

УДК 62-229.331:621.924

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА МАГНИТОПРОВОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ШПИДЕЛЬНОГО УЗЛА С ГАЗОМАГНИТНОЙ ОПОРОЙ

**Космынин А.В., Щетинин В.С., Хвостиков А.С., Смирнов А.В., Блинков С.С.**

*ГОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»,  
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: faks@knastu.ru*

Рассмотрена методика расчета выходных характеристик высокоскоростного шпиндельного узла с передней газомангнитной опорой, несущая способность которой обусловлена совместным действием газовых сил и сил электромагнитного поля. Приведена конструкция такого подшипника. С целью проверки достоверности теоретических результатов расчетов приведено их сравнение с экспериментальными данными. Проанализировано влияние длины магнитопровода двухполюсного газомангнитного подшипника на выходные характеристики шпиндельного узла. На основе выполненных исследований изготовлен опытно-промышленный образец высокоскоростного шпиндельного узла, испытания которого показали на высокое качество и точность обрабатываемых поверхностей.

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, газомангнитная опора, несущая способность, жесткость смазочного слоя

## THE INFLUENCE OF SIZE MAGNETIC-WIRE ON CHARACTERISTICS OF SPINDLE UNIT WITH GAS-MAGNETIC BEARING

**Kosmynin A.V., Shchetinin V.S., Khvostikov A.S., Smirnov A.V., Blinkov S.S.**

*SEIHPЕ «Komsomolsk-na-Amure state technical university»,  
Komsomolsk-na-Amure, e-mail: faks@knastu.ru*

Methodology of calculation of output descriptions of high speed spindle unit is considered with front gas-magnetic bearing strength of which is conditioned by the united action of gas forces and forces of the electromagnetic field. A construction over of such bearing is brought. With the purpose of verification of authenticity of theoretical results of calculations their comparison over is brought with experimental data. Analysed influence of the length magnetic conductor of double-pole gas-magnetic bearing on operational characteristics of spindle unit. On the basis of the executed researches the industrial construction of high-speed spindle unit the tests of which were shown on high quality and exactness of the processed surfaces is made.

**Keywords:** spindle unit, gas-magnetic bearing, carrier ability, rigidity lubricating layer

Развитие современной промышленности предъявляет повышенные требования к технологическому оборудованию по производительности и точности. Одним из видов такого оборудования являются шлифовальные станки, применяемые на финишных операциях для прецизионной и сверхпрецизионной обработки. Точность и производительность таких станков зависит в основном от точности работы шпиндельного узла (ШУ).

Высокоскоростные ШУ шлифовальных станков должны обеспечивать высокую быстроходность, жесткость на шлифовальном круге и достаточную силу резания для повышения производительности и точности обработки.

Высокая быстроходность ШУ достигается при использовании бесконтактных газовых или магнитных опор. Однако такие подшипники имеют сравнительно невысокую несущую способность [5], что ограничивает силу резания на шлифовальном круге и приводит к снижению производительности, особенно при снятии черновых и получистовых припусков.

Один из способов повышения эксплуатационных характеристик бесконтактных опор ШУ состоит в применении комбинированных подшипников, и, в частном слу-

чае, газомангнитных опор. Несущая способность таких подшипников обеспечивается совместным действием сил давления газовой смазки и магнитного поля [4].

Рассмотрим методику расчета выходных характеристик ШУ с передней газомангнитной и задней газостатической опорами. Передняя опора имеет два магнитных полюса. Газ в зазор подшипников подается через пористые вставки, расположенные в газонепроницаемом вкладыше. Типовая схема ШУ с креплением шлифовального круга на консоли шпинделя показана на рис. 1.

Нагрузка на шлифовальном круге находится из двух уравнений статики: суммы проекций сил на ось  $Y$ :

$$F = Q_1 - Q_2$$

и уравнения моментов относительно точки  $O$ :

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

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – несущая способность передней и задней опоры соответственно;  $M$  – восстанавливающий момент от перекоса передней и задней опоры.

Представленные выражения показывают, что для определения нагрузки на шлифовальном круге необходимо знать несущую способность опор и восстанавливающий момент

от перекоса шпинделя. При этом заметим, что последняя величина, как показали расчеты, на порядок меньше моментов сил  $Q_1$  и  $Q_2$ .

Расчет частично пористых газостатических подшипников ШУ достаточно полно изложен в работе [2].

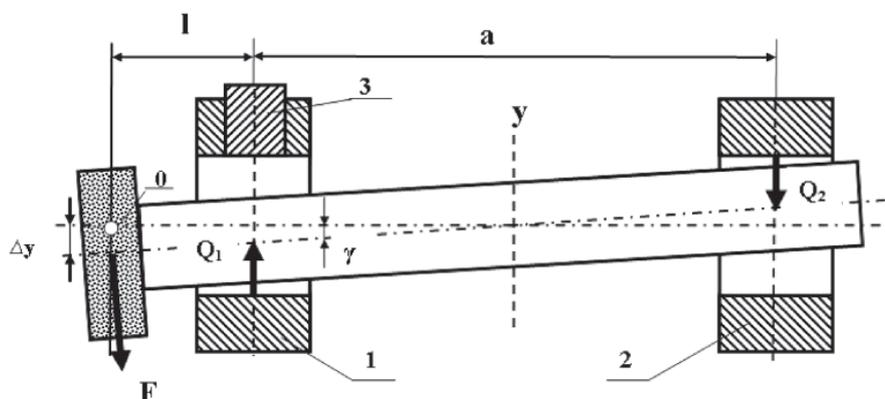


Рис. 1. Схема ШУ с креплением илифовального круга на консоли шпинделя: 1 – передняя газомангнитная опора; 2 – задняя газостатическая опора; 3 – магнитопровод

Рассмотрим методику расчета эксплуатационных характеристик газомангнитной

опоры с двумя магнитными подвесами, изображенной на рис. 2.

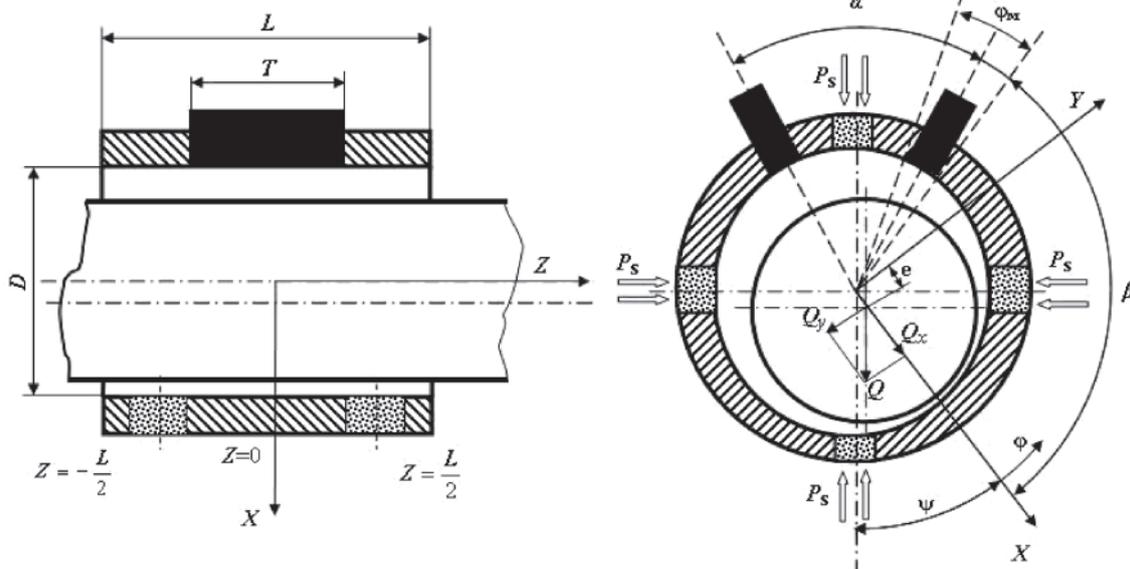


Рис. 2. Схема газостатической опоры с двумя магнитными подвесами

Методика расчета газомангнитной опоры базируется на том, что поле давлений газовой смазки и магнитное поле имеют разную природу и не оказывают заметного влияния друг на друга. Тогда несущую способность такой опоры можно представить как результирующий вектор двух силовых векторов – магнитной силы и силы давления газа.

В скалярной форме выражение для определения несущей способности газомангнитной опоры имеет вид:

$$Q = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2},$$

где  $Q_x$  и  $Q_y$  – проекции нагрузки на ось  $X$  и  $Y$  соответственно. Каждая из этих проекций равна:

$$Q_x = Q_{xг} + F_{xм}, \quad Q_y = Q_{yг} + F_{yм},$$

где  $Q_{xг}$  и  $Q_{yг}$  – проекции на ось  $X$  и  $Y$  газовой составляющей несущей способности,  $F_{xм}$  и  $F_{yм}$  – проекции на ось  $X$  и  $Y$  магнитной составляющей несущей способности.

Согласно работе [3] проекции на оси координат газовой составляющей нагрузки равны:

$$Q_{xг} = R \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p \cos \phi \, d\phi \, dz,$$

$$Q_{\text{вт}} = R \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} p \sin \phi \, d\phi \, dz,$$

где  $R$  – радиус вкладыша,  $L$  – длина подшипника,  $p$  – давление в газовом слое,  $\phi$  – координата в окружном направлении подшипника,  $z$  – координата в осевом направлении подшипника.

Магнитная составляющая несущей способности опоры по абсолютной величине равна тяговому усилию соленоидов. Известно [1], что его элементарная величина находится по формуле:

$$dF_m = \frac{B^2}{2\mu_0} dS, \quad (1)$$

где  $B$  – магнитная индукция,  $S$  – площадь ферромагнитного тела,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Принимая во внимание хорошо известную зависимость индукции от ве-

$$F_{\text{хм}} = \frac{K_3 RT}{c^2} \left[ \cos(\psi - \frac{\alpha}{2}) \int_{\beta}^{\beta+\phi_m} \frac{d\phi}{h^2} + \cos(\psi + \frac{\alpha}{2}) \int_{\beta+\alpha}^{\beta+\alpha+\phi_m} \frac{d\phi}{h^2} \right],$$

$$F_{\text{ym}} = \frac{K_3 RT}{c^2} \left[ \sin(\psi - \frac{\alpha}{2}) \int_{\beta}^{\beta+\phi_m} \frac{d\phi}{h^2} + \sin(\psi + \frac{\alpha}{2}) \int_{\beta+\alpha}^{\beta+\alpha+\phi_m} \frac{d\phi}{h^2} \right],$$

где  $\psi$  – угол положения нагрузки;  $\beta$  – окружная координата начала первого полюса;  $\phi_m$  – полюсный угол;  $T$  – длина электромагнита.

Заметим, что зазор  $\bar{h}$  между шпинделем и вкладышем подшипника находится из выражения:

$$\bar{h} = \frac{h}{c} = 1 - \varepsilon \cos \phi - \frac{\bar{\gamma}}{L} \cdot \bar{z} \cos(\phi - \psi),$$

где  $\bar{\gamma} = \frac{\gamma D \bar{L}}{2c}$  – параметр перекося;  $\bar{L} = \frac{L}{D}$  – удлинение подшипника;  $c$  – средний радиальный зазор;  $\varepsilon$  – относительный эксцентриситет;  $\gamma$  – угол перекося;  $D$  – диаметр подшипника;  $L$  – длина подшипника.

Жесткость, измеренная на шлифовальном круге, определяется по формуле:

$$J = \frac{dF}{dy},$$

где  $y$  – смещение оси круга.

Изложенная методика послужила основой для исследования влияния длины магнитопровода  $T$  – одного из основных элементов конструкции газомангнитной опоры, на выходные характеристики ШУ.

Результаты расчёта нагрузки  $F$  и жесткости  $J$  на шлифовальном круге в зависи-

мости зазора, выражение (1) запишем в виде

$$dF_m = K_3 h^{-2} dS, \quad (2)$$

где  $K_3 = 0,5\mu_0 (in)^2$  – коэффициент, учитывающий электрические параметры соленоида;  $i$  – ток в соленоиде;  $n$  – число витков соленоида;  $h$  – зазор между шпинделем и вкладышем подшипника.

Зависимость (2) является исходной при определении магнитной составляющей несущей способности, развиваемой двумя электромагнитами.

Поскольку величина зазора в сравнении с линейными размерами полюса меньше примерно в  $10^{-3}$ , то примем допущение об однородности магнитного поля. Принимая это во внимание, можно показать, что при угловой раздвижке электромагнитов  $\alpha$  проекции магнитной составляющей нагрузки с учётом длины магнитопровода  $T$  на оси координат находятся из выражений:

мости от частоты вращения шпинделя и длины магнитопровода представлены соответственно на рис. 3 и 4. Расчет выполнен, когда несущая способность передней опоры создается только как за счёт сил давления газа ( $T = 0$ ), так и при совместном действии газового и магнитного поля с относительной магнитной силой  $\bar{F}_m = 0,1$ . Экспериментальные данные получены на стенде. Конструкции и принцип работы стенда подробно описаны в работе [3].

Относительная магнитная сила определяется по следующей зависимости:

$$\bar{F}_m = F_m / D L \Delta P,$$

где  $F_m = \sqrt{F_{\text{хм}}^2 + F_{\text{ym}}^2}$  – абсолютная магнитная сила;  $\Delta P$  – избыточное давление наддува газа.

Из представленных зависимостей видно, что увеличение длины магнитопровода позволяет увеличить нагрузку на шлифовальном круге. Следует отметить, что при работе опоры в газомангнитном режиме при постоянной магнитной силе ( $\bar{F}_m = \text{const}$ ) жесткость шпиндельного узла ниже. Этот недостаток устраняется при использовании следящей системы управления положением шпинделя.

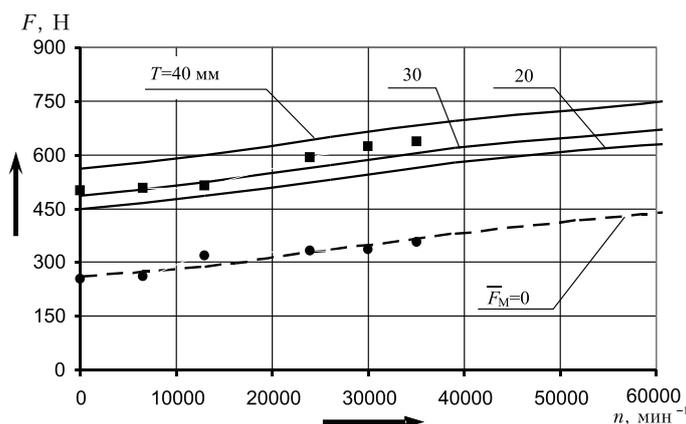


Рис. 3. Зависимость нагрузки  $F$  на шлифовальном круге от частоты вращения шпинделя  $n$  и длины магнитпровода  $T$ ; — — режим работы ШУ с выключенным электромагнитом; — — режим работы ШУ с включенным электромагнитом; ■ — эксперимент при  $T = 40$  мм; ● — эксперимент с выключенным электромагнитом

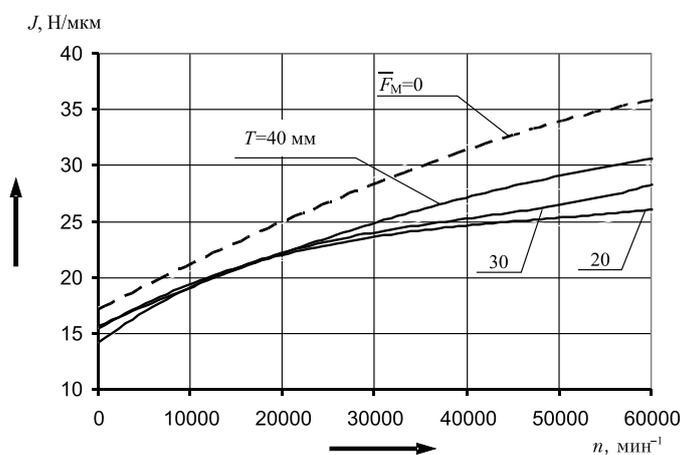


Рис. 4. Зависимость жесткости  $J$  на шлифовальном круге от частоты вращения шпинделя  $n$  и длины магнитпровода  $T$ ; режим работы ШУ с выключенным электромагнитом; режим работы ШУ с включенным электромагнитом

В Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете спроектирован и изготовлен опытно-промышленный образец высокоскоростного внутришлифовального шпиндельного узла, имеющего переднюю газомагнитную опору, а заднюю – газостатическую.

В результате испытаний ШУ при обработке образцов изделий диаметрами 25 и 40 мм, выполненными из стали 20×13, получены следующие результаты: некруглость отверстий не более 1,0 мкм, волнистость – до 0,15 мкм, шероховатость поверхности  $R_a$  не более 0,12 мкм, что на 10–15% выше, чем у ШУ, имеющих только газостатические опоры.

Из сказанного следует, что применение в станках ШУ с газомагнитными опорами позволяет более эффективно использовать станочное оборудование за счет совмещения полустатических, чистовых и финишных операций за один установ, а также получать более высокое качество обработки.

#### Список литературы

1. Бессонов П.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.
2. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А.В. Космынин, Ю.Г. Кабалдин, В.С. Виноградов, С.П. Чернобай. – М.: Академия Естественных наук, 2006. – 219 с.
3. Стенд для исследования выходных характеристик шпиндельного узла на газомагнитных опорах / В.С. Космынин, В.С. Щетинин, Н.А. Иванова, А.В. Хвостиков, С.С. Блинков // СТИН. – 2010. – №5. – С. 8–11.
4. Космынин А.В., Щетинин В.С. Способ работы подшипникового узла и подшипниковый узел: патент России № 2347960.2009. Бюл. №6.
5. Пуш А.В. Шпиндельные узлы: Качество и надёжность. – М.: Машиностроение, 1992. – 228 с.

#### Рецензенты:

Козин В.М., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре;

Амосов О.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой информатики ФГОУ ВПО «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.

Работа поступила в редакцию 25.02.2011.