

УДК 691.9.048.6

Е.В. Пашков, А.И. Бохонский

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ЛЕВИТАЦИОННОЕ ТОЧЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ КОНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Предложена конструкция патрона для левитационного точения тонкостенных конических деталей. Найдена аналитическая зависимость угла поворота консольной аэростатической опоры от усилия, развиваемого пневмодвигателем и прикладываемого к мембране, с которой связаны аэростатические опоры. Рассмотрены вопросы динамики левитационного точения конических деталей.

Задачам динамики тонкостенных цилиндрических деталей и дисков при левитационном точении посвящены работы [1-3], в которых уделяется внимание исследованию устойчивости квазистатического положения равновесия и движения системы «резец–деталь» при автоматическом левитационном точении; рассмотрены вопросы совершенствования динамических моделей системы «инструмент–деталь» при учете ряда характерных для левитационного точения факторов, найдены конструктивные решения устройств, обеспечивающих бесконтактное базирование нежестких цилиндрических деталей и дисков в процессе обработки.

Целью исследований, результаты которых приводятся в данной статье, является разработка конструкции патрона для левитационного точения конических деталей и определение некоторых технических характеристик данной конструкции.

1. Конструкция патрона для конических деталей

Патрон (рисунок 1, а,б) выполнен на базе чашечного корпуса 1, внутри которого размещены круглая, заземленная по краю упругая мембрана 21 и статор в виде пакета кольцевых зубчатых магнитопроводов 17, на сердечниках 16 которых установлены катушки 18 с фазными обмотками, подключенными к источнику трехфазного напряжения с последовательной круговой и линейной перестановкой фаз. Фиксация мембраны и магнитопроводов статорного пакета в окружном направлении осуществляется штифтами 20, а в осевом направлении – прижимным кольцом 15. В центре мембраны выполнен цилиндрический прилив 8 с центральным резьбовым отверстием под резьбовой конец вала 5 неполнооборотного следящего пневмодвигателя, закрепленного на наружной поверхности донной части чашечного корпуса 1 [4]. Вал 5 смонтирован на радиально-упорных подшипниках 8. На шлицевой части вала установлены лопасть-поршень 2, аналоговый датчик обратной связи 4 и флажок 3, входящий в контакт с регулируемым упором 6. Электропитание датчика осуществляется через разъем 7.

Между осевыми рядами сердечников 16 размещены дугообразные пластинчатые аэростатические опоры 14 в виде консолей, связанных с мембраной 21, центральные закрытые распределительные канавки 13 которых соединены с источником сжатого воздуха посредством каналов 12, трубопроводов 9, кольцевой полости 11, образованной корпусом 1 и крышкой 19, и штуцера 10. Полосные наконечники сердечников 16 магнитопроводов 17 и внутренние дугообразные поверхности аэростатических опор 14 образуют установочную коническую поверхность с углом β_1 для обрабатываемой детали, а резьбовой конец вала 5 и резьбовое отверстие в цилиндрическом приливе мембраны – мелко модульную передачу винт-гайка.

Обрабатываемая деталь, в данном случае усеченный конус, после прохождения операции контроля действительной величины угла конусности β_1 , устанавливается в патрон, аэростатические опоры которого предварительно настраиваются на аналогичный угол путем поворота лопасти 2 пневмодвигателя, вызывающей вращение вала 5 и осевое смещение центра мембраны 21, т.е. ее прогиб. Величина угла поворота вала 5, обеспечивающего требуемую величину прогиба мембраны, а следовательно и требуемый угол конусности, контролируется встроенным аналоговым датчиком 4. При перемещении центра мембраны вправо угол увеличивается, т.е. аэростатические опоры расходятся, а при смещении влево – уменьшается, т.е. опоры сходятся.

В результате подачи воздуха через штуцер 10 в центральные распределительные канавки 13 аэростатических опор 14 и запитывания фазных катушек 18 магнитопроводов 17 создаются, соответственно, подъемная сила $F_{\text{П}}$, вызывающая появления осевой силы выталкивания $F_{\text{В}}$ детали из патрона, а также крутящий момент, вызывающий вращение детали (по принципу работы асинхронного двигателя с полым ротором) и тяговое усилие $F_{\text{Т}}$, уравнивающее силу $F_{\text{В}}$.

Поддержанием равенства $F_{\text{Т}} = F_{\text{В}}$ обеспечивается устойчивое бесконтактное расположение детали в патроне относительно установочных элементов. Влияние осевой составляющей силы резания $P_{\text{Х}}$ на осевое положение детали устраняется за счет соответствующего изменения $F_{\text{Т}}$ или $F_{\text{В}}$, т.е. в зависимости от направления ее действия.

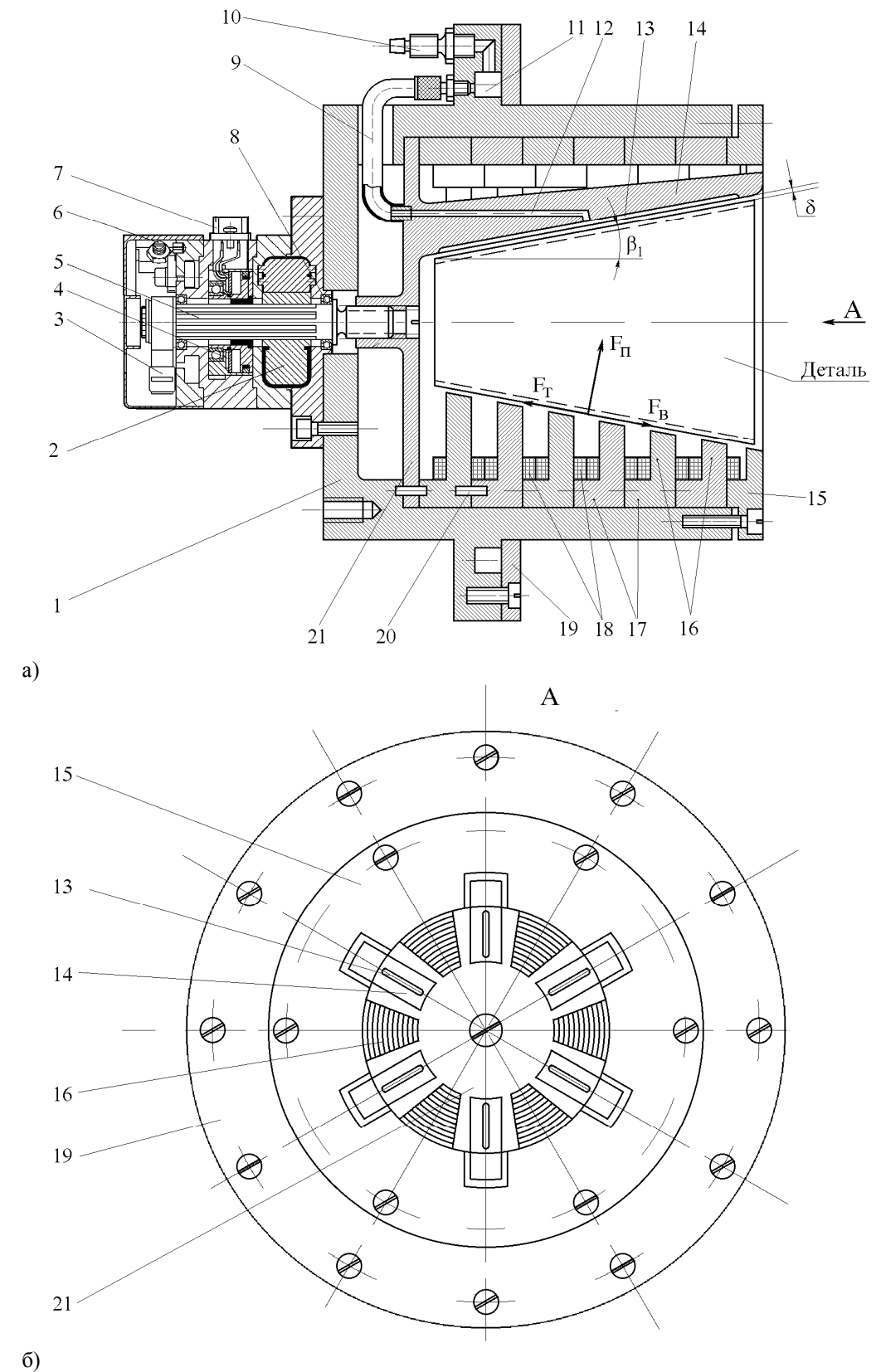


Рисунок 1 – Патрон для левитационного точения конических нежестких деталей

Устранение прямого механического контакта обрабатываемой детали с установочными и приводными элементами технологического оборудования и оснастки исключает перенос тепловых и силовых деформаций (вибраций), что способствует повышению точности и качества обработки, а возможность осуществления бесступенчатого регулирования скорости вращения устраняет необходимость иметь традиционную коробку скоростей.

2. Статический расчет угловых перемещений аэростатических опор при деформировании мембраны под действие центральной нагрузки, перпендикулярной плоскости мембраны

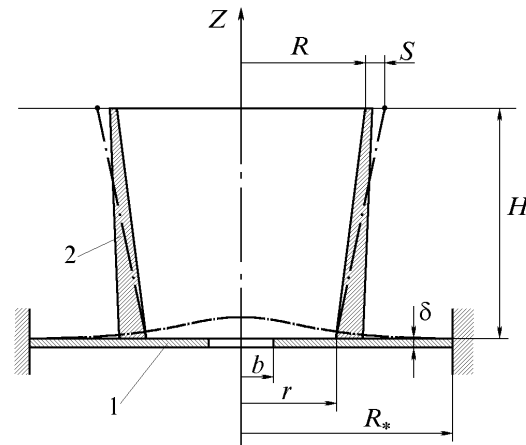


Рисунок 2 – Схема мембраны с опорами:
1 – мембрана; 2 – аэростатические опоры

воспользоваться решением, приведенным в [5]:

$$w(\rho) = \frac{pR_*^3\beta}{8D} \left[(1+2k_1)(1-\rho^2) + 4k_1 \ln \rho + 2\rho^2 \ln \rho \right]. \quad (1)$$

В (1) принято: R_* – радиус окружности защемления мембраны; $\beta = b/R_*$; $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость, где E – модуль упругости, δ – толщина мембраны; безразмерный коэффициент $k_1 = \frac{1+(1-\nu)\ln\beta}{1-\nu+(1+\nu)\beta^2} \cdot \beta^2$; $\rho = \frac{r}{R_*}$ – безразмерный параметр; ν – коэффициент Пуассона.

Тогда угол поворота сечения будет равен:

$$w'(\rho) = \frac{dw}{d\rho} = \frac{pR_*^3\beta}{2D} \left[-k_1\rho + k_1/\rho + \rho \ln \rho \right]. \quad (2)$$

С учетом (2), перемещение свободного конца консольной аэростатической опоры в связи с поворотом ее основания на угол $w'(\rho)$, равно:

$$s = w'(\rho) \cdot H, \quad (3)$$

где H – длина аэростатической опоры.

Пример. Исходные данные: $R_*=0,045$ м; $b=0,005$ м; $H=0,1$ м; $r=0,025$; $\nu=0,25$; $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па; $\delta=0,002$ м; $P=1000$ Н.

Результаты: $w' = 3,902 \cdot 10^{-4}$ рад; $s = 3,902 \cdot 10^{-5}$ м.

При такой достаточно большой нагрузке максимальные нормальные напряжения, которые возникают у закрепленного края мембраны и вычисляются по формуле

$$G_{\max} = \frac{3pR_*\beta}{\delta^2} (2k_1 - 1),$$

не превышают допустимых напряжений.

Если взять мембрану с шарнирным защемлением по контуру, то угол поворота сечения с координатой ρ , вычисленный по формуле

$$w'(\rho) = \frac{dw}{d\rho} = \frac{pR_*^3\beta}{8D} \left[-\frac{2(3+\nu-2k_1)\rho}{1+\nu} + \frac{4k_1}{\rho(1-\nu)} + 4\rho \ln \rho + 2\rho \right],$$

где $k_1 = \frac{(1+\nu)\ln\beta \cdot \beta^3}{1-\beta^2}$, увеличивается более чем в два раза, а нормальные кольцевые напряжения

существенно превышают допускаемые.

3. Динамическая модель левитационного течения конических деталей

Для исследования динамики левитационного течения жестких конических деталей с учетом факторов, характерных для процесса левитации, применима модель, которая предложена и исследована в [1-3], но необходимо определить момент инерции полого конуса относительно оси вращения.

Физический момент инерции тонкостенного усеченного конуса (рисунок 3) вычислен в следующей последовательности.

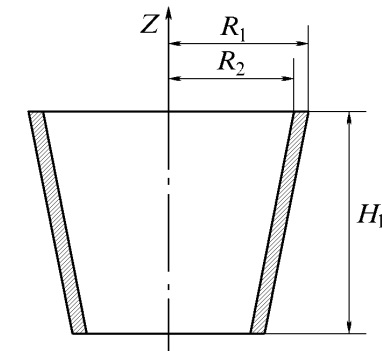


Рисунок 3 – Сечение обрабатываемой тонкостенной цилиндрической детали

Момент инерции сплошного усеченного конуса радиусом R_1 в основании и высотой H_1 равен

$$J'_Z = 0,1\gamma \pi R_1^4 H_1, \quad (4)$$

где γ – плотность материала.

Момент инерции внутреннего сплошного усеченного конуса радиусом R_2 равен:

$$J''_Z = 0,1\gamma \pi R_2^4 H_1. \quad (5)$$

С учетом выражения для массы тонкостенного усеченного конуса $m = \gamma \pi (R_1^2 - R_2^2) H_1 / 3$ из (4) и (5) следует выражение для тонкостенного усеченного конуса:

$$J_Z = J'_Z - J''_Z = 0,3m(R_1^2 + R_2^2).$$

Представляется возможность запроектировать аэростатическую опору минимальной массы (или объема) при учете ограничения на ее изгибную жесткость.

Критерий оптимальности

$$\nu = \int_0^H b \cdot h_1(x) dx = \min,$$

где b – ширина опоры; $h_1(x)$ – переменная толщина опоры. Ограничение по жесткости в данном случае соответствует ограничению в виде равенства на перемещение свободного конца консольной опоры в связи с ее возможным изгибом от распределенной по длине нагрузки (от давления). С использованием интеграла Мора записывается уравнение

$$\int_0^H \frac{\bar{M}_1 \cdot M_p}{EJ(x)} dx - [f] = 0, \quad (6)$$

где $\bar{M}_1 = 1 \cdot (H - x)$ – изгибающий момент от единичной силы; $M_p = q(H - x)^2 / 2$ – момент от распределенной нагрузки; $J = bh_1^3 / 12$ – осевой момент инерции поперечного сечения; $[f]$ – заданное перемещение конца консоли.

Задача на условный экстремум сводится к задаче на безусловный с использованием множителя Лагранжа:

$$\nu = \int_0^H b \cdot h_1(x) dx + \lambda \int_0^H \frac{6q}{bh_1^3} (H - x)^3 dx = \min,$$

где λ – множитель Лагранжа.

Из уравнения Эйлера $\frac{\partial F}{\partial h_1} = 0$ для функции Лагранжа

найдено

$$F = bh_1 + \frac{6\lambda q}{b} \cdot \frac{(H-x)^3}{h_1^3}$$

$$h_1 = \frac{2,06}{bE} \sqrt[4]{E^3(H-x)^3 q \lambda b^2} . \quad (7)$$

После подстановки (7) в (6) и решения уравнения следует

$$\lambda = \frac{0,2872H^2}{E[f]^2} \sqrt[3]{qb^2HE^2[f]^2} .$$

Выражение для $h_1(x)$ принимает вид:

$$h_1 = \frac{1,508}{bE} \sqrt[4]{\frac{b^2E^2(H-x)^3 qH^2 \sqrt[3]{qb^2HE[f]^2}}{[f]^2}} .$$

Пример. Исходные данные: $b=0,01$ м; $[f]=0,00015$ м; $q=500$ Н/м. Вес аэростатической опоры будет равен $P = v \cdot g \cdot \gamma = 0,362$ Н. Функция $h_1(x) = 0,0467 \sqrt[4]{(0,1-x)^3}$ в этом случае практически близка к линейной и при $x=0$ высота поперечного сечения $h_1(0) = 0,08$ м.

4. Исследование случайных колебаний

В работах [1-3] не рассматривались случайные колебания, которые присущи как обычному процессу обработки, так и левитационному. Дифференциальное уравнение крутильных колебаний около установившегося положения равновесия (для которого выполняются статические условия равновесия) тонкостенной конической детали имеет вид:

$$J_Z \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k_1 \frac{d\varphi}{dt} + c\varphi = f(t) , \quad (8)$$

где k_1 – коэффициент линейно-вязкого сопротивления; c – коэффициент жесткости упругого основания, создаваемого воздушной средой; $f(t)$ – случайная функция.

Если корреляционную функцию случайной функции $f(t)$ принять в виде $k_f(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|}$, где D – дисперсия случайного воздействия, а α – положительный коэффициент, то спектральная плотность воздействия будет равна

$$S_f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} k_\tau(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau = \frac{D\alpha}{\pi(\alpha^2 + \omega^2)} .$$

Параметры D и α должны быть найдены из экспериментальных исследований. Из (8) следует передаточная функция и частотная характеристика

$$W(S) = \frac{1}{S^2 + 2nS + p_o^2} , \quad W(i\omega) = \frac{1}{(i\omega)^2 + 2ni\omega + p_o^2} ,$$

где $n = k_1/2J_Z$; $p_o = \sqrt{c/J_Z}$ – частота крутильных колебаний детали. Дисперсия крутильных колебаний (угловых перемещений) детали около равновесного положения

$$D_\varphi = \frac{1}{J_Z^2} \int_{-\infty}^{+\infty} |W(i\omega)|^2 S_f(i\omega) d\omega = \frac{D}{2nJ_Z^2 p_o^2} \cdot \frac{2n + \alpha}{p_o^2 + 2n\alpha + \alpha^2} , \quad (7)$$

а среднеквадратическое отклонение $\sigma_\varphi = \sqrt{D_\varphi}$. Функция (7) имеет экстремум при $\alpha = p_o - 2n$.

Пример. Исходные данные: $J_Z = 0,002$ кг·м²; $D = 1$ Н·м; $p_o = 100$ с⁻¹; $n = p_o/8$. График функции $D_\varphi = D_\varphi(\alpha)$ изображен на рисунке 4. Как следует из графика, экстремум достигается при $\alpha_* = 75$ с⁻¹, т.е. $\alpha_* = 100 - 2 \cdot 12,5 = 75$ с⁻¹.

Снижение уровня случайных колебаний может быть достигнуто при использовании известных методов пассивного и активного (управляемого) гашения колебаний конической детали.

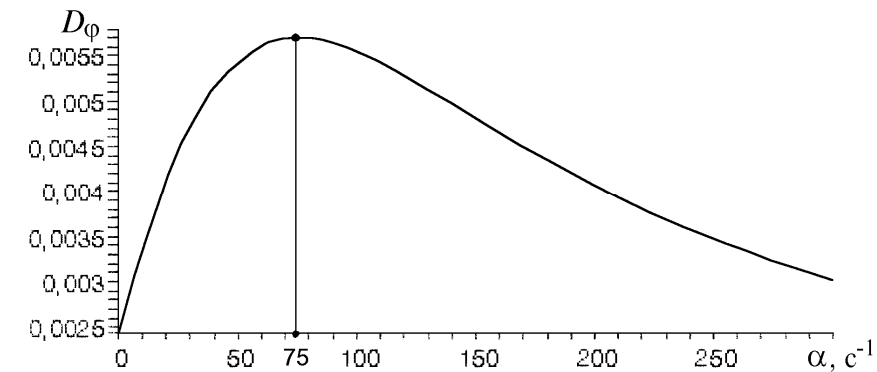


Рисунок 4 – График функции $D_\varphi = D_\varphi(\alpha)$

Выводы

1. Предложено новое техническое решение устройства (патрон) для левитационного точения тонкостенных конических деталей, обеспечивающего устойчивое бесконтактное положение обрабатываемой детали.
2. Исследовано угловое перемещение консольных дугообразных пластинчатых аэростатических опор, взаимодействующих с мембраной, при деформировании последней.
- Предметом дальнейших исследований является анализ динамической устойчивости процесса левитационного точения конических деталей как абсолютно твердых и деформируемых твердых тел.

Библиографический список

1. Бохонский А.И. Устойчивость движения системы «резец-деталь» при левитационном точении / А.И. Бохонский, Е.В. Пашков, А.А. Вожжов // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2001. — Вып. 4. — С. 3–8.
2. Бохонский А.И. Совершенствование динамической модели подсистемы «инструмент–деталь» при левитационном точении / А.И. Бохонский, Е.В. Пашков // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2005. — Вып. 8. — С. 38–43.
3. Бохонский А.И. Исследование процесса левитационного точения деталей: динамические модели и технические решения / А.И. Бохонский, Е.В. Пашков // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнар. зб. наук. праць. — Донецьк, 2005. — Вип. 32. — С. 50–54.
4. Handling and Positioning Systems. Volume 5 / Festo AG & Co. KG, Postfach, D-73726, Esslingen, Germany. — 2003.
5. Вайнберг Д.В. Расчет пластин / Д.В. Вайнберг, Е.В. Вайнберг. — К.: Будівельник, 1970. — 436 с.

Поступила в редакцию 24.04.2007 г.