

**Рисунок 2 – График зависимости нагрузки по времени**

Проведем анализ полученных результатов. При расчете сил, необходимых для деформации заготовки аналитическим методом и методом конечных элементов, разница результатов не превысила 10%. Данные различия можно объяснить рядом допущений, используемых для упрощения расчетов и в том, и в другом методе.

#### **Литература**

1. Лукьянов В.П. Параметры холодной гибки листовых заготовок, прутков и труб. / В.П. Лукьянов. – М.: Машиностроение –1,2005
2. Quantor Form «Руководство пользователя Qform 3D v 5.0» - М.:ООО «КванторФорм», 2009

### ***К вопросу об обеспечении качества обработки сложнопрофильных деталей на станках с изменяющимися элементами<sup>1</sup>***

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., Абрамова А.Р., Кузьминский Д.Л., Мокринская А.Ю.  
МГТУ «МАМИ»

8(495)223-05-23, [assi@mami.ru](mailto:assi@mami.ru)

*Аннотация.* В статье выделены проблемы, возникающие при обработке сложнопрофильных деталей с криволинейным профилем. Рассмотрены все этапы формирования геометрического образа станка с изменяющимися элементами. Сформирован комплекс 3D-геометрических моделей фрезерного обрабатывающего центра Finc Tech SMV-450-N3, позволяющий оперативно редактировать компоненты без изменения общей структуры модели.

*Ключевые слова:* метод конечных элементов, сложнопрофильная деталь, станок с изменяющимися элементами

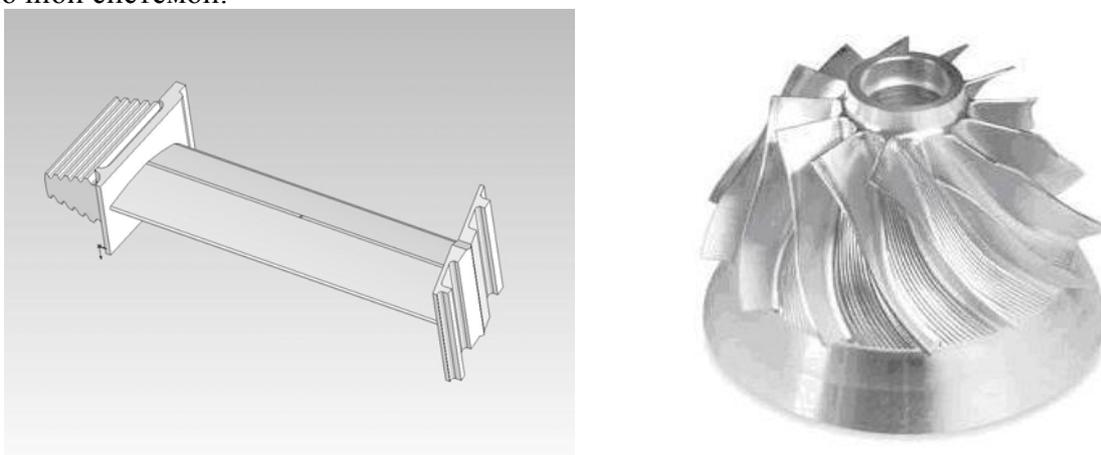
Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. по теме «Определение пространственной точности металлорежущих станков и разработка методов её обеспечения» (Госконтракт 16.740.11.0439).

Растущие требования к повышению производительности, точности и качеству обработки сложнопрофильных деталей приводят к необходимости автоматизации процессов их изготовления. В условиях высокой конкуренции требуется своевременная и быстрая подготовка производства к выпуску нового изделия, а также переоснащение производства современным, высокопроизводительным оборудованием. Применение систем с изменяющимися эле-

ментами позволяет сократить сроки переналадки оборудования на выпуск новой номенклатуры изделий. Детали сложной формы могут быть обработаны на станках с многокоординатной кинематикой. Создание математических моделей, методов анализа и синтеза решений, связанных с оценкой пространственной точности многокоординатных станочных систем на стадии проектирования, позволяет находить оптимальные решения. При этом возникает научная задача разработки комплексной точностной модели многокоординатного станка, охватывающей широкий спектр вопросов при обработке сложнопрофильных деталей, что является актуальным.

На точность обработки деталей на станках с ЧПУ влияет комплекс погрешностей на всем пути преобразования информации в системе чертеж — готовая деталь. Часть погрешностей приходится на программноситель при разработке и записи программы управления. Основная же доля погрешностей возникает при непосредственной обработке детали, в выполнении которой участвует вся технологическая система: станок с ЧПУ, режущий инструмент, приспособление и заготовка. От всех этих элементов технологической системы в комплексе зависит получение заданного качества обработки деталей, а также производительность и себестоимость их обработки. На технологическую систему в процессе обработки действуют различные внутренние и внешние факторы, которые вызывают отклонение хода технологического процесса обработки от заданного, а следовательно, ухудшают его выходные показатели. В результате действия внутренних и внешних факторов возникают упругие деформации элементов технологической системы, их износ, вибрации, тепловые деформации, что ухудшает, в первую очередь, качество обработки, а также влияет на производительность и себестоимость обработки.

Многокоординатная обработка является перспективным методом изготовления деталей сложной формы. На рисунке 1 показаны примеры деталей с криволинейными поверхностями. Описание сложнопрофильных поверхностей таких деталей производится сплайн-методами, что позволяет применять CAD/CAM-моделирование для адекватного управления станочной системой.



**Рисунок 1 – Примеры деталей с криволинейными поверхностями**

Такие детали могут быть обработаны на станках с многокоординатной кинематикой и элементами, расширяющими их формообразующие возможности за счет изменения угловой ориентации взаимодействующих компонентов — инструмента и заготовки. Для этого многокоординатный станок оснащается специализированными изменяемыми элементами — высокотехнологичной оснасткой в виде глобусных столов или поворотных инструментальных головок. Для управления формообразованием и точностью многокоординатных станков требуется разработка методов аналитического описания криволинейных поверхностей сложных деталей. Для автоматизации программирования обработки сложных деталей на станках с ЧПУ необходимо развитие и совершенствование метода описания геометрической информа-

ции на основе аналитических сплайн-функций [1].

Такие детали могут быть обработаны на станках с многокоординатной кинематикой и элементами, расширяющими их формообразующие возможности за счет изменения угловой ориентации взаимодействующих компонентов – инструмента и заготовки. Для этого многокоординатный станок оснащается специализированными изменяемыми элементами – высокотехнологичной оснасткой в виде глобусных столов или поворотных инструментальных головок. Для управления формообразованием и точностью многокоординатных станков требуется разработка методов аналитического описания криволинейных поверхностей сложных деталей. Для автоматизации программирования обработки сложных деталей на станках с ЧПУ необходимо развитие и совершенствование метода описания геометрической информации на основе аналитических сплайн-функций.

Представленные детали обрабатываются при помощи контурного фрезерования, которое является в настоящее время наиболее производительным и точным методом изготовления деталей криволинейного профиля. Фрезерование – процесс получения обработанной поверхности постепенным удалением определенного количества материала, называемого припуском, при помощи относительно медленного перемещения (подачи) фрезы, вращающейся на относительно высокой скорости.

Особенностью процесса фрезерования является прерывистость резания каждым зубом фрезы. Зуб фрезы находится в контакте с заготовкой и выполняет работу резания только на некоторой части оборота, а затем продолжает движение, не касаясь заготовки, до следующего врезания, что приводит к возникновению дополнительных вибраций. Операции контурного фрезерования, как правило, являются окончательными, поэтому их выполнение должно обеспечивать получение необходимых требований по точности и качеству обработанных поверхностей.

Характерной особенностью процесса контурного фрезерования является криволинейная траектория движения геометрического центра инструмента [2]. Обеспечение такой траектории движения возможно лишь постоянным изменением скоростей подач по координатным осям, сопровождаемым динамическим воздействием со стороны сил инерции, представляющих собой противодействие материальной точки изменению ее скорости. Таким образом, можно сделать вывод, что контурное фрезерование всегда сопровождается действием сил инерции, влияние которых можно оценить, рассмотрев динамику процесса.

Процесс контурного фрезерования предусматривает относительные движения заготовки и инструмента, которые предопределяют изменение величин координатных скоростей, вызывающее дополнительные динамические возмущения, которые, в свою очередь, оказывают влияние на окончательную точность обработки.

Таким образом, для описания более точной картины формирования точности обработки криволинейной поверхности на фрезерном станке с ЧПУ необходимо дополнительно рассмотреть процесс контурной обработки как динамический и выявить влияние текущей кривизны контура на точность обработки.

Как правило, контур используемых на операциях фрезерования криволинейных поверхностей заготовок не совпадает по форме с контуром готовой детали. Причем это различие может быть весьма существенным. Это предопределяет изменение припуска на обработку вдоль контура в широких пределах, что приводит к постоянному изменению сил резания и, как следствие, возникновению погрешности обработки.

В настоящее время выбор режимных параметров процесса контурной обработки производится без учета возможного динамического воздействия, обусловленного кривизной контура. Это может привести к значительным погрешностям обработки (особенно на чистовых переходах), вследствие смещения расчетной траектории движения инструмента. Этот недостаток может быть устранен лишь путем исследования динамики и управления процессом, выявления всех факторов, определяющих состояние системы в каждый момент времени, по-

строением траектории движения инструмента, исключая резкое изменение координатных скоростей.

На современном этапе актуальной задачей становится разработка и управление технологическим процессом на основе трехмерного представления изделия. Причем в данном случае речь идет о полной автоматизации технологического проектирования, в основу которого положена трехмерная математическая модель изделия, полученная из конструкторских подразделений. Главная особенность трехмерных моделей заключается в том, что внутри математического описания формы модели содержатся данные о структуре изделия в целом и отдельных деталей как набора поверхностей или элементов формы.

На сегодняшний день многие автоматизированные системы проектирования предоставляют возможность конструктору создавать математические модели деталей и изделий в виде параметрических трехмерных моделей. Среди таких систем можно отметить известные на мировом рынке программные продукты Unigraphics, Catia, Pro/Engineer, SolidWorks. Из российских систем, параметрические возможности при трехмерном моделировании лучше всего реализованы в T-FLEX CAD.

Задача геометрического моделирования поверхностей является важной областью машинной графики как инструментальной основы имитационного моделирования пространственной точности станочных систем. В настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) широко применяется для решения инженерных задач. Задачей геометрического моделирования для решения задач МКЭ является построение конечно-элементной сетки заданной точности. Результаты, рассчитанные в конечно-элементной программе, проверяются экспериментальными исследованиями.

CAD/CAM/CAE/PDM-система SolidWorks предназначена для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства изделий любой степени сложности и назначения. SolidWorks относится к классу CAD систем и позволяет осуществлять весь комплекс мероприятий по подготовке конструкторской документации и созданию трехмерных твердотельных моделей и сборок.

Solid Works оснащен мощным комплексом инструментов, позволяющих спроектировать конструкцию любой сложности и конфигурации. Твердотельную модель, созданную в программном комплексе SolidWorks, можно разделить на два уровня деталь и сборка. Объемная модель станка – это большая сборка, состоящая из подборок и деталей. Любая сборка состоит из деталей, поэтому крайне важно, разрабатывая модель детали, учитывать размерные цепи, что позволит в дальнейшем параметризировать отдельные сборки и модель станка в целом.

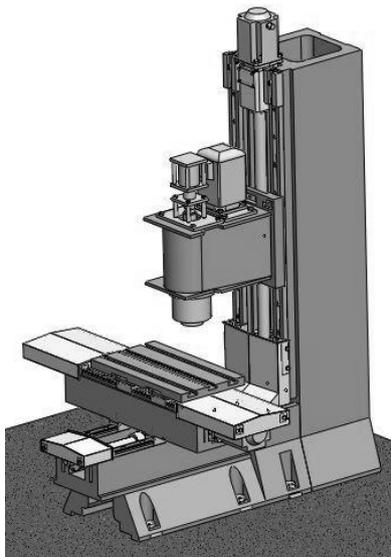
В данной работе рассмотрены все этапы формирования геометрического образа станка с изменяющимися элементами. Был разработан 3D-геометрический образ обрабатывающего фрезерного центра модели Finc Tech SMV-450-H3.

Создание математической модели станка в системе состоит из двух основных этапов: создание твердотельных моделей элементов комплекса и сборка конструкции в системе SolidWorks с последующим её экспортом в систему MSC.visualNastran; а также наложение связей между элементами сборки конструкции в соответствии с их реальной работой, задание материала и расчет конструкции в кинематике, статике и динамике.

На первом этапе в системе SolidWorks соберем все детали в необходимом порядке, так как они будут работать в реальной конструкции.

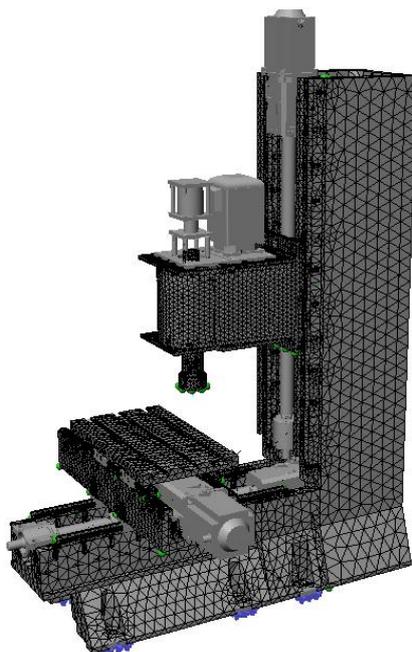
Общий вид модели представлен на рисунке 2.

После сборки конструкции необходимо задать материал конструкций, используя при этом встроенную библиотеку материалов. После процедуры выбора материала необходимо расставить связи, установить в опоры валы, закрепить основание станка. Все эти действия выполняются при помощи стандартной библиотеки связей системы MSC VisualNastran. Расстановку связей и ограничений следует производить согласно реальной конструкции.



**Рисунок 2 – Общий вид обрабатывающего фрезерного центра модели Finc Tech SMV-450-НЗ.**

Установив все необходимые связи, производим разбиение тел на конечные элементы и выполняем моделирование, представленное на рисунке 3. MSC Visual Nastran – это инструмент для проведения компьютерного инженерного анализа (CAE) проектируемых изделий МКЭ.



**Рисунок 3 - Разбиение станка на сетку конечных элементов**

МКЭ — один из основных методов решения задач строительной механики, механики деформируемого твердого тела, теплопроводности, гидромеханики и др. Идея метода заключается в аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы, совокупностью простых элементов, имеющих конечное число степеней свободы и связанных между собой в узловых точках.

Для МКЭ характерны: широкий диапазон применимости, инвариантность по отношению к геометрии конструкции и механическим характеристикам материалов, простота учета взаимодействия конструкций с внешней средой (механические и температурные нагрузки, граничные условия и т. д.), высокая степень приспособленности к автоматизации всех этапов

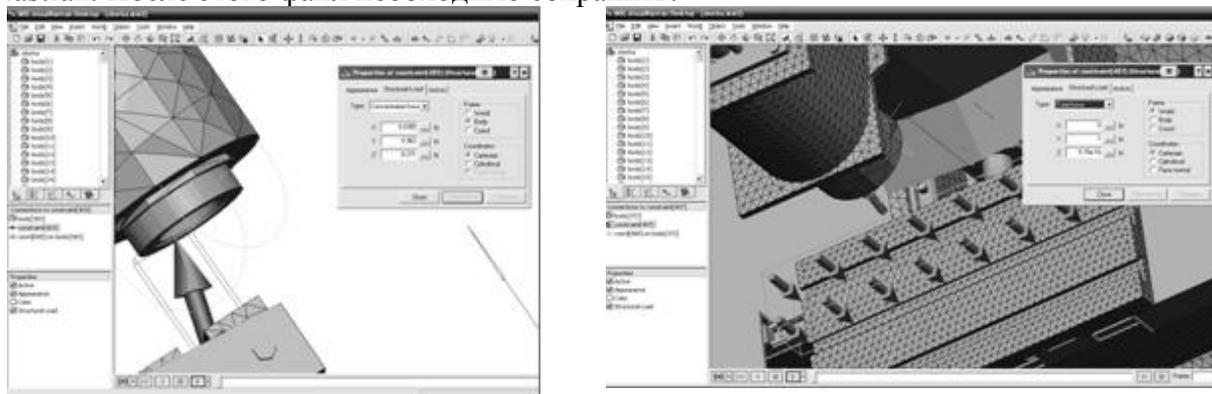
расчета. Популярность метода объясняется также простотой его физической интерпретации и очевидной связью с методами Ритца и перемещений, широко применяемыми в механике сплошных сред и строительной механике.

МКЭ во всех его различных формулировках предусматривает следующие основные этапы расчета: разбиение рассматриваемой области (тела) на конечные элементы; аппроксимацию зависимых переменных кусочно-полиномиальными функциями с неизвестными параметрами для каждого конечного элемента; подстановку аппроксимирующих функций в определяющие уравнения и их решение, дающее значения параметров, которые полностью определяют искомые функции внутри элемента через их значения в узловых точках.

Расчет с помощью МКЭ включает следующие этапы:

- разбиение конструкции на конечные элементы и подготовка топологической, геометрической и физической информации; установление факторов взаимодействия с окружающей средой;
- построение для выделенных конечных элементов соответствующих матриц (жесткости, масс, теплопроводности и др.) и векторов, определяющих зависимости между реакциями и перемещениями в узлах элемента;
- формирование разрешающей системы линейных алгебраических или дифференциально-алгебраических (в нестационарных задачах) уравнений;
- решение полученной системы уравнений и установление полей перемещений, внутренних силовых факторов, температуры и т. д.;
- обработка результирующей информации и ее анализ.

Таким образом, для передачи файла из SolidWorks в Nastran необходимо сохранить сборку как файл parasolid с расширением *.x\_t*. Затем открыть данный файл в программе Nastran. После этого файл необходимо сохранить.

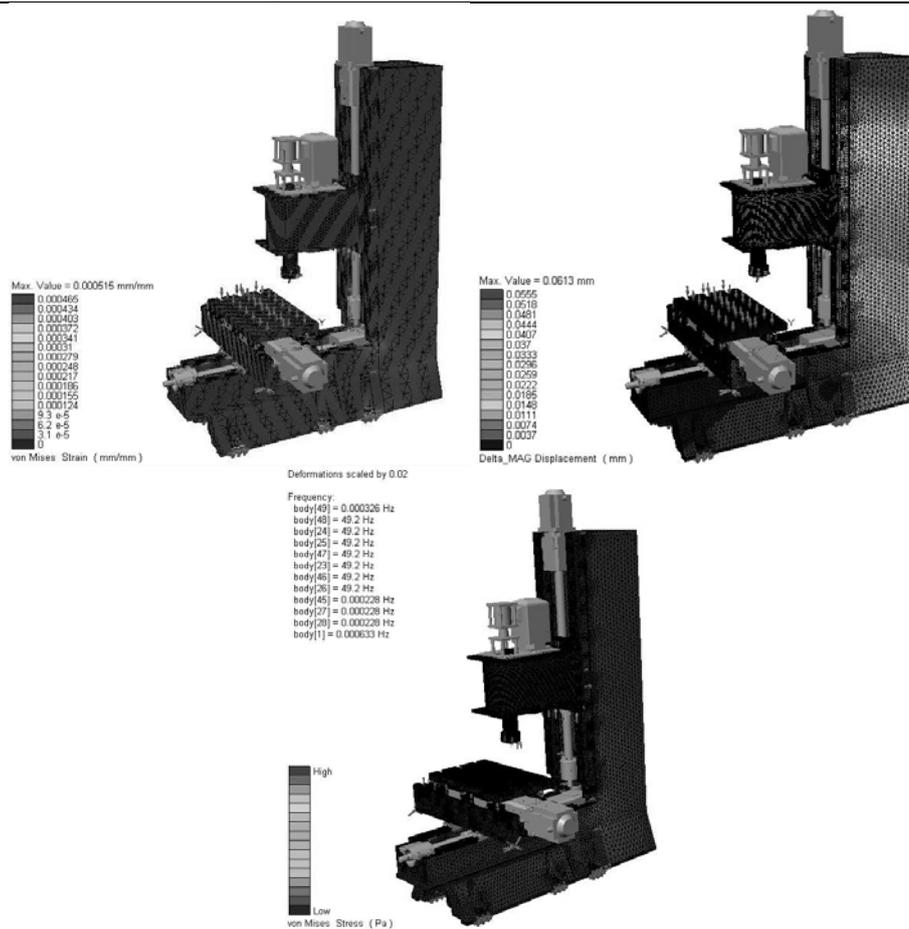


**Рисунок 4 – Задание вектора действующих нагрузок**

Для расчета необходимо: выбрать вид расчета; задать всем телам массу; включить тела в конечно-элементный анализ и разбить на сетку конечных элементов; установить приложение действующих сил: сила резания имеет противосилу, которая оказывает влияние на шпиндельный узел, а на стол действует распределенная нагрузка; также необходимо зафиксировать станок в виде жесткой заделки. Выполнение расчета осуществляется вызовом соответствующей команды. Затем проводится вывод результатов и их анализ.

Сформирован комплекс 3D-геометрических моделей фрезерного обрабатывающего центра Finc Tech SMV-450-H3, позволяющий оперативно редактировать компоненты без изменения общей структуры модели.

Модели могут быть использованы не только для получения комплекта конструкторской и технологической документации, но и для выполнения инженерных расчетов. Возможность многократного использования сформированных 3D-моделей существенно повышает эффективность работы, обеспечивает сокращение трудозатрат и сроков проектирования металлорежущих станков.



**Рисунок 5 – Результаты расчета: деформация, перемещение и напряжение**

Сформированные модели наглядны, обоснованы и автоматизируемы, и позволяют повысить обоснованность проектных решений, сократить сроки и затраты на техническую подготовку производства.

С целью оценки адекватности разработанных моделей необходимо провести экспериментальную проверку установленных взаимосвязей путем исследования совокупности установленных погрешностей, характеризующих геометрическую точность станка с изменяющимися элементами.

**Литература:**

1. Иванников С.Н., Михайлов В.А., Мокринская А.Ю. Определение характеристик режущего инструмента методом конечных элементов: Известия МГТУ «МАМИ», 2010, №1(9), С. 132-135.
2. Мокринская А.Ю. Моделирование оптимальных параметров концевых фрез малого диаметра: «Будущее машиностроения России». Сборник трудов третьей всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, С.11

**Управление качеством технических изделий на стадиях проектирования**

к.т.н. доц. Мартишкин В.В.  
 МГТУ «МАМИ»  
 8-905-558-56-10

*Аннотация.* Рассматриваются методы управления качеством изделий на стадиях технического и рабочего проектов. На стадии технического проекта основное значение в повышении качества имеют показатели стандартизации и унификации.