

ной быстрорежущей стали. Рассмотрим несколько конкретных примеров, отражающих результат нанесения современных качественных покрытий на червячные фрезы «собственного» изготовления нескольких российских заказчиков. Существенное увеличение периода стойкости наблюдается даже в тех случаях, когда сравнение производится с инструментами, на которые потребители наносили износостойкое покрытие на установках предыдущих поколений.

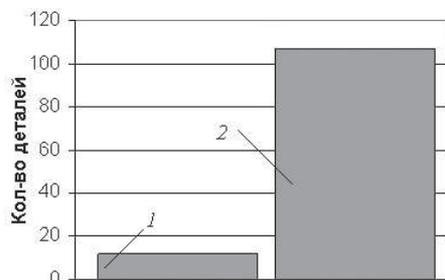


Рисунок 11. Рост стойкости червячных фрез после нанесения покрытия: 1 - стойкость без покрытия; 2 – стойкость с покрытием

На рисунке 11 приведено сравнение стойкости червячной фрезы без покрытия и червячной фрезы с покрытием TiN. Фреза работает на одном из крупнейших российских автомобильных заводов. Приведенные данные получены от московской фирмы «Технологические покрытия», активно работающей на рынке нанесения современных покрытий на червячные фрезы.

Литература

1. Современные методы обработки зубчатых колес / Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А.: Москва, 2012.
2. Критерии оптимизации зубообрабатывающих операций, основанных на различных методах формообразования зубьев / Виноградов В.М., Черепяхин А.А.: Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012. Т. 2. № 2 (14) - с. 238-242.
3. Параметрическая оптимизация зубообрабатывающих операций / Виноградов В.М., Черепяхин А.А.: Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. Т. 2. № 1 (15) - с. 22-30.

Анализ износа и причин выхода из строя подшипников качения высокоскоростных шпиндельных узлов

Решняк С.Е., к.т.н. Максимов А.Д.
Университет машиностроения
8 (962) 988-06-58 anatoliy_litha@mail.ru

Аннотация. В статье приведен анализ факторов, влияющих на ресурс работы подшипников качения высокоскоростных шпиндельных узлов, а также приведены и проиллюстрированы наиболее типичные повреждения подшипников с анализом картины явления износа, его причины и рекомендациями по предупреждению выхода подшипников из строя.

Ключевые слова: шпиндельные узлы, высокоскоростные опоры, подшипники качения, ресурс работы подшипников, проблемы в работе, виды отказов, предупреждение поломок

Одним из наиболее критичных компонентов любого высокоскоростного шпиндельного узла (ШУ) является система подшипников. При конструировании ШУ особое внимание уделяется опорам. В ряде случаев высокоскоростные шпиндельные узлы работают на максимальных скоростях и соответственно имеют невысокую долговечность подшипников. При правильном использовании ШУ типовой срок службы его подшипников, например в Европе – 5...7 тысяч часов.

Срок службы подшипников зависит от следующих основных факторов: скорости,

нагрузки, смазки и размеров подшипников. Подшипники в шпиндельном узле должны обладать большой грузоподъемностью. В ШУ станков для обеспечения высокой грузоподъемности, точности вращения, повышенной жесткости и минимальных тепловыделений, как правило, применяют подшипники качения специальных конструкций. Помимо способности выдерживать радиальную и одностороннюю осевую нагрузки, такие подшипники должны воспринимать осевую нагрузку, действующую в разных направлениях.

Долговечность шпиндельных узлов зависит от долговечности опор шпинделя, которая в свою очередь во многом зависит от эффективности системы смазывания, уплотнений, частоты вращения, величины предварительного натяга в подшипниках качения и т. д. Расчет на долговечность подшипников шпинделя определяет срок их замены. Существует много моделей и расчетных формул для прогнозирования срока службы подшипников.

Известно много факторов, влияющих на ресурс подшипников качения, например: неправильный монтаж подшипника; недостаточное (неправильное) смазывание или неподходящий смазочный материал; недостаточная эффективность уплотнения (загрязнения); чрезмерная высокая нагрузка; чрезмерный преднатяг; недостаточная жесткость.

Эти факторы порождают специфические повреждения подшипников, в результате анализа которых определяется причина их выхода из строя. К наиболее часто встречающимся видам отказов подшипников можно отнести следующие.

Неправильный монтаж (рисунок 1, а). Около 16% всех преждевременных отказов подшипников связаны с неправильным монтажом (обычно чрезмерными усилиями) и являются следствием отсутствия надлежащих инструментов. Эффективный монтаж/демонтаж подшипников требует применения механических и гидравлических методов или нагрева.

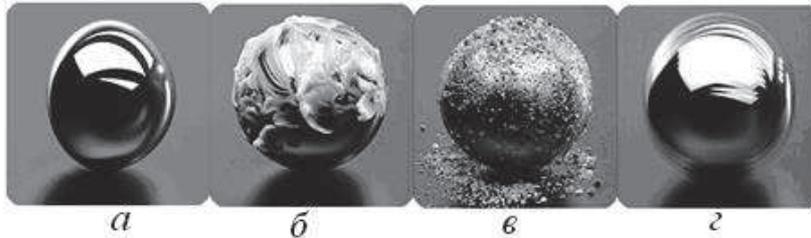


Рисунок 1. Внешний вид шариков, как пример неправильной эксплуатации подшипника

Профессиональный монтаж и демонтаж с применением специальных инструментов и технологий - это еще один шаг на пути к достижению максимальной производительности.

Неправильное смазывание (рисунок 1, б). Несмотря на то, что смазанные на весь срок службы подшипники после установки не требуют к себе внимания, около 36% преждевременных отказов подшипников вызываются именно неправильным выбором типа смазки или метода смазывания. В реальных условиях любой подшипник при каких-либо отклонениях свойств смазочного материала от требуемых параметров, выходит из строя задолго до выработки расчетного ресурса. Так как подшипники являются важными деталями машин, то их неправильное смазывание зачастую приводит к существенным проблемам. Для тех случаев, когда невозможно осуществлять смазывание вручную, предлагают систему автоматического смазывания. Эффективное смазывание с применением материалов, инструментов и методов позволяет значительно сократить незапланированные простои машин.

Загрязнения (рисунок 1, в). Подшипники это прецизионные изделия, поэтому они не могут надежно функционировать в условиях загрязнения тел качения подшипника и смазочного материала инородными частицами. Так как уплотненные и смазанные на весь срок службы подшипники составляют относительно небольшую долю от установленных в машинах подшипников, то, по меньшей мере, 14% преждевременных отказов связаны с загрязнением.

Усталость (рисунок 1, г). При перегрузках или неправильном обслуживании машин усталостный износ подшипников становится причиной 34% преждевременных отказов. Такие отказы можно предупредить, так как поврежденные и перегруженные подшипники из-

меняют регламентированные параметры работы, которые можно обнаружить с помощью приборов для мониторинга состояния машин [1].

Наиболее типичные повреждения подшипников приведены в таблице 1.

Таблица 1

Картина явления	Причины	Мероприятия
Поверхность дефектная, иногда с зеркальным блеском (как бы полированная). По мере развития процесса могут возникнуть «цвета побежалости»: голубой и коричневый (рисунок 2).	Смазочный материал постепенно исчерпывается или утрачивает свои свойства.	Проверять, поступает ли смазка в подшипник. Уменьшить интервал повторного смазывания.
Маленькие вмятины распределены на дорожках качения обоих колец (рисунок 3).	Попадание в подшипник инородных частиц.	Соблюдать чистоту в процессе сборки. Использовать чистые смазочные материалы. Улучшать уплотнения
Вмятины на дорожках качения обоих колец; расстояние между двумя углублениями соответствует расстоянию между соседними телами качения (рисунок 4, а).	В процессе монтажа усилие прикладывается к наружному кольцу (передается через тела качения). Внутреннее кольцо слишком сильно напрессовано на коническую шейку (рисунок 4, б. Чрезмерная нагрузка на не вращающееся кольцо подшипника.	Усилие монтажа следует прикладывать к тому кольцу подшипника, которое устанавливается с натягом. Избегать перегрузок, применять подшипники более высокой статистической грузоподъемности.
Задиры на расстоянии роликов на дорожке качения цилиндрического роликоподшипника в виде полосок, направленных перпендикулярно к направлению вращения.	В процессе сборки кольцо с сепаратором и комплектом тел качения перекошено относительно второго кольца. Удары или чрезмерный натяг при не вращающихся в процессе сборки кольцах (рисунок 5).	При монтаже поворачивать внутреннее или наружное кольцо. Поверхности хорошо смазать. При серийном производстве использовать монтажные направляющие втулки. При монтаже вращать кольца подшипника. Усилие монтажа прикладывать к кольцу, устанавливаемому с натягом. Ни в коем случае не передавать усилие монтажа через тела качения.
Усталостные раковины, развившиеся от вмятин, расположенных на расстоянии тел качения. Усталостные раковины, развившиеся от малых вмятин (рисунок 6).	Вмятины, возникшие от неправильного монтажа или перегрузки не вращающегося кольца подшипника. Вмятины, возникшие при перекачивании инородных частиц.	

Износ вследствие недостаточного смазывания. Устойчивый несущий смазочный слой не может возникнуть, если количество смазки недостаточно, а сама смазка утратила свои свойства. В таких условиях могут возникать металлические контакты между телами качения и дорожками качения. В начальной стадии износ как бы реализует процесс притирания. Микроскопически малые вершины шероховатости, образующиеся в процессе механической обработки, деформируются. Одновременно достигается известный эффект прикатывания, благодаря чему поверхность качения выглядит зеркально гладкой. Но уже на этой ста-

дии могут начинаться поверхностные разрушения.

Когда смазка полностью израсходована, происходит значительный рост температуры. Закалённая подшипниковая сталь теряет свою твёрдость, и на поверхности возникают «цвета побежалости»: голубой и коричневый. При этом температура может стать настолько высокой, что подшипник заклинивает.

Вмятины под действием инородных частиц. Инородные частицы, например, металлические стружки, попадающие в подшипник, порождают вмятины, когда тело качения закатывает стружку в дорожку качения. Не только твёрдые частицы порождают вмятины, но и, например, частицы бумаги или текстильные волокна. Вмятины в большинстве случаев маленькие и распределены по всей дорожке качения.

Вмятины, возникающие из-за неправильного монтажа или чрезмерной нагрузки. Расстояние между двумя вмятинами соответствует расстоянию между соседними телами качения. Вмятины на дорожках качения шарикоподшипников возникают очень легко, если усилия монтажа или демонтажа передаются через тела качения. Особенно повреждаемы сферические шарикоподшипники.

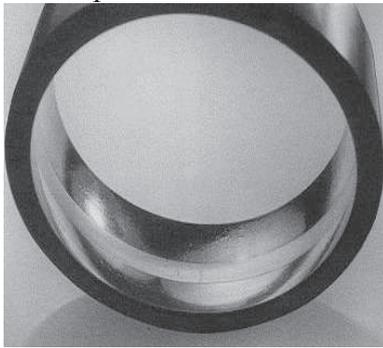


Рисунок 2. Результат недостаточного смазывания

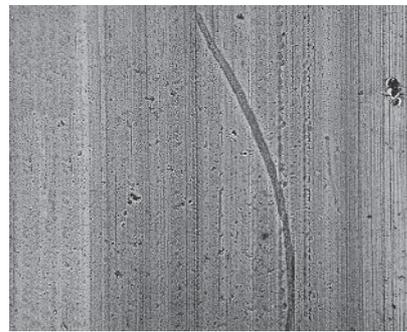


Рисунок 3. Результат неправильного монтажа

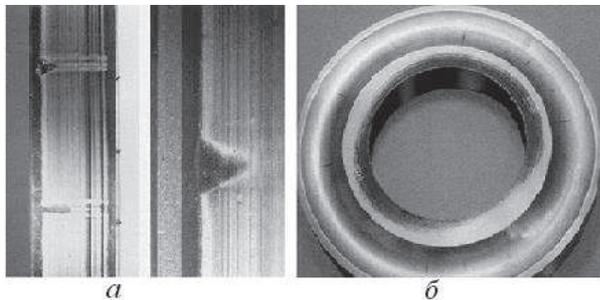


Рисунок 4. Результат чрезмерной напрессовки внутренних колец на конические шейки валов

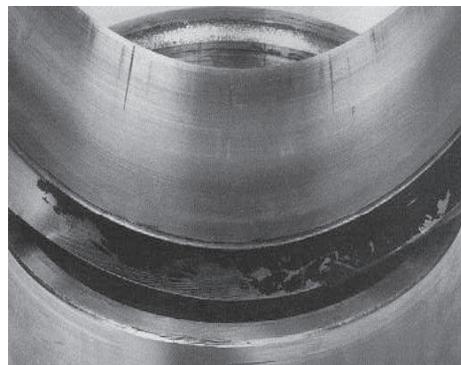


Рисунок 5. Результаты ударных или чрезмерных нагрузок

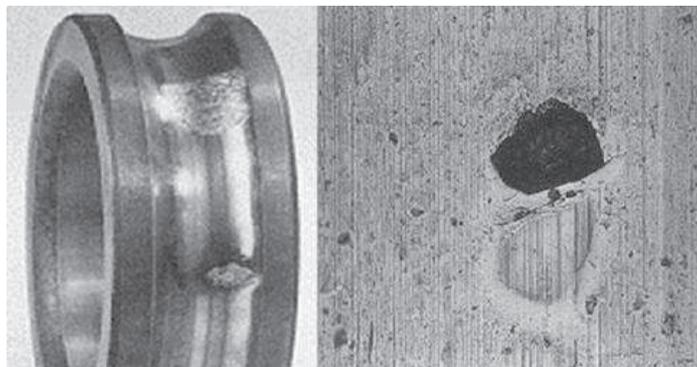


Рисунок 6. Раковины вследствие вмятин

У сферических роликоподшипников первоначально возникают задиры и только лишь при более высокой нагрузке – вмятины. То же происходит с коническими роликоподшипни-

ками, если их при установке не проворачивать. Вмятины возникают также при посадке подшипников на валы и в корпуса с чрезмерным натягом, а также при чрезмерной напрессовке внутренних колец на конические шейки валов.

Задиры на дорожках качения на расстоянии тел качения. Одна из самых распространённых причин повреждений при монтаже цилиндрических роликоподшипников заключается в том, что в процессе монтажа подшипника кольцо с сепаратором и телами качения перекашивается относительно другого кольца и, кроме того, одно кольцо относительно другого не проворачивают. При этом ролики скользят по дорожке качения другого кольца, вследствие чего возникают задиры в виде полосок, направленных перпендикулярно плоскости вращения. Одновременно также могут быть повреждены и ролики.

Описанный вид повреждений можно предотвратить, если в процессе сборки хорошо смазывать дорожки качения и поворачивать кольца друг относительно друга.

При серийном производстве целесообразно применение монтажных направляющих втулок.

Подобного же рода повреждения цилиндрических роликоподшипников могут иметь место в условиях, когда кольца напрессованы с большим натягом и, соответственно, радиальный зазор в подшипнике слишком мал.

На дорожках качения сферических и конических роликоподшипников задиры в виде полосок образуются вследствие ударных нагрузок, перекосов колец подшипников или ошибок в процессе их монтажа. Ударные или чрезмерные нагрузки, приложенные «не к тому» кольцу, могут породить узкие поперечные (на дорожке качения) задиры, если кольца подшипника в процессе сборки не поворачивают относительно друг друга (рисунок 5).

Раковины вследствие вмятин. Часто возникающие проблемы в высокоскоростных шпиндельных узлах [3]: повышенное радиальное биение; необходимость замены смазки в подшипниках (загрязнение подшипников); износ подшипников с необходимостью их замены; неправильное расположение (смещение) подшипников; межвитковое замыкание в электрошпинделях (моторшпиндель); пробой (короткое замыкание) обмоток; перегрузка по току (высокий ток).

Повышенное радиальное биение. Радиальное биение проявляется в понижении точности обработки поверхности детали. Причин повышенного радиально биения может быть несколько: изогнутость рабочего вала (может возникнуть вследствие критической (ударной) нагрузки, например, при обработке на станке, что исправляется правкой вала шпинделя; недостаточная затяжка подшипников, зазоры – исправляется регулировкой подшипников подтяжкой затяжной гайки подшипников шпинделя; износ подшипников – неисправность устраняется заменой подшипников; износ посадочных шеек вала под подшипники, способ устранения состоит в восстановлении посадочных шеек шпинделя.

Необходимость замены смазки в подшипниках. Если шпиндель работал в условиях повышенной загрязнённости, в подшипники могли попасть пыль и грязь. Также пыль может образовываться вследствие работы шпинделя на нештатных режимах и при интенсивном износе его посадочных шеек. Неисправность проявляется в повышенной температуре подшипников, а также в других признаках, например, появлением шума в подшипнике.

Устраняется снятием подшипников, промывкой их с последующей заменой смазки. Смазка для подшипников должна использоваться качественная, рассчитанная на длительный срок службы и высокие скорости их вращения.

Износ подшипников с необходимостью их замены. При работе шпинделя подшипники могут интенсивно изнашиваться, если нарушено какое-либо из условий их нормальной работы. Об износе подшипников может свидетельствовать, например, шум в подшипнике. Факторами ускоренного износа подшипников могут быть: неправильная установка подшипников на валу шпинделя; загрязнение смазки подшипников (когда смазка после загрязнения не была своевременно заменена); повышенные нагрузки при обработке (повышенные подачи, не предусмотренные условиями эксплуатации станка); износ посадочных шеек шпинделя. Замена подшипников в шпинделе на первый взгляд несложная операция, однако требую-

щая высокой точности при напрессовке и контроле правильности установки подшипников.

Неправильное расположение подшипников. При самостоятельной замене радиально-упорных подшипников шпинделя они были неправильно установлены (не той стороной, с перекосами и т.д.). Неисправность проявляется следующими признаками: повышенное биение на валу, чрезмерный нагрев подшипников, повышенный шум в подшипнике и т.д. Устранение неисправности – правильная установка подшипников. Может потребоваться не только правильная установка, но и замена подшипников на новые.

Заключение

Проведенный анализ износа и причин выхода из строя подшипников качения высокоскоростных шпиндельных узлов позволяет предпринимать действенные меры по предупреждению поломки подшипников, что обеспечивает предприятиям возможность сэкономить значительные материальные и финансовые средства.

Литература

1. Изделия *SKF* для технического обслуживания и смазочные материалы. www.mapro.skf.com / www.skf.com – с. 4-8.
2. *SKF*/ Повреждения подшипников качения и их причины. Авторское право *SKF AB*, 2002, Санкт-Петербург/ - с. 10-12, 17-18, 24-25.
3. Высокоскоростные мотор-шпиндели приводов главного движения металлорежущих станков/ Бушуев В.В., Молодцов В.В.: Вестник МГТУ Станкин, 2011, № 3 – с. 24-26.

Зависимость точности изготовления цилиндрических зубчатых передач от точности изготовления их основных деталей и сборки

к.т.н. Виноградов В.М., к.т.н. Черепяхин А.А.
Университет машиностроения, Москва
8(495)2230523, доб. 1224. tkm1410@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены факторы влияющие, на точность зубчатой передачи. Показано, что значительное влияние на точность имеют следующие факторы: точность изготовления и сборки всех элементов передач. Дан пример расчета технологических размерных цепей для цилиндрической зубчатой передачи.

Ключевые слова: зубчатая передача, точность изготовления и сборки, технологическая размерная цепь

В процессе изготовления деталей зубчатой передачи и ее сборки возникают погрешности, которые определяют степень точности готовой передачи. Согласно с ГОСТ 1643-81 степень точности передачи характеризуется соответствующими показателями точности (кинематической, плавности работы, контакта зубьев в передаче). Помимо этого, независимо от степени точности должен быть обеспечен требуемый вид сопряжения зубчатых колес в передаче.

Указанный ГОСТ устанавливает, что при соответствии показателей точности передачи допускаемым отклонениям, контроль этих же показателей зубчатых колес не является обязательным. Однако в условиях производства, чтобы обеспечить технологическую дисциплину на каждой операции и выявить возможные погрешности обработки, производят комплексный или поэлементный контроль зубчатых колес, на основании которого устанавливают их степень точности. При этом за измерительную базу принимают ось колеса (ось отверстия), а не рабочую ось, находящуюся в передаче, хотя ГОСТ 1643 предусматривает требования именно к точности зубчатого колеса относительно рабочей оси. Поэтому погрешности зубчатого колеса будут отличаться от его погрешностей относительно рабочей оси. Это отличие должно быть предусмотрено в чертеже колеса и учтено при установлении точности передачи. Однако в справочной литературе отсутствуют рекомендации для перерасчета отклонений показателей точности зубчатого колеса, связанного с изменением измерительной базы, что и послужило основанием для рассмотрения данного вопроса.