

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОБЛЕМ И СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

В работе показаны основные направления совершенствования конструкций современных станков, учитывающие повышение их теплоустойчивости. Выполнен анализ современного состояния теплового моделирования металлорежущих станков. Приведена классификация тепловых моделей. Показано, что наиболее перспективными направлениями дальнейшего развития теплового моделирования металлорежущих станков являются модальный и стохастический подходы.

Достоверно известно, что тепловые деформации составляют существенную долю в общем балансе погрешностей при изготовлении деталей на металлорежущих станках. Погрешности, вызываемые тепловыми деформациями, составляют до 30...70% от общей погрешности обработки. Особенно заметно их влияние при выполнении чистовых операций, при которых статические и динамические деформации упругой системы станка не оказывают существенного влияния на погрешности, и при обработке небольших партий деталей, когда необходима быстрая стабилизация и постоянство теплового режима оборудования.

Возникающее при работе станка температурное поле приводит к изменению относительного положения инструмента и заготовки, причем линейные изменения относительного положения инструмента и заготовки приводят к размерным погрешностям, а угловые – к погрешностям формы и расположения. Тепловые деформации узлов и деталей станка, приводящие к снижению точности обработки носят сложный характер и зависят от многих факторов: конструкции и компоновки станка, теплофизических характеристик материалов, из которых изготовлен станок, условий теплообмена, мощности тепловыделений в источниках тепла и т.д.

Источники тепла, формирующие температурное поле станка, по своему характеру могут быть разделены на две категории: внутренние и внешние. К первым относят узлы станка, в которых теплообразование является следствием механических, гидравлических и электрических потерь, ко вторым – окружающая среда (различные отопительные устройства, цеховые системы охлаждения и т.п., вызывающие нестабильность температуры окружающей среды). Обычно теплообразование в узлах и механизмах точных и высокоточных станков является основным фактором, определяющим температурное поле и тепловые деформации станков этих классов, т.к. теплообразование в процессе резания ввиду малости при-

пусков незначительно, а влияние внешних источников тепла на точность обработки практически может быть полностью исключено путем стабилизации температуры цеха.

Совершенствование конструкций металлорежущих станков, повышение производительности и точности обработки предъявляет особые требования к их теплоустойчивости.

Современное станочное оборудование характеризуется стремительным ростом технических характеристик, стимулируемых совершенствованием технологии производства и современными инструментальными материалами. Многие фирмы оснащают станки быстроходными шпиндельными головками с повышенной частотой вращения шпинделя. При этом отмечается, что в большинстве случаев крутящий момент на шпинделе не возрастает, что связано с расширением областей использования металлорежущих станков (МС) и гибких производственных модулей (ГПМ) для обработки деталей из легких сплавов и синтетических материалов.

Для возможности обеспечения высокой частоты вращения шпинделя шпиндельные узлы большинства МС устанавливаются на прецизионных радиально-упорных шарикоподшипниках по схеме триплекс или дуплекс в передней опоре и по схеме дуплекс в задней; преобладают системы масловоздушного и обильного смазывания. На отдельных МС шпиндельные узлы скоростного исполнения устанавливаются керамические шариковые подшипники в сочетании с интенсивным охлаждением корпуса узла. В ряде случаев используются мотор-шпиндели на электромагнитных подшипниках с высокочастотным электроприводом.

Скорость быстрых перемещений узлов у большинства МС составляет 15 – 25 м/мин., а на МС модели ХНС 240 фирмы Ex-Cell-o (Германия) скорость быстрых перемещений узлов возросла до 80 м/мин. В качестве приводов перемещения используют электродвигатели постоянного или переменного тока с шарико-винтовыми передачами (ШВП) на конечном звене, либо электроприводы на базе

линейных двигателей с максимальной скоростью 150-210 м/мин. Увеличение скорости быстрых перемещений до 30-40 м/мин. при использовании электродвигателей в сочетании с ШВП на конечном звене вызывает необходимость обеспечения частоты вращения до 3000 – 4000 мин⁻¹.

Анализ современного оборудования показал, что основным путем повышения точности новейшего станочного оборудования является всемерное уменьшение тепловых погрешностей и погрешностей позиционирования узлов. А в связи со значительным увеличением скорости быстрых перемещений, частоты вращения шпинделя и мощности главного привода минимизация тепловых деформаций является особенно актуальной.

Уменьшение тепловых погрешностей достигается тремя способами. Первый способ – это воздействие на температурное поле. Здесь используется либо сокращение тепловыделения, либо управление температурным полем, путем перераспределения градиента температур. Второй способ связан с непосредственным воздействием на поле тепловых деформаций станка без учета управления температурным полем. Этот способ предполагает снижение влияния температурного поля на геометрическую точность станка, что достигается совершенствованием компоновки станка и использованием специальных систем охлаждения. Третий способ связан с автоматической компенсацией тепловых погрешностей.

Первый способ реализуется путем совершенствования конструкций конечных звеньев приводов: шпиндельных узлов и тяговых механизмов в приводах подач. Это достигается использованием особо точных подшипников и подшипников с малыми потерями на трение; применением наиболее совершенных смазочных материалов при их строгом дозировании; применением масляно-воздушной системы смазывания; охлаждением корпуса шпиндельного узла и коробки скоростей путем использования проточной системы со стабилизацией температуры масла. Кроме того, у всех новых МС имеется герметизированное устройство защиты рабочей зоны, в которую обильно подается СОЖ, что существенно снижает нагрев соответствующих узлов. В современных электродвигателях отвод генерируемого ими потока теплого воздуха от станка обеспечивается наличием у них системы вентиляции. Использование направляющих качения также способствует уменьшению тепловыделения в подвижных элементах станка.

Второй способ уменьшения тепловых деформаций станков предполагает придание его базовым деталям симметричной формы. Так в большинстве

современных МС используются П-образные (портальные) стойки с центрально-расположенными шпиндельными бабками и с центрально (симметрично относительно направляющих стойки) расположенной ШВП.

Современные системы ЧПУ типа CNC при наличии соответствующего программно-математического обеспечения позволяют автоматически компенсировать тепловые смещения шпинделя относительно стола станка.

Анализ конструкций современных станков выводит проблему их теплоустойчивости на одну из ведущих позиций в связи со значительным увеличением скоростей быстрых перемещений узлов, частоты вращения шпинделя, мощности главного привода, а также непрерывно повышающимися требованиями к точности обработки. Вместе с этим важнейшим направлением совершенствования процесса проектирования является разработка систем CAD/CAM/CAE. Рассматривая тепловое проектирование как процесс, обеспечивающий оптимальные тепловые характеристики технической системы, можно сформулировать тезис, что «совершенствование теплового проектирования металлообрабатывающих станков» – это актуальное направление научных исследований. С начала своего развития САПР постоянно развивались по двум независимым и вместе с тем взаимодополняющим путям. Первый связан с совершенствованием сервисных возможностей систем. Второй – с совершенствованием математической модели проектируемого объекта. Если первое направление определяет работоспособность и гибкость САПР в новых условиях ее технического обеспечения, то второе направление отвечает стремлению достижения адекватности математической модели реальным процессам, происходящим в технических системах. Одной из развиваемых в последнее время идей совершенствования математических моделей различных технических систем является переход от детерминированных моделей к вероятностным и статистическим. Учитывая, что температурный процесс в натуральных условиях является нестационарным случайным процессом, а адекватность модели достигается максимальным приближением ее структуры к структуре реального процесса, то для получения адекватных тепловых моделей следует использовать вероятностный подход.

В этих условиях разработка новых конструкций предполагает выполнение трех основных этапов: собственно проектирование; изготовление и испытание опытного образца; доводка конструкции и корректировка технической документации по ре-

зультатам испытаний. Для ускорения запуска в производство нового изделия необходимо иметь интегрированную автоматизированную систему, рассматривающую каждый из этапов с единых методологических позиций.

На первом этапе необходимо получать оценочные расчеты, позволяющие конструкторам избавляться от принципиальных ошибок. На втором этапе при проведении испытаний необходимо использовать идентификационную модель. На третьем этапе целесообразно иметь набор средств моделирования, позволяющих избежать утомительных многовариантных расчетов.

Таким образом, совершенствование теплового проектирования металлорежущих станков в условиях развития компьютерных интегрированных производств непосредственно связано с совершенствованием тепловых моделей металлорежущих станков. Совершенствование тепловых моделей предполагает реализацию трех путей. Первый путь связан с развитием тепловых моделей, предполагающих решение задачи теплопроводности в различных постановках: прямой; обратной, в качестве инструмента для проведения идентификации, а также в экстремальной постановке – в целях проведения оптимизации конструкции. Второй путь совершенствования модели предполагает введение дополнительных факторов, не учтенных в первоначальной модели. Третий путь – переход от детерминированного подхода к стохастическому с развитием не только статистического моделирования, но и вероятностного.

Если рассмотреть состояние современного уровня теплового моделирования в металлорежущих станках, то весь спектр существующих моделей, охватывающий тепловые явления в металлорежущих станках, можно классифицировать по нескольким признакам.

Первый признак: по выбору объекта решаемой задачи. Здесь выделяют модели, предназначенные для построения: температурного поля; поля тепловых деформаций и совместного построения температурного поля и поля тепловых деформаций.

Второй признак: по классу решаемой задачи – прямые, обратные и оптимизационные. Модели, в которых решаются прямые задачи, т.е. устанавливаются причинно-следственные связи, и получают оценки либо температуры, либо тепловых деформаций, при этом вектор нагрузок считается определенным. Напротив, в моделях, в которых требуется получение решения обратной задачи, т.е. восстановления причинных характеристик, находят вектор нагрузки либо по измеренному вектору температур, либо деформаций. Модели, связанные

с поиском оптимальных параметров отдельных элементов станка, предполагают наличие в качестве ядра модели, оптимизационных задач.

Третий признак: по принятому уровню моделирования. По этому признаку модели можно разделить на оценочные или упрощенные и полные или подробные. Оценочные модели построены таким образом, что не требуют сложных вычислений и обеспечены простейшими и бесспорными гипотезами, получившими общее признание. Полные модели предполагают наличие всех самых современных научных гипотез, сложных и подробных расчетных схем.

Четвертый признак: по степени автоматизации модели разделяются на удобные для автоматизации и сложно реализуемые в автоматизированных системах. Здесь также отдельно следует выделить группу моделей как «модели – расчеты» – совокупность не связанных в единую систему расчетов, теоретически объединенных в единой модели.

Пятый признак: по характеру случайности учитываемых величин модели разделяются на детерминированные, вероятностные и статистические.

Шестой признак: по виду получаемого решения модели подразделяются на численные, аналитические и численно-аналитические.

Седьмой признак: по количеству экспериментальной информации, присутствующей в модели, – экспериментальные, теоретические и теоретико-экспериментальные или экспериментально-теоретические.

Восьмой признак: по уровню универсальности различают универсальные и специальные модели. Универсальные модели предназначены для решения тепловых проблем для любого объекта безотносительно к его физическому происхождению. Специальные – учитывают служебное назначение технического объекта, для которого используется данная модель.

Девятый признак: по виду функций, участвующих в модели, величине степени участвующих аргументов, линейные и нелинейные.

Десятый признак: по наличию функциональной связи между выходными величинами и входными параметрами различают замкнутые и разомкнутые модели.

Одиннадцатый признак: по характеру временных связей, участвующих в модели. По этому признаку модели различаются как стационарные и псевдостационарные или нестационарные.

Принятые признаки классификации в большей степени относятся к тем методам, которые в основном их формируют. Поэтому в любой из суще-

ствующих моделей присутствуют несколько признаков одновременно.

В последнее время в области динамических исследований станков большую известность получил модальный анализ. Основные принципы модального анализа были заложены гораздо раньше, чем он нашел свое применение в технике. Первая работа, которая положила начало его распространению в динамике машин, была представлена в 1947 г. Kennedy и Ransu. Однако лишь с развитием вычислительной техники модальный анализ получил свое признание. С начала 60-х годов резко активизировались разработки, связанные с реализацией модального анализа. На сегодняшний день модальный анализ – это хорошо развитая и перспективная отрасль научных исследований. С 1982 г. регулярно проводятся международные симпозиумы по модальному анализу, начиная с 1986 г. в США выходит научно-технический журнал по модальному анализу.

Для решения задач теплообмена модальный анализ впервые был использован в 1983 г. Т.М. Shi и J.T. Skladany. Применительно к тепловым моделям станков или отдельных их узлов модальный анализ не получил пока широкого распространения. Наиболее полное представление о современном уровне использования идей модального анализа в тепловом моделировании можно получить из работ [1-3]. Главная цель, которую преследовали авторы в работе [1], это получение достоверных значений мощностей тепловыделения в источниках тепла путем решения задачи идентификации. Рост температуры измерялся в нескольких точках вокруг источников тепла. Коэффициенты теплоотдачи считались известными. После сопоставления результатов измерений и расчета определялись мощности тепловыделения.

Эффективность модели проверялась на вертикальном обрабатывающем центре. Все источники тепла находились в шпиндельной бабке: передний подшипник главного шпинделя; задний подшипник приводного вала; задний подшипник главного шпинделя; передний подшипник приводного вала; двигатель привода главного движения. Измерения проводились в 35 точках с интервалом 6 часов при частоте вращения 1000, 2000, 3500 мин⁻¹. Используя экспериментальные значения температур, были определены тепловыделения в источниках тепла, а затем уточнены установившиеся температуры вокруг них. Предложенная авторами тепловая модель станка позволила разработать методику ускоренных испытаний и сократить время тепловых испытаний до 15 мин.

В работах [2-4] изложен в наиболее полном виде модальный подход к тепловому моделированию металлорежущих станков на примере шпиндельных узлов (ШУ). Рассматриваются возможные аспекты применения модального подхода и модального анализа в тепловом моделировании металлорежущих станков. Приведена детерминированная модель шпиндельного узла небольшой размерности.

Достаточно полная статистическая модель ШУ изложена в работах [5, 6]. В данном случае богатый экспериментальный материал позволил получить статистические оценки для всех характеристик шпиндельного узла, т. е. как тепловых, так и деформационных. Предложенная модель может быть отнесена к классу подробных или полных моделей в силу достаточно большого многообразия используемых гипотез. Подробно рассмотрено формирование всех компонентов тепловой модели ШУ. Предлагаются модели, не только используемые при проектировании шпиндельного узла, но и при управлении его точностью. Предложенная модель обеспечивает прогнозирование параметрической надежности.

Таким образом, исходя из приведенного выше анализа состояния исследований в данной области, можно сформулировать следующие выводы:

1. Тепловые деформации оказывают существенное влияние на точность обработки; погрешности, обусловленные их действием, составляют от 30 до 70% в общем балансе погрешностей обработки в зависимости от типоразмера станка.

2. Существующие на сегодняшний день тепловые модели предусматривают проведение анализа теплового состояния станка и отдельных его узлов только путем анализа его температурного поля, что при необходимости выполнения многовариантных расчетов значительно снижает эффективность теплового проектирования.

3. Все получившие в настоящее время распространение теоретические тепловые модели можно отнести либо к упрощенным, в основном базирующимся на использовании аналитических решений задач теплопроводности для тел простой геометрической формы, либо к подробным, основанным на использовании численных методов.

4. Главным препятствием построения адекватных тепловых моделей в металлорежущих станках является неопределенность задания коэффициентов теплоотдачи по участвующим в конвективном теплообмене поверхностям и мощности тепловыделения в источниках тепла. Известным средством математического моделирования, позволяю-

щим преодолеть это препятствие, является идентификация, не нашедшая достаточного распространения в существующих тепловых моделях.

5. Получивший в настоящее время в динамике станков большую популярность модальный анализ позволяет разрабатывать математические модели, предназначенные для решения как прямых, так и обратных (идентификация) задач. Кроме того, модальный анализ позволяет проводить анализ динамического состояния станков и отдельных его узлов по их динамическим характеристикам, построенным по информации, полученной в результате решения прямой задачи.

6. Среди получивших наибольшее развитие моделей отмечается доминирующее положение детерминированных моделей. Наиболее дорогими являются статистические модели в силу их значительной сложности, обусловленной получением экспериментального материала. Их применение не нашло пока широкого применения. Вероятностные модели, способствующие решению аналогичных со статистическими задач моделирования, в литературе не нашли отражение.

7. Наличие экспериментальной информации позволяет строить статистические модели, позволяющие осуществлять прогнозирование параметрической надежности и оптимизировать не только соответствующие конструктивные параметры конструкций, но и эксплуатационные нагрузки для обеспечения заданной точности.

8. Наличие вероятностных моделей не нашло

должного отражения в тепловом моделировании станков, хотя использование численно-аналитических методов моделирования должно способствовать их практической реализации.

9. В тепловом моделировании шире начинают использоваться методы, получающие все большее развитие в сопряженных областях исследований станков – динамике. Это, в частности, относится к методам модального анализа.

10. Наблюдается общая тенденция повышения адекватности строящихся моделей.

11. Отсутствие на рынке программного обеспечения систем автоматизированных расчетов, кроме известных систем зарубежного производства.

Таким образом, состояние современного теплового моделирования позволяет считать актуальным предложенное направление исследований и сформулировать следующие задачи совершенствования теплового моделирования:

1) разработка процедур редукции и компактных схем хранения матриц, способствующих решению задач большой размерности;

2) разработка детерминированной модели металлорежущего станка, сочетающая построение температурного поля и поля тепловых деформаций станка;

3) разработка на основе предложенной детерминированной модели вероятностной модели станка;

4) разработка соответствующих алгоритмов и программно-математического обеспечения детерминированной и вероятностной моделей.

Список использованной литературы:

1. Matsuo M., Yasui T., Inamura T., Matsumura M. High speed test of thermal effects for a machine-tool structure based on modal analysis // Precision Engineering. – 1986. – vol.8, № 2. p. 72–80.
2. Хомяков В.С., Досько С.И., Поляков А.Н. Применение теоретического модального анализа к расчету температурных полей в металлорежущих станках // Известия вузов. Машиностроение. – 1989. – №9. – С.154 – 158.
3. Хомяков В.С., Досько С.И., Поляков А.Н. Использование принципа декомпозиции в тепловых расчетах металлорежущих станков // Известия вузов. Машиностроение. – 1990. – № 5. – С.141–145.
4. Поляков А.Н. Разработка метода анализа теплового состояния шпиндельных узлов на основе модального подхода // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. № 053291. М.: 1991. 24 с.
5. Пуш А.В. Прогнозирование тепловых смещений шпиндельных узлов. – Станки и ин-т, 1985, № 5, с.15–19.
6. Пуш А.В. Шпиндельные узлы. Качество и надежность. – М: Машиностроение, 1992, 288 с.