

П. Ю. ГЕДЬКО, А. Б. СМЕРНОВ, С. И. ПУГАЧЕВ, Е. Ю. РЫТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКТЮАТОРОВ МИКРОРОБОТА

Исследованы трубчатые пьезоактюаторы микроробота, изготовленного на базе сферического шарнира, имеющего параллельную кинематику. Выявлен эффект вращения шара при несимметричности пьезоактюатора, работающего на ультразвуковых резонансных частотах; рассчитаны параметры движения шара. Рассмотрена технология изготовления пьезоактюаторов, показано преимущество использования ультразвукового формообразования пьезотрубок.

Ключевые слова: трубчатый пьезоактюатор, микроробот, шар, гармонические колебания, несимметричность, ультразвуковое формообразование пьезотрубок, сферический шарнир.

Введение. В области приборостроения последнее десятилетие характеризуется высоким интересом к созданию миниатюрных высокоточных исполнительных механизмов. Это связано, в первую очередь, с возросшими требованиями к размерам приводов и требованиями по надежности и точности выполнения движений.

В миниатюрных исполнительных устройствах (МИУ) используются различные физические эффекты для преобразования электрической энергии в механическую. Благодаря современному уровню техники в приводах МИУ возможно использовать большой спектр физических эффектов. Вследствие совершенствования пьезокерамических материалов по совокупности параметров пьезоэлектрические приводы микроперемещений в настоящее время являются одними из самых востребованных. Пьезоэлектрические МИУ имеют ряд неоспоримых преимуществ перед другими приводами: высокие удельные силовые характеристики, малые значения электрических токов и потерь, высокая надежность и технологичность изготовления в серийном производстве, радиационная, химическая и температурная стойкость.

В настоящее время в СПбГПУ разрабатывается микроробот с тремя степенями подвижности на базе сферического шарнира (рис. 1). В качестве привода используется трубчатый пьезоактюатор размером $\varnothing 14 \times \varnothing 10 \times 29$ мм, изготовленный из пьезокерамики ЦТС-19, который позволяет вращать шар в трех плоскостях. Для миниатюрных роботов совершенствуется также пьезоэлектрический схват с микропозиционированием и включением датчиков положения.

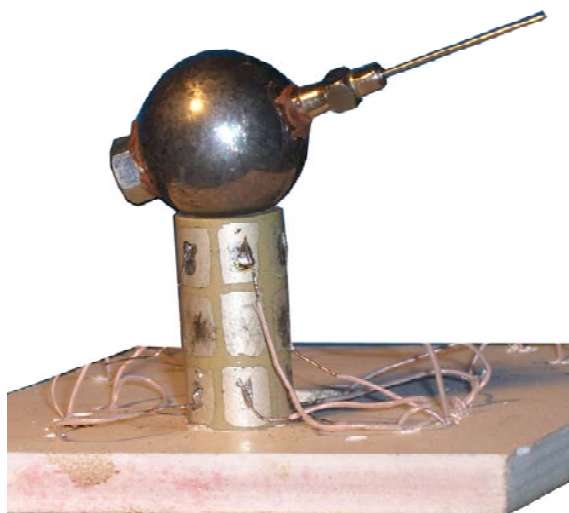


Рис. 1

Микроробот со сферическим шарниром — это система с параллельной кинематикой, использующая силу трения. Сферический шарнир микроробота представляет собой шар, установленный на опору — пьезокерамическую трубку (трубчатый пьезоактуатор), которая является приводным элементом. Рабочий орган (схват) в такой системе крепится непосредственно на поверхности шара, усилие с пьезопривода на шар передается за счет силы трения. Поскольку поверхность шара однородна (кроме места крепления рабочего органа), то зона действия рабочего органа практически совпадает со сферой. Таким образом, можно получать углы сервиса манипулятора почти 360° по трем координатам, что является хорошим показателем. Сферический шарнир позволяет изменять усилие прижима шара к опорам при помощи электромагнита, что повышает нагрузочную способность микроробота.

Направление движения задается выбором электрода пьезотрубки, на который подается гармоническое напряжение на резонансной частоте. Вращение шара обусловлено разнотолщинностью пьезотрубки, поэтому при подаче напряжения на один электрод возникает несколько составляющих силы, действующей через поверхность, контактирующую с шаром, они передаются посредством силы трения, приводя последний в движение.

Для движения шара используются резонансные режимы при возбуждении изгибно-крутильных колебаний сложной формы, которые осуществляются за счет подачи гармонического напряжения на различные электроды пьезотрубки. В частности, для вращения вокруг вертикальной оси в одном направлении напряжение подается на один электрод, расположенный в центральной части образующей поверхности; для вращения в противоположную сторону напряжение подается на противоположный электрод. При конечно-элементном моделировании вынужденных колебаний на резонансной частоте 34 кГц была определена амплитуда колебаний порядка 1,2 мкм [1, 2] при действующем значении гармонического напряжения 300 В. Крутильная составляющая колебаний возникает за счет переменного по длине трубки эксцентриситета внутренней цилиндрической поверхности относительно внешней.

Экспериментальные исследования показали, что скорость вращения сферы относительно вертикальной оси линейно зависит от подаваемого напряжения. В этом случае движение начинается только при напряжении порядка 120 В, после 340 В скорость остается постоянной (рис. 2). Этот факт можно объяснить тем, что при напряжении до 120 В амплитуды колебаний торца в вертикальном направлении меньше суммарной высоты микронеровностей сопрягаемых поверхностей шара и пьезотрубки.

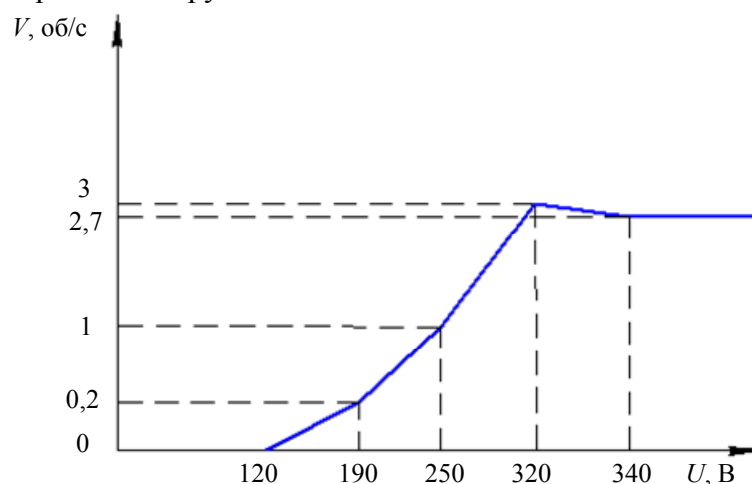


Рис. 2

При напряжении свыше 340 В действуют два фактора: нелинейность пьезоэффекта и интенсивное проскальзывание в обе стороны из-за инертности шара, что приводит к ограничению максимальной скорости.

Аналитическое исследование пьезоактюатора, взаимодействующего с шаром. Цель настоящего исследования — оценить деформации и траектории движения торца пьезотрубки, взаимодействующего с шаром, при подаче квазипостоянного (т.е. медленно меняющегося) и гармонического напряжения на электроды. Допущения: толщина стенок трубки $h_p \ll L_p R_1$, где L_p — длина пьезотрубки (или длина потенциального электрода), R_1 — внешний радиус пьезотрубки.

При подаче напряжения U размеры пьезотрубки изменяются согласно обратному пьезоэффекту:

$$S_1 = S_{11}^E T_1 + d_{31} E_3, \quad (1)$$

где S_1 — деформация, S_{11}^E — податливость, T_1 — механическое напряжение, d_{31} — пьезомодуль, E_3 — напряженность электрического поля.

При отсутствии внешних воздействий и при $U = \text{const}$ имеем $T_1 = 0$, тогда удлинение пьезотрубки в осевом направлении

$$\xi = d_{31} \frac{U}{h_p} L_p. \quad (2)$$

В последующих расчетах применим метод эквивалентных механических нагрузок, суть которого состоит в замене электромеханической схемы на механическую, т.е. найдем внешнюю силу F_n , при которой пьезотрубка удлинится так же, как и при подаче электрического напряжения U :

$$\xi = \frac{F_n}{\Omega_p} S_{11}^E L_p, \quad (3)$$

где Ω_p — площадь поперечного сечения пьезотрубки.

Приравняв (2) и (3), получим

$$\frac{d_{31} U}{h_p} L_p = \frac{F_n S_{11}^E L_p}{\Omega_p},$$

откуда эквивалентная сила

$$F_n = d_{31} \frac{\Omega_p}{h_p} \frac{U}{S_{11}^E}. \quad (4)$$

Эквивалентная сила F_n приложена к свободным торцам и вызывает то же удлинение, что и напряжение U .

Рассмотренная схема нагружения не изменится, если сосредоточенную силу F_n представить как распределенную f_n , приложенную по периметру средней линии пьезотрубки:

$$f_n = \frac{F_n}{2\pi R_{\text{ср}}},$$

где $R_{\text{ср}} = \frac{R_1 + R_2}{2}$, R_2 — внутренний радиус пьезотрубки, тогда

$$f_n = \frac{d_{31} \Omega_p U}{2\pi R_{\text{ср}} h_p S_{11}^E}. \quad (5)$$

Если потенциальный электрод занимает не всю кольцевую поверхность пьезотрубки, а только ее часть, то распределенная сила будет действовать на секторе с углом φ (рис. 3).

Таким образом, сосредоточенная сила, действующая в продольном направлении

$$F_{n\phi} = f_n \phi R_{cp}. \quad (6)$$

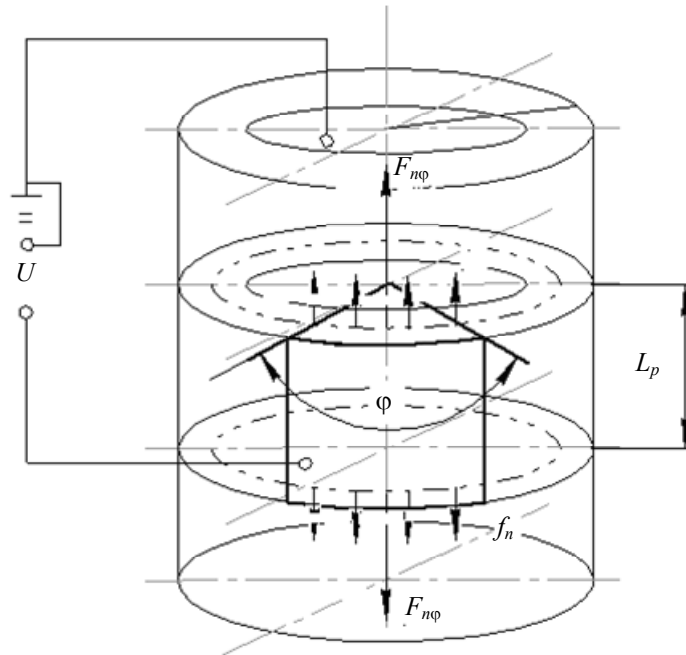


Рис. 3

Как было сказано выше, экспериментально установлено, что при подаче гармонического напряжения на одной из резонансных частот на электроде, расположенном в средней части пьезотрубки, наблюдалось устойчивое и управляемое вращение сферы в ту или иную сторону. Чтобы понять физическую сущность выявленного эффекта, рассмотрим формы колебаний пьезотрубки. Форма изгибных колебаний на первой собственной частоте для свободной пьезотрубки приведена на рис. 4, а, для пьезотрубки, закрепленной с одного торца, на рис. 4, б.

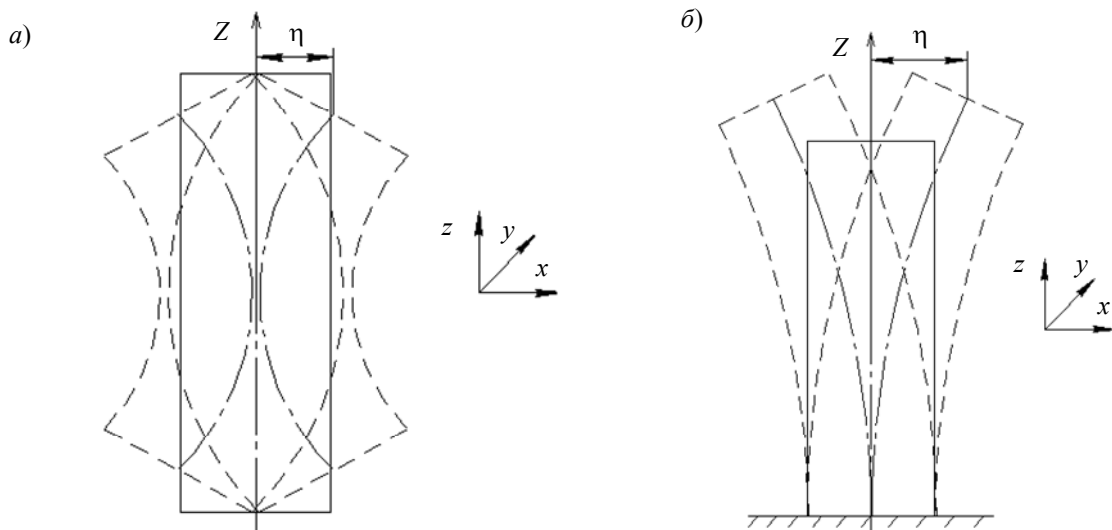


Рис. 4

Если пьезотрубка симметрична, т.е. внутренняя и внешняя цилиндрическая поверхности соосны, то в обоих случаях колебания торца трубки в проекции на плоскость XU будут происходить только в одном направлении.

Если пьезотрубка несимметрична (в частном случае имеет на одном конце несоосность с эксцентриситетом), то при возбуждении изгибных колебаний могут возникнуть и крутильные колебания (рис. 5).

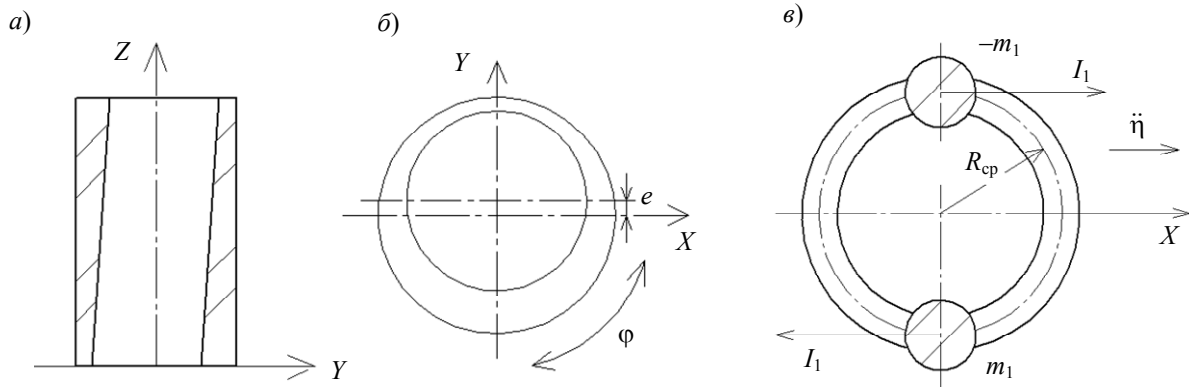


Рис. 5

Для упрощения расчетов, не изменяя физического смысла эффекта, несимметричную пьезотрубку можно представить как симметричную, но с закрепленной на торце дополнительной m_1 и отрицательной массой $-m_1$ на противоположной стороне торца (причем m_1 будет пропорциональна эксцентриситету e).

В этом случае при возбуждении изгибных колебаний в плоскости ZX будут возникать силы инерции I_1 , которые создадут крутящий момент (рис. 5, в)

$$M_{кр} = -2I_1 R_{cp}, \tag{7}$$

где $I_1 = m_1 \ddot{\eta}_1$ — сила инерции, η_1 — изгибные колебания торца трубки в направлении оси X .

Для упрощения математической модели вращения шара под действием вибраций пьезотрубки, не изменяя физической сущности процесса колебаний, будем рассматривать колебательный процесс при действии только двух сосредоточенных гармонических сил, действующих в противоположные стороны (рис. 3). Приложим на оси Z пьезотрубки в точках O_1 и O_2 по две пары сил $F_{ny} - F_{ny} = 0$ (рис. 6, а). В этом случае появятся эквивалентные моменты сил

$$M_3 = F_{n\phi} R_{cp} \tag{8}$$

и силы $F_{n\phi}$, действующие в точках O_1 и O_2 (рис. 6, б).

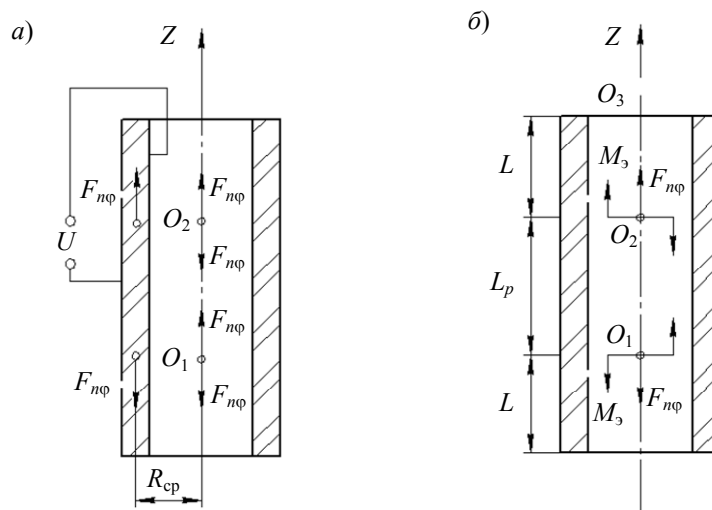


Рис. 6

Таким образом, торцы трубки будут подвергаться действию двух факторов: растягивающему (сжимающему) усилию оси Z и изгибающему моменту в плоскости ZX .

Рассмотрим случай, когда нижний торец закреплен. Тогда под действием момента M_3 угол поворота сечения в точке O_2

$$\theta_2 = \frac{S_{11}^E}{J} M_3 L_p,$$

где $J = \frac{\pi(R_1^4 - R_2^4)}{2^6}$ — момент инерции сечения пьезотрубки.

Перемещение точки O_2 в направлении оси X будет следующим:

$$\eta_2 = \frac{S_{11}^E}{2J} M_3 L_p^2,$$

а перемещение точки O_3 в том же направлении:

$$\eta_1 = \eta_2 + \theta_2 L = \frac{S_{11}^E}{J} M_3 L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right) \quad (9)$$

(если пьезотрубка не закреплена, перемещение уменьшается примерно в два раза).

При подаче гармонического напряжения $U = U_m \cos \omega t$ на потенциальный электрод с учетом (2):

$$F_{n\phi}(t) = F_{n\phi} \cos \omega t,$$

где из (8) и (9) имеем

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{S_{11}^E}{J} F_{n\phi} R_{cp} L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right) \cos \omega t, \\ \ddot{\eta}_1 &= -\frac{S_{11}^E}{J} F_{n\phi} R_{cp} L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right) \omega^2 \cos \omega t. \end{aligned} \quad (10)$$

Перейдем теперь к определению угла закручивания ψ торца пьезотрубки относительно другого торца:

$$\psi_1 = \frac{M_k (L_p + 2L)}{GJ_k},$$

где $G = \frac{1}{S_{11}^E 2(1+\mu)}$ — модуль сдвига, μ — коэффициент Пуассона, $J_k = 2J$ — полярный момент инерции.

С учетом (7) и (10) имеем:

$$\psi_1(t) = -\frac{4m_1 R_{cp}^2 (S_{11}^E)^2 (1+\mu) F_{n\phi} L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right)^2}{J^2} \omega^2 \cos \omega t. \quad (11)$$

Угловая колебательная скорость

$$\dot{\psi}_1(t) = \frac{4m_1 R_{cp}^2 (S_{11}^E)^2 (1+\mu) F_{n\phi} L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right)^2}{J^2} \omega^3 \sin \omega t,$$

а с учетом (5) и (6) получим

$$\dot{\psi}_1(t) = \frac{2m_1 R_{cp}^2 S_{11}^E (1+\mu) L_p \left(\frac{L_p}{2} + L \right)^2 d_{31} \Omega_p \phi U}{\pi h_p J^2} \omega^3 \sin \omega t. \quad (12)$$

Из последнего выражения следует, что угловая колебательная скорость $\dot{\psi}_1$ точек на поверхности торца зависит от пьезомодуля, массы, характеризующей эксцентриситет пьезотрубки, угла сектора потенциального электрода φ , куба частоты колебаний и квадрата длины пьезотрубки, угловая колебательная скорость $\dot{\psi}_1$ обратно пропорциональна средней толщине пьезотрубки и квадрату момента инерции сечения. Угол φ может иметь максимальное значение $\varphi_{\max} = \pi$, так как при дальнейшем его увеличении момент M_φ будет уменьшаться.

Кроме угловых качательных движений вокруг оси пьезотрубки и поперечных колебаний вдоль оси X точки торца пьезотрубки совершают продольные колебания вдоль оси Z . Это связано с тем, что сила $F_{\eta\varphi}$ действует вдоль оси Z и приводит к растяжению-сжатию оси трубки. Исходя из (4) имеем

$$\xi_1 = \frac{F_{\eta\varphi} S_{11}^E L_p}{\Omega_p} \cos \omega t \quad (13)$$

при гармоническом напряжении U .

Таким образом, траектории движения точек торца пьезотрубки имеют три составляющие ξ_1 , ψ_1 , η_1 .

На резонансной частоте для оценки амплитуд колебаний в формулах (11)—(13) выражения необходимо умножить на механическую добротность пьезокерамики Q_M . Для более точных расчетов амплитуд вынужденных колебаний в резонансе должны быть найдены решения уравнений продольных, изгибных и крутильных колебаний трубки с использованием приведенных выше эквивалентных моментов M_φ и сил $F_{\eta\varphi}$.

Угловая скорость вращения шара $\omega_{\text{ш}}$ (рис. 7) зависит в первую очередь от значения $\dot{\psi}_1$, вычисляемого по формуле (12), однако если суммарная высота шероховатости у поверхности шара и торца пьезотрубки $h_\Sigma \geq \xi_3$, то шар не сможет вращаться. Кроме того, импульсы силы взаимодействия в точках контакта шара и пьезотрубки при вибрациях зависят от коэффициента трения $k_{\text{тр}}$, поэтому движущий момент шара

$$M_{\text{ш}} = A k_{\text{тр}} m_{\text{ш}} g R_{\text{ср}},$$

где A — коэффициент, определяемый экспериментально, $m_{\text{ш}}$ — масса шара, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Угловая скорость шара

$$\omega_{\text{ш}} = B \dot{\psi}_1,$$

где B — коэффициент сцепления (эквивалент коэффициента трения, определяемый экспериментально).

Для вращения шара в противоположную сторону необходимо подавать напряжение на электрод, находящийся на противоположной стороне. Проведенные оценочные расчеты показали возможность однонаправленного движения шара при подаче напряжения на один из электродов пьезотрубки. В сравнении с методом конечных элементов такая упрощенная модель дает погрешность не более 25—35 %.

Технология изготовления трубчатого пьезоактюатора. Особенность технологии заключается в применении ультразвукового формообразования (УЗФО) — процесса уплотнения пьезокерамического порошка в закрытой жесткой матрице при одновременном воздействии статического давления прессования и ультразвуковых колебаний (УЗК). По сравнению с промышленной технологией статического одноосного прессования УЗФО увеличивает плотность формуемой заготовки при пониженном (в 2—3 раза) статическом давлении. Кроме

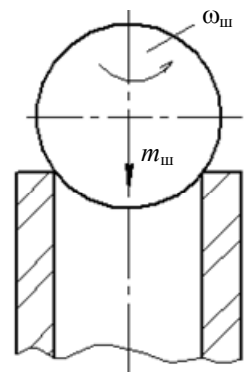


Рис. 7

того, при статическом прессовании трубчатой заготовки с увеличением ее длины и уменьшением толщины стенки возрастают потери усилия прессования на преодоление внешнего трения между порошком и стенками пресс-формы. Это приводит к повышению неравномерности распределения плотности в объеме получаемой заготовки. Поэтому для изготовления тонкостенных протяженных трубок с использованием промышленной технологии осуществляют статическое прессование заготовок со значительно увеличенной толщиной стенки. Требуемые конечные размеры изделий достигаются при механической обработке после высокотемпературного обжига. Такой способ получения трубок приводит к большому расходу пьезокерамического материала и увеличению трудоемкости их изготовления.

Воздействие ультразвука в процессе формообразования существенно уменьшает внешнее трение, поэтому применение УЗФО позволяет получать тонкостенные трубки с равномерной плотностью при значительно меньших материальных и трудовых затратах, чем при промышленной технологии.

Ультразвуковое формообразование пьезотрубок проводилось на установке, включающей гидравлический пресс усилием 50 тонн, ультразвуковой генератор УЗГЗ-4 с выходной мощностью $(4,0 \pm 20 \%)$ кВт, магнитострикционный преобразователь ПМС-15А-18 с акустической обратной связью и специальную пресс-форму. Колебания от преобразователя подводились к дну матрицы пресс-формы через концентратор колебаний, закрепленный в нижней траверсе пресса. Рабочая частота УЗК составляла $(18 \pm 7,5 \%)$ кГц. При отработке режимов УЗФО наилучшие результаты были достигнуты при статическом усилии прессования 40 МПа, амплитуде УЗК 10 мкм и длительности их воздействия 10 с [3].

Последующие операции процесса изготовления пьезотрубок — высокотемпературный обжиг, нанесение металлических электродов методом „вжигания“ серебрясодержащей пасты и поляризация в постоянном электрическом поле высокой напряженности — проводились по режимам, разработанным для образцов указанной геометрической формы, изготавливаемым из материала ЦТС-19.

Электрофизические параметры пьезотрубок рассчитывались по данным измерений резонансных характеристик методом резонанса-антирезонанса, а также по результатам диэлектрических измерений (см. таблицу, здесь $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ — относительная диэлектрическая проницаемость; $\text{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; $\Delta f = f_a - f_p$ — частотный промежуток, f_a и f_p — антирезонансная и резонансная частота соответственно; k_{31} и k_{33} — коэффициенты электромеханической связи; d_{31} — пьезомодуль; v_1^E — скорость звука).

Параметры	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	$\text{tg} \delta, \%$	$d_{31}, 10^{-12}$ Кл/Н	$v_1^E, \text{м/с}$	k		$f_p, \text{кГц}$	$\Delta f, \text{кГц}$
					k_{31}	k_{33}		
Статическое прессование	1819	1,63	146	2921	k_{31}	0,222	48,1	1,2
					k_{33}	0,490	87,9	10,5
УЗФО	1853	1,60	151	2891	k_{31}	0,222	47,8	1,2
					k_{33}	0,512	86,7	11,4

Данные таблицы подтверждают преимущество УЗФО перед промышленной технологией. Кроме того, прессованные заготовки, получаемые способом УЗФО, имеют внешний диаметр 18, внутренний 11 мм, а при статическом прессовании — 20 и 11 мм соответственно. Таким образом, применение УЗФО наряду с улучшением электрофизических параметров пьезотрубок позволило уменьшить толщину стенки заготовки, следовательно и расход пьезокерамического материала, более чем на 20 %. Описанный выше способ позволил также изготовить асимметричные пьезотрубки с заданным эксцентриситетом для использования их в качестве пьезоактуаторов микроботов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гедько П. Ю., Павлов П. Л., Семенов А. С., Смирнов А. Б. Конечно-элементное моделирование пьезоэлектрического актюатора микроробота // „XL Неделя науки СПбПУ“: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2011.
2. Смирнов А. Б. Элементная база автоматических машин и оборудования. Мехатронные модули микроперемещений технологических машин: Учеб. пособие. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. 172 с.
3. Рытов Е. Ю. Ультразвуковое формообразование тонкостенных пьезокерамических цилиндров // Матер. региональной науч.-техн. конф. „Кораблестроительное образование и наука-2003“. СПб, 2003. Т. 2. С. 420—425.

Сведения об авторах

- Павел Юрьевич Гедько** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра автоматов; E-mail: choppepper@list.ru
- Аркадий Борисович Смирнов** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра автоматов; E-mail: 123smirnov@list.ru
- Сергей Иванович Пугачев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, кафедра физики; E-mail: spugachev@bk.ru
- Евгений Юрьевич Рытов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, кафедра физики; E-mail: physics_spbmtu@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
29.02.12 г.