

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING

**Космынин А.В., Щетинин В.С.**  
**A.V. Kosmynin, V.S. Schetinin**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ  
НА БЕСКОНТАКТНЫХ ОПОРАХ ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОМАГНИТНЫХ  
ПОДШИПНИКОВ**

**IMPROVING HIGH-SPEED SPINDLE ASSEMBLIES ON NO-CONTACT BEARINGS  
USING GAS-MAGNETIC BEARINGS**

**Космынин Александр Витальевич**, доктор технических наук, профессор, декан ФЭТМТ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КнАГТУ). Тел. 8(4217)534191. E-mail: [avkosm@knastu.ru](mailto:avkosm@knastu.ru)

**Alexander V. Kosmynin** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Transport and Marine Technologies, State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur), phone: 8(4217)534191, e-mail: [avkosm@knastu.ru](mailto:avkosm@knastu.ru).

**Щетинин Владимир Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, докторант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КнАГТУ). Тел. 8(4217)531474. E-mail: [schetynin@mail.ru](mailto:schetynin@mail.ru)

**Mr. Vladimir S. Schetinin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, candidate for a doctoral degree, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, phone: 8(4217)531474, e-mail: [schetynin@mail.ru](mailto:schetynin@mail.ru).

**Аннотация:** Рассмотрено влияние магнитной силы на несущую способность и жесткость шпиндельного узла с газомангнитной опорой. Сделан сравнительный анализ эксплуатационных характеристик шпиндельного узла с газомангнитной и газостатической передней опорой. Определены области технологического использования таких шпиндельных узлов.

**Summary:** The paper investigates the influence of magnetic force on bearing ability and rigidity of spindle assembly with a gas-magnetic bearing. A comparative analysis of performance of a spindle assembly with a gas-magnetic/gas-static front support is made. Areas for industrial use of such spindle assemblies are defined.

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, газомангнитная опора, шпиндельные подшипники, газостатические подшипники, несущая способность, жесткость шпиндельного узла.

**Keywords:** spindle assemblies, gas-magnetic bearings, spindle bearings, gas-static bearings, bearing ability, rigidity of spindle assemblies.

УДК 62-229.331:621.924

Подъем промышленного производства в стране, в том числе и предприятий машиностроительного комплекса, обуславливает спрос на металлорежущие станки. При этом возрастает потребность в высокоточном и высокопроизводительном оборудовании.

Скоростной параметр станка зависит от вида шпиндельного узла (ШУ) и типа опор, применяемых в нем. Высокие скорости вращения шпинделя достигаются на опорах с газовой смазкой [1, 2], магнитных подшипниках [1, 3] и немного меньше на опорах качения [1].

Точность обработки зависит во многом от технологической схемы обработки. Известно, что наибольшая точность достигается при обработке детали за один установ. Кроме этого сокращается и вспомогательное время обслуживания станка. Поэтому черновые и чистовые операции желательно проводить на одном станке без открепления детали. Для этого необхо-

дим шпиндель, который должен иметь достаточную несущую способность для черновых операций и высокую жесткость на финишных операциях.

ШУ на подшипниках качения обеспечивает высокую несущую способность и невысокую жесткость [1], так как контакт происходит, согласно теории эластогидродинамики, по малому пятну контакта тела качения и дорожки качения. Газостатические и газодинамические опоры ШУ обеспечивают достаточно высокую жесткость, но при этом имеют сравнительно небольшую несущую способность.

Разработанная в КНАГТУ конструкция газоманитной опоры (ГМО) [4] вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к подшипникам ШУ шлифовальных станков. При выключенном питании соленоида ГМО способна работать в режиме газостатического подшипника, а при включенном соленоиде – в режиме газоманитного воздействия на шпиндель. При этом в последнем случае опора имеет несущую способность выше в сравнении с традиционным газостатическим подшипником.

В настоящее время характеристики ГМО остаются не изученными, что требует особого внимания этому вопросу. В работе [5] приводятся статические испытания несущей способности такой опоры. Результаты исследований показали, что несущая способность ГМО по сравнению с газостатическим подшипником практически удваивается.

Выполним сравнительную оценку характеристик ШУ с передней газостатической и газоманитной опорой по двум основным параметрам – жесткости и несущей способности. В обоих случаях задний подшипник шпинделя газостатический.

Несущая способность передней комбинированной опоры определяется как результирующий вектор двух векторов – магнитной силы  $\vec{Q}_m$  и силой, создаваемой давлением газа  $\vec{Q}_2$ :

$$\vec{Q}_1 = \vec{Q}_m + \vec{Q}_2.$$

Нагрузка на шлифовальном круге определяется на основе известной методики С.А. Шейнберга. Типовая схема ШУ с креплением шлифовального круга на консоли шпинделя показана на рис. 1.

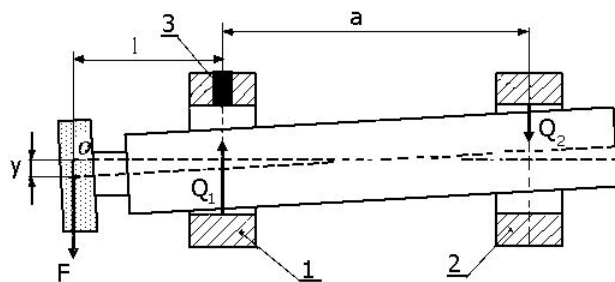


Рис. 1. Схема шпиндельного узла: 1 – передний газоманитный подшипник; 2 – задний газостатический подшипник; 3 – магнитопровод соленоида

Нагрузка на шлифовальном круге находится из двух уравнений статики:

1) суммы проекций сил на ось  $Y$ :

$$Q_1 - Q_2 - F = 0,$$

2) уравнения моментов относительно точки  $O$ :

$$Q_1 l - Q_2 (a + l) - M = 0,$$

где  $Q_2$  – несущая способность задней опоры;  $M$  – восстанавливающий момент от перекоса, равный сумме моментов переднего подшипника, заднего подшипника и подпятника.

Жесткость, измеренная на шлифовальном круге, определяется по формуле

$$J = dF / dy,$$

где  $y$  – смещение оси круга.

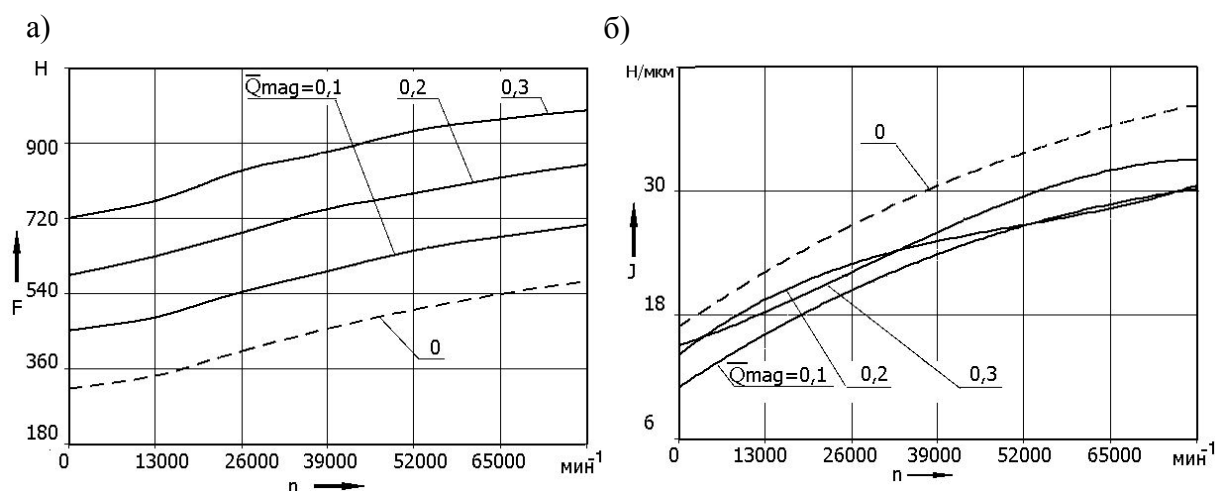


Рис. 2. Эксплуатационные зависимости шпиндельного узла:  
 а – несущей способности (F); б – жесткости (J) от быстроходности  
 (для  $P_{изб} = 5$  атм,  $L_1 = 60$  мм,  $D_1 = 50$  мм)

Усилие, развиваемое электромагнитом  $Q_m$ , рассчитывается согласно выражению:

$$Q_m = K_s h^{-2} S,$$

где  $K_s$  – коэффициент, учитывающий электрические параметры соленоида;  $h$  – зазор между шпинделем и вкладышем подшипника;  $S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Газовая составляющая несущей способности ГМО  $Q_g$  находилась с помощью решения модифицированного уравнения Рейнольдса теории газовой смазки [2].

Результаты расчетов представлены на рис. 2, на которых  $\bar{Q}_m$  – относительная магнитная сила, равная отношению текущего значения магнитной силы к максимально возможной грузоподъемности ГМО при отключенном электромагните.

Из показанных зависимостей видно, что на частотах вращения шпинделя до  $65\,000\text{ мин}^{-1}$  нагрузка на шлифовальном круге с включенным электромагнитом передней опоры вдвое выше, чем при отключенном ( $\bar{Q}_m = 0$ ). При этом потеря жесткости составляет около 20 %. Снижение жесткости происходит вследствие увеличения магнитного зазора с ростом эксцентриситета. На режиме работы передней опоры ШУ с включенным электромагнитом можно обрабатывать детали на черновых и получистовых операциях с припусками для соответствующих видов обработки. После выключения электромагнита, без переустановки детали, проводятся чистовые и финишные виды обработки с меньшими силами резания, когда не требуется большая нагрузка на шлифовальном круге. При этом жесткость, измеренная на шлифовальном круге, заметно возрастает, что позволяет получить точность, заданную требованиями на обработку детали.

Приведенный выше анализ основных эксплуатационных характеристик высокоскоростных ШУ с передней газоманитной опорой показывает, что данное техническое решение позволит более эффективно использовать станочное оборудование за счет уменьшения вспомогательного времени на установку и снятие детали. Кроме этого, обработка детали за один установ позволяет добиться наибольшей точности из всех технологических схем обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пуш, А.В. Шпиндельные узлы: Качество и надёжность / А.В. Пуш. – М.: Машиностроение, 1992. – 228 с.
2. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А.В. Космынин, Ю.Г. Кабалдин, В.С. Виноградов, С.П. Чернобай. – М.: Изд-во «Академия Естествознания», 2006. – 219с.
3. Журавлёв, Ю.П. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение / Ю.П. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206с.
4. Пат. 2347960 РФ. Способ работы подшипникового узла и подшипниковый узел / Космынин А.В., Щетинин В.С.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. № 2007120545/11; заявл. 01.06.07; опубл. 27.02.09, Бюл. № 6. – 1 с.
5. Космынин, А.В. Применение магнитной силы в газостатических опорах высокоскоростных шпиндельных узлов / А.В. Космынин, В.С. Щетинин, Н.А. Иванова // Вестник машиностроения. – 2009. – № 5. – С. 19-21.