

УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИСТЕМ

Асп. ЛУГОВОЙ И. В., канд. техн. наук, доц. ЛУГОВОЙ В. П.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: lyhavyvp@mail.ru

ELASTIC CHARACTERISTICS OF ANNULAR HUBS IN ULTRA SOUND SYSTEMS

LUGOVOJ I. V., LUGOVOJ V. P.

Belarusian National Technical University

В статье дано обоснование применения упругих кольцевых концентраторов с переменным сечением ультразвуковых систем. Приведены результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований упругих характеристик кольцевых концентраторов.

Ключевые слова: ультразвуковые системы, кольцевые концентраторы, упругие характеристики.

Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

The paper provides a justification for application of elastic ring hubs with variable cross-section of ultra sound systems. The results of theoretical calculations and experimental investigations of elastic characteristics of annular hubs.

Keywords: ultra sound systems, annular hubs, elastic characteristics.

Fig. 6. Tab. 1. Ref.: 5 titles.

Введение. Известно, что повышение производительности ультразвуковой прошивки отверстий в хрупких материалах достигается оптимальным выбором технологических и акустических параметров [1]. Поэтому модернизация существующего оборудования и ультразвуковых методов получения отверстий малого диаметра осуществлялась в основном направлении совершенствования этих параметров. Производительность ультразвуковой прошивки отверстий зависит в основном от амплитуды и частоты продольных колебаний рабочей части инструмента. Увеличение амплитуды колебаний рабочей части инструмента благоприятно влияет на создание виброударного режима его работы, а также на доставку абразивной пасты в зону обработки. Однако используемые в настоящее время конструкции акустических систем позволяют повысить амплитуду продольных колебаний инструмента за счет либо увеличения мощности акустического преобразователя, либо применения многоступенчатых концентраторов, что в итоге приводит к снижению долговечности и разрушению инструмента из-за больших циклических напряжений [2].

Результаты расчетов. В данной работе решали задачу повышения амплитуды колебаний рабочего инструмента без увеличения подводимой мощности за счет использования промежуточных упругих концентраторов-волноводов, работающих в режиме управляемого резонанса. В качестве упругих элементов для передачи ультразвуковых колебаний использовали разновидности плоских пружин, выполненных в форме круглого кольца, а также кольца с плоскопараллельными сторонами. В результате исследований было установлено, что больший эффект может быть достигнут в том случае, когда упругий элемент выполнен в виде кольца с переменным сечением [3, 4]. Такая конфигурация кольца позволяет использовать его одновременно в качестве концентратора колебаний, преобразующего поршневые продольные колебания волновода в изгибные колебания кольца. Это обусловлено тем, что жесткость любого произвольного поперечного сечения кольца зависит от переменной толщины $H(x)$ и наибольшие упругие перемещения при действии сил возникают в сечениях с наименьшей жесткостью кольца, т. е. в зоне с минимальной толщиной.

Известно [2], что потенциальная энергия, накопленная в пружине, зависит от упругих свойств материала и величины упругого сжатия пружин u и выражается формулой

$$\Pi = cu^2/2,$$

где c – коэффициент упругости.

Линейное перемещение u складывается из двух составляющих компонентов: статического перемещения u_c от действия сжимающей силы P и динамического перемещения u_d , вызванного действием периодических сил P_d :

$$u = u_c + u_d.$$

Первая составляющая представляет собой упругое перемещение, вызванное действием статической силы. Ее величина определяет значение накопленной энергии в круговом кольце с переменным сечением, как в пружине. Теоретические расчеты показали, что она зависит от геометрических размеров кольца, т. е. от жесткости поперечного сечения [5]:

$$u_c = \frac{3Pb^2}{EBc^3} \int_0^\pi \left[\sin \varphi - \frac{4\sqrt{1-\frac{t^2}{c^2}}}{\pi\left(2+\frac{t^2}{c^2}\right)} \right] \times \sqrt{\frac{a^2}{b^2} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} \frac{d\varphi}{\left(1-\frac{t}{c} \cos \varphi\right)^3}, \quad (1)$$

где t – толщина поперечного сечения кольца; EB – жесткость сечения; a, b – размер полуосей кольца; c – величина эксцентриситета эллипсов наружного и внутреннего контуров; P – статическое усилие.

Уравнение (1) позволяет представить графическую зависимость величины упругих перемещений от геометрических параметров кольца. В качестве примера был выполнен расчет уравнения (1) для кольца с размерами: наружный диаметр кольца $R_1 = 50$ мм; внутренний диаметр $R_2 = 40$ мм; ширина $B = 10$ мм; толщина в узком сечении $t = 0,5$ мм. Статическое усилие принято $P = 100$ Н.

Результаты расчетов представлены на рис. 1–3 в виде обобщенных графиков. Сравнение полученных результатов свидетельствует о том, что изменение конфигурации кольца, которое сопровождается уменьшением толщины его узко-

го участка (изменение внешнего и внутреннего диаметров, толщины сечения кольца и величины эксцентриситета между осями), приводит к увеличению упругих перемещений. При большей ширине B кольца оно постепенно трансформируется в трубу, что ведет к повышению жесткости поперечного сечения и резкому снижению величины упругих перемещений.

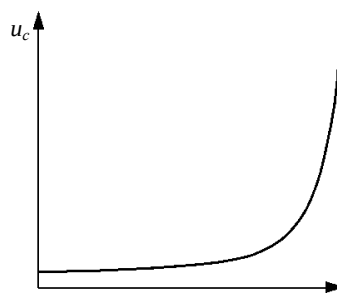


Рис. 1. Зависимость упругих перемещений кольца u_c от эксцентриситета t

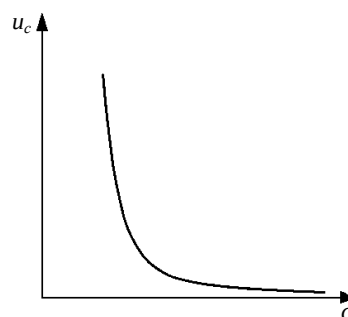


Рис. 2. Зависимость перемещений кольца u_c от толщины сечения $c = R_1 - R_2$

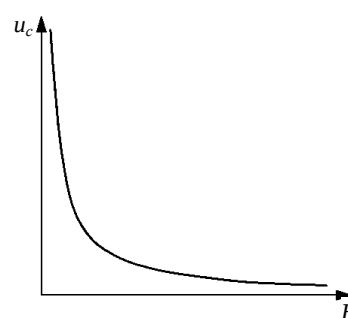


Рис. 3. Зависимости упругих перемещений точек приложения сил u_c от ширины кольца B

Для проведения экспериментальных исследований кольцевые концентраторы были изготовлены из стали 45 и титана, что обусловлено требованиями, предъявляемыми к конструкциям волноводов ультразвуковых систем: прочностью, упругостью, высокими акустическими характеристиками (рис. 4).

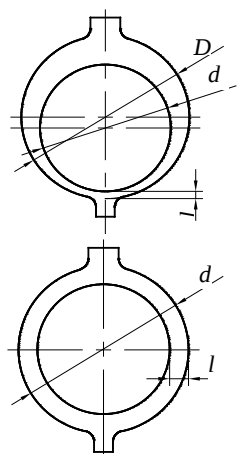


Рис. 4. Формы кольцевых концентраторов акустической системы

Для оценки упругих характеристик были проведены исследования на экспериментальной установке, фотография которой представлена на рис. 5. Она состоит из массивного основания, на котором жестко крепится кольцевой концентратор. К кольцу сверху прикладывали груз, создававший статическую нагрузку. Статические перемещения кольца вдоль оси симметрии колец измеряли микрометром с точностью 1 мкм. Для исследований использовали три разновидности колец с различными переменными сечениями и размерами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Размеры кольцевых концентраторов

№ кольца	Размер круглого кольца, мм	
	с переменным сечением	с постоянным сечением
1	$D_1 = 50; d_1 = 40; t_1 = 2,50$	$D_1 = 40; t_1 = 2,2$
2	$D_2 = 45; d_2 = 35; t_2 = 2,50$	$D_1 = 31; t_1 = 2,2$
3	$D_3 = 37; d_3 = 27; t_3 = 2,25$	—

Полученные зависимости влияния геометрических параметров исследуемых упругих элементов на деформацию от статической нагрузки (рис. 6а, б) показывают, что увеличение диаметра и уменьшение толщины поперечного сечения приводят к снижению жесткости кольца, что, в свою очередь, увеличивает упругие перемещения. Аналогичные зависимости составлены при измерении статических упругих перемещений колец с плоскопараллельными сторонами. Полученные результаты хорошо согласуются с показателями оценки упругой характеристики колец различных конструктив-

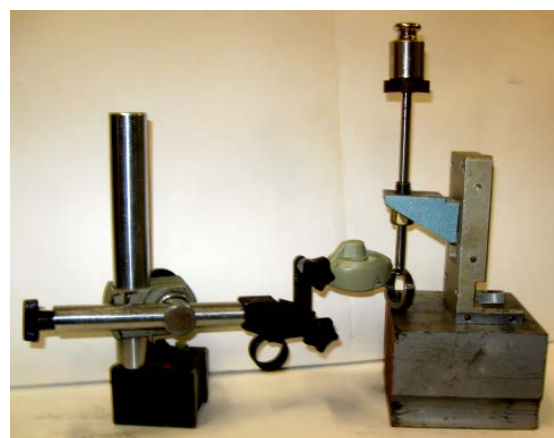


Рис. 5. Общий вид измерительной установки

ных исполнений. Приведенные графики показывают, что исследуемые упругие элементы имеют линейную характеристику и сравнительно небольшой разброс по величине в пределах рассматриваемых статических сил до 15 Н.

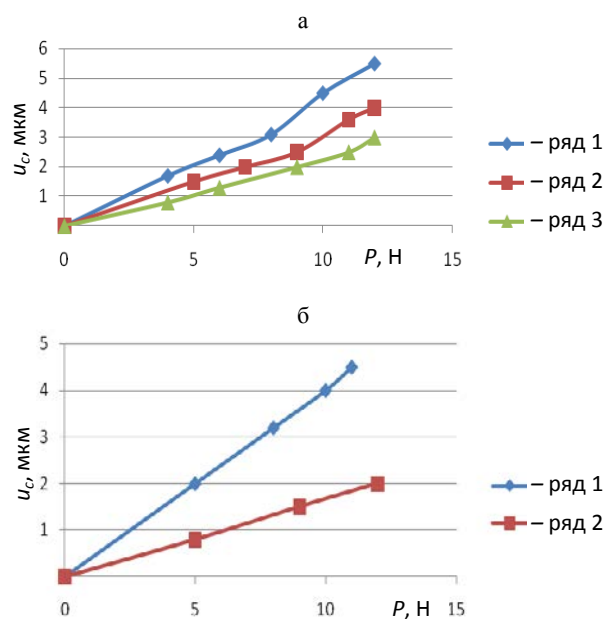


Рис. 6. Зависимость упругих перемещений u_c кольцевого концентратора от статической силы P для круглого кольца (размеры – в мм): а – с переменным сечением (ряд 1: $D_1 = 50; d_1 = 4; t_1 = 2,5$; ряд 2: $D_2 = 45; d_2 = 35; t_2 = 2,5$; ряд 3: $D_3 = 37; d_3 = 27; t_3 = 2,25$); б – с постоянным сечением (ряд 1: $D_1 = 4; d_1 = 35,6$; ряд 2: $D_2 = 31; d_2 = 26,6$)

Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с теоретическими расчетами и указывают на доминирующее влияние геометрических параметров кольцевых концен-

траторов на их упругие характеристики. Экспериментально установлено, что предложенная ультразвуковая система с промежуточными упругими элементами позволяет увеличить амплитуду колебаний при одинаковых условиях работы по сравнению с традиционной поршневой системой в 3,5 раза. Практическое применение упругих свойств исследуемых кольцевых концентраторов с переменным сечением было предложено для ультразвукового прошивания таких хрупких материалов, как стекло и кремний. Обработку выполняли стреловыми инструментами в виде стальной трубчатой иглы диаметром до 1,5 мм. Полученные результаты подтвердили возможность повышения производительности процесса.

ВЫВОД

Результаты исследований показывают, что предложенный новый тип кольцевых концентраторов обладает необходимыми акустическими и упругими свойствами в составе ультразвуковых систем технологического назначения и может выполнять функцию усилителя колебаний. По своим техническим характеристикам эти системы превосходят традиционные ультразвуковые системы с жесткими концентраторами поршневых систем. Предложенная схема акустической системы обеспечивает благоприятные условия для виброударного режима работы инструмента и повышение эффективности ультразвуковой обработки материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волосатов, В. А.** Ультразвуковая обработка / В. А. Волосатов. – Л.: Лениздат, 1973. – 247 с.
2. **Андреева, Л. Е.** Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. – М.: Машиностроение, 1981. – 392 с.
3. **Ультразвуковой** инструмент: пат. № а 20120353; Респ. Беларусь, МПК51 В 06В 1/00 / И. В. Луговой, В. Т. Минченя, В. П. Луговой; заявл. 12.03.2012; опубл. 16.09.2011 // Афіцыйны бюл. – 2011. – № 2. – С. 127.
4. **Устройство** для ультразвуковой обработки: пат. 8459 Респ. Беларусь, МПК В06В 3/00 / И. В. Луговой, В. Т. Минченя, В. П. Луговой; № и 20120039; заявл. 16.01.2012; опубл. 16.01.2012.
5. **Босаков, С. В.** К определению перемещений в упругом эллиптическом кольце / С. В. Босаков, И. В. Луговой // Наука и техника. – 2013. – № 3. – С. 59–63.

REFERENCES

1. **Volosatov, V. A.** (1973) *Ultrasonic Treatment*. Leningrad: Lenizdat.
2. **Andreeva, L. E.** (1981) *Elastic Elements of Devices*. Moscow: Mashinostroyeniye.
3. **Lugovoj, I. V., Minchenia, V. T., & Lugovoj, V. P.** (2011) Ultrasonic Device. Patent Republic of Belarus, No a 20120353. *Afitsyiny Biuleten' [Official Journal]*, 2.
4. **Lugovoj, I. V., Minchenia, V. T., & Lugovoj, V. P.** (2012) *Device for Ultrasonic Treatment*. Patent Republic of Belarus, No и 20120039.
5. **Bosakov, S. V., & Lugovoj, I. V.** (2013) To Determination of Displacements in Elastic Elliptical Ring. *Nauka i Tekhnika [Science and Technique]*, 3, 59–63.

Поступила 06.12.2013