

УДК 621.9.06

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ МОТОР-ШПИДЕЛЕЙ

Глеб Юрьевич Бохонов

Студент 6 курса

кафедра «Технологии обработки материалов»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Самойлов В.Б.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов»

Ключевые слова: мотор-шпиндель, подшипники качения, выходной контроль.

Key words: motor-driven spindle, ball bearings, outgoing inspection.

Аннотация: В данной работе приведено описание шпиндельных узлов, их основные характеристики и схема. Приведена статистика по причинам выхода из строя мотор-шпинделей на основе 86 восстановленных узлов. Показано, что износ подшипников качения – основная причина остановки шпинделя. Приведены основные меры по сохранению срока службы подшипниковых узлов. Кроме того, рассмотрен пример инспекции мотор-шпинделя на основании двух радиально-упорных подшипников. Описаны основные способы первичной диагностики оборудования для определения исправности узла. Обозначено, какие параметры необходимо контролировать при инспекции шпиндельного узла после разборки. Описана важность и необходимость обкатки, выходного контроля, и приведены основные контролируемые параметры.

Abstract: In the paper the main characteristics and the scheme of the spindle units are described. The failure statistics based on 86 retrofitted motor-driven spindles is listed. It has been shown that the wear of rolling bearings is the main reason for stopping the spindle. The basic measures to preserve the life of the bearing are shown. In addition, the example of the motor-spindle inspection on the basis of the two angular-contact bearings is observed. The basic methods for equipment primary diagnostic for the runability determination are listed. Parameters which need to be monitored after the disassembled spindle unit are indicated. The importance and necessity of the running-in and the output control are described, and the main controlled parameters are shown.

Одним из наиболее ответственных узлов любого станка является его шпиндельный узел (ШУ), всегда участвующий в движении формообразования. На его долю приходится от 50 до 80 % погрешностей в общем балансе частот станка. ШУ, в первую очередь воспринимая эксплуатационные нагрузки и подвергаясь действию процессов различной скорости, должен обеспечивать заданные выходные параметры точности и сохранение их во времени [1].

Шпиндель служит для закрепления инструмента или приспособления с установленной в нем заготовкой. Его быстроходность, точность, жесткость, нагрузочная способность, динамические и тепловые характеристики оказывают существенное влияние на производительность, точность и надежность станка [2].

На рис. 1 представлена схема мотор-шпинделя горизонтального обрабатывающего центра [3], в который входят: шпиндель, статор и ротор, передняя и задняя опоры, элементы смазочной системы, рубашка охлаждения, уплотнения опор, система фиксации инструмента, датчики положения инструмента.

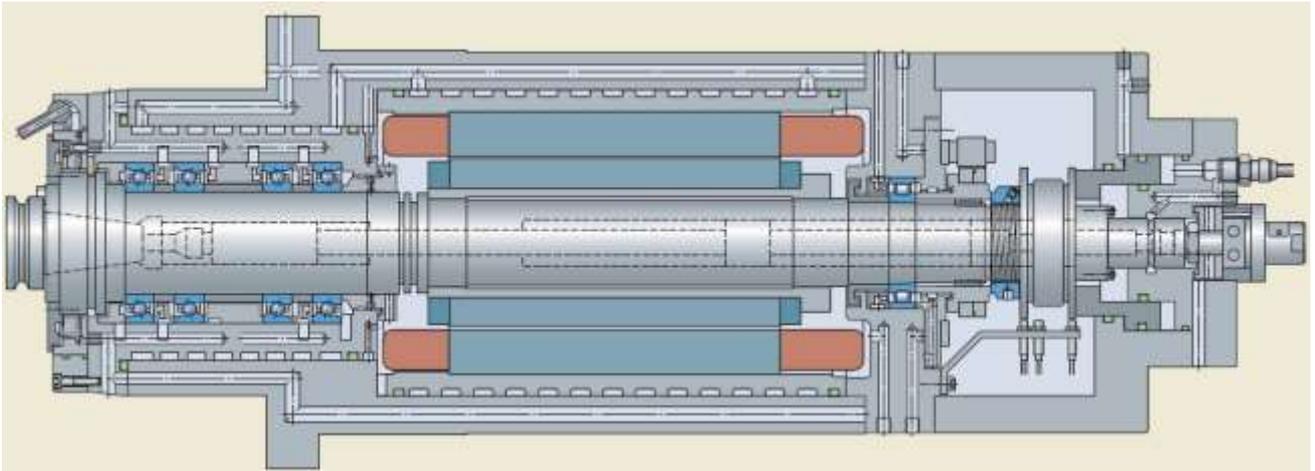


Рис. 1. Схема мотор-шпинделя горизонтального обрабатывающего центра

Общий вид ШУ токарного многоцелевого станка модели NL3000 Mori Seiki (Япония) с частотой вращения 3000 об/мин и мощностью 30 кВт представлен на рис. 2 [4].



Рис. 2. Общий вид ШУ токарного многоцелевого станка Mori Seiki NL3000

При потере геометрической точности или выходе из строя ШУ встает вопрос о его замене. Стоимость мотор-шпинделя составляет от 15 до 30 % от стоимости станка, а с учетом того, что за последние 25 лет производство металлообрабатывающего оборудования в стране сократилось более чем в 30 раз [5], а в 2012 году доля импорта станков в Россию составила 93,3 % [6], приобретение нового ШУ обходится довольно дорого. Более того, сроки поставки могут достигать трех месяцев, что принесет колоссальные затраты предприятию.

В этой связи целесообразней произвести восстановление мотор-шпинделя, так как стоимость работ составляет от 20 до 50 % от стоимости нового изделия, а сроки выполнения, в зависимости от квалификации специалистов и наличия комплектующих, могут укладываться в одну неделю.

По статистике, основанной на инспекции 86 мотор-шпинделей металлообрабатывающих станков с частотами вращения от 2000 до 60000 об/мин и мощностями от 0,5 до 40 кВт восстановленных в период с июня 2013 г. по март 2016 г., основными узлами ШУ, выходящими из строя, являются:

- Подшипники – 75 %
- Вал – 9 %;
- Статор – 6 %;
- Система фиксации – 6 %;
- Гидроцилиндр – 3 %;
- Другие – 1 %.

На рис. 3 приведена причинно-следственная диаграмма, раскрывающая причины выхода из строя узлов ШУ. Как показывает статистика, выход из строя подшипников качения – основная причина потери работоспособности ШУ. Кроме того, остальные причины, в большинстве случаев, также требуют замены подшипников.



Рис. 3. Причины выхода из строя ШУ

Выбор подшипников имеет первостепенное значение, когда речь идет о шпиндельных узлах станков. Факторы, которыми следует руководствоваться при выборе подшипников, следующие:

- Точность;
- Жёсткость;
- Доступное пространство;
- Скорость;
- Нагрузка;
- Осевое смещение;
- Встроенные уплотнения.

Скорость работы подшипников в значительной степени зависит от их рабочей температуры. Высокоточные подшипники, которые создают низкий уровень трения, наилучшим образом подходят для узлов, работающих на высоких скоростях. В целом, шарикоподшипники являются более предпочтительными, чем роликоподшипники для снижения зоны контакта. Однако, гибридные подшипники превосходят по всем свойствам все типы подшипников.

Одним из важнейших показателей ШУ является его быстроходность:

$$A = n \cdot d_m, \text{ где}$$

A – коэффициент быстроходности, мм/мин;

n – частота вращения, об/мин;

$d_m = 0,5 \cdot (D + d)$ – средний диаметр подшипника, мм.

Коэффициент быстроходности в современных мотор-шпинделях может достигать значения 2000000 мм/мин и выше.

Для сохранения срока службы подшипниковых опор мотор-шпинделей рекомендуется:

- Устанавливать комплекты подшипников (дуплекс, триплекс, квадро) с соответствующим значением преднатяга – силы взаимодействия между телами качения и кольцами подшипника. Причины для использования преднатяга следующие: увеличенный коэффициент жесткости, пониженный уровень шума, увеличенный срок службы.

- Для снижения потерь на трение и отвода тепла от подшипниковых опор необходимо использовать смазку, обеспечивающую необходимую быстроходность (со соответствующим значением коэффициента быстроходности A и качества смазки). В зависимости от конструкции мотор-шпинделя возможны следующие варианты смазывания подшипников: консистентной смазкой, масляным туманом, системой масло-воздух, погружением в масляную ванну, циркулирующим маслом, посредством масляного сопла. Стоит учитывать, что консистентная смазка закладывается на весь срок службы подшипника, а при использовании масла в качестве смазочной жидкости необходима его регулярная фильтрация. Предельная частота вращения подшипников выше при смазывании маслом, чем при пластичной смазке;

- Для защиты от попадания загрязнений (мелких дисперсных частиц, стружки и т.п.) предусматривать лабиринтные и манжетные уплотнения;

- Водяное или воздушное охлаждение существенно уменьшает температуру в подшипниковых опорах, за счет отвода теплоты. Важно контролировать качество подаваемой охлаждаемой жидкости или воздуха [3, 7].

Своевременная диагностика оборудования позволяет сохранять существенные материальные средства. При этом, для первичной диагностики, нет необходимости в использовании специального оборудования – оператор может самостоятельно выявить изменения в работе узла. Основными признаками, свидетельствующие о неисправности мотор-шпинделей на этапе эксплуатации, являются:

- Повышенный шум мотор-шпинделя, вызываемый изменениями в зоне контакта взаимодействия тел качения с дорожками качения (износ, старение смазки, попадание инородных частиц на дорожки качения и др.);

- Повышенная температура опор или обмотки статора мотор-шпинделя, свидетельствующая об увеличении сил трения в зоне контакта или изменении электрических параметров (например, увеличение силы тока);

- Повышенный уровень вибрации (виброскорости, виброускорения), сообщающий о наличии дисбаланса шпинделя, изменения жесткости его опор;

- Потеря точности мотор-шпинделя, свидетельствующая об изменении геометрических параметров узлов или смещения подшипников качения в опорах шпинделя. Для измерения геометрической точности достаточно наличие стойки с индикатором, а также контрольной оправки (например, измерение радиального биения инструментального конуса вала, осевого биения у торца конуса вала).

Доведение оборудования до катастрофического износа увеличивает вероятность повреждения большого количества составных частей мотор-шпинделя, что влечет за собой увеличение затрат на восстановление.

При разборке и инспекции мотор-шпинделя важно определить вероятную причину выхода из строя ШУ. При этом стоит обращать внимание, в первую очередь, на подшипники качения, позволяющие смоделировать процессы, приведшие к отказу узла. На рис. 4 изображены два радиально-упорных прецизионных подшипника установленные в передней опоре ШУ токарного многоцелевого станка Mori Seiki NL3000.



Рис. 4. Радиально-упорные подшипники передней опоры ШУ станка Mori Seiki NL3000

Без разборки вышеприведенных подшипников можно сделать следующие выводы:

- Большое количество загрязнений, вызвавшее ухудшение качества пластичной смазки, вызвало ее выработку, что повлекло за собой уменьшение количества отводимого тепла из зоны контакта и ухудшение условий эксплуатации подшипников;
- Фреттинг-коррозия внешних, внутренних и торцевых поверхностей подшипников свидетельствует о повышенном уровне вибрации (виброскорости, виброускорения) шпинделя, что также внесло вклад в ухудшение условий эксплуатации подшипников.

Кроме того, при инспекции после разборки ШУ необходимо контролировать:

- Геометрические параметры посадочных мест под подшипники качения (диаметры шеек вала и внутренних диаметров корпуса);
- Геометрические параметры инструментального конуса вала (радиальное и осевое биение);
- Электрические параметры статора (баланс фаз, сопротивление изоляции обмотки относительно корпуса, коэффициент несоответствия токов);
- Работоспособность системы фиксации (целостность пружин(-ы) сжатия, геометрические параметры кулачков, штока фиксации);
- Работоспособность индуктивных датчиков положения инструмента и энкодера;
- Работоспособность пневмо- или гидроцилиндра (целостность пружин сжатия, уплотнений);
- Работоспособность воздушной или водяной системы охлаждения (чистота каналов, целостность уплотнений).

Обкатка и выходной контроль – одни из важнейших этапов при восстановлении мотор-шпинделей, позволяющие спрогнозировать оставшийся ресурс. В процессе обкатки происходит изменение макро- и микрогеометрии поверхностей трения, обычно уменьшаются сила трения и температура в зоне контакта деталей, снижаются контактные давления вследствие увеличения фактической площади контакта, происходят структурные, физические, химические и механические изменения поверхностных слоев [8]. Для проведения обкатки ШУ необходимо помещение, оборудованное под эту задачу (рис. 5).



Рис. 5. Общий вид комнаты для обкатки ШУ

При выходном контроле необходимо производить измерение:

- Радиального биения инструментального конуса вала, измеряемого с помощью стойки с индикатором. Допуск на радиальное биение инструментального конуса вала мотор-шпинделей особо высокой точности составляет 2,5 мкм [9];
- Температуры подшипниковых опор и корпуса ШУ, зависящие от сил трения в опорах качения и системы охлаждения. Установившаяся избыточная температура корпуса ШУ при номинальной частоте вращения не должна превышать 45 °С [9];
- Средне квадратичного значения вибрационной скорости передней и задней опор на холостом ходу при номинальной частоте вращения. Допуск на средне квадратичное значение вибрационной скорости для мотор-шпинделей особо высокой точности составляет 1,8 мм/с [9];
- Усилия затяга системы фиксации инструмента, которое может достигать, в зависимости от размера инструментального конуса и габаритов мотор-шпинделя, 25 кН.

Заключение

Восстановление высокоточных высокоскоростных мотор-шпинделей является актуальной задачей и позволяет сохранять существенные материальные затраты. Соответствующее определение причины выхода из строя ШУ позволяет сформулировать необходимый комплекс мер по восстановлению его работоспособности. Оставшийся ресурс восстанавливаемых мотор-шпинделей закладывается с помощью качества устанавливаемых комплектующих, зависящих от их правильного выбора и производителя, и качества сборки, определяющегося квалификацией специалиста.

Завершающие этапы восстановления мотор-шпинделей – обкатка и выходной контроль – позволяют спрогнозировать оставшийся ресурс и дать полную оценку технического состояния ШУ.

Литература

1. *Пуш А.В.* Шпиндельные узлы: Качество и надежность. М.: Машиностроение. 1992. 288 с.
2. *Кочергин А. И., Василенко Т. В.* Шпиндельные узлы с опорами качения: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию металлорежущих станков для студентов машиностроительных специальностей. М.: БНТУ. 2007. 124 с.
3. SKF super-precision bearings catalogue, 2013. 422 p.
4. Mori Seiki NL series catalogue, 2007. 56 p.
5. *Гражданкин А.И., Кара-Мурза С.Г.* Белая книга России. Строительство, перестройка и реформы: 1950–2013 гг. / Центр пробл. анализа и гос.-упр. проект. М.: Научный эксперт, 2015. 728 с.
6. К совещанию о мерах по развитию отечественного станкостроения в целях модернизации военно-промышленного комплекса. Режим доступа: <http://government.ru/info/3322/> (дата обращения 17.03.2016).
7. FAG super-precision bearings catalogue, 2010. 241 p.
8. *Самойлов В.Б.* Оценка остаточного ресурса: курс лекций для студентов машиностроительных специальностей. Режим доступа: http://www.bmstu.ru/ps/~samoylov_v/fileman/ls/4-й%20курс (дата обращения 17.03.2016).
9. ГОСТ 14177-88. Шпиндели со строенным приводом. Общие технические условия. Введ. 1990-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1989. 16 с.