

УДК 621.822.574

ШПИДЕЛЬНЫЕ УЗЛЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА ОПОРАХ С ВНЕШНИМ НАДУВОМ ГАЗА ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Щетинин В.С., Космынин А.В., Ульянов А.В., Ваньков А.А.

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

Произведен анализ бесконтактных опор с внешним надувом газа для подтверждения целесообразности их использования в высокоскоростных шпиндельных узлах МРС на финишных стадиях обработки. В статье кратко изложена методика, по которой проводился расчет выходных характеристик бесконтактных опор, также описан экспериментальный стенд для подтверждения точности расчета и теории. Выводы основывались на показателях жесткости шпиндельного узла (ШУ) в зависимости от изменения оси его смещения (эксцентриситета) и нагрузки, прилагаемой к шлифовальному кругу. Произведенные теоретические и экспериментальные исследования этих показателей позволили сделать заключения по использованию газовых опор, которые подтверждают их целесообразное использование на финишных стадиях обработки поверхности в связи с высокой жесткостью опор с внешним надувом газа при высоких рабочих оборотах ШУ МРС.

Ключевые слова: эксцентриситет, высокоскоростные шпиндельные узлы (ШУ), металлорежущие станки (МРС), жесткость, нагрузка

SPINDLE ASSEMBLIES OF METAL CUTTING MACHINE TOOLS (MRS) FOR FINISHING SMALL-DIAMETER HOLES ON SUPPORT FROM EXTERNAL INFLATING GAS

Schetinin V.S., Kosmynin A.V., Ulyanov A.V., Vankov A.A.

Komsomolsk-on-Amur State Technical University,
Komsomolsk-on-Amur, e-mail: office@knastu.ru

The analysis of non-contact bearings with external inflating gas to confirm the appropriateness of their use in high-speed spindle units IFAs on the final stage of processing. The article summarized the methodology on which the calculation was carried out of the output characteristics of non-contact bearings, also described experimental stand to confirm the accuracy of the calculation and theory. Conclusions based on indicators of severity of the spindle unit (SHU), depending on changes to its axis of displacement (eccentricity) and the load applied to the grinding wheel. Made theoretical and experimental studies of these indicators, led to the conclusion, on the use of gas struts that confirm their expedient use for the final stage of the surface treatment due to the high cruelty supports an external inflating gas at high operating speeds SHU MRS.

Keywords: eccentricity, high-speed spindle units (SHU), metal cutting machines (IFA), the stiffness, the load

Высокоскоростная обработка является одним из приоритетных направлений развития современной технологии производства. Ее внедрение в промышленность позволит повысить производительность труда при одновременном повышении точности обработки.

Современное высокотехнологическое производство характеризуется жесткими требованиями к точности изделий, которая практически полностью определяется совершенством технологического оборудования. Для создания высококачественных изделий необходимы высокоскоростные прецизионные металлообрабатывающие станки, эффективность работы которых определяется до 80% точностью работы шпиндельных узлов [1].

Реализация высоких скоростей в шпиндельных узлах металлорежущих станков, возможна при применении в них быстроходных опор.

Современные требования к шпиндельным узлам

металлообрабатывающих станков

Уровень требований по точности и производительности к металлообрабатывающему оборудованию, используемому для производства деталей в авиастроении, в машиностроении, в конструкции гидроприводов и других отраслях промышленности характеризуется такими показателями, как погрешность вращения менее 0,5 мкм; быстроходность более $5 \cdot 10^5$ мм·мин⁻¹; диаметр обрабатываемых поверхностей 10...60 мм [1].

Актуальность использования газовых опор в шпиндельных узлах металлообрабатывающих станков

Опыт эксплуатации ШУ шлифовальных станков с опорами различных типов показывает, что в ряде случаев применение газостатических опор более предпочтительно, поскольку такие опоры способны

обеспечить точность вращения шпинделя равную $0,1 \dots 0,2$ мкм при скоростном параметре равном $0-5 \cdot 10^6$ мм/мин [2].

Достичь всех вышеупомянутых выходных характеристик и современных требований к точности обработки возможно на основе применения в конструкциях ШУ бесконтактных подшипников на газовой смазке.

К достоинствам шпиндельных опор на газовых подшипниках также следует отнести: упрощенную конструкцию шпиндельного узла; отсутствие металлического контакта; отсутствие опасности загрязнения выпускаемой продукции; малый расход мощности; возможность балансировки шпиндельного круга непосредственно на шпинделе.

Недостатком газовых опор является незначительная потеря жесткости при повышенной силе резания на начальных стадиях обработки поверхности.

Из всего вышесказанного делается вывод о целесообразности использования газовых опор для финишной обработки поверхностей металлорежущим станком (МРС).

Теоретические исследования

В работе [3] доказано целесообразное использование опор с частично пористой вставкой для финишной высокоскоростной обработки отверстий малого диаметра.

По дифференциальному уравнению (1) рассчитывается принцип распределения газа.

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}^2}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}^2}{\partial z} \right) = -f(1 - \bar{p}^2)K + 2B \frac{\partial(\bar{p}\bar{h})}{\partial \varphi}, \quad (1)$$

где $K = \frac{12k_p R_2}{c^3 \ln(1 + \delta/R_2)}$ – параметр питания

подшипника; $B = \frac{6\mu R_2^2 \omega}{p_s c^2}$ – число сжимаемости.

После расчета уравнения (1) рассчитываются выходные характеристики ШУ по методике, описанной ниже.

Методика расчета выходных характеристик

Для расчета выходных характеристик использовалась схема ШУ с креплением шлифовального круга на консоли шпинделя (рис. 1) [1].

Задаемся начальным эксцентриситетом ε_1 и при различных параметрах перекоса $\bar{\gamma}_1$ определяем несущую способность C_{Q_1} передней опоры и восстанавливающий момент \bar{M}_1 . Такой же принцип расчета C_{Q_1} используем и для задней опоры. В результате характеристики передней и задней опоры становятся зависимыми только от параметра перекоса. По уравнению $\bar{y} = \varepsilon_1 + l\bar{\gamma}_1/(R\bar{L}_1)$ находим относительное смещение оси шлифовального круга, а по уравнению $\bar{F} = C_{Q_1} - C_{Q_2}\bar{L}_2/\bar{L}_1$ находим нагрузку на шлифовальном круге. Далее находится коэффициент жесткости ШУ по формуле $k_{\bar{F}} = df(\bar{y})/d\bar{y}$.

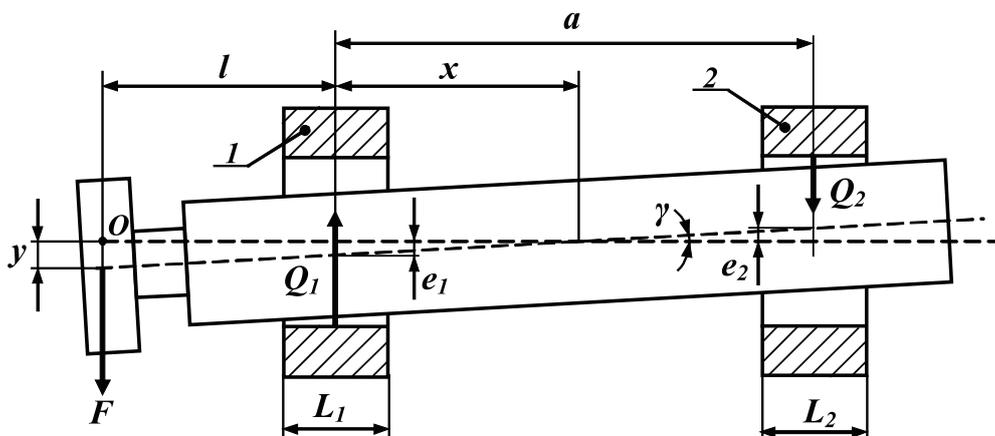


Рис. 1. Схема шпиндельного узла:

1 – передний подшипник; 2 – задний подшипник; F – нагрузка на шлифовальном круге; Q_1 – несущая способность передней опоры; Q_2 – несущая способность задней опоры; L_1 – удлинение передней опоры; L_2 – удлинение задней опоры; y – смещение оси шлифовального круга; γ – угол перекоса осей шпинделя и вкладыша подшипника; e – относительный эксцентриситет

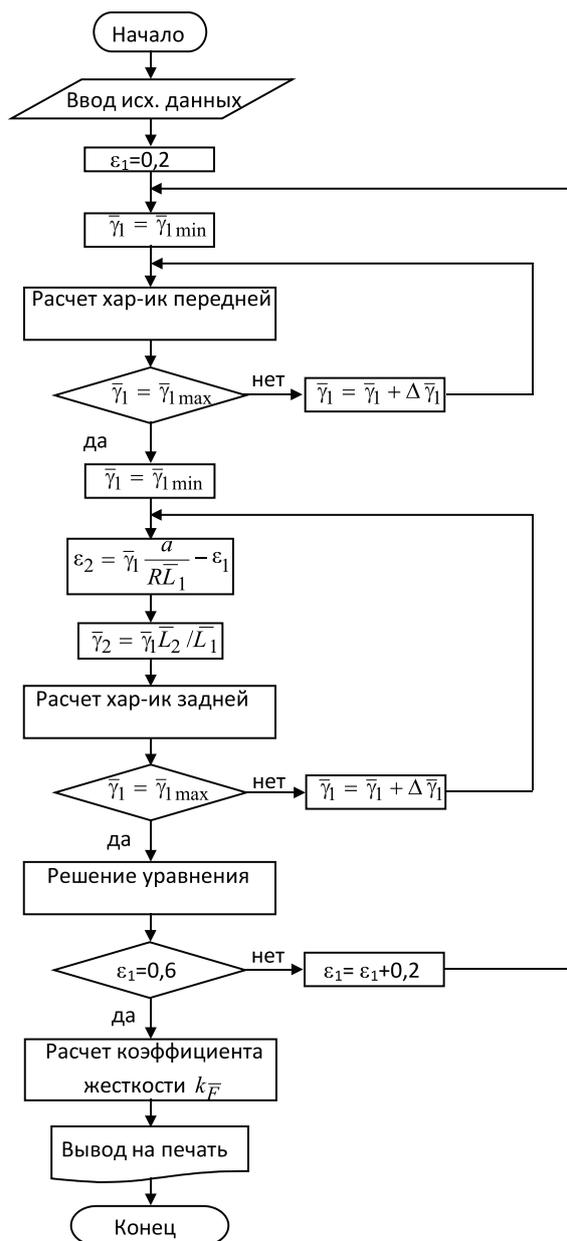


Рис. 2. Блок-схема расчета выходных характеристик ШУ

На основе вышеприведенных выводов и зависимостей представим методику в виде алгоритма расчета выходных характеристик шпиндельного узла (рис. 2) [1].

Оценка погрешности теоретических результатов наблюдений

Вышеописанная методика расчета газовых подшипников ШУ дает достаточно высокое качественное и количественное согласование результатов с экспериментальными показателями, так, средняя погрешность результатов расчета жесткости $k_{\bar{F}}$ с различным эксцентриситетом ε составляет 8%,

для относительной нагрузки \bar{F} погрешность при всех ε составляет 5%.

Экспериментальные исследования

Оценка достоверности результатов теоретических расчетов выходных характеристик ШУ выполнена на основе опытных данных, полученных на экспериментальном стенде (рис. 3).

Вал длиной 370 мм и диаметром 51,01 мм выполнен из стали 30ХГСА. Поверхность вала хромирована на глубину 2 мм и закалена до твердости HRC 60-65. После закалки поверхность обработана до 10 класса шероховатости с высотой микронеровностей $R_a = 0,16$ мкм.

Геометрические размеры газовых опор: длина подшипников $L_1 = L_2 = 60$ мм; диаметр подшипников $D = 51,11$ мм; средний радиальный зазор $c = 50$ мкм; раздвижка линий наддува в опоре $b = 24$ мм; раздвижка опор, $a = 213$ мм; вылет шпинделя $l = 67,3$ мм.

Оценка погрешности экспериментальных результатов наблюдений

Полученные значения эксплуатационных характеристик ШУ определяются с помощью, различных инструментов и приборов, которые имеют определенную степень точности. Поэтому для корректного анализа необходимо найти суммарное влияние этих погрешностей на результаты экспериментов. В результате процентная погрешность результатов экспериментов выходных характеристик ШУ с газовыми опорами составляет: для относительной нагрузки – $\varepsilon_{\bar{F}} = 1,83\%$, для коэффициента жесткости – $\varepsilon_{k_{\bar{F}}} = 2,62\%$.

Теоретические и экспериментальные наблюдения

Подтверждение целесообразности использования газовых опор высокоскоростных ШУ на финишных стадиях обработки

Как видно из полученных результатов эксперимента и теоретических данных, во время повышенной силы резания \bar{F} происходит увеличение относительного эксцентриситета ε_1 рис. 3, а $\varepsilon_1 = \frac{e}{c}$ это приводит к понижению жесткости $k_{\bar{F}}$ ШУ (рис. 4, а).

На финишных стадиях обработки поверхности сила резания \bar{F} уменьшается, что приводит к повышению жесткости $k_{\bar{F}}$ ШУ из-за уменьшения эксцентриситета ε_1 , рис. 4, б.

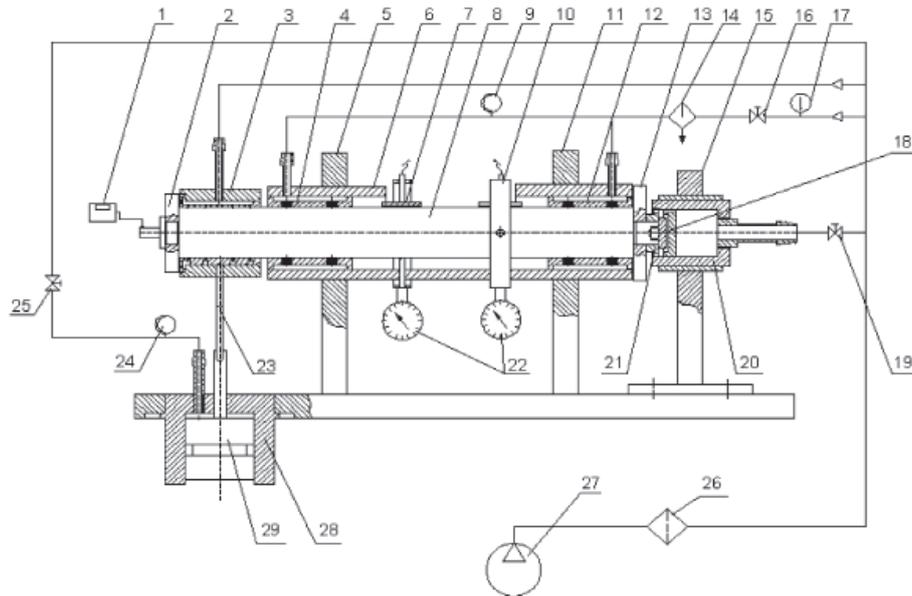


Рис. 3. Экспериментальный стенд для исследования выходных характеристик шпиндельного узла с газостатическими подшипниками [1]: вал 8; передний 4 и задний 12 радиальные газостатические подшипники с пористыми вставками; нагрузочный подшипник 3; опорные стойки 5; 11; корпус подшипников 6; кольцо 10; подпятники 2,13; водомаслоотделитель 14; стойка корпуса турбины 15; клапан подвода воздуха к подшипникам 16; клапан подвода воздуха к турбине 19; сопловой аппарат турбины 18; корпус турбины 20; рабочее колесо 21; гибкая связь 23; клапан подвода воздуха к нагрузочному поршню 25; воздушный фильтр 26; компрессор 27; корпус нагрузочного поршня 28; нагрузочный поршень 29

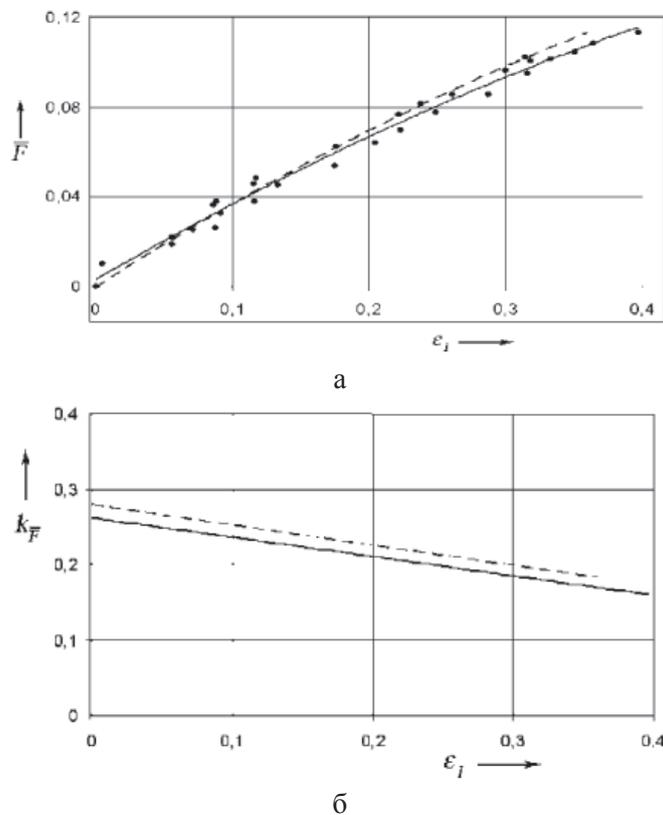


Рис. 4. Зависимость нагрузки \bar{F} от эксцентриситета ϵ_i и зависимость жесткости $k_{\bar{F}}$ от эксцентриситета ϵ_i :
 а – \bar{F} от ϵ_i ; б – $k_{\bar{F}}$ от ϵ_i [1]

Выводы

Испытания опытного образца внутришлифовальной головки, выполненные на филиале ОАО «ОКБ Сухого», показали хорошее качество шлифуемой поверхности отверстий, высокую точность ее обработки (отклонение от округлости не более 0,2 мкм, волнистость поверхности на доводочном режиме не обнаружена) и надежную работу газовых опор. Установлено также, что при работе на разработанной конструкции головки износ шлифовального круга уменьшается в 1,4 раза по сравнению с отраслевой конструкцией головки на опорах качения. При этом производительность напора возрастает в 2,3 раза.

Список литературы

1. Космынин А.В., Шаломов В.И., Щетинин В.С., Жесткая В.Д., Хвостиков А.С., Смирнов А.В. Выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов на газовых опорах: монография. – М.: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2011. – 178 с.
2. Космынин А.В., Щетинин В.С., Смирнов А.В. Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем: монгр.: в2 ч. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014.
3. Космынин А.В., Кабалдин Ю.Г., Виноградов В.С., Чернобай С.П. Эксплуатационные характеристики газовой опоры высокоскоростных шпиндельных узлов. – М.: Академия естествознания, 2006. – 219 с.
4. Космынин А.В., Щетинин В.С., Хвостиков А.С. Основы проектирования высокоскоростных шпиндельных узлов на газоманитных опорах. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 181 с.
5. Космынин А.В., Щетинин В.С., Иванова Н.А., Хвостиков А.С. Газоманитные опоры высокоскоростных роторных систем: монография. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО КнАГТУ, 2013. – 132 с.
6. Щетинин В.С. Совершенствование высокоскоростных шпиндельных узлов на бесконтактных опорах

за счёт применения газоманитных подшипников / А.В. Космынин, В.С. Щетинин // Ученые записки КнАГТУ Вып. II-1(2). Науки о природе и технике, гл. ред. А.М. Шпилев. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО КнАГТУ, 2010. – С. 65–68.

References

1. Kosmyinin A.V., Shalomov V.I., Shhetinin V.S., Zhestkaja V.D., Hvostikov A.S., Smirnov A.V. Vyhodnye karakteristiki vysokoskorostnyh shpindelnyh uzlov na gazovyh oporah: monografija. M.: Izdatelskij Dom «Akademija Estestvoznaniya», 2011. 178 p.
2. Kosmyinin A.V., Shhetinin V.S., Smirnov A.V. Beskontaktnye opory vysokoskorostnyh rotornyh sistem: mongr.: v2 ch. Komsomolsk-na-Amure: FGBOU VPO «KnAGTU», 2014.
3. Kosmyinin A.V., Kabaldin Ju.G., Vinogradov V.S., Chernobaj S.P. Jekspluatacionnye karakteristiki gazovoy opory vysokoskorostnyh shpindelnyh uzlov. M.: Akademija estestvoznaniya», 2006. 219 p.
4. Kosmyinin A.V., Shhetinin V.S., Hvostikov A.S. Osnovy proektirovaniya vysokoskorostnyh shpindelnyh uzlov na gazomagnitnyh oporah. Vladivostok: Dalnauka, 2011. 181 p.
5. Kosmyinin A.V., Shhetinin V.S., Ivanova N.A., Hvostikov A.S. Gazomagnitnye opory vysokoskorostnyh rotornyh sistem: mongr. Komsomolsk-na-Amure: FGBOU VPO KnAGTU, 2013. 132 p.
6. Shhetinin V.S. Sovershenstvovanie vysokoskorostnyh shpindelnyh uzlov na beskontaktnykh oporah za schjot primeneniya gazomagnitnyh podshipnikov / A.V. Kosmyinin, V.S. Shhetinin // Uchenye zapiski KnAGTU Vyp. II-1(2). Nauki o prirode i tehnikе, gl. red. A.M. Shpilev. Komsomolsk-na-Amure: GOUVPO KnAGTU, 2010. pp. 65–68.

Рецензенты:

Черномас В.В., д.т.н., профессор, главный инженер проекта, ООО «ТехКомплект», г. Комсомольск-на-Амуре;

Козин В.М., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре.