

**Ключевые слова:**

металлорежущий станок, высокоскоростной шпиндельный узел, подшипник качения

**Keywords:**

machine tool, high-speed spindle unit, contact rolling bearing

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

**Игорь ЗВЕРЕВ**

Представлены основные требования к характеристикам работоспособности современных высокоскоростных шпиндельных узлов (ВШУ) на опорах качения, а также факторы, способствующие развитию производительных методов механической обработки. Рассмотрены основные тенденции в развитии конструкций и систем обеспечения работоспособности ВШУ.

This paper presents the main technical requirements to the performance characteristics of the modern high-speed spindle units (HSSUs) running on rolling bearings as well as the factors stimulating high-speed machining. The recent development trends in HSSUs' structures and supporting systems have been considered.

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ развития технологических методов обработки резанием показывает, что одной из закономерных тенденций является повышение точности обработки с использованием высокопроизводительного прецизионного оборудования. Создание станочного оборудования, позволяющего вести обработку на больших скоростях, обеспечивает снижение сил резания, уменьшение износа инструмента, улучшение структуры обрабатываемого материала. Перед отечественной промышленностью неизбежно возникнет задача создания станков, шпиндельные узлы (ШУ) которых способны реализовать возможности прогрессивного режущего инструмента, а именно: осуществлять резание со скоростями до 3 тыс. м/мин при лезвийной обработке черных металлов, до 5 тыс. м/мин при обработке цветных металлов и до 7 тыс. м/мин при абразивной обработке. Создание таких станков невозможно без повышения точности, быстро-

ходности, нагрузочной способности и технологической надежности ШУ как элемента станка, в значительной мере определяющего его точность и производительность [1].

К настоящему времени наибольшее распространение в станках получили ШУ с опорами качения, как наиболее экономичные и надежные, а также более простые в эксплуатации. Вместе с тем, возросший уровень требований к ШУ на опорах качения характеризуется следующими показателями:

- погрешность вращения – менее 1,0 мкм;
- долговечность – более 5 тыс. ч;
- быстроходность ( $d \times n$ ) – более  $10^6$  мм·мин<sup>-1</sup>, где  $d$  – средний диаметр передней опоры, мм;  $n$  – максимальная частота вращения шпинделя, мин<sup>-1</sup>).

Достижение таких показателей зависит от нескольких факторов, в том числе от возможностей применения современных CAD/CAM/CAE технологий. Если раньше проектирование могло осно-

вываться на подобию с хорошо зарекомендовавшими себя конструкциями и индивидуальном опыте конструктора, то сегодня для создания конкурентоспособных конструкций необходимы как статистические обобщения опыта эксплуатации и экспериментальных исследований узлов, так и проведение научного и проектного поиска, основанного на средствах и методах автоматизированного проектирования.

За последние 20–30 лет решающее влияние на развитие конструкций ШУ оказали следующие факторы [2]:

- разработка новых инструментальных материалов, обеспечивающих возможность значительного повышения режимов резания;
- тенденция общего роста требований к точности обработки деталей машин;
- автоматизация универсальных станков на базе применения систем ЧПУ.

Появление новых инструментальных материалов создало предпосылки для развития высокопроизводительных процессов механической обработки, характеризующихся высокими скоростями резания. В конце 20 века появилось большое число публикаций, посвященных развитию соответствующих технологий. Итоги этих разработок отражены в том числе в материалах фирмы FAG [3]. Показано, в частности, что в лабораторных условиях скорость фрезерования алюминия достигала 9 тыс. м/мин. Долгосрочные прогнозы, основанные на экспериментах, предрекают достижение сверхзвуковых скоростей резания (до 30 тыс. м/мин).

## ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

Основные требования к ШУ и их опорам могут быть сформулированы на основе общих требований к металлорежущим станкам. В целом, ШУ должны обеспечивать заданную мощность в сочетании с высокой быстроходностью, а также иметь высокую точность вращения, жесткость, несущую способность и долговечность подшипников, ограниченное тепловыделение в опорах и, соответственно, малые температурные деформации. ШУ, таким образом, должны быть технологичными, экономичными и надежными.

**Требования к точности вращения шпинделей.** Точность вращения шпинделя является важнейшей характеристикой ШУ, в значительной мере определяющей точность обработки изделий на станке. С точностью вращения шпинделя связаны некоторые важные геометрические характеристики обработанной детали: в первую очередь, отклонение от круглости, отсутствие овальности,

постоянство диаметра в поперечном сечении (точность формы).

Точность вращения шпинделя зависит от точности изготовления и сборки подшипников и сопряженных с ними деталей, от регулировки подшипников и от числа оборотов шпинделя [4]. Решающей предпосылкой для производства прецизионных ШУ является соответствие точности вращения подшипников с требованиями к точности ШУ.

Квазистатическая точность вращения шпинделей (при медленном вращении) регламентируется стандартами на станки. Регламентируются следующие параметры: радиальное биение центрирующей (базирующей) шейки шпинделя; радиальное биение конического отверстия шпинделя; радиальное биение контрольной оправки, установленной в коническом (базирующем) отверстии шпинделя; осевое биение шпинделя; торцовое биение опорного (базирующего) бурта шпинделя.

Динамические смещения мгновенной оси вращения шпинделя под действием возмущений от опор и привода формируют динамическую точность вращения шпинделя, которая в настоящее время не регламентируется, что связано, в первую очередь, с высокими требованиями к техническим средствам для ее измерения. Спектральный анализ динамической точности вращения шпинделя позволяет давать дифференцированную оценку частотным составляющим, различно влияющим на формирование погрешностей обрабатываемой детали [5]. Так, составляющая с частотой вращения шпинделя (биение шпинделя) вызывает в основном погрешности размеров и взаимного расположения обрабатываемых поверхностей. Другие частотные составляющие вызывают погрешности формы и микропрофиля обрабатываемых поверхностей (волнистость, шероховатость).

**Требования к быстроходности.** Требования к быстроходности шпинделей определяются целевым назначением и особенностями станков.

Показателем быстроходности шпинделя служит произведение ( $d \times n$ ), где:  $d$  – средний диаметр подшипника передней опоры;  $n$  – максимальная частота вращения шпинделя. Быстроходность зависит от типа шпиндельных подшипников, вида и способа их смазки, наличия (отсутствия) их принудительного охлаждения.

В среднескоростных ШУ не принимают специальных мер для достижения высоких скоростей и показатель  $d \times n \leq 0,5 \cdot 10^6$  мм·мин<sup>-1</sup>. Благодаря специальным мерам (совершенствование смазки и охлаждения, балансировка шпинделя и др.) значения  $d \times n$  могут быть увеличены до  $1,5-2,5 \cdot 10^6$  мм·мин<sup>-1</sup> [6].

Большое влияние на работу ШУ оказывает диапазон регулирования частоты вращения шпинделя. При конструировании ШУ, работающих в широком диапазоне частот вращения, возникают проблемы, связанные с нестабильностью температуры подшипниковых опор и, соответственно, изменениями величины зазора-натяга подшипников [7].

**Требования к несущей и нагрузочной способности.** Несущая способность опор характеризуется динамической ( $C$ ) и статической ( $C_0$ ) грузоподъемностью подшипников, которые указываются в каталогах производителей подшипников. Допускаемые опорными качения нагрузки ограничены в основном выносливостью поверхностных слоев колец и тел качения и определяются расчетом на выносливость.

Несущая способность опор ШУ, выбранных по критерию жесткости, как правило, соответствуют требованиям, предъявляемым к шпиндельным опорам станков.

Под нагрузочной способностью ШУ понимают допустимый крутящий момент или мощность на шпинделе, которые определяются возможностями привода и несущей способностью подшипниковых опор. В качестве показателя нагрузочной способности принято отношение  $N/d$ , где:  $N$  – мощность привода ШУ, кВт;  $d$  – диаметр шейки шпинделя в передней подшипниковой опоре, мм. Для высокоскоростных электрошпинделей (моторшпинделей) этот показатель составляет 0,7–0,8 кВт/мм, в ШУ токарных и фрезерных станков отношение  $N/d$  обычно находится в интервале 0,2–0,3 кВт/мм [6].

**Требования к долговечности шпиндельных опор.** Поскольку размеры шпинделей выбирают в основном по критерию жесткости, расчетная долговечность опор по усталости многократно превышает допустимую, и, как правило, расчет на долговечность имеет условный характер. Ресурс прецизионных подшипников качения в составе ШУ обусловлен, в наибольшей степени и в большинстве случаев, потерей точности вращения шпинделя в связи с абразивным износом (микрочастицами загрязнений, попавшими в ШУ при сборке и эксплуатации, а также микрочастицами абразивов, внедренными в поверхностные слои деталей ШУ при их финишной обработке и со временем вышедшими на их поверхность) дорожек качения подшипников и разрегулировкой опор (по данным фирмы FAG [3], выход подшипников из строя из-за усталостного разрушения наблюдается в 10–15% случаев). В настоящее время оценка долговечности подшипников по их абразивному износу и методика их ускоренных испы-

таний – нерешенная научная проблема. Ресурс подшипников зависит также от качества их изготовления и особенно – от качества их монтажа в ШУ, однако этот вопрос изучен недостаточно.

В связи со сказанным, специальной регламентации по критериям усталостных повреждений и по износу долговечность опор качения ШУ не подвергается. Однако, в связи с ростом частот вращения и, как следствие, значительными инерционными нагрузками на тела качения в подшипниках (соизмеримыми с нагрузками от резания), в некоторых случаях обеспечение долговечности шпиндельных опор может стать проблемой [8].

К настоящему времени, практикой проектирования и производства ШУ принята расчетная долговечность опор обычных узлов порядка 20 тыс. ч, быстроходных – 10–12 тыс. ч, сверхбыстроходных – 5 тыс. ч.

Практически используемая граница усталостной долговечности зависит от конструкции и размеров подшипников. По данным исследований фирмы FAG, ей соответствует контактное напряжение на дорожках качения порядка 2 тыс. Н/мм<sup>2</sup> (для точечного контакта) и 1,5 тыс. Н/мм<sup>2</sup> (для линейного контакта). Эти значения рассматриваются как надежные, при условии отсутствия загрязнения смазки [3]. Рабочие нагрузки на подшипники ШУ даже для подшипников легких серий в большинстве случаев ниже указанных величин.

**Требования к жесткости шпиндельных узлов.** Статическая и динамическая жесткости ШУ определяют величину упругих перемещений шпинделя при резании и зависят от многих факторов: типа опор, способа создания и величины предварительного натяга, демпфирования в подшипниковых опорах, частоты вращения шпинделя, конструктивных размеров шпинделя и др. [9]. Так, при равных наружных диаметрах у подшипников с меньшим поперечным сечением (серия внутреннего диаметра) жесткость ШУ выше за счет большего диаметра шпинделя и большего числа шаров. Это особенно заметно для небольших диаметров шпинделей – 10–45 мм (у которых в балансе суммарной жесткости ШУ, в которую вносит свой вклад жесткость самого шпинделя и жесткость подшипниковых опор, преобладает составляющая от жесткости шпинделя) и мало значимо для шпинделей диаметром 100 мм и более (т.к. в балансе суммарной жесткости ШУ начинает преобладать составляющая от жесткости подшипниковых опор).

Требования к жесткости ШУ не регламентированы. Требуемая жесткость ШУ может быть получена из общего баланса жесткости станка. Необходимость повышения жесткости ШУ вызвана

возрастающими требованиями к динамическому качеству станков в условиях работы на тяжелых или скоростных режимах обработки и к точности обработки. Требования к жесткости ШУ могут быть обусловлены также задачей обеспечения нормальных условий работы его подшипников.

С увеличением предварительного натяга подшипников опор жесткость ШУ сначала возрастает быстро, а затем рост ее замедляется, и дальнейшее увеличение натяга становится малоэффективным и даже приводит к недопустимому тепловыделению в подшипниковых опорах. Выбор величины предварительного натяга зависит от частоты вращения шпинделя и величины нагрузок на шпиндель: при любых нагрузках в работе должны принимать участие все тела качения. Раскрытие стыка подшипника от сил резания недопустимо, так как в случае раскрытия стыка – скачком падает точность вращения ШУ, начинается проскальзывание шаров, и в результате наблюдается катастрофически быстрый рост температуры подшипника, ухудшение трибологических свойств смазки и даже быстрый и необратимый выход из строя ШУ.

**Энергетические потери и допустимый нагрев подшипников.** Энергетические потери в ШУ характеризуются моментом трения или мощностью холостого хода и определяются потерями на трение в приводе и шпиндельных опорах. С ростом частот вращения потери в опорах качения возрастают, а в высокоскоростных ШУ оказываются соизмеримыми с затратами энергии на процесс резания [10]. Нагрев шпиндельных опор и температурные деформации шпинделя в результате нагрева в значительной мере ограничивают форсирование режимов обработки.

Потери в опорах качения зависят от типа опор, вида смазочного материала, его количества и вязкости. Уменьшение потерь достигается при «минимальном» количестве смазочного материала.

Требование снижения потерь на трение и соответствующего нагрева подшипников обусловлено тем, что при высоких скоростях шпиндельные опоры работают в условиях нагрева, близкого к предельно допустимому, что является источником

температурных деформаций прецизионных станков. В настоящее время норма предельно допустимого нагрева подшипников установлена только для станков нормальной точности. Допустимый нагрев (избыточная температура) на наружном кольце принят за 50 °С.

В соответствии со сложившейся практикой конструирования и производства ШУ станков, рекомендованы примерные величины температуры допустимого нагрева наружных колец подшипников, указанные в табл. 1 [11].

### ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

Развитие ШУ идет по нескольким основным направлениям, которые кратко рассмотрены ниже.

**Конструкции и опоры ШУ.** Возрастание требований к ШУ привело к изменению их конструкций. Применявшиеся ранее компоновочные схемы ШУ не обеспечивают требуемых показателей работоспособности из-за недостаточной быстроходности упорных шарикоподшипников, значительных температурных деформаций переднего конца шпинделя. В настоящее время практически не выпускаются станки с трех- и четырехопорными шпинделями (за исключением ШУ станков для растачивания и шлифования глубоких отверстий).

Применение шпиндельных прецизионных конических подшипников, цилиндрических роликоподшипников, упорно-радиальных шарикоподшипников с углом контакта 60°, радиально-упорных шарикоподшипников с углами контакта 15° и 25° сделало возможной унификацию конструкций ШУ. Сравнительно недавно в станкостроении наблюдалось свыше 70 различных конструктивных схем ШУ с опорами качения. В настоящее время подавляющее большинство ШУ станков создаются на базе 8–10 типовых схем (табл. 2) [12].

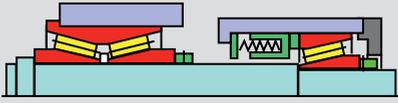
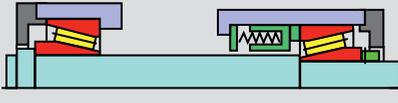
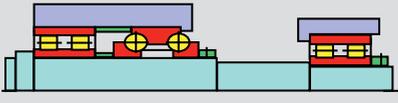
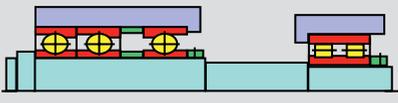
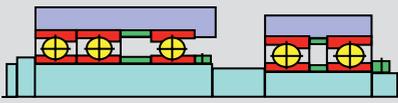
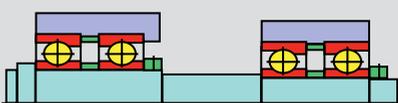
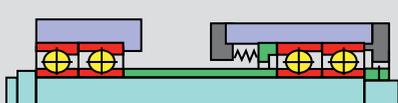
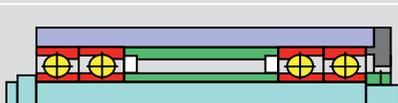
Интенсивное развитие процессов высокоскоростной обработки привело к появлению большого числа конструкций высокоскоростных ШУ, что свидетельствует о быстром расширении областей их применения. Такие ШУ устанавливаются на фрезерных, многоцелевых, внутри- и координатно-шлифовальных станках, иногда даже непосредственно в инструментальные магазины.

Совершенствование подшипников качения идет в направлении повышения их точности, создания сверхлегких и суперлегких серий, оптимизации условий контакта за счет изменения внутренней геометрии, использования композиционных материалов для изготовления элементов подшипников (керамические или «гибридные» подшипники), создания подшипников с детерминированным спектром вибрации. Погрешность вращения высо-

Таблица 1. Допустимый нагрев подшипников

Класс точности станка	Н	П	В	А	С
Допустимая избыточная температура наружного кольца, °С	50	30–35	20–25	15–20	8–10

Таблица 2. Типовые конструкции и области применения шпиндельных узлов

Типовые компоновки шпиндельных узлов	Области применения	
1		Средние и тяжелые токарные и фрезерные станки
2		Легкие и средние токарные, фрезерные и шлифовальные станки
3		Легкие и средние токарные, фрезерные, фрезерно-расточные, отделочно-расточные станки
4		Скоростные легкие и средние токарные, фрезерные, фрезерно-расточные и отделочно-расточные станки
5		Скоростные легкие и средние токарные, фрезерно-расточные и отделочно-расточные станки
6		Шлифовальные и отделочно-расточные станки для работы на особо высоких скоростях
7		Шлифовальные и отделочно-расточные станки для работы на высоких скоростях
8		Шлифовальные и отделочно-расточные станки для работы на высоких скоростях

коточных подшипников составляет 0,5–1,0 мкм, а особо точных – 0,2–0,3 мкм.

Освоение радиально-упорных шарикоподшипников с телами качения меньших диаметров и более тонкими кольцами позволило повысить их быстроходность при тех же внутренних диаметрах примерно в 2 раза, а при равных наружных диаметрах – увеличить их жесткость на 60–70% [13]. Большое влияние на технический уровень ШУ и их опор оказывает качество изготовления и сборки.

Проблема динамической жесткости ШУ решается за счет оптимальной конструкции шпинделя (длина и диаметр) и рационального применения опорных подшипников (размеры, предварительные натяги) [14].

**Системы смазки и охлаждения.** Решающее влияние на быстроходность шпинделей оказыва-

ет смазывание их опор. Широко распространенная пластичная смазка обеспечивает лишь низший участок диапазона скоростных режимов обработки ( $d \times n \leq 1,0 \cdot 10^6$  мм·мин<sup>-1</sup>). Средний участок диапазона скоростных режимов ( $d \times n = 1,4–1,6 \cdot 10^6$  мм·мин<sup>-1</sup>) обеспечивает «минимальная» смазка (маслово-воздушная смазка) с правильно выбранным режимом смазывания. Для верхней части диапазона скоростных режимов резания ( $d \times n > 1,8 \cdot 10^6$  мм·мин<sup>-1</sup>) необходимо циркуляционное смазывание с охлаждением. Оптимальный режим смазывания можно установить только экспериментально, при этом критерием является нагрев подшипников.

Тепловые потери в статоре электродвигателя ШУ (электрошпинделя, моторшпинделя) и подшипниках опор отводятся с помощью системы

жидкостного охлаждения, обеспечивающей термическую стабильность ШУ (вдоль оси шпинделя).

**Привод.** Для увеличения скорости съема материала необходимо увеличивать мощность привода ШУ. Высокоскоростная обработка развивается в направлении повышения частот вращения ШУ и их приводных мощностей, например до 25–30 кВт при 60 тыс. мин<sup>-1</sup>.

В качестве привода ШУ до сих пор в основном применяется асинхронный электропривод с электронным частотным преобразователем, обеспечивающим постоянство отношения частота/напряжение. Основное требование к преобразователям – компактность и обеспечение высокого крутящего момента шпинделей. Наружный диаметр ротора электродвигателя ШУ определяется передаваемой мощностью. С ростом мощности и быстроходности ШУ возникает проблема прочности обмоток ротора.

Стандартные роторы асинхронных электродвигателей ШУ допускают значения окружной скорости до 120 м/с, а роторы специальной конструкции, с укрепленной бандажом обмоткой, до 150–200 м/с.

Получает всё большее распространение синхронный привод. Основные преимущества применения в ШУ синхронного электродвигателя по сравнению с асинхронным электродвигателем (с короткозамкнутым ротором) являются:

- максимально возможная удельная мощность;
- максимально возможный КПД;
- увеличение мощности в 1,5 раза при адекватных величинах тока;
- постоянство крутящего момента в широком диапазоне частот вращения ШУ;
- наличие крутящего момента при неподвижном шпинделе (отсутствие вращения);
- «холодный» ротор (шпиндель);
- возможность позиционирования шпинделя по углу поворота и возможность управления вращением шпинделя, как полноценной круговой координатой станка;
- удобство построения распределенной системы управления приводами станков, когда все приводы станка по всем координатам выполнены на базе синхронных электродвигателей.

В среднем, по массе и габаритам синхронный привод ШУ превосходит асинхронный привод ШУ на 20–25%, однако синхронный привод ШУ уступает асинхронному по стоимости.

Совокупность преимуществ применения в последнее время синхронного электродвигателя в ШУ ведет ко всё большему его распространению, что связано с его постепенным удешевлением. Эта тенденция особенно характерна для

главных приводов (моторшпинделей) сверлильно-фрезерно-расточных станков, продольно-фрезерных обрабатывающих центров, токарных станков, токарно-фрезерных обрабатывающих центров и др. В то же время применение асинхронного привода в ШУ по-прежнему обосновано, например, во внутришлифовальных универсальных и специальных станках, станках для наружного шлифования, деревообрабатывающих и др. А для особо точных станков, например внутришлифовальных и некоторых других, имеет заметное преимущество привод ШУ осуществляемый плоскоремненной передачей, с регулируемым асинхронным приводным электродвигателем и системой его жидкостного охлаждения (для термостабилизации станка).

**Системы крепления инструмента.** Система крепления инструмента HSK имеет лучшие характеристики в сравнении с конусом ISO (SK), особенно при высоких скоростях, когда центробежные силы способствуют дополнительному зажиму инструмента в шпинделе [15]. Хвостовик инструмента HSK более легкий и короткий по сравнению с другими хвостовиками для крепления инструмента. К настоящему времени это единственная система крепления инструмента, которая способна обеспечить существующие и перспективные скорости резания и быстроходность ШУ.

**Системы защиты и контроля.** Современные системы управления и контроля ШУ снабжаются комплектом различных встроенных датчиков:

- углового (иногда и точного осевого) положения шпинделя;
- тепловой защиты статора электродвигателя ШУ;
- температуры подшипниковых опор шпинделя и охлаждающей жидкости;
- частоты вращения шпинделя;
- вибрации корпуса (или подшипниковых опор) ШУ;
- нагрузки от сил резания на передний подшипник [16];
- наличия масла и воздуха и др.

Система управления приводом ШУ (контроллер, электронный статический преобразователь частоты питающего тока) должна обеспечивать плавный и оптимальный по быстродействию разгон и эффективное торможение электродвигателя ШУ в требуемом диапазоне частоты вращения, чтобы защитить подшипниковые опоры шпинделей от чрезмерных динамических нагрузок. Наиболее перспективным является применение регулируемого электропривода на базе статических полупроводниковых преобразователей частоты.

ты, которые имеют программируемый модуль (контроллер) с указанием параметров систем блокировок и защиты каждого конкретного электрошпинделя (моторшпинделя).

## ВЫВОДЫ

Развитие и совершенствование конструкций современных высокоскоростных и высокоточных ШУ с бесступенчатым регулированием, сопровождаемое прогрессом в сфере технических средств и систем поддержания работоспособности ШУ, обеспечивает:

- быстрое развитие технологии высокоскоростной обработки, которая находит всё более широкое применение в машиностроении. Это в основном обусловлено тем, что износ инструмента при многократном повышении производительности съема увеличивается незначительно, благодаря значительному падению сил резания при высокоскоростной обработке;
- применение высокоскоростных ШУ для высокоскоростной обработки некоторых материалов, например легких (алюминиевых, магниевых) сплавов, особенно для авиакосмической промышленности, является основным методом значительного повышения производительности;
- установку высокоскоростных компактных ШУ в инструментальных магазинах многооперационных станков с возможностью их автоматической замены, тем самым значительно расширяя технологические возможности станков;
- реализацию быстрой смены главного привода станка (скоростного ШУ) для обеспечения нескольких видов технологий обработки на одном станке, либо при техническом обслуживании или плановом ремонте ШУ;
- применение высокоскоростных ШУ (моторшпинделей специальной конструкции) для комплектования однокоординатных и двухкоординатных шпиндельных головок, создание 5-координатных (многокоординатных) обрабатывающих центров, развитие которых в настоящее время является одной из главных мировых тенденций в станкостроении (применение многокоординатной обработки обеспечивает получение сложных деталей с одной установки, а также позволяет значительно сократить количество деталей в различных конструкциях, что ведет к созданию принципиально новых конструкций автомобилей, самолетов и другой наукоемкой техники);

→ максимальное использование возможностей современного инструмента из твердого сплава, алмазного инструмента и др. при обработке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Пуш А.В., Зверев И.А.** Шпиндельные узлы: качество и надежность при проектировании. М.: СТАНКИН, 2000. 132 с.
2. **Voll H., Ramer P.** On the way to a new generation of spindles / 2-nd International German and French Conference, Darmstadt Univ., Germany, March 10–11, 1999.
3. **Фигатнер А.М.** Конструирование быстроходных шпиндельных узлов. По материалам журнала фирмы FAG “Walzlager technik DA”. М.: ЭНИМС, 1990. 88 с.
4. **Бальмонт В.Б., Зверев И.А., Данильченко Ю.М.** Математическое моделирование точности вращения шпиндельных узлов // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1987. № 11. С. 154–159.
5. **Селезнева В.В.** Связь параметров траектории оси шпинделя с показателями качества детали // СТИН. 1985. № 1. С. 8–10.
6. **Потапов В.А., Айзенштот Г.И.** Высокоскоростная обработка. М.: ВНИИТЭМР. Сер. 1. Металлорежущее оборудование. 1986. Вып. 9. 60 с.
7. **Фигатнер А.М., Коршиков А.Г., Баклыков В.Г.** Обеспечение высокой быстроходности шпиндельных узлов на подшипниках качения // СТИН. 1983. № 4. С. 15–17.
8. **Таллиан Т.** Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние толщины масляной пленки, микрогеометрии поверхностей и трения на долговечность подшипников качения // В сб.: Проблемы трения и смазки. М.: Мир. 1981. Т. 103. № 4. С. 37–51.
9. **Бальмонт В.Б., Горелик И.Г., Левин А.М.** Влияние частоты вращения на упругодеформационные свойства шпиндельных шарикоподшипников // СТИН. 1986. № 7. С. 15–17.
10. **Левина З.М., Горелик И.Г., Зверев И.А., Сегида А.П.** Расчетный анализ деформационных, динамических и температурных характеристик шпиндельных узлов при проектировании. М.: ЭНИМС, 1989. 64 с.
11. **Фигатнер А.М.** Шпиндельные узлы современных металлорежущих станков. Обзор. М.: НИИмаш, 1983. 60 с.
12. **Зверев И.А.** Технология проектирования шпиндельных узлов на опорах качения // В межвуз. сб.: Ресурсосберегающие технологии в машиностроении. М.: МАМИ, 1994. С. 18–20.
13. **Фигатнер А.М., Бондарь С.Е., Парфенов И.В.** Применение радиальноупорных шарикоподшип-

- ников сверхлегких серий диаметров в шпиндельных узлах металлорежущих станков // СТИН. 1984. № 5. С. 16–18.
14. **Глейзер Ю.В.** Исследование динамики высокоскоростных электрошпинделей с опорами качения // В сб.: Исследование, расчет и проектирование подшипников качения. М.: Специнформцентр ВНИПП, 1986. С. 140–151.
  15. **Григорьев С.Н., Кохомский М.В., Маслов А.Р.** Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: Справочник / Под общ. ред. А.Р. Маслова. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.: ил. (Б-ка инструментальщика).
  16. **Дубовецкий Б.О., Фигатнер А.М., Бондарь С.Е.** Шпиндельный узел с тензоподшипником как элемент системы контроля технологического процесса // Технология, организация и экономика машиностроительного производства. М.: ВНИИТЭМР. 1985. Вып. 2, С. 4–6.
  17. **Григорьев С.Н.** Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 3. С. 7–13.
  18. **Бушуев В.В., Сабиров Ф.С.** Направления развития мирового станкостроения // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 1. С. 24–30.
  19. **Хомяков В.С., Кочинев Н.А., Сабиров Ф.С.** Экспериментальное и расчетное исследование динамических характеристик шпиндельных узлов // СТИН. 2009. № 3. С. 5–9.
  20. **Кузнецов А.П., Косов М.Г.** Теплостойкость и быстроходность шпиндельных узлов металлорежущих станков // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 2. С. 22–24.
  21. **Бушуев В.В., Молодцов В.В.** Высокоскоростные мотор-шпиндели приводов главного движения металлорежущих станков // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 3. С. 24–32.
  22. **Бушуев В.В., Чернусь Г.В.** Шпиндельный узел с комбинированными опорами // Станки и инструмент. 1993. № 2. С. 14.

---

**ЗВЕРЕВ Игорь Алексеевич** –  
*доктор технических наук, профессор кафедры*  
*МГТУ «СТАНКИН»*