

УДК: 65.012.122

**С.А. БОЛСУНОВСКИЙ, В.Д. ВЕРМЕЛЬ, В.Д. МИНАЕВ, Л.Л. ЧЕРНЫШЕВ,
А.В. ШИНЯЕВ**

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

ОПЫТ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК МОДЕЛИ БИРОТАТИВНОГО КОМПРЕССОРА

Представлен опыт изготовления аэродинамических моделей лопаток с малой относительной толщиной в технологии высокоскоростного фрезерования с высокой точностью ($\sim 0,05$ мм). На этапе черновой обработки высокая производительность (32,5 см³/мин) была достигнута за счет выбора технологических параметров исключающих вибрации инструмента. При чистовой обработке малая толщина является причиной возникновения вибраций, приводящих к необратимой порче детали. Чтобы этого избежать был применен ряд методов (акустический анализ вибраций, прочностной расчет), которые позволили определить собственные частоты детали и устранить вибрации за счет малой ($\sim 5\%$) коррекции частоты вращения шпинделя. Показано, что повышение производительности и качества фрезерной обработки особо сложных деталей требуют специального комплекса расчетно-экспериментальных исследований с использованием высокотехнологичного программно-технического оснащения.

Ключевые слова: *Высокоскоростная обработка, фрезерование, обработка тонкостенных деталей, обработка лопаток, вибрации обрабатываемой детали, вибрации инструмента.*

Введение

В условиях опытного производства основу технологического процесса для изготовления лопаток аэродинамической модели турбокомпрессора составляет обработка на станке с ЧПУ, обеспечиваемая современными возможностями САПР.

Важной особенностью изготовления лопаток является их малая толщина. Максимальные толщины детали изменяются от 5 мм до 1,2 мм. Они расположены по центральной линии поверхности и уменьшаются к носу и хвосту лопатки. Вследствие большой переменной стреловидности передней кромки, а также изменение хорды (ширины детали) по радиусу, закрепление её выполняется с заметным эксцентриситетом. В результате возможный прогиб детали при обработке усугубляется её закручиванием при приложении усилий резания в области кромок.

Другим фактором, определяющим обработку, становится её производительность. Для качественных заготовок из цилиндрического проката (кругляка) с размерами $\varnothing 160 \times 370$ (масса составляет 58,4 кг) при весе детали $\sim 0,7$ кг требуется съём чрезвычайно большого объёма материала. В целом на партию лопаток (78 единиц) вес снимаемого материала ~ 4500 кг. При изготовлении необходимо обеспечение точности воспроизведения на станке заданных в математической модели геометрических размеров $\sim 0,04$ мм, с ручной финишной полировкой.

1. Используемые программно-технические средства

Обработка выполнялась на 5-ти осевом обрабатывающем центре DMU 70 eVolution (производство DMG, Германия) фрезами производства ф. Sandvik Coromant, Швеция.

Исходная математическая модель лопатки была подготовлена в САПР Catia V5. Оценка деформации детали от усилий резания и собственных частот колебаний выполнялась в системе NASTRAN. Программирование высокоскоростной фрезерной обработки в 5-ти осевом режиме – в системе PowerMILL, а оценка точности изготовления на основе сопоставления материалов замеров с исходной математической моделью – в системе PoweINSPECT.

2. Высокоскоростная черновая фрезерная обработка

Производителем инструмента даны предварительные рекомендации по режиму обработки жаропрочной стали. Однако при практическом фрезеровании даже массивной заготовки производительность приходится ограничивать вследствие вибраций шпиндельной группы (шпиндель, патрон и оправка, инструмент). Вибрации вызывают ускоренное разрушение инструмента и повышенный износ станка. Производительность, полученная путём уменьшения глубины фрезерования для исключения вибраций, составила

3,3 см³/мин стали. Соответствующее время черновой обработки для одной лопатки составило 18 часов. Для всей партии (78 лопаток) ~ 1400 часов (при двухсменной работе – около 90 дней).

В результате технологического эксперимента с варьированием скорости резания (по вращению шпинделя) и глубины резания удалось получить сочетание параметров, сокративших интенсивность автоколебаний шпиндельной группы при повышении производительности черновой обработки до 32,5 см³/мин. Стойкость режущих пластин при этом оказалась достаточной для обработки всей лопатки.

3. Чистовая обработка

Необходимым условием разработки управляющих программ и оценки величины удаляемого припуска стало определение прогибов детали от усилий фрезерования. Закрепление лопатки, обеспечивающее чистовую обработку в одном установе, показано на рис. 1.

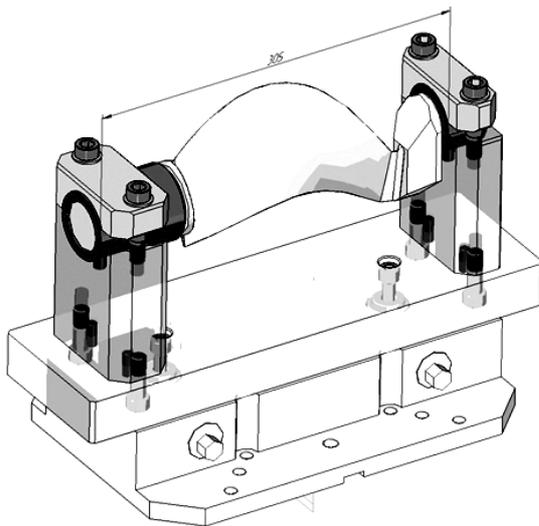


Рис. 1. Закрепление лопатки для пятиосевой обработки

Рассмотрение возможных стратегий движения инструмента (А-Г на рис. 2, а) показало, что минимальные усилия, нормальные к обрабатываемой поверхности со стороны инструмента, соответствуют режиму 4 – съёму припуска при опускании с постоянным углом между осью фрезы и нормалью к обрабатываемой поверхности.

В принципе оценка компонент силы резания для инструмента с заданной геометрией режущей части может быть выполнена по усреднённым величинам удельной силы резания. Однако более точно определить силы резания можно в эксперименте с их непосредственным измерением для ряда значений припуска с использованием тензометрированной динамометрической платформы (Kistler, Швейцария).

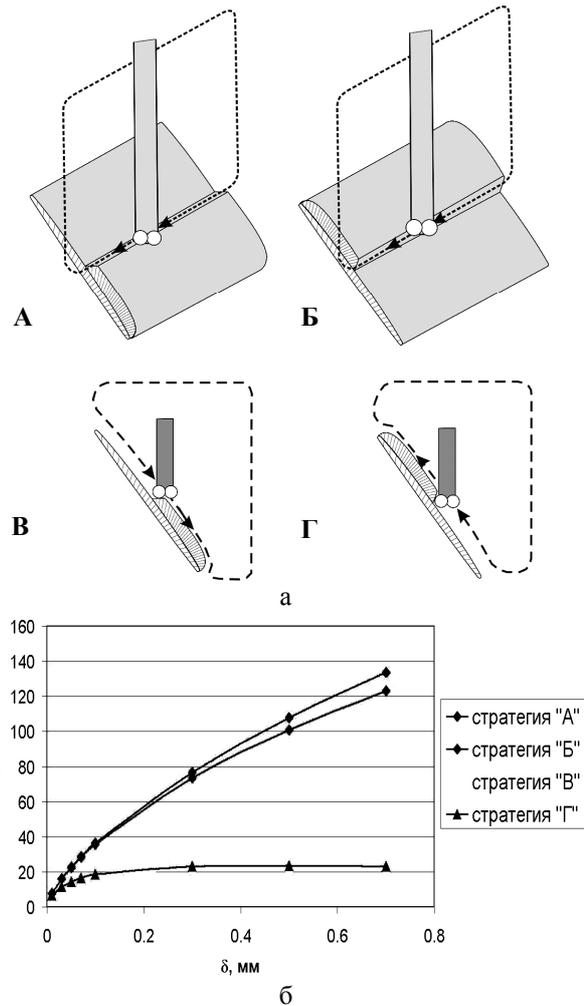


Рис. 2. а - возможные стратегии движения инструмента; б - величины отжимающей силы

Зависимости отжимающей силы, вызывающей прогиб детали, от величины припуска показаны на рис. 2, б. Для финишной обработки выбран припуск ~ 0,2 мм, при котором прогиб на сторону составил ~ 0,02 мм и, следовательно, суммарная погрешность двухсторонней обработки ~ 0,04 мм, что соответствует требованию.

4. Определение рациональных технологических параметров чистовой (финишной) обработки

Условием качества финишной фрезерной обработки является отсутствие вибраций при фрезеровании. Возникновение вибраций связано с периодическим воздействием фрезы на деталь, а также соотношением частоты воздействия фрезы на обрабатываемую поверхность и собственными частотами колебаний детали.

Результаты расчётов первых 4 тонов собственных колебаний лопатки, полученные в системе NASTRAN, показаны на рис. 3 и даны в табл. 1.

Таблица 1
Результаты расчётов

δ , мм	f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f_4 , Гц
1,6	896	1238	1627	2138
1,1	871	1144	1512	1933
0,6	848	1045	1398	1733
0,1	814	924	1262	1503

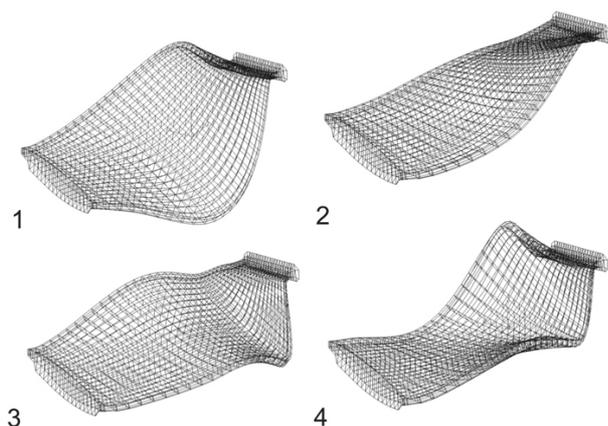


Рис. 3. Формы собственных колебаний лопадки

Эти данные позволили, наряду с рекомендациями фирмы Sandvik Coromant, выбрать начальные технологические параметры обработки ($n = 13200$ об/мин, $F = 3300$ мм/мин, $f_z = 0,125$ мм на зуб, $\delta = 0,3$ мм). Для практической корректировки параметров была проведена обработка экспериментальной лопадки с замером вибраций направленным микрофоном по уровню результирующего звукового давления (рис. 4, а). Видно, что возникают зоны с существенно высокими амплитудами, соответствующие обработке в окрестности кромок (передней и задней).

Спектральное разложение измеренного сигнала показано на графике на рис. 4, б. По полученным данным выполнена корректировка технологических параметров, немного увеличившая исходную скорость вращения шпинделя ($n = 13800$ об/мин, $F = 3450$ мм/мин, $f_z = 0,125$ мм на зуб, $\delta = 0,3$ мм). В результате корректировки амплитуды вибраций были сокращены в ~ 15 раз. Результирующая чистота обработки соответствует $\nabla 6\text{-}\nabla 7$ ($R_a = 2,5 - 1,25$ мк).

5. Контроль точности изготовления

Контроль точности выполнялся в два этапа. На первом выполнялся предварительный контроль непосредственно на технологической позиции до удаления технологических баз с использованием КИМ типа манипулятор Cimcore Infinite 2028 (рис. 5), управляемой оператором вручную. На втором – финишный контроль

после удаления технологических баз с креплением в имитаторе посадочного гнезда диска компрессора с использованием портальной КИМ LK-90 (производство LK, Великобритания) высокой точности.

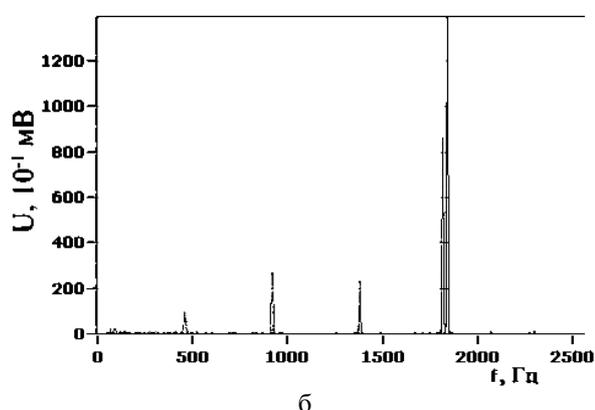
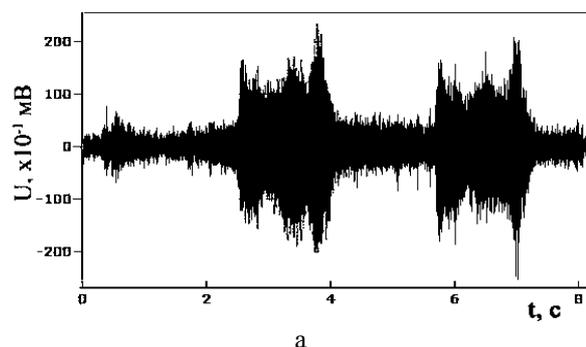


Рис. 4. Измерение спектра частот



Рис. 5. Технологический контроль

Заключение

В результате работы показано, что повышение производительности и качества фрезерной обработки особо сложных деталей требуют специального комплекса расчетно-экспериментальных исследований с использованием высокотехнологичного программно-технического оснащения.

Поступила в редакцию 1.06.2009

Рецензент: д-р техн. наук, доцент МФТИ, заместитель начальника отдела ЦАГИ Б.Х. Давидсон, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия.

ДОСВІД ОБРОБКИ ЛОПАТОК МОДЕЛІ БІРОТАТИВНОГО КОМПРЕСОРУ

С. А. Болсуновський, В.Д.Вермель, В.Д.Минаєв, Л.Л.Чернишов, А.В.Шиняєв

Представлено досвід виготовлення аеродинамічних моделей лопаток з малою відносною товщиною у технології високошвидкісного фрезерування з високою точністю (~0,05 мм). На етапі чорнової обробки висока продуктивність (32.5 см³/мин) була досягнута за рахунок вибору технологічних параметрів, які виключають вібрації інструменту. При чистовій обробці мала товщина може призвести до виникнення вібрацій, що призведуть до незворотного пошкодження деталі. Щоб цього уникнути, був застосований ряд методів (акустичний аналіз вібрацій, розрахунок міцності), які дозволили визначити частоту вібрацій та усунути їх за рахунок малої (~ 5 %) корекції частоти обертання шпинделя. Показано, що підвищення продуктивності та якості фрезерної обробки особливо складних деталей потребує спеціального комплексу розрахунково-експериментальних досліджень з використанням високотехнологічного програмно-технічного оснащення.

Ключові слова: високошвидкісна обробка; фрезерування; обробка тонкостінних деталей; обробка лопаток; вібрації деталі, що обробляється; вібрації інструменту.

EXPERIENCE OF MACHINING OF BIROTATORY COMPRESSOR BLADES MODEL

S.A. Bolsunovskiy, V.D. Vermel, V.D. Minaev, L.L. Chernishev, A.V. Shinyaev

Experience of machining of aerodynamic models of blades with small relative thickness in high speed milling technology with high accuracy (~0.05 mm) is presented. High productivity on rough machining stage (32.5 cm³/min) was achieved by choosing technological parameters that eliminates tool vibrations. Small thickness on finishing is the cause of arising of vibrations which lead to irreversible part damage. A series of methods were employed to avoid this (acoustic vibrations analysis, calculation of durability), which help to calculate natural part frequencies and eliminate vibrations by small correction (~5 %) of spindle rotation frequency. Productivity and quality of milling of complicated parts needs special complex of computational and experimental researches with the use of high-tech program-technical equipment.

Key words: high speed machining, milling, machining of thin-walled parts, machining of blades, vibrations of the part been machined, tool vibrations

Болсуновский Сергей Анатольевич – начальник сектора исследования технологий механической обработки на станках с ЧПУ научно-технологического центра, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия, e-mail: sa_bolsunovskiy@mail.ru.

Вермель Владимир Дмитриевич – д-р техн. наук, проф., МФТИ, начальник научно-технологического центра, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия, e-mail: vermel_v@mail.ru.

Минаев Виктор Дмитриевич – главный инженер научно-производственного комплекса, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия, e-mail: anna.kazimirova@zpk.ru.

Чернышев Леонид Леонидович – начальник научно-производственного комплекса, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия, e-mail: anna.kazimirova@zpk.ru.

Шиняев Андрей Владимирович – начальник технологического отдела опытного производства, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия, e-mail: anna.kazimirova@zpk.ru.