

УДК 67.02

С.А. БОЛСУНОВСКИЙ, В.Д. ВЕРМЕЛЬ, Г.А. ГУБАНОВ,
А.Е. ЛЕОНТЬЕВ, Р.О. СКАЗКИН

Центральный аэрогидродинамический институт (ФГУП ЦАГИ), Жуковский, Россия

РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КОМПРЕССОРНОЙ ЛОПАТКИ ГТД

Разработан метод расчётной оценки усилий, действующих на режущий инструмент и обрабатываемую заготовку в процессе фрезерной обработки. Рассмотрено его использование при 5-осевой чистовой обработке компрессорной лопатки. Проведено сопоставление результатов расчёта с данными, полученными в экспериментах с прямым измерением усилий резания. Исследовано влияние ориентации инструмента при 5-осевой обработке на усилия резания. В результате предложена наиболее рациональная (по амплитуде отжимающих усилий, действующих на заготовку) траектория обработки лопатки.

Ключевые слова: фрезерование, 5-осевая обработка, расчёт усилий резания, нежесткая заготовка, вибрации, отжим заготовки, точность обработки, компрессорная лопатка.

Введение

Резание металла сопровождается значительными усилиями взаимодействия между фрезой и обрабатываемой заготовкой. Возникающие усилия определяют ряд факторов – использование располагаемой мощности привода шпинделя, деформации инструмента и детали в процессе обработки, а также их вибрации, нагартовку и остаточные напряжения в поверхностном слое обработанной заготовки. В итоге, значения возникающих усилий влияют на качество и точность обработки изделия.

На практике при выборе параметров обработки, влияющих на усилия резания, технологи зачастую ориентируются на результаты пробных обработок, что связано со значительными временными затратами. В этой связи задача расчётной оценки сил, действующих на заготовку и фрезу в процессе резания, является актуальной и востребованной, в особенности в условиях опытного производства при изготовлении единичных изделий.

В данной статье рассмотрен метод расчётной оценки усилий, действующих на фрезу и заготовку в процессе 5-осевой фрезерной обработки, приведены экспериментальные данные, позволяющие оценить точность результатов расчёта.

Результаты исследований

Рассматривается 5-осевая обработка сферической фрезой с произвольной ориентацией фрезы относительно поверхности заготовки. В процессе обработки фреза совершает поступательное движение и вращается вокруг своей оси.

Мгновенное положение фрезы в базовой системе координат детали задаётся координатами кончика фрезы и значениями углов Эйлера, определяющих ориентацию её оси. Координаты кончика фрезы и значение угла осевого вращения фрезы изменяются по времени и вычисляются по заданным технологическим параметрам обработки (минутная подача, частота вращения фрезы). Углы, задающие ориентацию оси фрезы, являются параметрами (рис. 1).

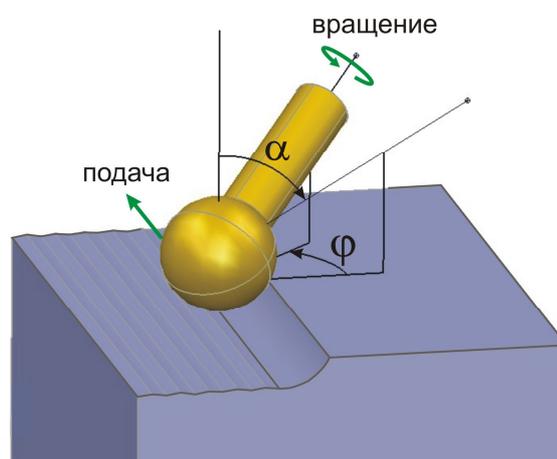


Рис. 1. Положение фрезы при 5-ти координатной обработке

В процессе резания на режущую кромку действуют касательные и нормальные силы (2). Принятый в литературе метод аппроксимации сил резания позволяет вычислять погонные (на единицу длины режущей кромки) усилия резания по известной толщине срезаемой стружки [1 – 5]:

$$F_t = k_{cl} a_p h^{1-m_c},$$

$$F_n = r_{nt} F_t,$$

где F_t - касательная сила, и

F_n - и нормальная сила, действующие на режущую кромку;

a_p - длина рассматриваемого участка режущей кромки;

k_{cl} , m_c и r_{nt} - коэффициенты, зависящие от обрабатываемого материала и материала инструмента.

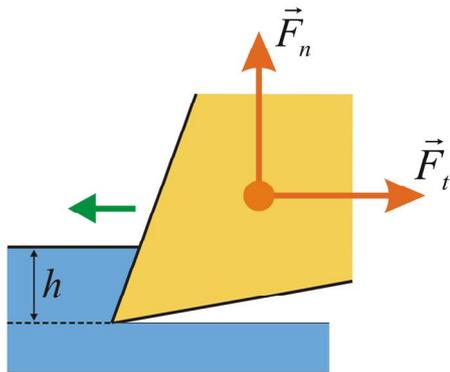


Рис. 2. Силы, действующие на режущую кромку

Значения коэффициентов k_{cl} , m_c и r_{nt} для используемых материала заготовки (сталь 30ХГСА) и материала режущих пластин – справочные данные [1].

При 5-осевой обработке фрезой с криволинейной режущей кромкой местная толщина срезаемой стружки различна по длине режущей кромки фрезы и изменяется во времени.

Для проведения расчётной оценки усилий с учётом различающихся значений местной толщины стружки представим режущую кромку фрезы в виде набора элементарных лезвий в расчетных точках. Для последовательно меняющихся по времени положений режущей кромки, используя преобразования координат (три поворота и параллельный перенос), вычислим координаты в базовой системе координат всех расчётных точек режущей кромки. Вычисляя расстояние между последовательными траекториями режущей кромки, находим местную толщину стружки. Далее находим значение местного вектора силы, действующей в рассматриваемой точке режущей кромки в рассматриваемый момент времени. По распределённым данным вычисляется суммарная сила, с которой фреза воздействует на заготовку.

На рис. 3 показан график изменения силы давления фрезы на заготовку по времени для разной ориентации фрезы. Интервал времени соответствует одному периоду воздействия зуба фрезы. Видно, что графики силы отличаются не только по ампли-

туде, но также по длительности и форме импульса, что, соответственно, влияет на вибрации детали в процессе обработки. Хотя разница амплитуды и длительности импульсов усилий при разных вариантах движения фрезы для рассмотренных условий невелика, тем не менее, импульсы отличаются по форме – темпу нарастанию силы, что может привести к более интенсивным вибрациям и, следовательно, стать основанием для выбора траектории обработки.

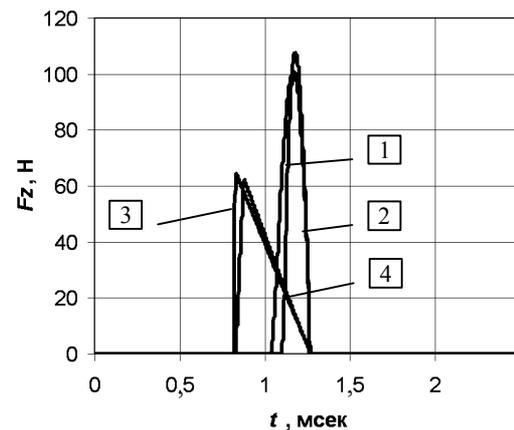


Рис. 3. Изменения силы давления фрезы на заготовку по времени: 1, 2 – вдоль размаха; 3, 4 – вдоль профиля

На рис. 4 приведён график максимального значения силы, с которой фреза давит на поверхность заготовки при фрезеровании лопатки ГТД в зависимости от припуска на обработку.

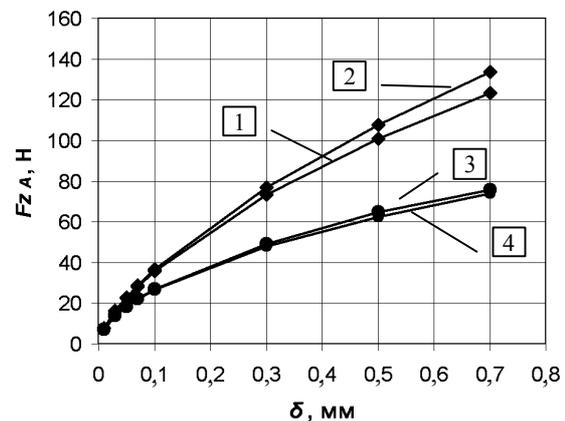


Рис. 4. Сила, действующая на лопатку со стороны фрезы от величины припуска на обработку: 1, 2 – вдоль размаха; 3, 4 – вдоль профиля

График построен для следующих значений технологических параметров обработки: смещение между строчками 0,15 мм, подача на зуб 0,13 мм, обработка проводится монолитной твердосплавной фрезой фирмы Sandvik Coromant, фреза двузубая со сферической режущей частью, диаметр фрезы 8 мм, частота вращения фрезы 12000 об/мин, материал

заготовки – сталь 30ХГСА. Из графика видно, что ориентация фрезы влияет на значения сил, и может использоваться, например, для снижения прогиба заготовки без потери производительности обработки. Кроме того, видно, что максимальные силы существенно зависят от фрезерования вдоль размаха или вдоль профиля, в соответствии с характерной ориентацией оси фрезы. По результатам расчёта была выбрана стратегия обработки «сверху вниз вдоль профиля» (рис 5, б, случай 3), соответствующая наименьшей амплитуде отжимающих усилий, действующих на лопатку при обработке.

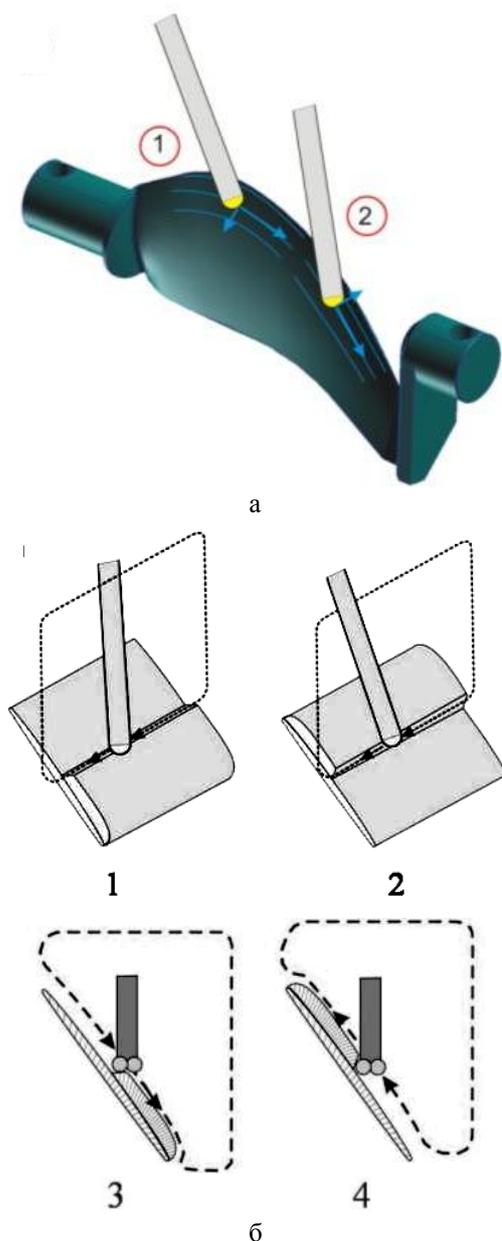


Рис. 5. Варианты движения фрезы при обработке лопатки ГТД: а – схема закрепления; б – траектории

Экспериментальное измерение усилий резания проводилось с помощью специально предназначенной для этого динамометрической платформы.

Результаты расчёта и эксперимента приведены на рис. 6. Значения параметров k_{cl} , m_c и r_{nt} первоначально были взяты из справочных данных [1], а затем уточнены по результатам эксперимента.

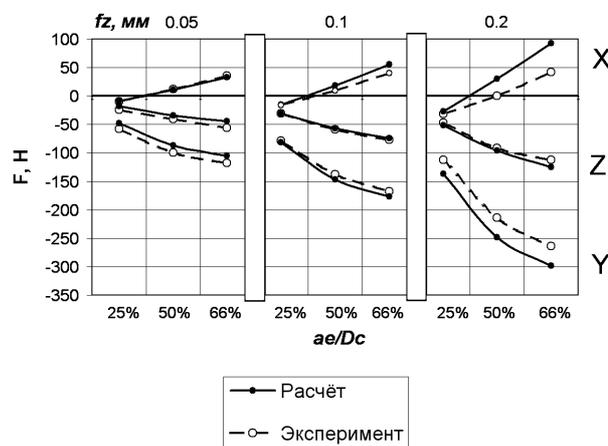


Рис 6. Значения усилий, действующих на заготовку в процессе фрезерной обработки, полученные в расчёте и эксперименте.

f_z – подача на зуб, a_e/D_c – относительная ширина фрезерования

Вывод

Среднеквадратическое относительное отклонение расчётных данных от экспериментальных в широком диапазоне варьирования параметров не превышает 10-12%, что достаточно для практического применения разработанного метода при выборе технологических параметров обработки деталей авиационных конструкций, например, компрессорных лопаток ГТД.

Литература

1. Каталог металлорежущего инструмента фирмы Sandvik Coromant Украина [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sandvik.com.ua>. – 12.03.2012 г.
2. Multiple chatter frequencies in milling processes [Text]/ T. Insperger, G. Stepan, P.V. Bayly, B.P. Mann // *Journal of sound and vibration*. – 2002. – Vol. 250, Is. 5. – P. 773 – 973.
3. Altintas Y. Modeling approaches and software for predicting the performance of milling operations at MAL UBS / Y. Altintas // *Machining Science and Technology*. – 2000. – Vol. 4, Is. 3. – С. 445 – 478.

4. *Katsuyoshi Karino Trouble Shooting for cutting. Prediction Information to Improve Production Techniques [Text]/ Katsuyoshi Karino // Mitsubishi Materials Corporation Tsukuba Plant, Kogyo Chosokai Publishing Co. Ltd. – 1998. – P. 233 – 242.*

5. *Опыт изготовления лопаток модели турбокомпрессора с повышенной точностью в условиях опытного производства [Текст]/ С.А. Болсуновский, В.Д. Вермель, Г.А. Губанов, А.В. Кажан // САПР и графика. – 2009. – № 3 (149). – С. 80 – 82.*

Поступила в редакцию 30.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Н. Лаврухин, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия.

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ВИМІР ЗУСИЛЬ РІЗАННЯ ДЛЯ ЧІСТОВОЇ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ КОМПРЕСОРНОЇ ЛОПАТКИ ГТД

С.А. Болсуновський, В.Д. Вермель, Г.А. Губанов, О.Є. Леонт'єв, Р.О. Сказкін

Розроблений метод розрахункової оцінки зусиль, діючих на різальний інструмент та заготовку в процесі фрезерної обробки. Розглянуто його використання у випадку 5-осевої чистової обробки компресорної лопатки. Проведене співставлення результатів розрахунку з даними, що були отримані в експериментах з прямим виміром зусиль різання. Проведене дослідження впливу орієнтації інструменту у випадку 5-осевої обробки на зусилля різання. У результаті запропонована найбільш раціональна (за амплітудою зусиль, діючих на заготовку) траєкторія обробки лопатки.

Ключові слова: фрезкування, 5-осева обробка, розрахунок зусиль різання, гнучка заготовка, вібрація, відтискування заготовки, точність обробки, компресорна лопатка.

CUTTING FORCES THEORETICAL CALCULATION AND EXPERIMENTAL MEASUREMENT FOR HIGH-SPEED FINISH MILLING OF A GAS-TURBINE ENGINE COMPRESSOR BLADE

S.A. Bolsunovskiy, V.D. Vermel, G.A. Gubanov, A.E. Leontiev, R.O. Skazkin

A method for theoretical calculation of cutting forces, acting on cutting tool and workpiece in milling is developed. Its utilization for 5-axis finishing of compressor blade is considered. A comparison between the results of theoretical calculations and the data from experiments with direct cutting force measurement is carried out. The influence of cutting tool orientation in 5-axis milling on cutting forces is examined. As a result, the most rational (in sense of pushing force amplitude, acting on workpiece during machining) toolpath for blade milling is proposed.

Key words: milling, 5-axis machining, cutting force calculation, flexible workpiece, vibrations, surface location accuracy, compressor blade.

Болсуновский Сергей Анатольевич – начальник сектора, Центральный Аэрогидродинамический Институт (ФГУП ЦАГИ), Жуковский, Россия, e-mail: sa_bolsunovskiy@mail.ru.

Вермель Владимир Дмитриевич – д-р техн. наук, проф., начальник НТЦ НПК, Центральный Аэрогидродинамический Институт (ФГУП ЦАГИ), Жуковский, Россия, e-mail: anna.kazimirova@zppk.ru.

Губанов Глеб Анатольевич – младший научный сотрудник, Центральный Аэрогидродинамический Институт (ФГУП ЦАГИ), Жуковский, Россия, e-mail: glebgubanov@mail.ru.

Леонт'ев Александр Евгеньевич – младший научный сотрудник, Центральный Аэрогидродинамический Институт (ФГУП ЦАГИ), Жуковский, Россия, e-mail: simplicate@gmail.com.

Сказкин Роман Олегович – инженер, Центральный Аэрогидродинамический Институт (ФГУП ЦАГИ), Жуковский, Россия.