

УДК 622.46:621.63

Дудник М.Н., мл. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПОР ВРАЩЕНИЯ ОСИ КРЫЛЬЧАТКИ И РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Дудник М.М., мол. наук. співр.
(ИГТМ НАН України)

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ, ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПОР ОБЕРТАННЯ ОСІ КРИЛЬЧАТКИ І РЕЖИМУ ЇЇ РОБОТИ

Dudnik M.N., M.S (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

CHOOSING OF MATERIALS, GEOMETRICAL PARAMETERS AND OPERATING REGIMES OF SUPPORTS FOR IMPELLER ROTATIONAL AXIS

Аннотация. В статье приведена характеристика камней, используемых для приборостроительных материалов, из естественных и искусственных материалов. Приведены данные о зависимости износа материала от прилагаемой к оси нагрузки. Определено, каким значениям контактных напряжений соответствует степень износостойкости наиболее характерных камней - агата и рубина при разных нагрузках. При аэродинамических исследованиях преобразователя установлено, что оптимальными значениями являются радиус округления кратера подпятника, равный 0,08 мм, и радиус сферической пяты керна, равный 0,03 мм. Приведены расчетные формулы и получены результаты контактных напряжений для агата и рубина соответственно. Сформулированы основные требования к материалам оси прибора, и приведены результаты сравнительных испытаний на трибометре на износостойкость образцов, изготовленных из различных материалов (сталей и твердых сплавов), в паре с подпятником из лейкосапфира. В процессе доводки анемометра эксплуатационным испытаниям подверглись преобразователи с осями крыльчаток из кобальт-титанового твердого сплава и легированной инструментальной стали 95•18 и подпятниками из вышеуказанных материалов. Полученные результаты проанализированы, и сделан вывод о том, что могут быть предложены следующие меры по совершенствованию рассматриваемого процесса: использование оси из материала с меньшим значением модуля упругости и большим коэффициентом Пуассона; применение подпятников из сапфира; применение смазки в опоре. Исследованы свойства различных видов смазок. На основании обоснованных в работе требований дана рекомендация о разработке, изготовлении и аттестации органами Госстандарта Украины аэродинамической трубы для воспроизведения эталонных значений воздушных потоков в диапазоне 0,2 – 40,0 м/с, что соответствует шахтным условиям.

Ключевые слова: износ материала, контактные напряжения, ось крыльчатки, модуль упругости, подпятники, смазка.

В настоящее время мировая приборостроительная промышленность производит очень широкий спектр средств измерений скорости воздушного потока – анемометров.

В настоящее время мировая приборостроительная промышленность производит очень широкий спектр средств измерений скорости воздушного потока – анемометров. Это приборы различного назначения, принципов действия, классов точности и ценовых категорий. Их номенклатура постоянно обновляется, а технические показатели и точность измерений растут. Их объединяет, в большинстве случаев, один технический элемент – в измерительном приборе для измерения параметров используются крыльчатки. Поскольку приборы предназначены для измерения параметров в широком диапазоне, в том числе и при малых значениях измеряемых величин, и контакт элементов крыльчатки с другими элементами прибора должен быть максимально облегчен с целью невнесения в измерения погрешности, к качеству материала крыльчатки применяется ряд жестких требований. Поэтому выбор материала для изготовления крыльчатки и ее элементов является актуальной научной и практической задачей, имеющей важное значение для приборостроительной промышленности.

Керновая опора крыльчатки (рис. 1) состоит из конической цапфы 1, имеющей на конце сферическую поверхность малого радиуса – керна, и подпятника 2 с внутренним конусом (кратером), переходящим в сферическую поверхность большего радиуса, чем сферическая поверхность цапфы. У некоторых типов подпятников кратер отсутствует и имеется только вогнутая сфера.

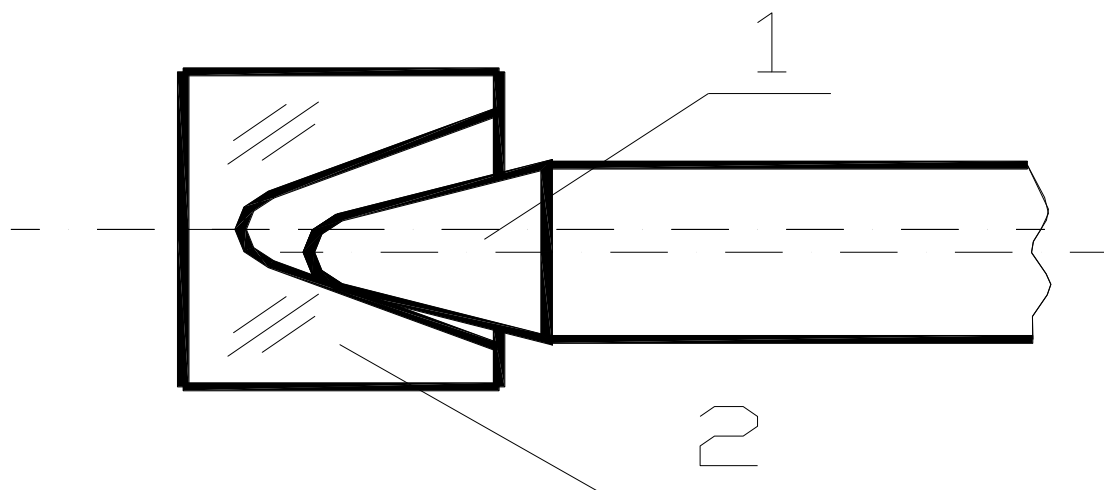


Рисунок 1 - Керновая опора крыльчатки

В керновой опоре с горизонтальной осью камень с коническим кратером и скруглением впадины (камень типа «К») позволяет легче установить и поддерживать во время эксплуатации нормальный рабочий зазор, что способствует повышению ее надежности и ресурса.

Для нужд приборостроительной промышленности выпускаются камни из естественных и искусственных материалов – рубина, сапфира и др. Широкое распространение получили камни из ситалла – специального стекла, которое в результате термообработки приобретает тонкую кристаллическую структуру и по своим физико-механическим свойствам становится весьма близким к агату.

Наиболее доступными являются технические камни из агата и ситалла, более дефицитны – из искусственного рубина. Камни из сапфира выпускаются под цилиндрическую цапфу для часовой промышленности.

Выбор материалов опоры – камня и оси должен производиться из условий обеспечения минимального коэффициента трения и изнашиваемости. В табл. 1 приведены результаты исследований на трибометре образцов из различных каменных материалов на износ в паре с закаленной сталью марки У10 [1].

Таблица 1 - Износ каменных материалов в зависимости от нагрузки

Материалы	Микротвердость в Н/мм ²	Диаметр пятна износа в мкм (время изнашивания 5 мин)					
		Нагрузка 3 Н		Нагрузка 12 Н		Нагрузка 21 Н	
		Сухое трение	Масло МБП-12	Сухое трение	Масло МБП-12	Сухое трение	Масло МБП-12
Стекло ТФ-3	4420	160	Следы	240	42	Разрушено	109
Яшма	8840	190	63	200	73	230	90
Агат	12780	130	Следы	190	63	240	83
Кварц плавленый	14700	130	84	260	110	320	117
Рубин	22200	155	48	185	70	210	96
Лейкосапфир	23600	120	47	140	65	155	74

Радиус сферической поверхности образцов составлял 1,5 мм, время трения – 300 с, скорость трения 5,4 м/с.

Поскольку прочность каменной опоры и интенсивность ее износа определяются не абсолютным значением нагрузки, а удельным давлением в точке контакта камня и сферы зерна [1,2], в таблице 1 приведены величины в зависимости от значений этого параметра.

При контакте двух тел, ограниченных сферическими поверхностями произвольных размеров, площадка контакта имеет форму круга, в центре которой удельное давление q_0 максимально. Его величину вычисляют по формуле [2]

$$q_0 = 0,57843 \sqrt{\frac{P_a}{\eta^{*2}} \left(\frac{R-r}{R \cdot r} \right)^2}, \quad (1)$$

где $\eta^* = (1-\mu_1^2)/E_1 + (1-\mu_2^2)/E_2$ - комбинированная упругая постоянная контактирующих тел; P_a – нагрузка на контактирующую пару, Н; R, r - радиусы контактирующих поверхностей, мм; μ_1, μ_2 - коэффициенты Пуассона материалов контактирующих тел; E_1, E_2 – модули упругости материалов контактирующих тел, МПа.

Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона некоторых материалов, приведенных в таблице 1 и используемых в камневых опорах оси крыльчатки, приведены в таблице 2 [1,2,3]

Таблица 2 – Модуль упругости и коэффициент Пуассона некоторых материалов

Материал	E, МПа	μ
Агат	$0,85 \cdot 10^5$	0,32
Рубин	$3,60 \cdot 10^5$	0,30
Сталь У10	$2,15 \cdot 10^5$	0,30
Сплав ВК60М	$7,40 \cdot 10^5$	0,26

Определим, каким значением контактных напряжений соответствуют результаты исследований износостойкости агата и рубина при нагрузках 3Н, 12Н и 21Н, приведенные в таблице 1. Эти камни выбраны, как наиболее характерные, поскольку значения их микротвердости отличаются почти в два раза, а также сравнительно доступны для использования их в высококачественных опорах.

Вычислим значения комбинированных упругих постоянных
– агата в паре со сталью Ст10 по формуле (2.15)

$$\eta^* a = \frac{1 - 0,32^2}{0,85 \cdot 10^5} + \frac{1 - 0,30^2}{2,15 \cdot 10^5} = 1,48 \cdot 10^5 \text{ мм}^2/\text{Н};$$

- рубина в паре со сталью Ст10

$$\eta^* p = \frac{1 - 0,30^2}{3,60 \cdot 10^5} + \frac{1 - 0,30^2}{2,15 \cdot 10^5} = 0,675 \cdot 10^5 \text{ мм}^2/\text{Н};$$

Тогда при нагрузке 3Н контактные напряжения будут

- для пары агат – сталь Ст10

$$q_{pa} = 0,57843 \sqrt{\frac{3_a}{(1,48 \cdot 10^5)^2} \frac{1}{1,5^2}} = 1210 \text{ Н/мм}^2$$

- для пары рубин – сталь Ст 10

$$q_{op} = 0,57843 \sqrt{\frac{3_a}{(1,675 \cdot 10^5)^2} \frac{1}{1,5^2}} = 1790 \text{ Н/мм}^2$$

В приведенных вычислениях радиус камневых образцов в соответствии с данными [1] принят $r = 1,5$ мм, радиус R плоской плиты трибометра из стали Ст10 равным ∞ .

Контактные напряжения при нагрузках 12 и 21Н, вычисленные аналогичным способом, составляют соответственно

- для агата 1920 Н/мм^2 и 2314 Н/мм^2 ;
- для рубина 2840 Н/мм^2 и 3424 Н/мм^2 .

Для расчета величина контактных напряжений в реальной керновой опоре с подпятниками из агата и рубина и осью из сверхтвердого сплава ВК60М прием радиус скругления кратера подпятника $R = 0,08$ мм и радиус сферической пяты керна $r = 0,03$ мм. При аэродинамических исследованиях преобразователя установлено, что указанная величина радиуса пяты является оптимальной. При больших его значениях не обеспечивается заданная чувствительность преобразователя, а при $r < 0,02$ мм наблюдается заметный износ камня при длительном воздействии скоростей воздушного потока, превышающих 20 м/с.

При массе крыльчатки 0,5 г вертикальная составляющая силы P_3 , действующей на одну опору, равна 2,45 мН. Несложными геометрическими построениями можно определить, что при радиусе впадины кратера $R = 0,080$ мм, угле раствора кратера 90° , радиусе сферической пяты керна $r = 0,030$ мм и зазоре в опоре 0,04 мм, который строго контролируется при сборке преобразователя, полное значение силы P , действующей в опоре при горизонтальном расположении оси, равно геометрической сумме вертикальной составляющей силы P_3 и горизонтальной составляющей – силы скоростного напора P_2 .

Оценим величину осевой силы P_a при скорости набегающего потока $V = 8$ м/с. Площадь одной лопасти, как это видно из приведенных выше вычислений, составляет $S_l = 1,2 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, соответственно суммарная площадь шести лопастей будет $S_{кр} = 1,2 \times 10^{-4} \text{ м}^2$. В установившемся режиме вращения крыльчатки угол атаки набегающего потока составляет не более 5° [5]. Тогда аксиальная сила P_a будет

$$P_a = \xi_x S_{кр} \frac{\rho V^2}{2} = 0,05 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} \frac{1,22 \cdot 8^3}{2} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н.}$$

где $\xi = 0,05$ – коэффициент лобового сопротивления тонкой лопасти с относительным удлинением равным единице при угле атаки 5° [10]; $\rho = 1,22 \text{ кг/м}^3$ – массовая плотность воздуха при 25° С .

Полная сила, действующая в опоре при горизонтальном расположении оси, составляет

$$P_8 = \sqrt{P^2 + P_a^2} = \sqrt{2,45^2 + 1,4^2} \cdot 10^{-4} = 2,82 \cdot 10^{-3} \text{ Н.}$$

При скоростях воздушного потока 20 м/с и 40 м/с значения полных сил, действующих в опоре, составят соответственно $P_{20} = 9,1 \times 10^{-3} \text{ Н}$ и $P_{40} = 35,1 \times 10^{-3} \text{ Н}$.

Вычислим значения комбинированных упругих постоянных, используя данные таблицы 2:

- агата в паре со сплавом ВК60М

$$\eta_a = \frac{1-0,32^2}{0,85 \cdot 10^5} + \frac{1-0,26^2}{7,4 \cdot 10^5} = 1,18 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{мм}^2}{\text{Н}};$$

- рубина в паре со сплавом ВК60М

$$\eta_p = \frac{1-0,30^2}{3,60 \cdot 10^5} + \frac{1-0,26^2}{7,4 \cdot 10^5} = 0,38 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{мм}^2}{\text{Н}};$$

Тогда максимальные контактные напряжения q_{08} от воздействия на опору полной нагрузки $P_8=2,82 \cdot 10^{-3} \text{Н}$ при скорости воздушного потока 8 м/с составит

$$q_{08} = 0,5784 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,82 \cdot 10^{-3}}{(1,18 \cdot 10^{-5})^2} \left(\frac{0,08-0,03}{0,08 \cdot 0,03} \right)^2} = 1160 \text{ Н/мм}^2.$$

При значениях скорости воздушного потока 20 м/с и 40 м/с контактные напряжения, действующие в опоре с агатовыми подпятниками, будут, соответственно, равны $q_{020}=1714 \text{ Н/мм}^2$ и $q_{040}=2690 \text{ Н/мм}^2$, что значительно меньше предельных допускаемых напряжений на сжатие для агата $[q_{оп}]=7500 \text{ Н/мм}^2$ и сплава ВК60М $[\sigma_{ок}]=12000 \text{ Н/мм}^2$.

Определим также значения контактных напряжений, действующих при скоростях воздушного потока 8 м/с, 20 м/с и 40 м/с, в аналогичной по геометрическим параметрам опоре с рубиновым подпятником. Комбинированная упругая постоянная в этом случае будет равна

$$\eta_p^* = \frac{1-0,3^2}{3,6 \cdot 10^5} + \frac{1-0,26^2}{7,4 \cdot 10^5} = 0,38 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{мм}^2}{\text{Н}},$$

а величина контактного напряжения в опоре при скорости воздушного потока 8 м/с составляет

$$q_{08}^* = 0,5784 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,82 \cdot 10^{-3}}{(0,38 \cdot 10^{-5})^2} \left(\frac{0,08-0,03}{0,08 \cdot 0,03} \right)^2} = 2543 \text{ Н/мм}^2.$$

Аналогичные вычисления показывают, что значения контактных напряжений в рубиновой опоре при скоростях воздушного потока 20 м/с и 40 м/с составляют соответственно 3750 Н/мм^2 и 5890 Н/мм^2 .

Для удобства оценки полученные результаты представлены в виде таблицы 3.

Таблица 3 – Диаметры пятен износа каменных образцов

Материал подпятника	При скорости 8 м/с		При скорости 20 м/с		При скорости 40 м/с	
	Контактное напряжение, Н/мм ²	Диаметр пятна износа, мкм	Контактное напряжение, Н/мм ²	Диаметр пятна износа, мкм	Контактное напряжение, Н/мм ²	Диаметр пятна износа, мкм
Агат	1160	130/(1210)	1714	190/(1920)	2690	240/(2314)
Рубин	2543	185/(2840)	3750	210/(3424)	5890	-

Примечание. В знаменателе граф «Диаметр пятна износа» в скобках указаны значения напряжений в контактирующей паре при испытаниях на трибометре, которым соответствуют приведенные диаметры пятен износа.

При этом диаметры пятен износа каменных образцов, соответствующие близким по величине контактными напряжениям, имевшим место при испытаниях на трибометре, заимствованы из таблицы 1. Все данные по износу приведены для режима сухого трения.

На основании приведенного анализа можно сделать следующие выводы:

а) во всем рабочем диапазоне полных механических нагрузок на горизонтально расположенную ось крыльчатки, изготовленную из сверхтвердого металлокерамического сплава ВК6ОМ, подпятник из агата имеет более высокую износостойкость, чем подпятник из рубина, как в режиме сухого трения, так и при смазке часовым маслом МБП-12, вследствие значительно меньших контактных напряжений, возникающих в опоре;

б) в области максимальных нагрузок на ось наилучшими характеристиками, как это видно из таблицы 1, обладает подпятник из сапфира, имеющий очень пологую зависимость роста диаметра пятна от приложенной нагрузки;

в) величина контактных напряжений, которые получены при выбранных геометрических параметрах опор с подпятником из агата и керновой осью со сферической пятой из сверхтвердого металлокерамического сплава ВК6ОМ во всем диапазоне рабочих нагрузок находятся в пределах нормы, принятой в точном приборостроении (до 4000 Н/мм²) [1];

г) снижение величины контактных напряжений в опоре применением оси из материалов с более низким, чем у сплава ВК6ОМ модулем упругости с целью уменьшения износа камня нецелесообразно, поскольку в процессе эксплуатации преобразователя замена изношенных подпятников гораздо проще и дешевле, чем замена крыльчатки с изношенной осью.

Основные требования, предъявляемые к материалу оси – высокая износостойкость при работе в каменной опоре в диапазоне реальных нагрузок, достаточный запас прочности при предельных скоростях вращения крыльчатки, устойчивость к коррозии в агрессивной воздушной среде горных выработок и промышленных предприятий.

В часовой промышленности и точном приборостроении оси выполняют из инструментальных сталей У8А, У10А, закаленных кобальтвольфрамовых и кобальттитановых сплавов, легированных коррозионностойких сталей 95Х18, К40НХМ, твердых сплавов на основе карбида вольфрама и других [3,1].

Стабильность коэффициента трения в камневой опоре и ее долговечность лимитируются износом как подпятников, так и кернов. В таблице 4 приведены результаты сравнительных испытаний на трибометре на износостойкость образцов, изготовленных из различных материалов, в паре с подпятником из лейкосапфира [1]. Путь трения составлял 254,4 м при постоянной нагрузке 11,75 Н. Шероховатость поверхности образцов в начале испытаний соответствовала $\nabla 12$.

Как следует из таблицы 4, твердость материала оси не является показателем ее износостойкости. Видно, что в режиме сухого трения износостойкость образцов из закаленной инструментальной стали У10А и шарикоподшипниковой стали ШХ15 оказалась самой низкой, даже ниже, чем у монель-металла, твердость которого меньше в 6 – 7 раз.

Таблица 4 - Сравнение износостойкости материалов цапф

Наименование Материала	Микротвердость в Н/мм ²	Без смазки		Смазка диоктилсеба- цинатом		Смазка маслом МЗП-6	
		Линейный износ в мкм	Относительная износо- стойкость	Линейный износ в мкм	Относительная износо- стойкость	Линейный износ в мкм	Относительная износо- стойкость
Монель-металл НМтМц	1570	31,4	1,1	20,1	0,5	20,1	0,3
Кобальт-вольфрам	7250	8,7	3,8	9,0	1,1	2,4	2,7
Сталь У10А	9400	33,2	1,0	9,6	1,0	6,4	1,0
Сталь ШХ15	10300	45,0	0,8	9,9	1,0	9,4	0,7
Твердый сплав ВК20	11000	2,3	14,4	1,7	5,6	1,4	4,6
Кобальттитановый твердый сплав	14800	4,3	7,7	3,0	3,2	2,0	3,2
Твердый сплав ВК10	16000	2,4	13,8	2,2	4,4	1,7	3,8
Лейкосапфир	22420	1,4	23,7	1,4	6,9	0,9	7,1

Это же можно отметить также сравнивая показатели износостойкости карбидвольфрамового сплава ВК20 и кобальттитанового твердого сплава. При смазке образцов диоктилсебацинатом (химически стойкая жидкость с низкой смазочной способностью) и часовым маслом МЗП-6 линейный износ твердых

сплавов и кобальт-вольфрама изменился мало, а сталей У10А и ШХ15 снизился в 3 – 4 раза.

В процессе доводки анемометра АПР-2 длительным эксплуатационным испытаниям на промышленных предприятиях и в шахтах Украины и России подверглись опытные партии преобразователей с осями крыльчаток, изготовленными из кобальттитанового твердого сплава и легированной инструментальной стали 95Х18, закаленной до $HRC \geq 58$. Подпятники применялись как из агата, так и из синтетического рубина. Керны осей, изготовленные из кобальттитанового твердого сплава, оказались значительно долговечнее. Периодическими проверками, проводимыми один раз в году, установлено что у приборов, активно эксплуатировавшихся в шахтах в течение трех – четырех лет, отсутствуют отклонения градуировочной характеристики за пределы нормируемой допускаемой погрешности измерений, хотя в большинстве случаев наблюдалось ухудшение чувствительности на момент начала вращения крыльчатки. Это подтверждает результаты испытаний, приведенные в таблице 4.

Из таблицы 4 следует, что наиболее высокой износостойкостью, как в режиме сухого трения, так и со смазкой обладают твердые сплавы ВК10 и ВК20 из карбида вольфрама. Эти материалы имеют удельный вес около $14,9 \text{ г/см}^3$ и твердость, превышающую 85 НРА. Столь высокое значение твердости материала керна оказывает благоприятное воздействие на фрикционные свойства опоры, поскольку из теории трения известно [4], что с увеличением твердости контактирующих материалов снижается коэффициент трения. Высокая износостойкость материала керна и низкий коэффициент трения в опоре являются необходимыми условиями для обеспечения высокой временной стабильности характеристик тахометрического преобразователя и главное – сохранения в течение эксплуатационного срока исходной величины чувствительности.

Для реализации этих возможностей сферическая пята керна должна иметь чистоту обработки не ниже $\nabla 12$ и практически идеальную форму. Некруглость, асферичность, волнистость искажают плотность контакта трущихся поверхностей, вызывают концентрацию напряжений, что изменяет коэффициент трения и увеличивает износ.

Вычислим радиус площади контакта r_k соприкасающихся поверхностей сферической пяты из сплава ВК10 и подпятника из агата, имеющих приведенные выше размеры и характеристики упругости при скорости воздушного потока 40 м/с

$$r_k = \sqrt[3]{\frac{3}{4} P \frac{R \cdot r}{R - r} \eta^*} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} 35,1 \cdot 10^{-3} \frac{0,08 \cdot 0,03}{0,08 - 0,03} 1,18 \cdot 10^{-5}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что при указанных характеристиках упругости материалов опоры величина упругой постоянной η^* соприкасающихся тел почти на 90 % определяется агатом. Отсюда следует, что контактная площадка, радиус которой вычислен в (2) образуется почти полностью за счет упругой деформации камневого подпятника сферической опорой керна, а керн вдавливаясь в агат, сам практически не деформируется. Это подтверждает необходимость

строгого контроля радиуса сферической пяты, точности ее формы и качества обработки.

Опытная партия тахометрических преобразователей в количестве 40 штук, у которых керны осей из материала ВК6ОМ имели описанную выше форму заточки, успешно выдержала испытания, проведенные ЦАГИ в диапазоне скоростей до 50 м/с, что является свидетельством удовлетворительной прочности усовершенствованной оси и высокой надежности узла вращения. Особо следует отметить тот факт, что после длительного воздействия столь больших скоростей воздушного потока градуировочные характеристики всех преобразователей, а также их начальная чувствительность 0,1-0,12 м/с остались неизменными. Стабильность характеристик преобразователей подтвердили также испытания двух экземпляров из указанной партии на специальной аэродинамической трубе в лаборатории ИГТМ НАНУ в течение 10 часов при скорости воздушного потока 30 м/с. Последующая проверка их на ротационном стенде и на аэродинамической трубе не выявила отклонений параметров преобразователей от их исходных значений.

В рассмотренной конструкции тахометрического преобразователя для значительного снижения износа камневого подпятника в период длительной эксплуатации можно предложить следующие меры:

- использование оси из материала с меньшим значением модуля упругости и большим коэффициентом Пуассона;
- применение подпятников из сапфира, который, как было отмечено выше, имеет слабую зависимость величины линейного износа от величины приложенной нагрузки;
- применение смазки в опоре.

Рассмотрим каждую из этих мер в отдельности.

Использование оси с более низким, чем у материалов группы ВК значениями параметров упругости и микротвердости безусловно облегчит режим работы камневого подпятника и уменьшит его износ при больших скоростях воздушного потока. Однако, изложенный выше опыт применения осей из кобальт-вольфрама, одного из лучших сплавов, которые используются в точном приборостроении для изготовления осей, указывает на нецелесообразность такого решения: замена крыльчатки с изношенной осью гораздо сложнее и дороже, чем замена изношенных подпятников.

Применение подпятников из сапфира или лейкосапфира в паре с осью из сплава ВК6ОМ, безусловно, повысит износостойкость опоры вращения при больших нагрузках, которые возникают при высоких скоростях набегающего воздушного потока. Об этом также свидетельствует положительный опыт германской фирмы «Höntsch», которая в тахометрических преобразователях высоких ценовых категорий, имеющих диапазоны измерений до 60-120 м/с, применяет подпятники из сапфира в сочетании с осью из сверхтвердого сплава, подобного сплавам группы ВК. Поскольку промышленность стран СНГ камни из сапфира и лейкосапфира для керновых опор не выпускает, необходимо ставить вопрос об их приобретении у мировых производителей.

Применение смазки опоры часовым маслом МБП-12, как это показано в таблице 1, уменьшает ее износ более чем в три раза в широком диапазоне реальных нагрузок. Это же подтверждают результаты исследований приведенные в [6,7]. Отличительной особенностью керновых опор тахометрического преобразователя от аналогичных опор приборов или часов является то, что они работают во влажной, зачастую агрессивной среде с содержанием угольной пыли до 1 г/м³. Поэтому высококачественные часовые и приборные масла, имеющие гарантированную стабильность 2 – 3 года, а реально – гораздо больше, под действием перечисленных дестабилизирующих факторов окисляются значительно быстрее и теряют свои смазывающие способности. Поэтому для расчета смазки керновых опор анемометров не имеет смысла применять методы, отработанные в часовой и приборостроительной промышленности [6-8].

Лабораторными исследованиями установлено, что приработка опоры со смазкой происходит более качественно, без нарушения чистоты поверхностей скольжения. Это, видимо, определяет повышение износостойкости элементов опоры в процессе длительной эксплуатации преобразователя, когда смазка уже утратила свои исходные антифрикционные свойства вследствие окисления и испарения из открытого зазора, а также воздействия на нее загрязнений.

Значительно повысить эффективность и продолжительность антифрикционного действия смазки в опорах возможно применением часового или приборного масла с добавкой поверхностно-активных веществ (ПАВ) [4]. Наиболее распространены ПАВ органического происхождения: жирные кислоты, спирты, мыла и др. Добавки ПАВ активизируют основные функции смазки:

- способность создавать прочные поверхностные пленки, хорошо удерживающиеся на поверхности трения в результате адсорбции молекул масла на поверхностях трения;
- способность взаимодействовать с поверхностными слоями и изменять их структуру и свойства (модифицировать).

Изменение состояния поверхностных слоев металла проявляется в виде пластической деформации, механического упрочнения и образования специфических вторичных структур трения (эффект Ребиндера) [4].

Результаты обработки опоры маслом с ПАВ оказывают самое существенное влияние на величину коэффициента трения и износа и предельные значения давления и скорости скольжения, при которых происходит переход к недопустимым процессам повреждаемости элементов опоры. При этом ПАВ в смазке оказывает особенно большое влияние [4]. Для наиболее полной реализации этих возможностей чистота контактирующих поверхностей должна быть не ниже $\nabla 12$. Более высокий уровень обработки не дает существенных преимуществ, при более низком уровне краевой угол смачивания уменьшается и масло плохо удерживается в зоне трения. По этой причине вся поверхность конуса керна также должна быть обработана не хуже $\nabla 12$, в противном случае она будет отсасывать смазку из зоны трения вследствие растекания масла.

Для изучения воздействия запыленности на керновую опору со смазкой первичный преобразователь помещали в закрытый воздушный объем, в котором

создавалась концентрация мелкодисперсной угольной пыли 10 г/м^3 , а затем через трубку подавался влажный воздух для создания однородной пылевоздушной среды и вращения крыльчатки. Длительность эксперимента составляла 30 минут, после чего преобразователь промывали в растворе стирального порошка. Испытания на ротационном стенде показали, что чувствительность преобразователя не изменилась, после чего он был разобран и исследован на бинокулярном микроскопе МБС-10. Оказалось, что несмотря на воздействие пыли и тщательную последующую промывку, в зоне трения находилось достаточное количество масла.

Окончательный вывод о целесообразности использования часового масла с ПАВ в опорах вращения тахометрических преобразователей с целью повышения их экспериментальных характеристик можно сделать на основе результатов промышленных испытаний большой партии анемометров АПР-2, в конструкцию которых была введена описанная опора со смазкой часовым маслом МБП-12. В течение двух лет, при поступлении анемометров на очередную поверку детали их преобразователей – оси и подпятники тщательно исследовались под микроскопом и сравнивались с аналогичными, но проработавшими без смазки. Вывод можно сделать только один: смазка камневой опоры часовым маслом, содержащим ПАВ, например, марки МБП-12, значительно уменьшает ее износ при длительной эксплуатации в тяжелых условиях, например, в сильно запыленной атмосфере горных выработок угольных шахт, в результате чего повышается ресурс работы и стабильность характеристик тахометрического преобразователя.

На основании полученных в работе результатов выработаны следующие рекомендации:

1. Результаты совершенствования конструкции тахометрического преобразователя должны быть использованы в разработке модифицированного варианта анемометра переносного рудничного АПР-2М. Это, безусловно, приведет к созданию прибора нового технического уровня, значительно превосходящего по комплексу метрологических и эксплуатационных характеристик все известные анемометры аналогичного назначения ведущих мировых производителей.

2. На основании обоснованных в работе требований должна быть разработана, изготовлена и аттестована органами Госстандарта Украины аэродинамическая труба для воспроизведения эталонных значений воздушных потоков в диапазоне 0,2 - 40,0 м/с. Это позволит создать в ИГТМ НАН Украины региональный контрольно-поверочный пункт, выполняющий все работы по метрологическому обслуживанию производства, первичных и периодических проверок средств измерений воздушного потока на высоком метрологическом уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хандельсман, Ю.М. Камневые опоры / Ю.М. Хандельсман. – М.: Машиностроение, 1973. – 151 с.
2. Ицкович, Г. М. Сопrotивление материалов / Г.М. Ицкович. – М.: Высшая школа, 1986. – 386 с.
3. Справочник конструктора точного приборостроения / Г.А. Веркович, Е.Н. Головенкин,

В.А. Голубков [и др.]; под общ. ред. К.Н. Явленского, Б.П Тимофеевой, Е.Е. Чаадаевой. – Л.: Машиностроение, 1989. – 792 с.

4. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий – К.: Техніка, 1970 – 396 с.

5. Горлин, С.М. Аэромеханические измерения (методы и приборы) / С.М Горлин., И.И. Слезингер. – М.: Наука, 1964. – 720 с.

6. Хандельсман, Ю.М. Теория трения и износ / Ю.М. Хандельсман, Г.И. Фукс. – М.: Наука, 1965. – С. 174.

7. Михайлюк, А.С. Влияние смазочных материалов на трение и износ камневых опор / А.С. Михайлюк, Г.И. Фукс // Часы и часовые механизмы. – 1962. – Вып. 3. – С. 98 - 102.

8. Михайлюк, А.С. Об износе материалов и осей прецизионных приборов. / А.С. Михайлюк, Г.И. Фукс // Приборостроение. – 1957. – Вып. 9. – С. 54 - 59.

9. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; под общ. ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

10. Горлин, С.М. Экспериментальная аэромеханика / С.М. Горлин. – М.: Высшая школа, 1970. – 262 с.

REFERENCES

1. Khandelsman, Yu.M. (1973), *Kamnevye opory* [Stone supports], Mashynostroyeniye, Moscow, SU.

2. Itskovich, G.M. (1986), *Soprotivleniye materialov* [Resistance of materials], High school, Moscow, SU.

3. Verkovich, G.A., Golovenkin, E.N., Golubkov, V.A. and others (1989) *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroyeniya* [Reference book of designer of exact instrument-making], in Yavlensky, K.N., Timofeyeva, B.P., Chaadayeva, Ye.Ye. (ed.), Mashynostroyeniye, Leningrad, SU.

4. Kostetsky, B. I. (1970), *Treniye, smazka i iznos v mashinakh* [Friction, greasing and wear in machines], Tekhnika, Kiev, SU.

5. Gorlyn, C.M. and Slezinger, I.I. (1964), *Aeromekhanicheskiye izmereniya (metody i pribory)* [Aeromechanical measurements (methods and devices)], Science, Moscow, SU.

6. Khandelsman, Yu. M. and Fuks, G.I. (1965), *Teoriya treniya i iznos* [Theory of friction and wear], Nauka, Moscow, SU.

7. Mykhaylyuk, A.S. and Fuks, G.I. (1962), “Influence lubricating materials on friction and wear of stone supports”, *Clock and clock-works*, no. 3, pp. 98-102.

8. Mykhaylyuk, A.S. and Fuks, G.I. (1957), «About wear of materials and axes of precision devices», *Pryborostroyeniye*, no. 9, pp. 54 - 59.

9. Idelchik, I.Ye. (1992), *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Reference book on hydraulic resistances], Mashynostroyeniye, Moscow, RU.

10. Gorlin, S. M. (1970), *Eksperimentalnaya atromekhanika* [Experimental aeromechanics], High school, Moscow, SU.

Об авторе

Дудник Михаил Николаевич, магистр, младший научный сотрудник в отделе горной термоаэродинамики и автоматизированных систем, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, dudnik1953@gmail.com

About the author

Dudnik Michail Nikolayevich, Master of Science, Junior Researcher in the Department of Rock Thermodynamics and Automated Systems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, dudnik1953@gmail.com

Анотація. В статті приведена характеристика каменів, які використовуються для приладобудівних матеріалів, з природних і штучних матеріалів. Приведені дані про залежність зносу матеріалу від прикладеного до осі навантаження. Визначено, яким значенням контактних напруг відповідає ступінь зносостійкості найхарактерніших каменів - агата і рубіна при різних навантаженнях. Під час аеродинамічних досліджень перетворювача встановлено, що оптимальними значеннями є радіус округлення кратера підп'ятника, рівний 0,08 мм, і радіус

сферичної п'яти керна, рівний 0,03 мм. Приведені розрахункові формули і одержані результати контактних напруг для агата і рубіна відповідно. Сформульовані основні вимоги до матеріалів осі приладу, і приведені результати порівняльних випробувань на трібометре на зносостійкість зразків, виготовлених з різних матеріалів (сталей і твердих сплавів), в парі з підп'ятником з лейкосапфіра. В процесі доведення анемометра експлуатаційним випробуванням піддалися перетворювачі з осями крильчаток з кобальт-титанового твердого сплаву і левоганої інструментальної сталі 95•18 і підп'ятниками з вищезгаданих матеріалів. Одержані результати проаналізовані, і зроблений висновок про те, що можуть бути запропоновані наступні заходи щодо вдосконалення даного процесу: використання осі з матеріалу з меншим значенням модуля пружності і великим коефіцієнтом Пуассона; вживання підп'ятників з сапфіра; вживання мастила в опорі. Досліджені властивості різних видів мастил. На підставі обґрунтованих в роботі вимог дана рекомендація про розробку, виготовлення і атестацію органами Держстандарту України аеродинамічної труби для відтворення еталонних значень повітряних потоків в діапазоні 0,2 – 40,0 м/з, що відповідає шахтним умовам.

Ключові слова: знос матеріалу, контактні напруги, вісь крильчатки, модуль пружності, підп'ятники, мастило.

Abstract. The article gives description of stones used as natural and artificial materials in the instrument-making industry and presents information about dependence between the material wear and loads applied to the axis. It is stated that certain values of contact tensions correspond to certain degree of wear resistance of the mostly used stones - agate and ruby – being under different loads. Aerodynamics of a transformer was studied, and the findings have shown that optimal values are roundoff radius 0,08 mm for the saddle crater and radius 0,03 mm for the spherical bottom of the core. Calculation formulas are presented, and results of contact tensions are shown for the agate and ruby, accordingly. Basic requirements are formulated for the materials of the device axis, and results of tribometric comparative tests on wear resistance of the samples made of different materials (steels and hard alloys) in pair with leucosapphire saddle are shown. In the process of an anemometer finishing, the transformers with impeller axes made of cobalt-titanic hard alloy and alloy tool steel 95•18 and with saddles made of the foregoing materials were exposed to the operating tests. The findings were analyzed, and a conclusion was made that the following measures could be proposed for improving the process under the study: to use axis made of a material with less modulus of elasticity and higher Poisson's ratio; to use saddles made of sapphire; and to use grease for the supports. Properties of different types of the greases were studied. Basing on the requirements grounded in the study, recommendations are given concerning the wind-channel designing, producing and attesting by bodies of the National Standard of Ukraine in order to simulate standard values of the air currents in the range of 0,2 – 40,0 m/s that corresponds to the conditions in the mines.

Keywords: wear of material, contact tensions, axis of impeller, module of elasticity, saddle, greasing.

Стаття поступила в редакцію 15.11.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Т.В. Бунько