

06, июнь 2016

УДК 621.9.06

Оценка технического состояния восстанавливаемых мотор-шпинделей

***Бохонов Глеб Юрьевич**, студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии обработки материалов»*

*Научный руководитель: **Самойлов В.Б.**, к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии обработки материалов»
samoylov.v@bmstu.ru*

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.

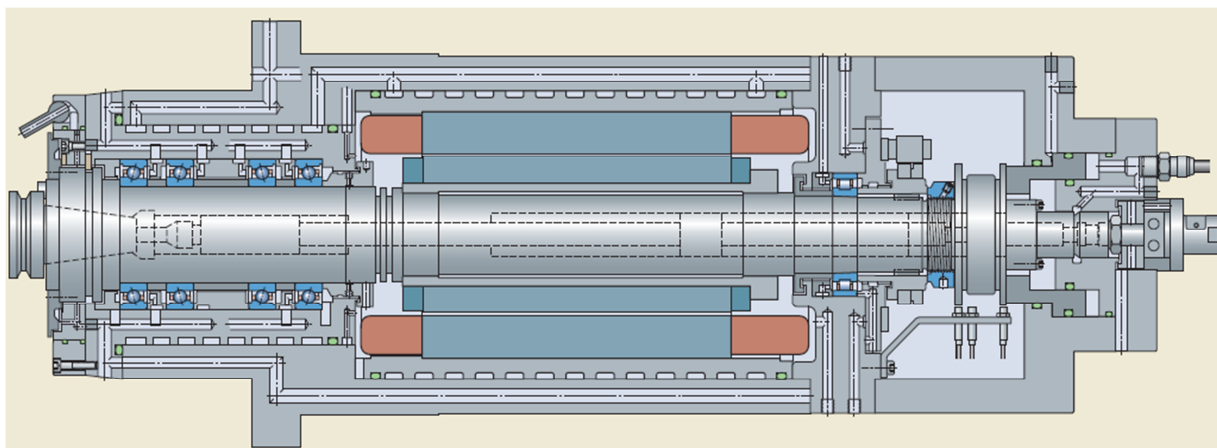


Рис. 1. Схема мотор-шпинделя горизонтального обрабатывающего центра

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].

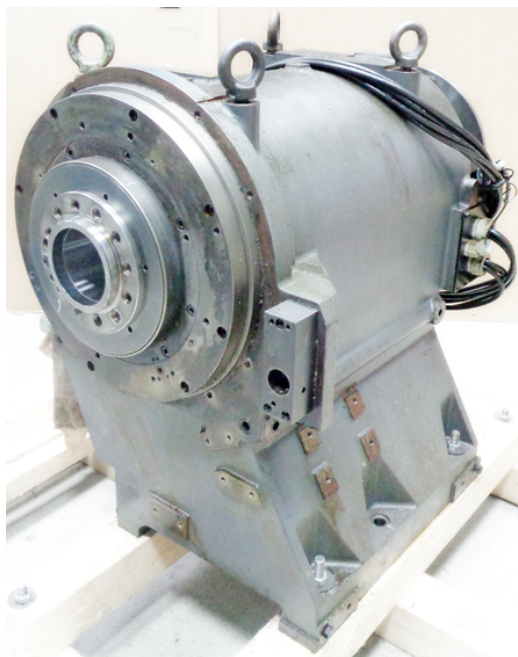


Рис. 2. Общий вид ШУ токарного многоцелевого станка Mori Seiki NL3000

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:

$$A = n \cdot d_m,$$

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 большего количества составных частей мотор-шпинделя, что влечет за собой увеличение затрат на восстановление.

При разборке и инспекции мотор-шпинделя важно определить вероятную причину выходя 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.

Список литературы

- [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]. Подшипники высокой точности фирмы «SKF». Режим доступа: <http://pdf.directindustry.com/pdf/skf/super-precision-bearings-catalogue/9172-422813.html> (дата обращения 28.04.2016).
- [4]. Станки серии «NL» фирмы «Mori Seiki». Режим доступа: http://www.xfactormachine.com/machine_tools/NLSERIES_EA05_LO.pdf (дата обращения 28.04.2016).
- [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 28.04.2016).
- [7]. Подшипники высокой точности фирмы «FAG». Режим доступа: <http://www.acornbearings.co.uk/downloads/catalogues/aerospace/super-precision-roller-bearings/fag-super-precision-bearings.pdf> (дата обращения 28.04.2016).
- [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 28.04.2016).
- [9]. ГОСТ 14177-88. Шпиндели со строенным приводом. Общие технические условия. Введ. 1990-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1989. 16 с.