

вильной простановке размеров, и проводится соответствующая корректировка размеров, проставленных на чертеже.

Таким образом, исходные данные алгоритма наиболее рационально представлять в виде рабочего чертежа детали. Результаты выбора баз необходимо представить в виде теоретических схем базирования и указать установочные элементы для их реализации.

Создание программного продукта для реализации описанной методики целесообразно при условии интеграции с САПР, имеющей чертежно-графический редактор, в качестве которой выбрана система КОМПАС-3D, благодаря возможности поддержки библиотек (приложений, созданных для расширения стандартных возможностей КОМПАС-3D).

Следует отметить, что окончательное решение о приемлемости выбранных черновых и чистовых технологических баз принимается по критерию обеспечения точности всех чертёжных размеров детали путём составления и решения подетальных технологических размерных цепей:

ЛИТЕРАТУРА

1. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.: ил.
2. Проектирование технологии: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов./ Под общ. ред. Ю.М. Соломейцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.: ил.
3. Махаринский Е.И., Горохов. Основы технологии машиностроения: учебник. – Мн.: Вышэйш. шк, 1997.
4. Кидрук М. Конструкторские библиотеки и инструменты для их создания в системе КОМПАС-3D // Сапр и графика. – 2006. – № 2.

УДК 621.92:539.377

Архутик С.В.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Григорьев В.Ф.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Высокоскоростная обработка (ВСО) является приоритетным направлением развития современной обработки резанием. Для эффективной реализации процесса ВСО необходимо изменение конструкции металлообрабатывающих станков (направляющих, шпиндельных опор, способных надежно работать на высоких скоростях вращения и при линейных перемещениях), применение новых типов приводов главного движения и поддачи, разработку специальных материалов, покрытий и новых конструкций режущего инструмента (твердосплавного, абразивного).

Основные достоинства ВСО состоят в повышении производительности труда, высокой точности и качестве изготовления изделий, сокращении количества ручных доводочных операций и времени на подгонку. Так, при высокоскоростном фрезеровании производительность при обработке инструментальных сталей высокой прочности увеличивается в три раза, алюминиевых сплавов – в 10 раз, графитовых электродов – более чем в 10 раз [1].

Актуальной проблемой для успешной реализации ВСО прецизионных изделий является стабилизация тепловых деформаций. Тепловые деформации возникают в результате действия трех факторов: тепла, выделяемого двигателями, гидравлической системой и при трении движущихся частей станка; непостоянства температуры помещения, в котором находится станок; тепла, образующегося в процессе резания. Эти деформации могут быть существенны, поскольку механическая работа резания почти пол-

ностью превращается в теплоту, которая распределяется между режущим инструментом, обрабатываемой деталью и стружкой, а через отходящую стружку – на элементы станка. Допускаемые температурные деформации технологической системы могут составлять 20...30% от технологического допуска. Отмечается, что температурные деформации частей станка в начальный период работы протекают весьма интенсивно, затем интенсивность уменьшается.

Одним из важнейших узлов для достижения требуемой точности с учетом тепловых деформаций является станина. Станины высокоскоростных станков выполняются термосимметричными и чрезвычайно жесткими. Несмотря на то, что теплостойкие полимербетоны находят применение в современном станкостроении, всё-таки чугун (как правило, высокопрочный) применяется чаще. Компьютерный расчёт механических деформаций и тепловых потоков позволяет с достаточной точностью вычислить величины механических и тепловых деформаций и выбрать современные методы их компенсации. Так, применение термостабилизирующих систем позволяет без предварительного разогрева прецизионного станка при обработке партии деталей в течение 0,5...1,5 часов получать разброс размеров в пределах 4-6 мкм. Для получения таких результатов при охлаждении отдельных участков станка используют холодильники охлаждающей жидкости, устанавливаемые вне станка [2].

Критичным компонентом высокоскоростных шпиндельных узлов (ВШУ) является система подшипниковых опор, от правильности выбора которой зависит интенсивность тепловыделения. Применяемые в современных конструкциях высокоскоростных ШУ подшипники – это опоры качения, гидростатические, гидродинамические, магнитные и газостатические. Каждый из этих типов опор имеет свои преимущества и недостатки. Так, для подшипников качения предельная частота вращения составляет $60...80 \cdot 10^3$ мин⁻¹. При этом, потеря заданной точности вращения наступает после 1000...2000 часов работы ШУ. У высокоскоростных подшипников увеличение температуры тел и дорожек качения происходит значительно быстрее, так как вызвано микроскопической «холодной сваркой» материала шариков с кольцами. Эти микросоединения разрушаются при движении, ухудшая шероховатость поверхности, что приводит к нагреву и уменьшает ресурс ШУ.

Альтернативным решением в технологии изготовления подшипников является использование керамики (нитрида кремния) для изготовления тел качения и колец. Керамические шарики при использовании в подшипниках с угловым контактом имеют преимущества перед стальными. Керамические шарики имеют на 60% меньшую массу, что особенно важно на высоких скоростях. Центробежные силы прижимают шарики к наружному кольцу, вызывая их деформацию, приводящую к потере точности и быстрому износу. Использование керамических подшипников позволяет увеличить на 30% максимальную скорость вращения для данного типоразмера подшипника без сокращения долговечности, поскольку керамические шарики не реагируют со стальными кольцами. Благодаря практически идеальной круглости керамических шариков, такие подшипники работают при температуре на 5-7С° ниже температуры работы стальных подшипников. Результатом является более долгий срок службы смазки подшипников.

Использование магнитных подшипников в ВШУ позволяет создать бесконтактные шпиндели со значением скоростного параметра $d_m \cdot n > 3,5 \cdot 10^6$ мм · мин⁻¹. Магнитные опоры не подвержены износу, имеют крайне высокую долговечность, высокую плавность при работе, не требуется отдельной системы подачи воздуха и жидкости, отсутствует удлинение вала из-за нагрева, свойственное шариковым подшипникам. Благодаря развитию средств электронного контроля и управления стало возможным настолько быстрое получение информации от датчиков положения подшипников и обработка этих данных, что можно говорить о динамической балансировке шпинделей с магнитными подшипниками

непосредственно в процессе работы. Такая возможность открывает новые перспективы по точности и шероховатости обработки [3].

Основным аргументом, ограничивающим применение магнитных опор, является стоимость шпиндельного узла из-за необходимости использования сложной электронной аппаратуры и дополнительных периферийных компонентов. Однако расчеты, проведенные фирмой SKF, показали, что при использовании динамической балансировки шпинделя общие затраты в течение всего срока эксплуатации на 15% ниже, чем для шпинделя с шариковыми подшипниками. Помимо балансировки шпинделя с инструментом, экономия достигается за счет затрат на ремонт, масло и сжатый воздух (для системы смазки), потерь на трение в подшипниках.

Гидростатические и гидродинамические подшипники обеспечивают высокие скорости вращения (до 45000 мин^{-1}), низкое биение шпиндельного вала (менее $0,1 \text{ мкм}$) и большую долговечность благодаря отсутствию механического контакта. В то же время жесткость этих подшипников может превышать жесткость шариковых подшипников. Гидравлические подшипники также обеспечивают лучшее виброгашение по сравнению с обычными подшипниками.

Недостатками гидравлических подшипников являются вязкостные потери. Большая часть мощности двигателя уходит на преодоление сопротивления гидравлической жидкости. Кроме того, эти подшипники требуют более интенсивного охлаждения, так как потери на преодоление сопротивления приводят к избыточному нагреву, делая их пригодными в основном для черновой низкоскоростной обработки.

Шпиндельные опоры на газостатической смазке способны работать надёжно и долговечно при большой окружной скорости и обладают рядом преимуществ перед другими видами опор.

Главные их достоинства – повышенная плавность вращения; высокие значения $d_m \cdot n$ – до $2,5 \cdot 10^6 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$; большая долговечность; отсутствие необходимости в «разогреве» шпинделя; существенное уменьшение потерь на трение; отсутствие загрязнения смазкой окружающей среды.

Недостатком газовых подшипников является невысокая несущая и демпфирующая способность смазочного слоя, что при тяжелых режимах работы ведет к снижению точности обработки. Применяют такие опоры в малонагруженных ВШУ, когда динамические нагрузки малы, а статические регламентированы. Улучшить эксплуатационные характеристики шпиндельных газостатических подшипников способны опоры с частично пористой стенкой вкладыша.

Важным конструктивным фактором, влияющим на температурные деформации, является метод смазывания подшипников. Обычные шариковые подшипники с угловым контактом требуют для нормальной работы в большинстве случаев использование консистентной или жидкой смазки, что иногда недостаточно при ВСО.

Для достижения значений $d_m \cdot n > 2,0 \cdot 10^6 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$ на основании проведенных опытов фирма УСМ (Тайвань) рекомендует охлаждение мотор-шпинделя производить комбинированно. Статор двигателя должен иметь жидкостное охлаждение, а подшипники и ротор должны охлаждаться циркулирующим воздухом, что обеспечивает быструю реакцию на термические всплески и точную обработку на станке [2].

Высокая скорость вращения подшипников достигается при смазывании «масляным туманом» ($d_m \cdot n = 0,8 + 1 \cdot 10^6 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$). Основными преимуществами этого способа является хорошая подача смазки и простота: масляный туман одновременно очищает и охлаждает подшипники. Однако такой способ смазки оказывает серьезное воздействие на окружающую среду, загрязняя рабочую зону аэрозолью, и требует дополнительных средств защиты.

Возможна комбинированная смазка шпиндельных подшипников: с помощью сжатого

воздуха, который подаётся не в качестве жидкого распылённого масла (масляный туман), а также консистентной смазки, которая в микроскопических количествах подается непосредственно в каждый подшипник, обеспечивая надежное и качественное смазывание. Такая технология запатентована фирмой YCM и названа Hi-Lub technology.

Достижением фирмы NTN (Япония) является разработка оригинальных систем смазывания консистентной смазкой и масляным туманом, которые обеспечивают рекордные скорости для подшипников с керамическими шариками ($d_m \cdot n > 2,0 \cdot 10^6$ мм·мин⁻¹). В системе с использованием консистентной смазки она закладывается во внутренний накопитель один раз на весь период эксплуатации. Расширяющееся масло в зависимости от температурного изменения в течение работы подаётся микроскопическими дозами непосредственно к шарикам. А новая разработка для подачи «масляного тумана» этой фирмы обеспечивает максимальную величину $d_m \cdot n > 5,0 \cdot 10^6$ мм·мин⁻¹ – наилучший в мире результат. Подаваемая к внутреннему кольцу смазка гасит перегрев шпинделя, охлаждая внутреннее кольцо подшипника струёй смазки. При этом возможен более высокий предварительный натяг, а стало быть, и жёсткость шпиндельного узла при уровне потери мощности, равной традиционной смазке «масляным туманом».

Производство с высокой степенью надёжности процесса обработки обеспечивается с помощью так называемого Condition Monitoring – системы широкого наблюдения и контроля. Фирма IBAG Switzerland AG опционально снабжает свои мотор-шпиндели разнообразными датчиками и исполнительными элементами, которые с высокой точностью измеряют смещения шпиндельного вала (рис. 1).

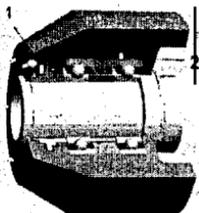


Рис. 1 – Оснащение Condition Monitoring мотор-шпинделя:
1 – датчик аксиального смещения вала;
2 – датчик измерения температуры

Полученный от датчика аналоговый сигнал используется устройством ЧПУ для расчета компенсации смещения вала. Компенсация смещения по нормали к обрабатываемой поверхности существенно повышает точность и качество обработки [4].

Дополнительно предлагается программное обеспечение P-Calc, базирующееся на обширной базе данных по материалам заготовок, режущему инструменту и ШУ с Condition Monitoring. На основании исходных данных и базы данных P-Calc рассчитываются необходимые мощности и моменты шпинделя, а также радиальные и аксиальные силы резания, действующие на инструмент и шпиндель. Следующим шагом является расчет оптимальных режимов резания и планирование подходящего для каждого конкретного приложения технологического процесса. Кроме того, применение программного обеспечения P-Calc позволяет избежать выбора недопустимых режимов резания, ведущих к перегрузкам и потере точности.

Проведенный анализ подтверждает перспективность развития средств компенсации и стабилизации тепловых деформаций при ВСО. В мировой практике преобладают следующие направления исследовательских и конструкторских работ: применение керамических подшипниковых узлов вместо стальных; использование бесконтактных подшипниковых опор, не имеющих механического износа и обладающих большой долговечностью; разработка безопасных и высокоэффективных систем смазывания; контроль всех составляющих работы шпинделя с помощью электронных датчиков; создание требуемого программного обеспечения для самодиагностики и расчета компенсации смещения шпиндельного вала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Локтев Д. Шпиндельные узлы / Д. Локтев // Стружка. – 2002. – № 5. – С. 12-15.
2. Юденков Н. Узлы станков / Н. Юденков // Комплект: ИТО. – 2008. – № 2. – С. 4-10.
3. Локтев Д. Шпиндельные узлы / Д. Локтев // Стружка. – 2003. – № 4. – С. 16-22.
4. Титов В. Автоматическая компенсация тепловых деформаций шпиндельных узлов прецизионного оборудования с ЧПУ / В. Титов, М. Бобырь // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – № 11. – С. 31-35.

УДК [621.9:62-502.55]:62-192

Рудюк А.Н.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Горбунов В.П.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА С ЧПУ

В современном машиностроении большую роль играет точность обработки, особенно корпусных прецизионных деталей, отличающимися высокими требованиями к базовым поверхностям, наличием отверстий различного диаметра, расположенных в различных плоскостях и т.д. В результате появилась необходимость использовать металлорежущие станки, которые позволяют обеспечивать требуемые показатели точности и производить многоинструментальную обработку за одну установку детали. Именно эти станками и стали многоцелевые станки (МС) с ЧПУ.

Важнейшим условием при эксплуатации МС с ЧПУ является обеспечение требуемой точности обработки деталей и сохранение ее в процессе заданного периода эксплуатации, что определяется их параметрической надежностью [1].

Для оценки работоспособности объекта и определения показателей его качества необходимо выявить так называемую область состояний, в которой находятся его выходные параметры, и сравнить ее с областью работоспособности, которая определяет границы допустимых значений этих параметров.

При обработке деталей типа плит и корпусных деталей на металлорежущих станках с позиционными и комбинированными системами ЧПУ, где высокие требования предъявляются к точности межосевых расстояний, выходным параметром принята точность выхода рабочих органов в запрограммированное положение [2].

Рабочие органы металлорежущего станка с ЧПУ при перемещении в запрограммированное положение устанавливаются в положении, которое характеризуется в общем виде радиус-вектором, или проекциями данного вектора на соответствующие оси координат. Область существования погрешностей данного радиус-вектора определяется объемом, ограниченным величинами рассеивания проекций погрешности на рассматриваемые оси координат. Существуют также и угловые смещения, так как происходят относительные повороты выбранной системы координат.

В качестве лимитирующей погрешности выходного параметра для термосимметричной конструкции станка горизонтальной компоновки будем рассматривать погрешности перемещения вдоль координаты Y, и в дальнейшем расчет показателей параметрической надежности будем вести для данной погрешности выходного параметра.

Для оценки параметрической надежности МС с ЧПУ необходимо, опираясь на общую модель формирования параметрического отказа [2], предложенную проф. А.С. Прониковым (рис. 1), применять следующие основные показатели:

1. $P(t)$ – вероятность безотказной работы станка по точности обработки за межналадочный период $T_{м.н.}$.

В начальном состоянии: