

## АНАЛИЗ КОРРЕКЦИИ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В СТАНКАХ

А.Г. Ягопольский, Д.Э. Крикунов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: Dmitri-krikunov@mail.ru

*Рассмотрены тепловые деформации металлорежущих станков, которые являются одной из ключевых и малоизученных причин возникновения погрешностей при механической обработке. Проведен анализ распространенных методов коррекции тепловых деформаций, выявлены основные преимущества и недостатки различных способов диагностики и устранения погрешностей, возникающих в результате тепловых деформаций механизмов и узлов металлорежущих станков. Описаны основные источники выделения теплоты. Данные мероприятия при условии их внедрения в конструкции станков и в процесс эксплуатации технологического оборудования позволят улучшить эксплуатационные характеристики современных металлорежущих станков и повысить точность обработки на станках. Это один из путей повышения качества изделий, изготавливаемых в условиях современного машиностроительного производства.*

**Ключевые слова:** тепловые деформации, металлорежущий станок, коррекция деформаций, погрешность обработки, нагрев, тепловыделение.

## ANALYSIS OF CORRECTION OF THERMAL DEFORMATION IN MACHINE TOOLS

A.G. Jagopolskiy, D.E. Krikunov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: Dmitri-krikunov@mail.ru

*This article is devoted to the heat deformation of machine tools. Today heat deformation is one of the key and poorly studied reasons of machining inaccuracy appearance. Analysis of current widespread methods of heat deformation correction was carried out. Basic advantages and disadvantages of different methods of diagnostics and eliminating the errors were revealed which take place because of heat deformation of metal-cutting machine-tools. Basic sources of heat emission have been described. These activities will allow to improve performance characteristics of modern metal-cutting machine tools and to increase accuracy for processing on the machines on condition their application in the machines design and within operation of the processing equipment. This is one of the ways to improve the quality of products manufactured in the conditions of modern mechanical engineering production.*

**Keywords:** heat deformations, machine tool, correction of deformations, processing error, heating, heat emission.

Тепловые деформации технологической машины, в частности металлорежущего станка, возникают в результате выделения теплоты в работающих узлах и механизмах, в зоне резания и под влиянием окружающей среды.

Тепловые деформации узлов и механизмов металлорежущих станков, характеризующиеся как процессы средней скорости и оказывающие существенное влияние на баланс формирования погрешностей

обработки, вызывают не только погрешности размеров, но и погрешности формы обрабатываемых деталей и соответственно снижают точность и надежность станка в целом.

В общем балансе погрешностей обработки на металлорежущих станках значительную долю занимают погрешности, вызванные тепловыми деформациями узлов и механизмов станка, приводящими к изменению относительного положения инструмента и заготовки в направлениях линейных осей координат и угловых поворотов вокруг этих осей. Тепловые деформации металлорежущего станка, связанные с неравномерным нагревом основных узлов станка и их последующим тепловым расширением являются одним из наиболее весомых факторов, влияющих на точность обработки. Также тепловые деформации возникают и от действия сил резания и трения. В результате работы этих сил, обрабатываемые заготовки, режущий инструмент и несущая система станка тоже нагреваются, что приводит к тепловым деформациям узлов станка.

Следует иметь в виду, что в связи с различным расположением источников теплоты, изменением их положения, переменной интенсивностью и переменной продолжительностью выделения теплоты, нагрев станка в разных его точках происходит неравномерно и с различной скоростью. В отличие от упругих перемещений, которые мгновенно возникают при приложении нагрузки и мгновенно исчезают при ее снятии, тепловые деформации сравнительно медленно нарастают и медленно исчезают. Поэтому при создании систем контроля и коррекции тепловых деформаций необходимо принимать во внимание не только их значения, но и скорость образования.

Коррекция тепловых деформаций — сложная научно-техническая задача, требующая наличия специальных измерительных систем, устанавливаемых часто в рабочей зоне станка и измеряющих значения тепловых смещений рабочих органов и исполнительных механизмов и пр.

В настоящее время применяют следующие методы борьбы с тепловыми деформациями технологических машин и оборудования (станков): вынос узлов и механизмов с повышенным тепловыделением за пределы станка; применение смазочно-охлаждающей жидкости в зоне резания; принудительное охлаждение узлов; создание термokonстантных цехов; выравнивание теплового поля путем искусственного подогрева или охлаждения отдельных узлов; автоматическая компенсация тепловых деформаций, т.е. применение коррекционных линеек в универсальных станках и использование предискажения управляющей программы в станках с ЧПУ.

Перечисленные методы представлены на рис. 1.



**Рис. 1. Методы борьбы с тепловыми деформациями**

Последний метод наиболее перспективный. При этом его применение легко комбинируется с другими методами. Однако имеются сложности по разработке структуры управления процессом обработки и построения математической модели.

Для реализации методов борьбы с тепловыми деформациями используются различные способы. Способы снижения влияния тепловых деформаций можно подразделить на две группы: уменьшение самих тепловых деформаций и уменьшение степени влияния тепловых деформаций на точность станка (рис. 2).

К первой группе, в которой используется конструкторско-технологический способ, относится снижение тепловыделений и теплоотдачи.

Ко второй группе, в которой используется программный способ, относятся управление тепловыми деформациями станка; повышение сопротивляемости станка тепловым воздействиям; коррекция тепловых деформаций дополнительными перемещениями рабочих органов станка с использованием специальных измерительных систем и (или) применением микроприводов.

Под термином “коррекция” (от латинского слова *correctio* — исправление, проверка) понимается исправление ошибок или недостатков машин и механизмов, результатов их работы, измерений, траекторий движений и т.д. При этом под коррекцией движения понимается исправление траекторий при движении, которое выполняется в соответствии с результатами измерений и вытекающим из них прогнозом движения. Сущность механизма коррекции погрешностей из-за тепловых деформаций станка можно представить как сокращение и стабилиза-



**Рис. 2. Способы снижения влияния тепловых деформаций на станок**

цию пространственных относительных перемещений и поворотов систем координат, жестко связанных с деталями станка, которые входят в размерные цепи, определяющие относительное положение рабочих органов станка, несущих заготовку или режущий инструмент.

Наиболее желательным воздействием на погрешности из-за тепловых деформаций станка является полная коррекция. Однако, исходя из экономических соображений, производитель станков, как правило, стремится к обеспечению согласованной с заказчиком нормы точности. Другая проблема состоит в технической трудности из-за необходимости применения специальных измерительных преобразователей, обеспечивающих достоверное измерение тепловых деформаций станка, а также из-за сложностей в полной управляемости рабочими органами станка по всем линейным и круговым координатам. Поэтому, учитывая, что направленность тепловых деформаций станка в пространстве очень сложна, на практике решается задача не полной коррекции этих погрешностей, а только возможности сокращения их влияния на точность работы станка.

В целях определения возможных способов коррекции погрешностей станка используется метод координатных систем [1] и модель формирования погрешности относительного положения рабочих органов станка [2].

Известно, что в общем виде возможны такие способы коррекции погрешностей станков, как:

1. Абсолютная стабилизация положений рабочих органов станка, несущих заготовку или режущий инструмент относительно заданного для них положения.

2. Относительная стабилизация за счет изменения относительно-го пространственного положения одного из рабочих органов станка относительно другого.

В полной мере реализация таких способов коррекции тепловых деформаций станков с линейными и угловыми смещениями рабочих органов сложна и практически не применяется. Поэтому существующие работы по коррекции погрешностей металлорежущих станков решают эти задачи частично.

В большинстве случаев применяются способы коррекции линейных перемещений рабочих органов по управляемым координатам с использованием их приводов подач. Особую трудность представляет коррекция угловых смещений рабочих органов из-за тепловых деформаций.

На практике коррекция тепловых деформаций станка может проводиться предыскажением управляющей программы на основе информации о систематических погрешностях; коррекцией управляющих сигналов формируемых системой ЧПУ и передаваемых на приводы подач рабочих органов станка; введением в станок специальных корректирующих элементов или исполнительных устройств с микроприводами и управлением ими от системы ЧПУ.

В этих случаях применяется способ, основанный на управлении процессом коррекции погрешностей по заданным программам, заложенным в памяти системы ЧПУ, когда информация о процессе формирования от управляющей программы суммируется с информацией о корректируемых погрешностях и передается на приводы подач или на специальные микропривода в реальном масштабе времени.

Коррекция погрешностей необходима на этапе проектирования станка, когда принимается решение о его компоновке, определяется расположение специальных механизмов и устройств, а также измерительных преобразователей, регистрирующих отклонения перемещений рабочих органов для проведения последующей коррекции. Обратные связи должны быть предельно короткими и жесткими, а элементы, реализующие эти связи, должны быть максимально приближены к рабочему органу станка, так как время запаздывания при осуществлении коррекции не должно превышать 1 мкс [3, 4]. Для проведения коррекции необходима максимально возможная управляемость станка.

При компенсации тепловых деформаций на основе применения обратной связи и для проведения коррекции в качестве контролируемых параметров могут быть использованы: частота вращения шпинделя; темп генерирования теплоты; изменение температуры нагрева

в характерной точке станка; смещение узлов и корпусных деталей; погрешность обработки заготовки и пр.

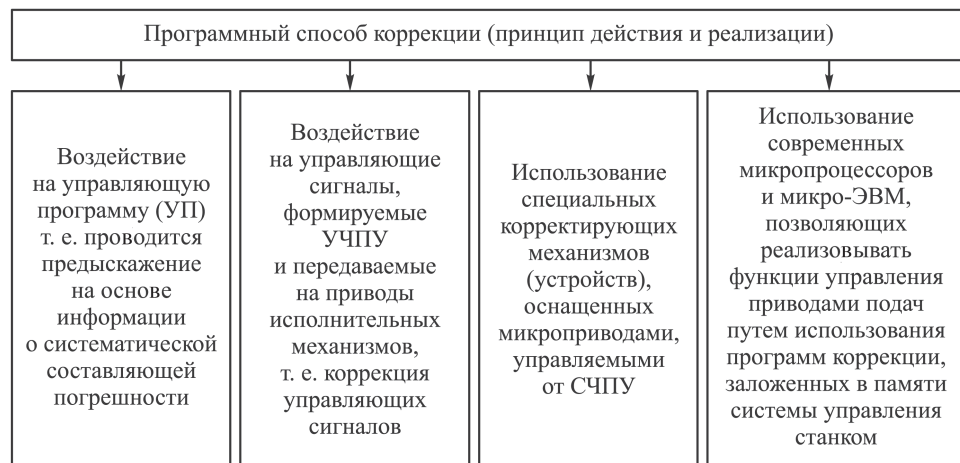
Однако и здесь имеется ряд ограничений, например, частота вращения шпинделя не всегда соответствует его температурному смещению, так как в ряде случаев необходимо учитывать время вращения шпинделя; темп генерирования теплоты вызывает трудности при измерении и учете времени вращения шпинделя; измерение смещения узлов и корпусных деталей из-за тепловых деформаций в ряде случаев трудно осуществить, но когда это возможно, достигается наиболее полная коррекция смещений.

Измерение температуры нагрева в характерной точке станка более удобно, когда наблюдается наиболее полное соответствие этой температуры смещению узла станка. При этом точность измерения температуры оказывает существенное влияние на правильность коррекции, поэтому система должна точно реагировать даже на очень небольшие колебания температуры.

Выбор способа коррекции погрешностей из-за тепловых деформаций также зависит от стоимости, надежности, требований по точности обработки и др.

Выбор оптимального принципа действия способа коррекции тепловых деформаций, т.е. программного способа коррекции, должен сочетать (рис. 3):

- воздействие на управляющую программу, когда проводится ее предсказание на основе информации о систематических погрешностях;
- воздействие на управляющие сигналы, формируемые системой ЧПУ и передаваемые на приводы исполнительных механизмов станка;
- использование на станке специальных корректирующих элементов или устройств, оснащенных микроприводами, управляемыми от системы ЧПУ станка;



**Рис. 3. Принцип действия и реализации программного способа коррекции**



— использование микропроцессоров, позволяющих реализовать функции управления приводами подачи станка программными средствами, компенсировать тепловые погрешности станка путем использования постоянно действующих программ коррекции, заложенных в памяти системы управления станка.

Проведенные обобщения и анализ показали, что существует большое число способов коррекции тепловых деформаций, имеющих различные принцип действия, конструктивное исполнение, достоверность результатов и экономическую эффективность. Все существующие методы и способы коррекции тепловых деформаций имеют определенные достоинства, недостатки и ограничения по их применению. Например, недостатком способов коррекции является также то, что они очень часто не учитывают характер изменения тепловых деформаций рабочих органов в трех взаимно перпендикулярных направлениях, а также разный характер тепловых деформаций на разных частотах вращения шпинделя.

Использование системы управления на основе контроля тепловых деформаций позволяет посредством предсказания управляющей программы проводить коррекцию тепловых деформаций и размерных погрешностей, что обеспечивает уменьшение значений погрешности формы и размеров.

Наиболее удобным является способ коррекции тепловых деформаций, основанный на измерении температуры в заранее определенных точках станка. Данный способ имеет высокую степень реализации при минимизации затрат на подготовительные работы, стоимость, удобство эксплуатации, а также минимизацию конструкторских изменений узлов станка для установки в этих точках термодатчиков и измерительных преобразователей. Данный способ имеет существенное ограничение, связанное с нахождением той точки, где измеряемая температура будет точно взаимосвязана с тепловыми деформациями узла. Однако определение этих точек можно установить предварительными экспериментальными исследованиями.

В заключение отметим, что рассмотрение имеющихся способов коррекции тепловых деформаций показывает, что все они требуют наличия специальных измерительных систем, устанавливаемых часто в рабочей зоне станка и осуществляющих постоянное измерение значения смещения рабочего органа (например, шпинделя и пр.), температуры нагрева или других параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Базров Б.М.* Расчет точности машин на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.

2. Стародубов В.С., Шаповалов А.Б. Формирование погрешности металлорежущих станков с ЧПУ и пути их снижения // Изв. вузов. Машиностроение. 1985. № 1. С. 125–130.
3. Пуш А.В. Основные принципы проектирования прецизионных и сверхпрецизионных станков // СТИН. 1999. № 3. С. 12–14.
4. Chen C., Zhang J.F., Wu Z.J., Feng P.F. Real-time measurement of machine tool temperature fields and their effect on machining errors // *Mechanika*. 2011. Vol. 17 (4). P. 413–417.

## REFERENCES

- [1] Bazrov B. M. Raschet tochnosti mashin na JeVM [Calculation accuracy of machinery using a computer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 256 p.
- [2] Starodubov V.S., Shapovalov A.B. Formation of errors of machine tools with CNC and ways to reduce them. Formation errors of machine tools with CNC and way of their decrease. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinostr.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1985, no. 1, pp. 125–130 (in Russ.).
- [3] Push A.V. Basic principles of designing of precision and super-precision machine tools. STIN (Stanki i instrumenty) [Stanki Instrum.], 1999, no. 3, pp. 12–14 (in Russ.).
- [4] Chen C., Zhang J.F., Wu Z.J., Feng P.F. Real-time measurement of machine tool temperature fields and their effect on machining errors. *Mechanika*, 2011, vol. 17, no. 4, pp. 413–417.

Статья поступила в редакцию 16.12.2013

Ягопольский Александр Геннадиевич — старший преподаватель кафедры “Металлорежущие станки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 25 научных работ в области станкостроения, надежности станков и диагностики оборудования.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Jagopolskiy A.G. — senior teacher of “Metal-Cutting Machine-Tools” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 25 publications in the field of machine-tool manufacture, reliability of machine-tools and diagnostics of equipment.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Крикунов Дмитрий Эдуардович — студент кафедры “Металлорежущие станки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области испытаний узлов и механизмов металлорежущих станков.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Krikunov D.E. — student of “Metal-Cutting Machine-Tools” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of several publications in the field of diagnostics, testing metal-cutting machines and another industrial equipment.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.