

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.822.72

doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-34-44

СПЕЦИФИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛАХ ПРИ РЕМОНТЕ

Александр Владимирович Хандожко^{1✉}, Андрей Николаевич Щербаков², Светлана Олеговна Федонина³, Нина Юрьевна Лакалина⁴

^{1,2,3,4,5} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ chandosh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0604-8537>

² taiga78@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1485-0415>

³ fedonina.sv2015@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0472-4845>

⁴ uhastyi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4947-2431>

Аннотация

Рассмотрены конструктивные решения, используемые в шпиндельных узлах массовых современных металорежущих станков, а также особенности ремонта подшипниковых опор. Основное внимание уделено специфике использования подшипников качения в высокоскоростных шпиндель-

ных узлах, их подбору, подготовке к установке и установке.

Ключевые слова: шпиндельный узел, подшипники, прикатка, вибродиагностика, дуплексирование, смазочный материал.

Ссылка для цитирования:

Хандожко А.В. Специфика использования подшипников качения в высокоскоростных шпиндельных узлах при ремонте / А.В. Хандожко, А.Н. Щербаков, С.О. Федонина, Н.Ю. Лакалина // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 8. – С. 34-44. doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-34-44.

Original article

Open Access Article

SPECIFIC CHARACTER OF USING ROLLING BEARINGS IN HIGH-SPEED SPINDLE ASSEMBLIES DURING REPAIR

Aleksandr Vladimirovich Khandozhko^{1✉}, Andrey Nikolaevich Shcherbakov², Svetlana Olegovna Fedonina³, Nina Yurievna Lakalina⁴

^{1,2,3,4,5} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ chandosh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0604-8537>

² taiga78@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1485-0415>

³ fedonina.sv2015@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0472-4845>

⁴ uhastyi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4947-2431>

Abstract

Design solutions used in spindle assemblies of modern mass-produced metal-cutting machines as well as the repair features of bearing supports are considered. The main attention is paid to the specific character of using rolling bearings in high-speed spindle as-

semblies, their selection, preparation for installation and installation itself.

Keywords: spindle assembly, bearings, roll-on, vibration diagnostics, duplexing, lubricant.

Reference for citing:

Khandozhko AV, Shcherbakov AN, Fedonina SO, Lakalina NYu. Specific character of using rolling bearings in high-speed spindle assemblies during repair. Transport Engineering. 2025;8:34-44. doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-34-44.

Модульные принципы конструирования и производства давно известны, широко применяются в разных отраслях машиностроения. Не является исключением и станкостроение. Широкая кооперация отдельных предприятий позволяет им специализироваться на отдельных деталях, узлах, комплектах. Этот процесс затронул производство шарико-винтовых передач, линейных и иных направляющих, элементов приводов, включая шпиндельные узлы и др. В современных станках широко используют модульные шпиндельные узлы. Такие узлы в значительной мере автономны, взаимозаменяемы. Это упрощает как их изготовление, так и ремонт станочного оборудования. Новый модуль ставят на замену вышедшему из строя, который ремонтируется на специализированных ремонтных предприятиях или непосредственно у производителя данного типоразмера модуля. Процесс замены шпинделя составляет всего лишь несколько часов. Это очень важно для эксплуатанта станка, для которого простой оборудования может принести организационно-финансовые потери, превышающие стоимость ремонта. Определенная универсальность шпиндельных модулей определила их использование различными производителями станочного оборудования, позволив существенно увеличить масштабы производства на специализированных заводах, перейдя к серий-

ному и даже крупносерийному типу производства.

Модульные решения для шпиндельных узлов оказались востребованными для относительно небольших фрезерных станков с программным управлением, ориентированных на получистовую и чистовую обработку (рис. 1). Работают они преимущественно твердосплавным инструментом (сборным и цельным). Для обеспечения рациональной скорости резания обработку приходится вести при высоких частотах вращения шпинделя (ЧВШ) – до $10000...20000 \text{ мин}^{-1}$ в зависимости от типоразмера обрабатываемой детали. Ранее такие ЧВШ были более характерны для внутришлифовальных станков и алмазно-расточных станков. Соответственно для таких шпинделей были разработаны типовые конструктивные решения, которые учитывали специфику работы узла при высоких частотах вращения и относительно малых силовых нагрузках.

В той или иной мере эти решения использованы и в современных шпиндельных модулях фрезерных станков.

Основные вопросы при проектировании, изготовлении и эксплуатации таких шпиндельных модулей связаны с проблемой работы подшипниковых узлов в таком диапазоне ЧВШ и соответствующих нагрузках.



Рис. 1. Внешний вид комплектного шпиндельного узла (модуля)
Fig. 1. Appearance of the complete spindle assembly (module)

У этой проблемы несколько сторон. В первую очередь это принципиальная возможность подшипников качения рабо-

тать в требуемом диапазоне ЧВШ и нагрузок. Есть и другие вопросы, например, вопросы шума, вибрации и борьбу с ними,

смазка, теплообмен, проблемы балансировки и надежности крепления инструмента и др. Рассмотрим в данной работе лишь вопросы проектирования и восстановления подшипниковых узлов, в том числе и с точки зрения импортозамещения.

Предельные частоты вращения подшипников регламентированы стандартами или другими документами. Быстроходность подшипников характеризует скоростной параметр. Для подшипников качения, которые применяются исключительно в модульных шпиндельных конструкциях, он определяется как $d_m \times n$, где d_m – диаметр окружности, проходящей через центры тел качения, мм, n – частота вращения, мин⁻¹.

К сожалению, в последние годы в нашей стране к подшипниковой отрасли проявлялось крайне мало внимания, как с

научной, так и инженерной точки зрения. В значительной мере по этой причине в стране нет собственного производства шпиндельных модулей, а ремонт импортных производится с использованием зарубежных подшипников или остатков советского производства.

Подшипниковые узлы шпинделей чаще всего созданы на радиально-упорных шариковых подшипниках. При этом основные схемы компоновки подшипниковых опор известны и применяются практически без вариаций всеми производителями. Используют чаще всего решение, характерное для шпинделей внутришлифовальных станков. Имеются две опоры, каждая из которых собрана по схеме «тандем», сами опоры относительно друг друга собраны по схеме «О» (рис. 2).

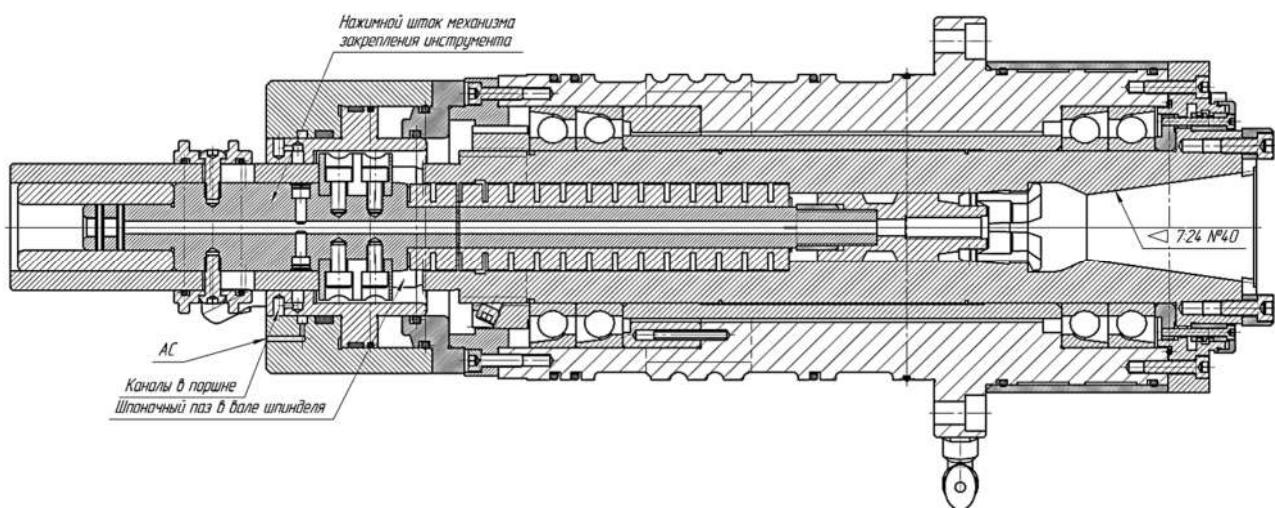


Рис. 2. Пример типовой конструкции шпиндельного модуля для фрезерных станков с ЧПУ
Fig. 2. Example of a typical spindle module design for CNC milling machines

При этом передняя опора жесткая, задняя плавающая. Наружные обоймы подшипника задней опоры контактируют с опорным кольцом, поджатым комплектом пружин. Данная схема обеспечивает компенсацию температурных деформаций, возникающих при эксплуатации. Естественно, нагрузки вытягивания подшипниковые опоры могут воспринимать лишь в рамках жесткости этих пружин. С учетом крайне малой вероятности таких нагрузок при эксплуатации этот недостаток не играет решающей роли.

Схема с двумя жесткими опорами больше соответствует лезвийной обработ-

ке. Такие опоры используют достаточно часто в шпинделях внутришлифовальных станков и почти всегда в алмазно-расточных. Но отсутствие компенсации термических деформаций создает проблемы. Для внутришлифовальных шпинделей, работающих при постоянных частотах вращения шпинделя, проблема решается окончательной затяжкой гаек, регулирующих натяг на «горячую», после достаточно длительной обкатки и выхода на рабочие температуры. Но для фрезерных станков, с варьируемыми частотами вращения, жесткие опоры целесообразно использовать лишь при принудительном эффективном

охлаждении корпуса. Практически все модули шпинделей имеют такую возможность (система канавок на наружном диаметре корпуса), но этой возможностью производители самих станков пользуются относительно редко. Частично проблема термостабилизации решается прокачкой СОТС, частично продувкой воздухом при смене инструмента, но такие процедуры скорее случайны, чем регулярны.

Для повышения модульности конструкции шпиндельных узлов производители часто отказываются от циркуляционной смазки, что значительно упрощает конструкцию подшипниковых опор. Подшипники в таком случае работают исключительно в консистентной смазке, которую закладывают единожды при сборке шпиндельных опор.

Все это приводит к значительному снижению благоприятного режима работы подшипников. В качестве примера можно рассмотреть работу подшипникового узла шпинделя фрезерного станка с ЧПУ, основные конструктивные решения которого показаны на рис. 2. Шпиндель предназначен для работы с ЧВШ до 15000 мин⁻¹. Подшипниковые опоры выполнены на подшипниках фирмы *SKF*, обозначение 7012, наружный диаметр 95 мм, внутренний 60 мм, класс точности Р4. Динамическая грузоподъемность составляет 12200 Н.

Отечественным ближайшим аналогом таких подшипников является 46112, класс точности 2. У таких подшипников динамическая грузоподъемность составляет 24500 Н.

Согласно стандарту ГОСТ 20918-75 для радиально-упорных шариковых подшипников скоростной параметр составляет $4,0 \cdot 10^5$ при консистентной смазке и $5,5 \cdot 10^5$ при жидкостной. При таких габаритах допустимые частоты вращения составляют около 6600 мин⁻¹. При снижении ресурса подшипника в 1,5...2 раза частота вращения их может быть несколько увеличена, в этом случае она будет примерно равна ЧВШ алмазно-расточных и даже внутришлифовальных шпинделей, выпускавшихся в нашей стране – примерно 10000 мин⁻¹ при консистентной смазке и 17000 мин⁻¹

при жидкостной. Тем не менее, это существенно меньше, чем ЧВШ фрезерных модулей, рассматриваемого типа.

Определенный резерв для повышения частот представляет снижение нормативной базовой статической и динамической грузоподъемности. На это может указывать почти двойное расхождение в базовых динамических грузоподъемностях подшипниках одинакового назначения и габаритов в нормативной документации фирмы *SKF* и ГОСТ 831-75. Для подшипника *SKF* номер 7012 динамическая грузоподъемность $C = 16300$ Н, для подшипника по ГОСТ – $C = 37400$ Н. Такое искусственное занижение грузоподъемности позволяет повысить либо базовую долговечность подшипников, либо максимально допустимые частоты вращения.

Зарубежные производители подшипников для скоростных шпиндельных узлов используют практически все современные методы повышения качества. Применяются специальные стали с повышенным содержанием азота, используются керамические шарики, устанавливаются повышенные требования по точности формы поверхностей, их взаимного расположения, размеров и параметров микрографии. Соответственно, стоимость таких подшипников на порядок выше, чем у подшипников общего машиностроения, а сроки поставки могут быть весьма велики (3-4 месяца).

Тем не менее, согласно статистике предприятий, работающих в сфере поставок и сервиса станочного оборудования, после 2–4 лет двухсменной эксплуатации станков резко возрастает вероятность выхода из строя шпиндельных модулей, даже при использовании производителями комплектующих, выпущенных лидерами подшипниковой отрасли. Наиболее характерным типом повреждения является разрушение сепараторов (рис. 3). Следовательно, процедура ремонта будет включать в себя практически полную разборку шпиндельного модуля и, после замены подшипников, полный контроль работоспособности узла, включая снятие виброхарактеристик, балансировку и др.



Рис. 3. Разрушенный подшипник задней опоры
Fig. 3. Destroyed rear support bearing

Процедура монтажа или замены подшипников шпинделя относительно длительна и трудоемка.

Согласно рекомендациям ЭНИМС по ремонту шпинделей внутришлифовальных и алмазно-расточных станков, имеющих шариковые радиально-упорные подшипники, перед их установкой выполнялся ряд процедур:

- прикатка (желательно);
- вибродиагностика (по возможности, актуально для высокоскоростных узлов);
- подбор пар подшипников;
- контроль геометрических параметров и комплектование пар;
- дуплексирование.

Прикатка выполняется для прохождения этапа приработки до сборки узла. При плавающей задней опоре, при окончательной обтяжке подшипников «на горячую» этот процесс не столь влияет на качество. Поэтому этот длительный (6-8 часов) процесс на специальном стенде очень часто не проводили и ранее, и сейчас.

Операция **вибродиагностики** весьма полезна и информативна. Но трудоемкость её достаточно высока, а стоимость диагностического оборудования сопоставима со

средней стоимостью станка с ЧПУ. Поэтому её выполняют лишь некоторые производители для серийного и крупносерийного производства. Для ремонтных подразделений такая операция полезна и информативна, но сложно реализуема с экономической точки зрения.

В то же время, оценка вибрационных характеристик подшипников позволяет исключить попадание на сборку изделий, которые не обеспечивают нормативные характеристики шпинделя. По информации некоторых потребителей подшипников (типоразмер близкий к используемым в данной конструкции) около 30% изделий, заявляемых как произведенные в РФ, непригодны для эксплуатации с частотой вращения выше 1000 мин⁻¹. Входной контроль позволяет рационально использовать большие объемы подшипников, в том числе за счет применения в тихоходных узлах.

Измерения вибрационных характеристик проводят в соответствии с ГОСТ Р 525 45.1–2006 (ИСО 15242-1:2004) «Подшипники качения. Методы измерения вибрации».

Контроль и комплектование пар подшипников, включают измерение наружного и внутреннего диаметров и ра-

диального и осевого биений наружных и внутренних колец, затем комплектование пар с минимальными отклонениями. Номинальные значения внутреннего и наружного диаметров должны быть одинаковы (в пределах точности измерения), биения колец в парах должны отличаться не более чем на 2...3 мкм. Места максимального биения на внутреннем и наружном кольцах должны быть маркированы.

Подбор пар подшипников, по сути, является операцией селективной сборки, позволяющей в большинстве случаев снизить требования к классу точности подшипника. Согласно рекомендациям ЭНИМС [1], при ремонте для алмазно-расточных станков допустимо использовать подшипники только 4-го класса, для внутришлифовальных на переднюю опору – только 4-й класс, на заднюю допустима установка 5-го класса.

Подшипники ведущих производителей часто имеют иную схему маркировки иные параметры классификации. В частности, для шпиндельных модулей фрезерных станков используют подшипники фирмы *SKF* класса точности 4. При этом предельные отклонения и допуски на диаметральные размеры использованных подшипников (обозначение 7012) на средние наружный $t_{\Delta D_{mp}}$ и внутренний $t_{\Delta d_{mp}}$ диаметры равны:

наружный диаметр $D=95$ мм:

$$D = 95^{+0,002}_{-0,006}$$

внутренний диаметр 60 мм:

$$d = 60^{+0,002}_{-0,005}$$

Т.е. поле допуска 4 мкм для наружного диаметра и 3 мкм для внутреннего.

Согласно ГОСТ 520-2011 требования по точности существенно отличаются от принятых для *SKF*.

Предельные отклонения, например, для 4-го класса точности равны:

$$d_{mp} = 60^{+0}_{-0,007}$$

$$D_{mp} = 95^{+0}_{-0,008}$$

Допуск по ГОСТ кратно больше, а поля допусков расположены немного иначе. Только поля допусков для подшипни-

ков 2-го класса точности приближаются к 4-му классу точности *SKF*:

$$d_{mp} = 60^{+0}_{-0,004}$$

$$D_{mp} = 95^{+0}_{-0,005}$$

Сравнение требований по точности подшипников согласно ГОСТ и каталогов *SKF* показывает, что для класса точности 4 необходимость в селективном подборе пар исчезает.

Скомплектованные пары отправляют на **дуплексирование**. Схемы и способы дуплексирования различны для разных схем монтажа (O , X , «тандем»). Кроме того, может варьироваться и величина преднатяга. Процедура дуплексирования не чрезмерно сложна, но трудоемка, требует большого внимания и аккуратности персонала и соответствующего технического оснащения.

После дуплексирования пары передают на сборку. Если период пролеживания до сборки более 7 часов, то подшипники подлежат хранению в масле, если более месяца – то необходима полноценная консервация.

Ведущие производители большую часть указанных выше операций выполняют на основном производстве. Подшипники в этом случае не требуют обкатки и вибродиагностики, величины биений и преднатяга указаны в обозначении. На рис. 4 (заимствован из каталога подшипников *SKF*) приведена схема обозначения и пример её реализации.

Поставляются такие подшипники в вакуумированной упаковке. Их распаковывают непосредственно перед монтажом, что исключает необходимость консервации или специальных условий хранения. Таким образом, при использовании таких подшипников существенно меняется схема ремонта шпинделя, состав технологических операций и порядок их выполнения.

После вскрытия упаковки с подшипниками необходимо удалить неизвестный смазочный материал, промыв их в бензине (керосине или аналогичных жидкостях) и после просушки закладывается смазочный материал для длительной эксплуатации.

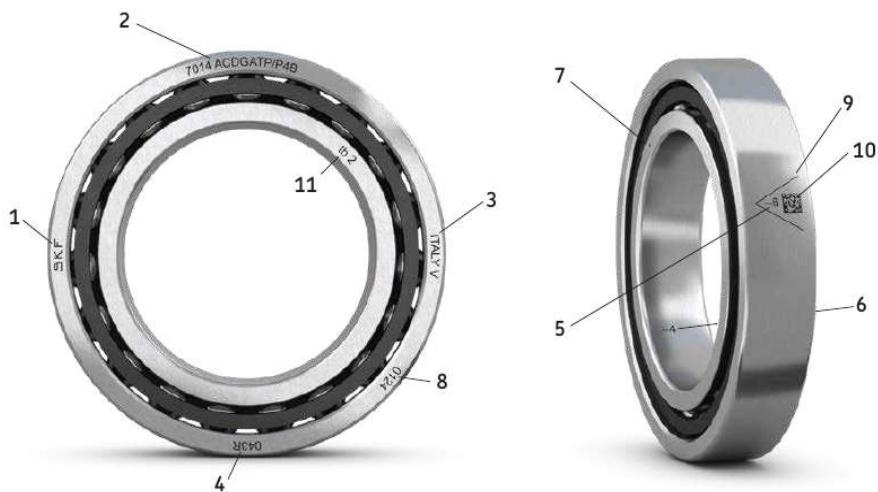


Рис. 4. Схема маркировки подшипников фирмы *SKF*

1 – название фирмы; 2 – основное обозначение подшипника; 3 – страна производитель; 4 – дата изготовления в кодированной форме; 5 - отклонение наружного диаметра от номинала и положение максимального биения наружного кольца (- 6 мкм); 6 - Отклонение диаметра отверстия от номинала и положение максимального биения внутреннего кольца (- 4 мкм); 7 – маркировка торца внутреннего кольца к которому прикладывается нагрузка; 8 - серийный номер; 9 – направление восприятия осевой нагрузки подшипником; 10 – штрих-код; 11 – параметр дуплексирования – величина разновысотности внутреннего наружного колец без нагрузки

Fig. 4. SKF bearing labeling scheme

1 – company name; 2 – main designation of the bearing; 3 – country of manufacture; 4 – coded date of manufacture; 5 - deviation of the outer diameter from the nominal value and the position of the maximum runout of the outer ring (- 6 microns); 6 - deviation of the hole diameter from the nominal value and the position of the maximum runout of the inner ring (- 4 microns); 7 – marking of the inner ring end to which the load is applied; 8 - serial number; 9 – direction of axial load resisted by the bearing; 10 – barcode; 11 – duplexing parameter i.e. the value of the height difference of the inner outer rings without load

Подшипники шпиндельного узла должны работать только на определенных марках консистентных смазочных материалов, что дает возможность обеспечить его длительную работоспособность и необходимую точность.

В литературе для такого рода подшипниковых узлов рекомендуются различные консистентные смазочные материалы, созданные для высокоскоростных узлов. Как правило, это материалы, созданные на основе синтетических масел с загущением мылом на основе щелочных или щелочноземельных металлов (литий, натрий, кальций), иногда с полимочевинным загустителем. В ряде случаев в состав входят синтетические эфиры.

Для отечественных аналогов шпинделей, работающих при близких нагрузках и частотах вращения, рекомендуется использовать смазочные материалы типа ЦИАТИМ-201, ВНИИ-228, ВНИИНП 505, ЛКС-2 и др.

В общем случае смазочный материал выбирают по допустимому скоростному параметру (произведение диаметра подшипника по центру тел вращения на частоту вращения) с учетом температуры каплеобразования и вязкости. Эти параметры производители обычно указывают.

В ряде случаев при использовании импортных смазочных материалов следует (удобно) придерживаться комплексного параметра классификации по *NLGI*. Этот критерий показывает степень консистенции и термостабильность смазочного материала, его способность выдерживать нагрузки. Класс *NLGI* формируют параметры вязкости базового масла, концентрация и тип загустителей. Всего в классификации их 9 и чем выше класс, тем выше параметры плотности. Наиболее распространенными для обработки подшипников являются продукты 1, 2 и 3 класса *NLGI*. Выбор того или иного класса зависит от скоростного параметра и эксплуатационного диапазона температур.

Также есть принцип – чем выше частота вращения подшипника качения, тем ниже вязкость закладываемого смазочного материала, а класс *NLGI* выше. Соблюдение такой взаимосвязи позволяет избежать деструкцию материала, появление истинного и ложного бринеллирования и обеспечивает стабильное антифрикционное действие.

Следует проявлять осторожность при выборе вязких смазочных материалов – они создают большое сопротивление и провоцируют рост температур в подшипниковых узлах.

Консистентный смазочный материал закладывается в подшипники непосредственно перед сборкой.

Распределять смазочный материал надо равномерно по всем телам качения, для чего во время заполнения подшипника смазочным материалом необходимо поворачивать его внутреннее кольцо.

Объем закладываемого материала не должен быть больше 0,3 от общего объема заполняемого пространства. В противном случае материал будет выдавливаться в сторону, если свободное пространство отсутствует, возможны различного рода проблемы, вплоть до повреждения подшипника.

При определении нужного объема можно придерживаться следующих практических рекомендаций. Расход смазочного материала можно рассчитать по приблизительной формуле:

$$Q = 0,005 \times D \times B, \text{ г}$$

где D – наружный диаметр подшипника, мм; B – ширина подшипника, мм.

Например, для подшипника 7012 рассматриваемого шпиндельного узла, имеем:

$$Q = 0,005 \times 95 \times 18 = 8,55, \text{ г.}$$

При плотности материала около 0,9 г/см³ объем смазочного материала примерно составит 9,5 см³.

Существуют и другие зависимости для расчета объема смазочного материала. Сначала определяют отношение объема материала к общему объему заполняемой им полости. Для этого нужно рассчитать быстроходность подшипника (*DN*-фактор). Количество смазочного материала должно соответствовать *DN*-фактору. При *DN*-

факторе более чем 400000 для высокоскоростных подшипников, количество должно быть примерно 20...30 % свободного места подшипника. Для стандартного подшипника нормального хода количество должно быть примерно 30 % свободного места и для подшипника с низкими скоростями вращения (*DN*-фактор менее 50000) свободное пространство подшипника и его корпуса должно быть полностью заполнено.

Для нашего подшипника скоростной параметр равен:

$$A = ((95+60)/2) \times 12000 = 930000.$$

Соответственно, заполнять следует подшипник на 25% от объема.

Объем рассчитывают по формуле:

$$V_{\text{св}} = 3,14 / 4 \times B \times (D^2 - d^2) \times 10^{-9} - G / 7800, \text{ м}^3$$

где B – ширина подшипника, мм; D – внешний диаметр подшипника, мм; d – внутренний диаметр подшипника, мм; G – масса подшипника, кг.

Для нашего случая получается объем полости 22,81 см³.

С учетом процента заполнения (25 %) объем смазочного материала составляет 5,7 см³ или 5,1 г.

Таким образом, по этой формуле количество смазочного материала несколько меньше, 5,7 см³ (5,1 г) против 9,5 см³ (8,6 г). С учетом точности процесса внесения смазочного материала, можно ограничиться средним значением этих двух рекомендаций 7,6 см³ (6,8 г).

Монтаж подшипников чаще всего выполняют с помощью пресса и направляющих втулок. В ряде случаев используют нагрев. При нагреве подшипники устанавливают либо только с минимальной нагрузкой («от руки»), либо в сочетании с запрессовкой.

Нагрев подшипника должен выполняться очень осторожно, особенно для закрытого исполнения, когда есть опасность вытекания разогретой смазки из подшипника. В любом случае недопустим нагрев близких к температурам отпуска – процессы начинаются уже со 160 °C.

Увеличение размеров при нагреве описывается известной формулой:

$$\Delta l = \alpha \times l \times \Delta T,$$

где Δl – изменение длины под действие температуры, мм; α – коэффициент теплового линейного расширения; l – длина номинальная, мм; ΔT – изменение температуры, градусы Кельвина (Цельсия).

Значения коэффициента теплового линейного расширения для стали 40ХС (наиболее близкой к подшипниковой стали по данным, приведенным в справочной

литературе для температуры в интервале 20...200 °C):

$$\alpha = (11,7 - 12,7) \times 10^{-6}, \text{град}^{-1}$$

Для запрессовки внутреннего кольца подшипника на шпиндель существует рекомендуемый разброс натягов (от 2 до 22 мкм).

Увеличение размеров при нагреве внутреннего кольца в зависимости от перепада температур приведено в таблице.

Таблица
Table

Внутреннее кольцо	Материал	α		Длина (диаметр)	Перепад температуры	Увеличение диаметра		
		min	max			l	ΔT	min
	сталь 40ХС	11,7	12,7	60,0000	20		0,014	0,0152
	сталь 40ХС	11,7	12,7	60,0000	30		0,021	0,0229
	сталь 40ХС	11,7	12,7	60,0000	40		0,028	0,0305
	сталь 40ХС	11,7	12,7	60,0000	50		0,035	0,0381
	сталь 40ХС	11,7	12,7	60,0000	60		0,042	0,0457
	сталь 40ХС	11,7	12,7	60,0000	70		0,049	0,0533
	сталь 40ХС	11,7	12,7	60,0000	80		0,056	0,0610
	сталь 40ХС	11,7	12,7	60,0000	90		0,063	0,0686
								0,066

Из таблицы видно, что гарантировано требуемый рост размеров обеспечивается при нагреве на 40 °C (рост не менее 28 мкм). То есть при работе в нормальных условиях, (температура воздуха 20 °C) нагрева до 60 °C ($20 + 40 = 60$ °) будет достаточно. Так как при переносе подшипника и, особенно, при монтаже он будет отдавать тепло (остывать), то целесообразно вести нагрев несколько выше, например на 50 °C, до 70 °C.

В литературе рекомендуется нагревать подшипники перед монтажом до температуры 80...90°C в течении 10...15 мин [3]. Открытые подшипники нагревают

в минеральном масле, закрытые (заполненные смазкой) – в термостате.

В общем случае даже при нагреве подшипник необходимо допрессовывать. Если подшипник устанавливается одновременно на вал и в корпус, поджим при этом нужно выполнять одновременно по внутреннему и наружному кольцам.

Важной особенностью монтажа подшипников в шпиндельных узлах является учет биений шпинделя и колец подшипников.

Перед сборкой подшипники устанавливаются на шейки шпинделя таким образом, чтобы положения максимальных биений шеек и внутренних колец были диа-

метрально противоположны. Это позволит максимально повысить точность и плавность вращения шпинделя.

Наружные кольца подшипников устанавливают в корпусе так, чтобы положе-

ния максимального биения всех подшипников были на одной линии. Для этого при монтаже на корпусе должны быть метки этого положения с обоих торцов.

Заключение

С учетом объема импортного стационарного оборудования, поставленного машиностроительным предприятиям страны, вопросы его обслуживания и ремонта являются крайне актуальными. Ремонтными службами, специализированными предприятиями страны уже накоплен значительный практический опыт выполнения ремонтных работ шпиндельных модулей. Но знания при этом получены путем проб и ошибок, во многих случаях на основе опыта, а не базовых знаний. Требуется

научное наполнение этой инженерной задачи ремонта, которая имеет много граней. Поэтому разработка комплекса методических рекомендаций, для организации и выполнения отдельных операций сборки-разборки, включая вопросы метрологии (по аналогии с материалами, которые имелись ранее в СССР и были доступны ремонтным службам и предприятиям) имеет важное значение для технологического суверенитета страны.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. РТМ 23.4.57-74 Ремонт шпиндельных головок алмазно-расточных и внутришлифовальных станков. ких масс. Волгоград, ГПКТБ. 1974, – 76 с.
2. Фигатнер А.М., Фискин Е.А., Бондарь С.Е. Конструкция, расчет и методы проверки шпиндель-

3. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст]: в 3 т. / В. И. Анурьев. - 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение. Т. 2. 1982. – 584 с.

REFERENCES

1. RTM 23.4.57-74 Repair of spindle heads of diamond boring and internal grinding machines. Volgograd: GPKTB; 1974.
2. Figatner AM, Fiskin EA, Bondar SE. Design, calculation and verification methods of spindle assem-

3. blies with bearings: methodological guidelines. Moscow: ENIMS; 1970.
3. Anuriev VI. Handbook of a mechanical engineering designer. 6th ed. Moscow: Mashinostroenie; 1982.

Информация об авторах:

Хандожко Александр Владимирович – доктор технических наук., профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, тел. 8(4832)588-289.

Щербаков Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, тел. 8(4832)588-289.

Khandozhko Aleksandr Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal-cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, phone: 8(4832)588-289.

Shcherbakov Andrey Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metal-cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, phone: 8(4832)588-289.

Федонина Светлана Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, тел. 8(4832)588-289.
Лакалина Нина Юрьевна – доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, тел. 8(4832)588-289.

Fedonina Svetlana Olegovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal-cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, phone: 8(4832)588-289.

Lakalina Nina Yurievna – Associate Professor of the Department of Metal-cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, phone: 8(4832)588-289.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 04.07.2025; одобрена после рецензирования 15.07.2025; принята к публикации 28.07.2025. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 04.07.2025; approved after review on 15.07.2025; accepted for publication on 28.07.2025. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.



**Продолжается подписка на научно-технический журнал
«Транспортное машиностроение» на 2025 год**

Подписку на журнал можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в редакции журнала. Подписные индексы по интернет-каталогу «Пресса по подписке» – Э80859 – https://www.akc.ru/itm/vestnik-bry_anskogo-gosudarstvennogo-tehnich_keskogo-universiteta/ и Объединенному каталогу «Пресса России» – 80859.

Стоимость подписки на минимальный срок – от 4846 руб.

Информация об опубликованных статьях регулярно направляется в систему Российской индекса научного цитирования (РИНЦ) – <https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=79505>.

*Сайт электронной редакции журнала: <https://bstu.editorum.ru/ru/nauka/journal/169/view>
E-mail: trans-eng@tu-bryansk.ru.*

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (категория К2) по группам научных специальностей:

2.5. Машиностроение (2.5.2; 2.5.3; 2.5.5; 2.5.6; 2.5.8),

2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия (2.6.1; 2.6.17),

2.9. Транспортные системы (2.9.1; 2.9.3; 2.9.5).