УДК: 67.02

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ В СОСТАВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ САМОЛЕТОВ

© 2012 С.А. Болсуновский, В.Д. Вермель, Г.А. Губанов, И.Н. Качарава, А.Е. Леонтьев

ФГУП "ЦАГИ", Московская область, г. Жуковский

Поступила в редакцию 05.10.2012

Рассматривается возможность расчетно-экспериментальной оценки рациональных технологических параметров высокопроизводительной фрезерной обработки на обрабатывающих центрах с ЧПУ нового поколения. Показано, что увеличение производительности высокоскоростной фрезерной обработки ограничивается возникающими вибрациями системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь). Рациональные величины технологических параметров, исключающие вибрации при одновременном повышении производительности, определяются по результатам измерения вибрационных характеристик и расчетной оценки сил резания для используемой фрезы и обрабатываемого материала. Ключевые слова: автоматизация технологической подготовки производства, аэродинамические модели, высокопроизводительная фрезерная обработка, технологические параметры обработки, производительность обработки, система "станок – приспособление – инструмент – деталь", вибрации в процессе фрезерования.

введение

В настоящее время автоматизация охватывает все этапы создания аэродинамических моделей ЦАГИ, включающие подготовку технического задания, разработку математической модели аэродинамической компоновки, конструирование, технологическую подготовку производства и изготовление, контрольные измерении и аттестацию (рис. 1).

Центральное место при разработке аэродинамической модели занимает формирование, по совокупности исходных данных, ее полного электронного макета. Размещаемый в базе данных он обеспечивает информационное единство всех выполняемых работ. Применительно к изготовлению модели – выпуск рабочей конструкторской документации, контрольные расчеты на прочность, технологическую подготовку производства с разработкой программ обработки деталей на оборудовании с ЧПУ, инструментальный контроль изделия с использованием координатно-измерительных машин (КИМ). Использование единого математического описания для всех деталей позволяет практически полностью отказаться от универсального станочного оборудования в пользу современного оборудования с ЧПУ.

Внедренные программные средства автоматизации конструирования и технологической подготовки производства являются необходимым условием для освоения современного оборудования с ЧПУ и разработки эффективных процессов высокопроизводительной фрезерной обработки деталей аэродинамических моделей самолетов.

Наибольшая степень автоматизации характеризует процесс разработки управляющих программ для станков с ЧПУ и их внестаночную верификацию, использующих в качестве основы математическую модель детали и построенные на ее основе технологические модели с конструктивными элементами для закрепления заготовки на столе станка. В то же время выбор технологических параметров высокопроизводительной фрезерной обработки (глубина фрезерования, ширина фрезерования, подача, частота вращения шпинделя) базируется на типовых рекомендациях из каталогов производителей режущего инструмента и, как правило, является предварительным, с последующей коррекцией технологом или оператором в цеху. Коррекция параметров, выполняемая в сторону уменьшения производительности, связана, в большинстве случаев, с нестабильным резанием вследствие возникновения вибраций системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь). Их предотвращение требует разработки соответствующего методического и инструментального обеспечения.

В ЦАГИ было предложено использовать расчетно-экспериментальный подход к определению рациональных технологически параметров высокоскоростной фрезерной обработки, позволяющий на основе измерения вибрационных характе-

Болсуновский Сергей Анатольевич, начальник сектора. E-mail: sa_bolsunovskiy@mail.ru

Вермель Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, начальник научно-технического центра. E-mail: vermel@tsagi.ru

Губанов Глеб Анатольевич, младший научный сотрудник. E-mail: glebgubanov@mail.ru

Качарава Йраклий Нугзарович, начальник сектора.

E-mail: iraklykacharava@rambler.ru

Леонтьев Александр Евгеньевич, младший научный сотрудник. E-mail: simplicate@gmail.com



Рис. 1. Автоматизация этапов производства аэродинамических моделей

ристик шпиндельной группы (станок – зажимное приспособление – инструмент) рассчитывать величины технологических параметров фрезерной обработки, при которых обеспечивается исключение вибраций и существенное повышение производительности черновой фрезерной обработки.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Высокоскоростная высокопроизводительная фрезерная обработка, по сравнению с традиционной, характеризуется повышенной скоростью резания, которая достигается за счет использования твердосплавного инструмента, а также располагаемыми для нового оборудования высокими частотой вращения шпинделя и подачей инструмента. Повышение частоты вращения шпинделя (до 10000-20000 об/мин и более) приводит к возникновению новых негативных явлений при обработке, связанных с динамической нестабильностью процесса резания – вибрациями системы СПИД (станок – приспособление – инструмент деталь). При обработке массивных заготовок (черновая обработка) вибрации обусловлены колебаниями шпиндельной группы станка, включающей собственно шпиндель и инструмент с системой закрепления. Такие вибрации имеют небольшую амплитуду (порядка толщины стружки) и приводят к появлению "дробления" на обработанной поверхности. Они снижают качество обработки и ведут к преждевременному разрушению инструмента и подшипников шпинделя [1] При возникновении вибраций оператор станка или технолог уменьшают глубину/ширину фрезерования или подачу инструмента, что приводит к снижению производительности обработки и не позволяет в полной мере реализовать располагаемую мощность привода шпинделя. Именно данные вибрации будут рассматриваться далее.

Производительность фрезерования (Q, см³/ мин) непосредственно зависит от основных технологических параметров фрезерования:

$$Q = a_p \cdot a_e \cdot f_z \cdot z \cdot n/1000, \qquad (1)$$

где *а*_{*p*} глубина фрезерования;

- *a_e* ширина фрезерования;
- f_z подача на зуб;
- *z* число зубьев фрезы;
- *n* частота вращения шпинделя.

Повышение значений первых трех из них $(a_e; a_p; f_z)$ приводит к росту усилий во взаимодействии "фреза – заготовка". Повышение частоты вращения шпинделя (соответствующее росту скорости резания) определяет частотный диапазон воздействия силы резания на компоненты системы СПИД.

2. ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Зафиксируем ширину фрезерования и подачу на зуб. Тогда усилия резания будут определяться преимущественно глубиной фрезерования. В этом случае, в осях технологических параметров "глубина фрезерования частота вращения шпинделя" может быть построена граница [2, 3], разделяющая зону стабильного безвибрационного фрезерования и зону, в которой происходят вибрации инструмента. Форма кривой, дающая представление о влиянии частоты вращения шпинделя на стабильность процесса обработки, показана на рис. 2. Область под кривой соответствует стабильному фрезерованию (без вибраций), над кривой – интенсивным вибрациям. Видно, что существуют области (или зоны) стабильного фрезерования (зоны стабильности) по частоте вращения шпинделя, для которых глубина фрезерования может быть существенно увеличена (отмечены номерами ј=1,2,3,...). Ширина зоны стабильности с увеличением номера уменьшается, при этом для повышения глубины фрезерования фактически могут быть использованы 2-3 зоны. Зоны с большими номерами перекрываются и не могут быть выделены. Положение зон стабильности (по оси абсцисс) определяется значением частоты собственных колебаний системы СПИД и, как правило, лежит в диапазоне ~ 10000-20000 об/мин для зоны ј=1, ~ 5000-10000 об/мин для зоны ј=2, ~ 3000-5000 об/мин для зоны ј=3. При меньших значениях частоты вращения шпинделя максимальная глубина безвибрационного фрезерования постоянна. Ее значение *а*_{*р*,*мин*} (см. рисунок 2) определяется динамической жесткостью шпиндельной группы. Видно, что если глубина фрезерования меньше *а*_{*р*, *мин*}, вибрации не возникают ни при каких значениях частоты вращения шпинделя. По этой причине при чистовой и получистовой обработке, которые характеризуются малыми припусками и, соответственно, малыми величинами глубины фрезерования a_p и сил резания, вибрации инструмента практически не проявляются. В этом случае, однако, могут возникать вибрации обрабатываемой детали [4].

Если в процессе фрезерования, при некоторых технологически параметрах обработки, возникают вибрации инструмента, то, как показывает анализ границы, имеется 2 основных способа их исключения. Первый, традиционный – за счет уменьшения глубины фрезерования, позволяющей опуститься ниже границы (см. рис. 2). При этом производительность обработки уменьшается. Второй – за счет изменения частоты вращения шпинделя переместиться в область локального максимума для границы. В результате возможно сохранение или даже заметное увеличение производительности обработки по сравнению с исходной (см. рис. 2).

Граница стабильности определяется собственными частотными характеристиками шпиндельной группы станка с используемым зажимным приспособлением и инструментом для данного обрабатываемого материала. Изменение одной из компонентов сборки: шпинделя станка, зажимного устройства или инструмента (включая изменение вылета) приводит к изменению вибрационных характеристик шпиндельной группы в целом и реконфигурации границы. Форма границы зависит также от усилий резания, возникающих при обработке характеристик обрабатываемого материала и фрезы, ширины фрезерования, величины подачи на зуб.

3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В ЦАГИ для измерения вибрационных характеристик шпиндельной группы было предложено использовать систему, аналогичную применяемой для измерения частотных характеристик авиационных конструкций. В ней для регистрации вибраций применяются акселерометры, закрепляемые в различных точках исследуемой конструкции, а колебания возбуждаются при помощи инструментальных пьезомолоточков, позволяющих измерять усилие воздействия и нормировать амплитуды колебаний. Использование такой системы позволяет описать поведение шпиндельной группы передаточной функцией $X / F(\omega)$.

При измерении шпиндельной группы с инструментом, акселерометр закрепляется в зоне рас-



Рис. 2. Граница стабильности в плоскости технологических параметров обработки

положения режущих пластин на конце инструмента, а возбуждение колебаний выполняется ударом молоточка по инструменту с противоположной стороны (рис. За). Пример получаемой в процессе измерения передаточной функции показан на рис. Зб. Она может быть представлена в виде аппроксимирующей совокупности гармонических составляющих гармонических осцилляторов, что позволяет записать систему уравнений колебательного движения шпиндельной группы. Возникновение вибраций характеризуется областями, в которых нарушается устойчивость решения системы при воздействии на инструмент сил резания. Их величины и изменение в циклическом процессе воздействия зубьев режущей части фрезы на заготовку, определяются расчетно-экспериментальным путем. Соответствующие методики, программные средства и технологическое оборудование имеются. В результате строится граница, определяющая

область стабильного фрезерования по технологическим параметрам обработки.

Сформированный программно-инструментальный комплекс включает необходимое оборудование и средства сбора, оцифровки и обработки данных измерении; обеспечивает расчет параметров обработки для получения ее максимальной производительности, а также хранение информации и ее представление в табличном и графическом виде.

4. ОЦЕНКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РЕАЛЬНОЙ ШПИНДЕЛЬНОЙ ГРУППЫ

Рассмотрим применение комплекса для выбора рациональных параметров обработки в реальном технологическом процессе высокоскоростной черновой фрезерной обработки алюминиевого сплава типа AMr6 применительно к обрабатыва-



Рис. 3. Процесс измерения (а) и измеренная передаточная функция (б)

ющему центру с ЧПУ, оборудованному высокооборотным шпинделем с максимальной частотой вращения 24 000 об/мин и мощностью 40 кВт.

Для обработки используется фреза с двумя режущими зубьями диаметром D=32 мм со сменными твердосплавными пластинами. Технологом для данной фрезы и обрабатываемого материала по рекомендациям производителя инструмента был определен режим обработки (таблица 1), обеспечивающий производительность Q = 360 см³/мин. На практике в производстве в процессе обработки проявились вибрации, что потребовало снижения режима обработки технологом и соответствующей модификации управляющей программы: уменьшения в два раза подачи инструмента и на 40% ширины фрезерования, что привело к трехкратному снижению производительности обработки до Q = 112 см³/мин, а также дополнительным согласованиям между разработчиками управляющих программ и цеховыми технологами, что снижает эффективность автоматизации, особенно если в производстве организованы отслеживание версий и архив управляющих программ.

Было проведено измерение передаточной функции и построена граница безвибрационного фрезерования для технологических параметров из табл. 1 (строка 1, табл. 1, рис. 4).

Видно, что значения параметров в первой строке таблицы лежат в зоне вибрационного фрезерования (т. 1 на графике). Их изменение (строка 2, табл. 1) обеспечило фрезерование без вибраций (т. 2 на графике). В т. 2 уменьшение ширины фрезерования (см. таблицу 1) переведено к эквивалентное изменение глубины фрезерования. При этом производительность сократилась более, чем в 3 раза. Основываясь на рассчитанной границе безвибрационного фрезерования (рис. 4) рациональным для повышения производительности является увеличение частоты вращения шпинделя до 20 000-22 000 об/мин, соответствующих зоне стабильности (j=1), с последующим увеличением глубины фрезерования (т. 3 на графике).

В табл. 2 приведены технологические параметры, соответствующие последовательному повышению режима обработки, а также повышение производительности и использования мощности привода шпинделя. При увеличении частоты вращения шпинделя и глубины фрезерования ширина фрезерования и подача на зуб в соответствии с исходными технологическими рекомендациями (см. табл. 1) не изменяются: $a_e = 20$ мм, $f_z = 0,2$ мм. В таблице 2 цветом выделены позиции, в которых выполняется последовательное увеличение технологических параметров обработки.

Из данных табл. 2 видно, что переход в зону с максимумом возможно глубины фрезерования на границе безвибрационной обработки (т. 3, рис. 4) позволяет увеличить как частоту вращения фрезы и, соответственно, минутную подачу, так и глубину фрезерования. При этом возрастает уровень использования располагаемой мощности шпинделя и, соответственно, производительность фрезерования.

Режим	глубина фрезерования, мм	ширина фрезерования, мм	подача на зуб, мм	и Частота вращения шпинделя, об/мин	Производитель ность, см ³ /мин
Номинальный	3	20	0,2	15000	360
Реально в производстве	3	12,5	0,1	15000	112

Таблица 1. Режимы, применяемые для обработки алюминиевых сплавов рассматриваемой фрезой

№ п/ п	Изменение режима обработки	глубина/ ширина фрезеро- вания, ММ	подача, мм/мин	Частота вращения шпинделя, об/мин	Произво- дительность, см ³ /мин	Используемая мощность шпинделя, кВт
1	Исходный в производстве, т.1	3/12,5	3000	15 000	112	3,7
2	Увеличение частоты вращения шпинделя, т.2	3/20	9000	22 000	540	10,5
4	Увеличение глубины фрезерования, т.3	7/20	9000	22 000	1260	24,5

Таблица 2. Последовательное изменение режима обработки для устранения вибраций и увеличения производительности



Рис. 4. Изменение режима обработки для устранения вибраций

5. ВЫВОДЫ

Выполненный анализ показывает, что при формальной эксплуатации современного оборудования, режущего инструмента и средств программирования не гарантируется достижение, за счет повышения скорости резания, высокой производительности, ограничиваемой, в значительной степени, возникающими вибрациями системы СПИД. При возникновении вибраций в процессе обработки, специальный анализ вибрационных характеристик шпиндельной группы станка с инструментом позволяет провести обоснованную корректировку параметров обработки для устранения вибраций и повышения производительности. Представляется рациональным использование предложенного расчетно-экспериментального подхода к выбору рациональных технологических параметров, что позволит в условиях автоматизации технологической подготовки производства сформировать базу данных инструментальных сборок для станков в производстве с рассчитанными вибрационными характеристиками. На их основе при формировании управляющей программы могут быть определены рациональные значения технологических параметров обработки при существенном снижении затрат и времени на технологические эксперименты на станочном оборудовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Высшая школа, 1984.
- Болсуновский С.А. Вермель В.Д. Методика и техническое оснащение оценки вибрационных характеристик системы "станок приспособление инструмент деталь" в процессе скоростного фрезерования // Научно-технический отчет ЦАГИ 2008 год: Сб. статей. Жуковский: Центральный Аэрогидродинамический Институт, 2009.
- 3. *Altintas Y*. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. New York: Cambridge University Press, 2000.
- Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Гришин В.И., Губанов Г.А., Качарава И.Н. Расчетное и графическое обеспечение уточнения параметров высокоскоростного фрезерования крыльев аэродинамической модели для предотвращения резонансных вибраций // САПР и Графика. 2011. №10.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ESTIMATION OF RATIONAL TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR HIGH-PERFORMANCE MILLING AS A PART OF AUTOMATED SYSTEM FOR AERODYNAMIC AIRCRAFT MODELS PRODUCTION TOOLING

© 2012 S.A. Bolsunovsky, V.D. Vermel, G.A. Gubanov, I.N. Kacharava, A.E. Leontiev

Central Aerohydrodynamic Institute "TsAGI", Moscow Region, Zhukovsky

A probability of theoretical and experimental estimation of rational technological parameters for high-performance milling with modern CNC machine tool is considered. It is shown, that milling productivity improvement is restricted by arising vibrations of machine-fixture-tool-workpiece system. Rational values of technological parameters, which provide vibration avoidance along with productivity increase, are determined based on vibration characteristics measurement and cutting forces calculation estimation for tool and workpiece material in hand. Key words: automation of production tooling, aerodynamic models, high-performance milling, machining technological parameters, machining productivity, machine-fixture-tool-workpiece system, vibrations during milling.

Sergey Bolsunovsky, Head of Sector. E-mail: sa_bolsunovskiy@mail.ru Vladimir Vermel, Doctor of Technics, Professor, Head of Scientific and Technical Centre. E-mail: vermel@tsagi.ru Gleb Gubanov, Junior Researcher. E-mail: glebgubanov@mail.ru Irakly Kacharava, Head of Sector. E-mail: iraklykacharava@ramblerru Aleksandr Leontiev, Junior Researcher. E-mail: simplicate@gmail.com