

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

В.Д. Вермель, Г.А. Губанов, К.А. Деев (ФГУП ЦАГИ)

Рассмотрена проблема возникновения вибраций мало жесткой детали при ее изготовлении фрезерованием. Описана разработанная система технологических демпферов с вакуумным закреплением, являющаяся оперативным и универсальным средством предотвращения вибраций. На примере изготовления ряда реальных деталей показаны преимущества применения разработанных демпферов.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, вибрации мало жесткой детали, демпфер, чистота обработанной поверхности, точность обработки.

Переход от традиционного фрезерования к высокоскоростному позволяет существенно усовершенствовать технологический процесс, повысить качество обработки, однако увеличение скорости резания и частоты ударов зубьев фрезы зачастую вызывает возникновение интенсивных вибраций инструмента и/или детали. При изготовлении фрезерованием мало жестких деталей возникновение их вибрации на этапе чистовой обработки является одной из основных проблем. Вибрации вызывают значительное ухудшение чистоты обработанной поверхности и точности изготовления, а также ускоренный износ инструмента.

Известным способом борьбы с вибрациями мало жестких деталей является подбор такого значения ча-

стоты вращения фрезы, при котором вибрации будут минимальны [1, 2]. Данный способ требует проведения ряда пробных обработок и/или расчетов, которые необходимо выполнять для каждого нового типа детали индивидуально. Другим способом является изготовление специальной оснастки, создающей дополнительные точки фиксации детали и повышающей ее жесткость. Специальную оснастку также необходимо проектировать и изготавливать под конкретную деталь.

Таким образом, известные способы борьбы с вибрациями деталей требуют длительной и трудоемкой подготовки производства, а также творческого участия в разработке технологического процесса квалифицированных специалистов. Это существенно повышает

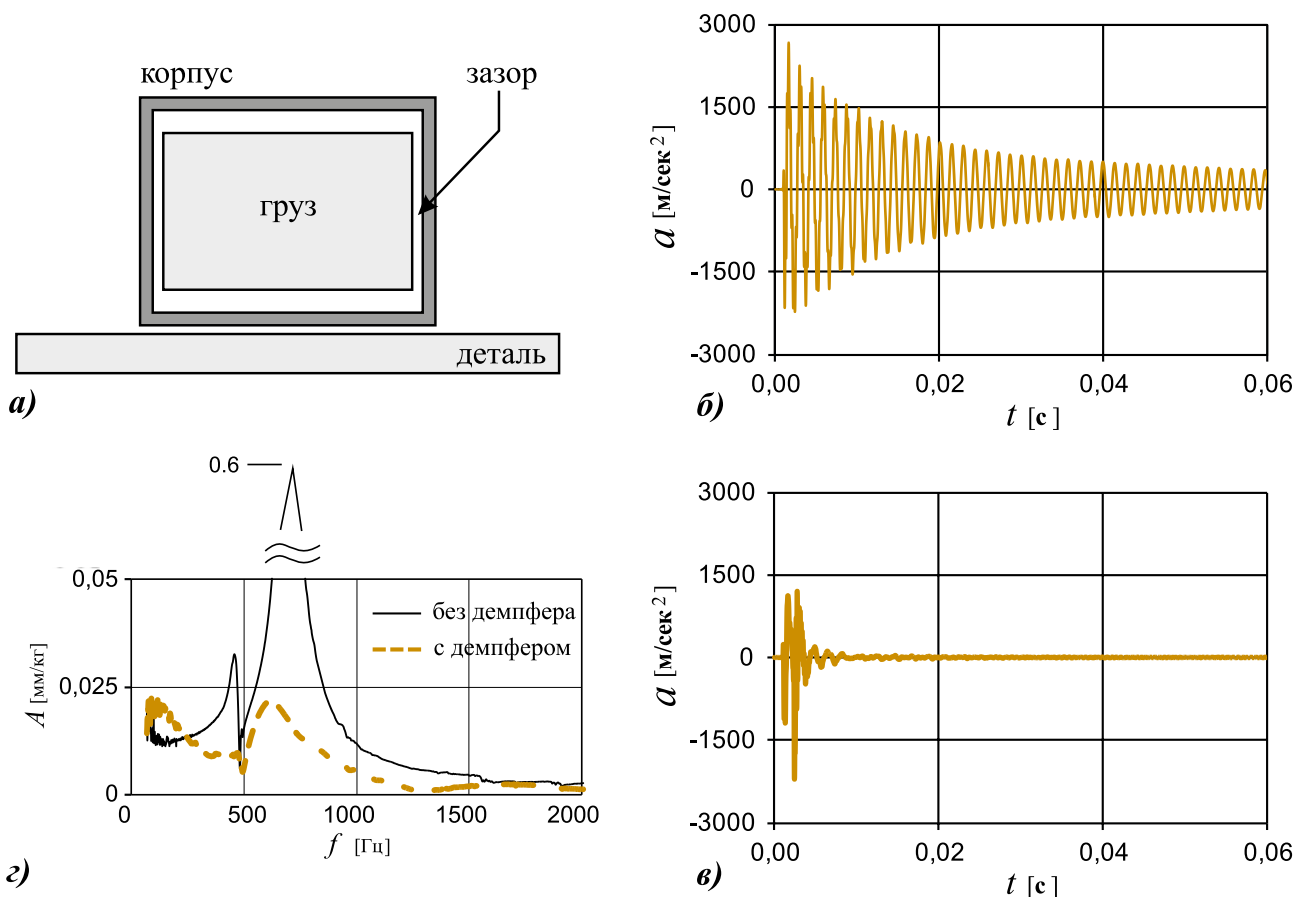


Рис. 1. Специальный технологический демпфер: а) принципиальная схема; б) затухание свободных колебаний детали без демпфера; в) затухание колебаний детали с демпфером; г) передаточная функция детали без демпфера и с демпфером

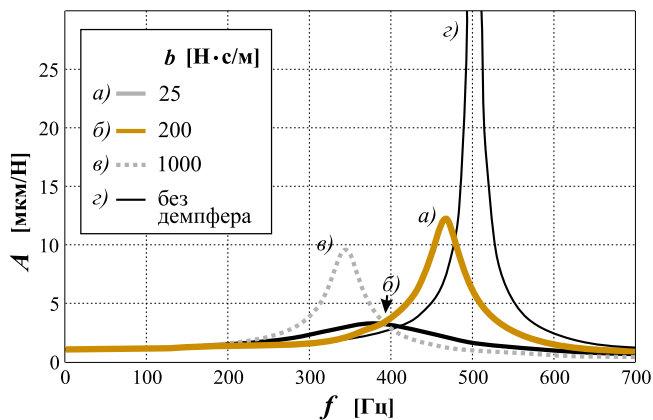


Рис. 2. Влияние коэффициента вязкого трения демпфера  $b$  на передаточную функцию детали с демпфером (масса груза демпфера 1 кг, масса детали 3 кг)

себестоимость изготовления детали при мелкосерийном производстве, не позволяет осуществить полную автоматизацию производственного процесса.

В качестве альтернативного, оперативного и универсального средства предотвращения вибраций маложест-

ких деталей специалистами ЦАГИ разработаны специальные технологические демпферы, закрепляемые на детали на время обработки. Конструкция демпфера включает массивный груз, способный перемещаться в вязкой среде, обеспечивая интенсивную диссипацию энергии колебаний. В результате коэффициент демпфирования детали возрастает с 0,5% до 20...30%, что обеспечивает эффективное подавление ее вибраций [3]. На рис. 1 показана принципиальная схема демпфера, закрепленного на детали, процесс затухания свободных колебаний детали после единичного удара до и после закрепления демпфера, а также экспериментально измеренная передаточная функция детали с/без демпфера. Видно, что после закрепления демпфера свободные колебания детали затухают значительно быстрее, и высота резонансного пика передаточной функции детали заметно снижается, что свидетельствует о существенном повышении интенсивности диссипации энергии и высокой эффективности демпфера.

Получаемая эффективность снижения вибраций демпфером может оцениваться по высоте резонансного пика детали с демпфером. Для обеспечения эффек-

тивного подавления вибраций необходимо правильно выбрать параметры демпфера, а именно коэффициент вязкого трения (при перемещении груза в корпусе), определяемый при фиксированной вязкости среды, заполняющей демпфер, величиной зазора между грузом и корпусом. На рис. 2 приведены передаточные функции детали с демпфером при различных значениях его коэффициента вязкого трения. При обеспечении достаточно высокой относительной массы демпфера (желательно, чтобы масса демпфера была сопоставима с массой вибрирующего элемента детали) он имеет достаточно широкий рабочий диапазон частот, и точной настройки параметров демпфера на конкретную деталь не требуется. Возможно изготовить универсальный набор из небольшого числа демпферов, отличающихся только по размеру, применимый для различных деталей без настройки и определения частотных характеристик деталей.

Демпферы закрепляются на детали в тех местах, где ее жесткость минимальна, со стороны, противоположной обрабатываемой. Для закрепления можно использовать термоклей или клей быстрого отвер-



Рис. 3. Изготовление лопаток аэродинамической модели компрессора с использованием технологических демпферов: а) общий вид детали в приспособлении; б) пара демпферов, закрепленная на детали с помощью общей вакуумной присоски; в) получаемая высокая чистота обработанной поверхности



Рис. 4. Обработка турбинных лопаток с консольным закреплением только за замок и использованием демпфера

ждения, но наиболее удобным способом является закрепление с помощью вакуумной присоски. Для реализации вакуумного закрепления демпферов разработана автономная герметизированная вакуумная станция, которая может располагаться непосредственно на столе станка рядом с деталью.

Система демпферов с вакуумным закреплением была применена при изготовлении серии лопаток аэродинамической модели компрессора в модельном производстве ФГУП «ЦАГИ». Лопатки обладали малой толщиной и низкой жесткостью при повышенных требованиях по точности изготовления. Ранее при изготовлении подобных изделий выполнялись предварительные расчеты собственных частот колебаний детали на различных этапах обработки и выбор на основе этих данных частоты вращения фрезы, обеспечивающих отсутствие резонанса детали [4]. При изготовлении нескольких серий лопаток, различающихся по форме, расчеты и отработку изготовления приходилось выполнять для каждой серии. Применение демпферов позволило выполнять обработку лопаток без расчетов и подбора частоты вращения фрезы, при этом одни и те же демпферы успешно применялись для изготовления лопаток разных серий. На рис. 3 а приведен общий вид лопатки в приспособлении с закрепленными демпфе-

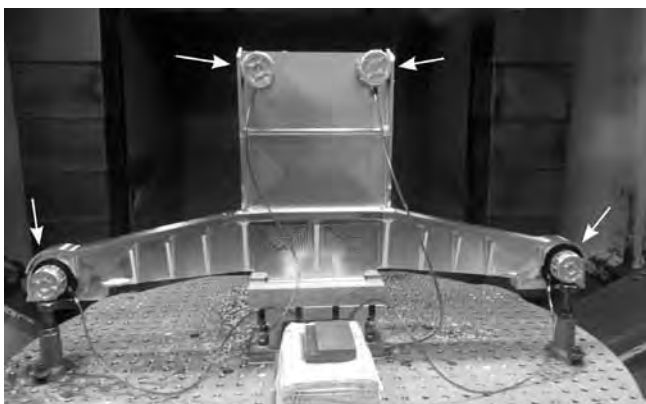


Рис. 5. Изготовление мало жесткой силовой панели с вертикальным закреплением и применением демпферов

рами и вакуумной станцией, на рис. 3 б показан способ крепления демпферов на детали, а на рис. 3 в демонстрируется высокая чистота обработанной поверхности, получаемая при использовании демпферов.

Применение демпферов позволяет не только оперативно предотвратить возникновение вибраций детали, но и совершенствовать технологический процесс обработки. На рис. 4 показано изготовление лопаток турбины с использованием демпферов. Вертикальное расположение лопаток с консольным закреплением только за замок позволяет открыть зону обработки, упростить крепежное приспособление, снизить коробление и повысить точность изготовления. При этом радикальное падение жесткости детали при закреплении только с одного конца компенсируется демпфером, установленным на свободном конце лопатки. Изготовленные таким способом лопатки соответствовали всем предъявляемым требованиям.

Аналогичные результаты были получены с помощью демпферов при изготовлении мало жестких силовых панелей. На рис. 5 показаны панель, установленная вертикально, и закрепленные на ней демпферы. Такой способ обработки позволил выполнять обработку обеих сторон панели в одном установе, при этом демпферы не препятствовали перераспределению внутренних напряжений детали в процессе удаления материала заготовки.

Демпферы также позволяют повышать производительность чистовой обработки и предотвращать ускоренный износ инструмента из-за вибраций фрезеруемых деталей. При изготовлении элементов воздушных каналов аэродинамической модели в модельном производстве ФГУП «ЦАГИ» вибрации тонких стенок, сопровождающиеся интенсивным звуком, приводили к тому, что из-за чрезмерного ударного силового воздействия режущие пластины раскалывались через 25...30 мин работы. Закрепление на стенках каналов демпферов значительно снизило их вибрации, что было ясно по уменьшению звука вибраций при обработке. Это позволило увеличить минутную подачу в 4 раза и пропорционально повысить производительность обработки, при этом стойкость режущих пластин составила 2 ч, а характер их износа изменился от растрескивания к нормальному истиранию, что позволило переворачивать пластины 4 раза, то есть одного комплекта пластин хватает в таком случае на 8 ч работы вместо 30 мин. Для всей партии деталей (8 ед.) использование технологических демпферов дало экономию (применительно только к оборудованию с ЧПУ) в 96 ч машинного времени и 80 твердосплавных пластин. Кроме того, улучшение чистоты обработанной поверхности значительно снизило трудоемкость ручной слесарной доработки деталей.

Таким образом, опыт применения разработанной системы демпферов с вакуумным закреплением в модельном производстве ФГУП «ЦАГИ» подтвердил ее высокую эффективность. Демпферы являются оперативным и универсальным средством предотвращения вибраций мало жестких деталей и позволяют при мини-

мальных затратах получать значительный экономический эффект — повысить производительность чистовой обработки, снизить износ инструмента, повысить чистоту обработанной поверхности и качество обработки. Помимо этого, применение демпферов позволяет упростить технологическую оснастку, открыть зону обработки, снизить негативное влияние коробления на точность изготовления. Являясь универсальным средством предотвращения вибраций, демпферы позволяют упростить технологическую подготовку автоматизированного производства маложестких деталей сложной формы.

#### Список литературы

1. Воронов С.А., Киселев И.А. Комплексная математическая модель динамики пространственного фрезерования по-

датливых сложнопрофильных деталей // Проблемы механики современных машин: сб. ст. 5-ой международной НТК. Улан-Удэ. ВСГУТУ. 2012. С. 89-92.

2. Altintas Y. Modeling approaches and software for predicting the performance of milling operations at MAL UBS // Machining Science and Technology. 2000. 4/3. с. 445-478.
3. Балашов С. М., Губанов Г.А. Система из пневматического демпфера с вакуумным закреплением для предотвращения вибраций деталей малой жесткости при фрезеровании // Материалы XXVI научно-технической конференции по аэродинамике в посёлке им. Володарского. — Жуковский: ЦАГИ, 2015. — С. 99.
4. Болсуновский, С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Качарова И.Н., Чернышев Л.Л. Подбор режима фрезерной обработки лопатки аэродинамической модели компрессора ГТД//Полет. 2012.— № 6. С. 37-42.

*Губанов Глеб Анатольевич — канд. техн. наук, младший научный сотрудник,  
Вермель Владимир Дмитриевич — д-р техн. наук, начальник научно-технического центра  
научно-производственного комплекса,  
Деев Константин Александрович — ведущий инженер ФГУП ЦАГИ.  
Контактный телефон (495) 556-45-72.  
E-mail: glebgubanov@mail.ru*

## ПРОГРАММНАЯ КОРРЕКЦИЯ ОБЪЕМНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МНОГОКООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**В.И. Телешевский, В.А. Соколов (МГУ «СТАНКИН»)**

Рассмотрен метод коррекции геометрических погрешностей многокоординатного оборудования (станков, КИМ и приборов) с программным управлением с применением Калмановской концепции «Наблюдения и управления». Для наблюдения за многокоординатной системой используется многофункциональная лазерная информационно-измерительная система (ПИИС), способная измерить разнообразные пространственные функции машины. На основе измерения определенного числа пространственных функций выстраивается карта систематических погрешностей в рабочем пространстве машины (> 10000 точек за 40 с). Предложен новый метод формирования стратегии коррекции по распределению погрешностей в рабочем пространстве машины и на его основе разрабатывается постпроцессор управляющих программ, обеспечивающий минимальные объемные погрешности во всем рабочем пространстве. Приводятся экспериментальные результаты на примере коррекции объемной точности трехкоординатных станков с ЧПУ высоких классов точности.

Ключевые слова: многокоординатные системы, объемная точность, наблюдение, управление, лазерные измерения.

Многокоординатные системы с программно-управляемым перемещением узлов и механизмов лежат в основе современного машиностроения. К ним относится как технологическое оборудование, обеспечивающее формообразование изделий (станки, функционирующие на различных физических принципах), так и измерительные системы (координатно-измерительные машины и приборы), осуществляющие измерение и контроль производимых изделий сложной формы [1].

Современное машиностроение характеризуется рядом принципиально новых тенденций, определяющих его развитие, среди которых интеграция измерительных и технологических операций в едином технологическом процессе. При этом также необходимо отметить вектор на: существенное повышение производительности и точности обработки изделий; постоянное повышение требований к точности изготовления и, как следствие, измерения деталей ма-

шиностроения; все более широкое распространение деталей со сложными геометрическими формами [2]. В связи с этим возрастают требования не только к точности позиционирования отдельных рабочих органов технологического и измерительного оборудования, но и к объемной точности машины в целом, то есть способности точно воспроизводить сложные трехмерные поверхности измерительным наконечником или режущей кромкой инструмента. Количественно объемная точность характеризуется объемной погрешностью [1] — вектором между номинальным (заданным программно) и действительным положением рабочей точки (измерительного наконечника либо режущей кромки инструмента) в произвольной точке рабочего пространства машины.

Объемная точность многокоординатных систем в решающей степени определяется технологией их изготовления и сборки. Однако в метрологии совершенствуется другой метод повышения объемной