

УДК 621.914.1

Разработка технологии высокоскоростной фрезерной обработки лопатки газотурбинного двигателя на основе расчета отжима и частот колебаний обрабатываемой заготовки методом конечного элемента

Болсуновский Сергей Анатольевич

sa_bolsunovskiy@mail.ru

Пупчин Владимир Андреевич

doctor.alchin@mail.ru

Качарова Ираклий Нугзарович

irakly.kacharava.83@inbox.ru

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена разработка технологии высокоскоростной фрезерной обработки лопатки ГТД с применением средств расчета методом конечного элемента отжима и собственных частот колебаний обрабатываемой заготовки. Был выполнен расчет жесткости заготовки и определен способ закрепления в рабочей зоне станка, обеспечивающий обработку пера лопатки в одном установе. Расчет собственных частот колебаний заготовки показал, что обработка возможна с применением прикрепляемых технологических гасителей вибрации. Места установки гасителей были определены на основе полученных в расчете форм колебаний обрабатываемой заготовки.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, чистовая обработка, деталь малой жесткости, лопатка ГТД, сила резания, расчет жесткости детали, метод конечного-элемента, собственные частоты колебаний заготовки, гаситель вибраций заготовки

Gas turbine engine blade highspeed milling technology development by means of workpiece deformation and eigen frequency calculation using finite element modelling

Bolsunovskiy Sergey Anatolievich

sa_bolsunovskiy@mail.ru

Pupchin Vladimir Andreevich

doctor.alchin@mail.ru

Irakly Kacharava Nugzarovich

irakly.kacharava.83@inbox.ru

Central Institute of Aerohydrodynamics named after prof. N.E. Zhukovsky, Moscow, Russia

Abstract. GTE blade highspeed milling technology development by means of workpiece deformation and Eigen frequency calculation using finite element modelling is considered. Stiffness calculation were performed and workpiece mounting method providing machining both sides of blade in one setup were determined. Workpiece Eigen frequency calculation results showed that machining is possible just in case of using technological vibration dampers attached. Dampers positions were determined based on workpiece Eigen forms obtained in FEM computation.

Keywords: high-speed milling, finishing, thin-walled part, GTE blade, cutting force, workpiece stiffness calculation, FEM method, workpiece Eigen frequency, workpiece vibration damper

Высокоскоростная фрезерная обработка лопаток ГТД, характеризующихся малыми относительными толщинами и высокой склонностью к вибрациям, представляет собой сложную инженерно-техническую задачу. При традиционном подходе к разработке технологии малая жесткость заготовки компенсируется введением дополнительных технологических приливов («платиков»), закрывающих зону обработки, препятствующих релаксации детали в результате поводок при удалении припуска, что, как следствие, требует введения дополнительных этапов термической обработки и переключивания заготовки для последовательной обработки одной и другой стороны пера. Все это может до нескольких раз увеличить трудоемкость изготовления детали за счет времени термической обработки, межоперационных затрат времени и вспомогательного времени на станке с ЧПУ для запуска обработки и базирования, а также существенно снизить точность обработки. Существенное сокращение трудоемкости изготовления заключается в сокращении числа технологических приливов, которое позволит открыть поверхность пера лопатки для обработки на пяти координатном фрезерном станке с ЧПУ в одном установе.

Для рассматриваемой лопатки с малой жесткостью была разработана технология фрезерования на пяти координатном оборудовании с фиксацией лопатки за «замок» и в концевом сечении посредством специального приспособления. Фиксация в приспособлении позволила обеспечить обработку пера лопатки в одном установе с обеих сторон пера, обеспечив снижение трудоемкости изготовления детали и высокую точность обработки.

Для оценки жесткостных и вибрационных характеристик обрабатываемой заготовки был выполнен расчет методом конечного элемента [1, 2] статической жесткости (определялся отжим на усилие 100 кгс) и собственных частот колебаний при креплении лопатки «за замок» и при двусторонней заделке «за замок» и по центру концевой сечении.

Показано, что жесткость при одностороннем закреплении составляет 4,3 кгс/мм и не позволяет обрабатывать лопатку при установке вертикально с креплением за замок. При двустороннем закреплении жесткость составила 68 кгс/мм, что позволяет выполнить обработку при настройке режима обработки и согласовании частоты вращения шпинделя с собственными частотами колебаний заготовки или при использовании прикрепляемых технологических гасителей вибраций [3].

Выбранные технологические параметры обработки: частота вращения шпинделя $n = 4000$ об/мин (скорость резания — 120 м/мин), припуск на чистовую обработку $a_p = 0,5$ мм, шаг между строчками $a_e = 0,2$ мм, подача на зуб $f_z = 0,05$ мм. Использовалась фреза со сферической режущей частью диаметром 10 мм, число режущих зубьев $Z = 4$.

Был выполнен расчет силы резания с использованием степенной модели с удельными касательной и нормальной силами резания [4]. Пиковое значение силы резания составило ~ 17 Н, среднее значение — 3,4 Н. Прогнозируемый отжим детали — 0,005 мм для участков пера с наименьшей жесткостью.



Рис. 1. Расчет жесткости заготовки при консольном закреплении

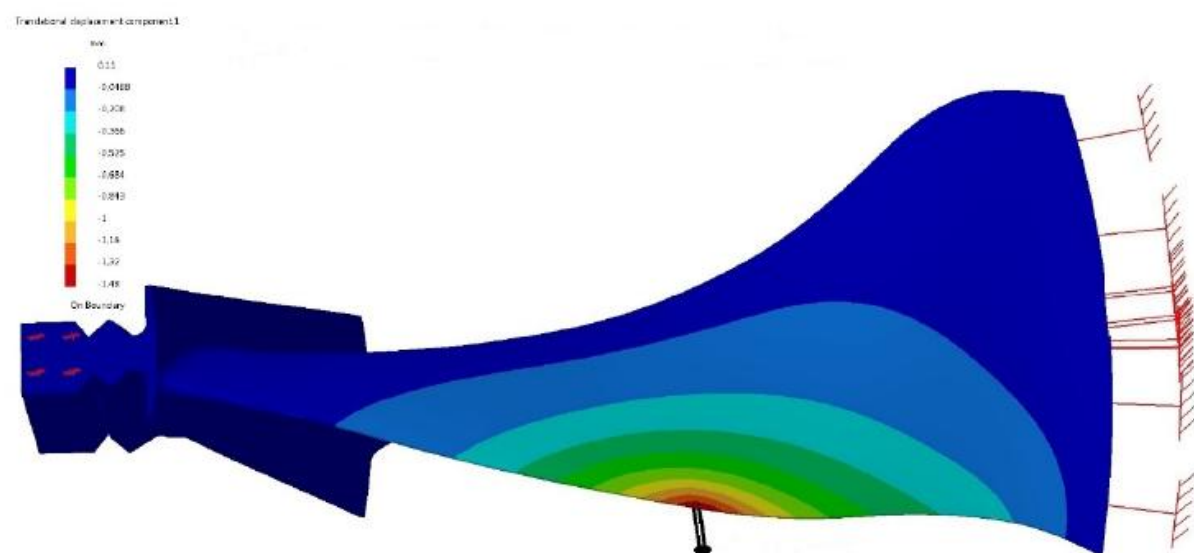


Рис. 2. Расчет жесткости заготовки при двустороннем закреплении

Был выполнен расчет собственных частот колебаний заготовки (таблица). Видно, что собственные частоты колебаний расположены близко, что затрудняет выбор частоты вращения шпинделя, исключающей резонансные и автоколебательные вибрации [5, 6].

Собственные частоты колебаний заготовки

Номер моды (формы колебаний)	Частота f_i , Гц
1	826,2
2	985,4
3	1105,3
4	1745,2
5	1987,8

Было принято решение о применении прикрепляемых технологических гасителей [3]. Использовались два гасителя с массой груза 300 г. Гасители устанавливались на обратной относительно фрезеруемой стороне пера с использованием вакуумной присоски (использовалась автономная вакуумная станция, размещаемая в зоне обработки). Места расположения гасителей выбирались таким образом, чтобы воздействовать на пучности собственных форм колебаний. Выполненные по результатам обработки контрольные измерения показали отклонения от номинального размера от $-0,03$ до $-0,05$ мм, а также отклонение по крутке в пределах $0,1$ мм, что соответствует заданному допуску. Высокой точности и качества обработки удалось достичь за счет обработки в одной установке всей детали без изменения «баз».

Список источников

- [1] Bolsunovskiy S., Vermel V., Gubanov G., Kacharava I., Kudryashov A. Thin-Walled Part Machining Process Parameters Optimization based on Finite-Element Modeling of Workpiece Vibrations. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 276–280.
- [2] Вермель В.Д., Болсуновский С.А., Губанов Г.А., Качарава И.Н., Бузулук В.И., Башкиров И.Г., Баранов А.А., Шиняев А.В. Устранение вибраций при фрезеровании консоли крыла аэродинамической модели путем коррекции частоты вращения фрезы. *Авиационная промышленность*, 2019, № 3–4, с. 47–51.
- [3] Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Пупчин В.А., Шиняев А.В. Технология фрезерной обработки лопаток аэродинамических моделей газотурбинных двигателей с применением технологического демпфирования вибраций заготовки. *Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2022). VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ.: матер.* Пермь, Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2022, с. 89–93.
- [4] Bolsunovskiy S., Vermel V., Gubanov G. Cutting Forces Calculation and Experimental Measurement for 5-axis Ball End Milling. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 235–239.
- [5] Лазарев Г.С. *Автоколебания при резании металлов*. Москва, Высшая школа, 1971, 243 с.
- [6] Жарков И.Г. *Вибрации при обработке лезвийным инструментом*. Москва, Машиностроение, 1986, 184 с.