

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ С КРЕПЕЖНЫМ ПОЯСКОМ

В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, С.В. Левин

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Бийск

Статья посвящена исследованию концентраторов ультразвуковых колебаний, имеющих крепежный пояс, предназначенный для крепления ультразвуковых колебательных систем в технологическое оборудование. С помощью анализа концентраторов методом конечных элементов определены поправочные коэффициенты и получены новые аналитические выражения для расчета концентраторов с крепежным пояском.

Ключевые слова: ультразвук, концентратор, коэффициент усиления, метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Концентраторы ультразвуковых колебаний являются обязательной частью ультразвуковых колебательных систем (УЗКС) в различных ультразвуковых установках. Их основное назначение – увеличение амплитуды ультразвуковых колебаний, получаемых с помощью преобразователей. В общем случае они представляют собой стержни переменного сечения, присоединяемые к преобразователю более широким концом [1].

Наибольшее применение в настоящее время находят составные ступенчато-радиальные концентраторы, методика расчета которых основывается на методике расчета концентраторов с экспоненциальным переходом [2] с поправочными коэффициентами для радиального перехода, полученными в работе [3].

Использование методики с поправочными коэффициентами позволяет рассчитывать ступенчато-радиальные концентраторы, общий и внешний виды которых показаны на рис. 1.

Однако, в ряде технологических задач возникает необходимость выполнять на концентраторе крепежный пояс, позволяющий осуществлять установку УЗКС в технологическую линию. Примерами таких технических решений может быть установка на концентратор крепежных фланцев для крепления в оборудовании, закрепление охлаждающего объема (при высокотемпературной обработке).

Общий вид концентратора с крепежным пояском показан на рис. 2.

Основной проблемой применения данного типа концентраторов является то, что у составных ступенчато-радиальных концентраторов минимум колебательных смещений (узел колебаний) находится в сечении, равноудаленном от сечения начала радиального перехода и от сечения окончания радиального перехода (т.е. посередине участка l_2), что соответствует положению, при котором достигается максимальный коэффициент трансформации.

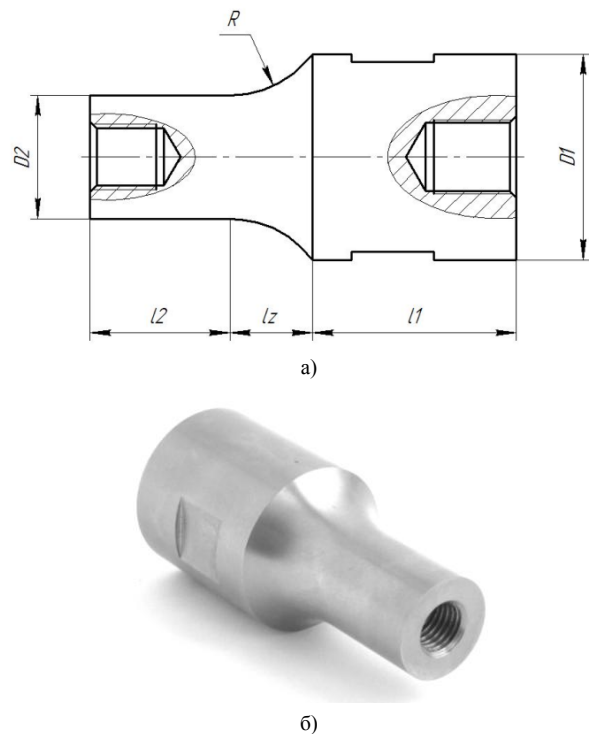


Рис. 1. Общий вид (а) и внешний вид (б) составного ступенчато-радиального концентратора

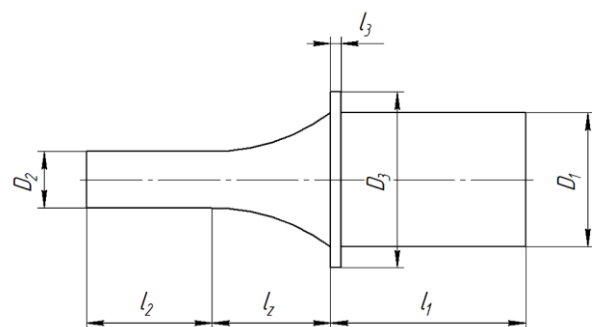


Рис. 2. Общий вид составного ступенчато-радиального концентратора с крепежным пояском

Положение крепежного пояса не в узле колебаний влечет за собой значительное снижение эффективности работы УЗКС, передачу механических колебаний на элементы конструкции технологического оборудования и обслуживающий персонал, что является недопустимым.

Таким образом, целью работы является выявление особенностей расчета ступенчато-радиальных концентраторов с крепежным пояском и на основе анализа полученных данных введение необходимых поправок в методику инженерного расчета.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Последовательность определения необходимых поправок для размеров ступенчато-радиального концентратора на случай концентратора с крепежным пояском состояла из следующих основных этапов.

1) Для расчета размеров концентраторов на заданную резонансную частоту с известными входным или выходным диаметром и коэффициентом усиления использовали методику расчета экспоненциальных концентраторов, дополненную поправочными коэффициентами на случай радиального перехода [4]. В результате получали необходимые размеры l_1 , l_2 , l_z , D_1 , D_2 .

2) По полученным размерам строили твердотельные модели концентраторов в CAD-системе, дополняя эти модели размерами l_3 и D_3 .

3) Построенную модель концентратора с крепежным пояском экспортировали в CAE-систему для проведения конечно-элементного анализа.

4) Проводя конечно-элементный анализ добивались расположения минимума колебательных смещений в сечении крепежного пояса при помощи последовательного изменения размеров в твердотельной модели.

5) По полученным размерам для двух случаев концентратора с крепежным пояском и без него получали поправочные коэффициенты для случая с крепежным пояском.

Более подробно решение поставленных в перечисленных этапах задач рассмотрено в следующем разделе.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В качестве начальных размеров трехмерной модели были взяты типоразмеры концентраторов, приведенные в табл. 1, где K – коэффициент трансформации.

Табл. 1. Типоразмеры концентраторов без крепежного буртика

D_1 , мм	D_2 , мм	K
24	10	4,6
38	16	4,5
50	30	2,2

Далее, по методике инженерного расчета, определялись l_1 , l_2 , l_z . Расчет для всех случаев производился на резонансную частоту 22000 Гц.

На следующем этапе строили твердотельные модели концентраторов с полученными размерами, дополняя эти модели размерами l_3 и D_3 . Размеры l_3 и D_3 для построения брались в соответствии с табл. 2.

Табл. 2. Типоразмеры концентраторов с крепежным буртиком

D_1 , мм	D_2 , мм	D_3 , мм	l_3 , мм
24	10	30	1,5
38	16	43	2
50	30	55	2,5

Для проведения конечно-элементного анализа был использован модальный тип анализа, при котором геометрические модели разбивались на 65000 элементов, а тип конечного элемента – тетраэдральный. Материал модели задан со следующими характеристиками: плотность – 4500 кг/м³, модуль Юнга – $1,12 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона – 0,429, что соответствует характеристикам титанового сплава BT5 (Ti-5Al).

Важной особенностью при конечно-элементном анализе является наложение на модель начальных условий, заключающихся в том, что на оба торца крепежного пояса накладываются фиксация (функция «Fixed support») имитирующая установку на концентратор крепежных фланцев для крепления в оборудование.

Рассчитанная конечно-элементная модель концентратора с крепежным пояском показана на рис. 2а, в продольном разрезе на рис. 2б.

На рисунке цветом показано распределение колебаний вдоль акустической оси, где черному цвету соответствует минимум колебательных смещений, взятый по уровню не более 5% от максимального уровня колебаний.

На основе результатов анализа для всех типов концентраторов были получены поправочные коэффициенты, позволившие вывести новые аналитические выражения для расчета:

$$l_1 = l_1^* \cdot 0,77 \quad (1)$$

$$l_2 = l_2^* \cdot 1,19 - l_3 \quad (2)$$

$$l_z = l_z^* \quad (3)$$

где, l_1^* , l_2^* , l_z^* – длины концентратора, полученные для случая концентратора без крепежного пояса, рассчитанные по методике [4].

Стоит отметить, что вынесение минимума колебательных смещений из сечения, равноудаленного от сечения начала радиального перехода, и от сечения окончания радиального перехода влечет за собой снижение коэффициента трансформации концентраторов. В сводной табл. 3 показано изменение коэффициента трансформации концентраторов с крепежным буртиком с минимумом колебательных смещений на нем в сравнении с концентраторами, выполненными по классической схеме.

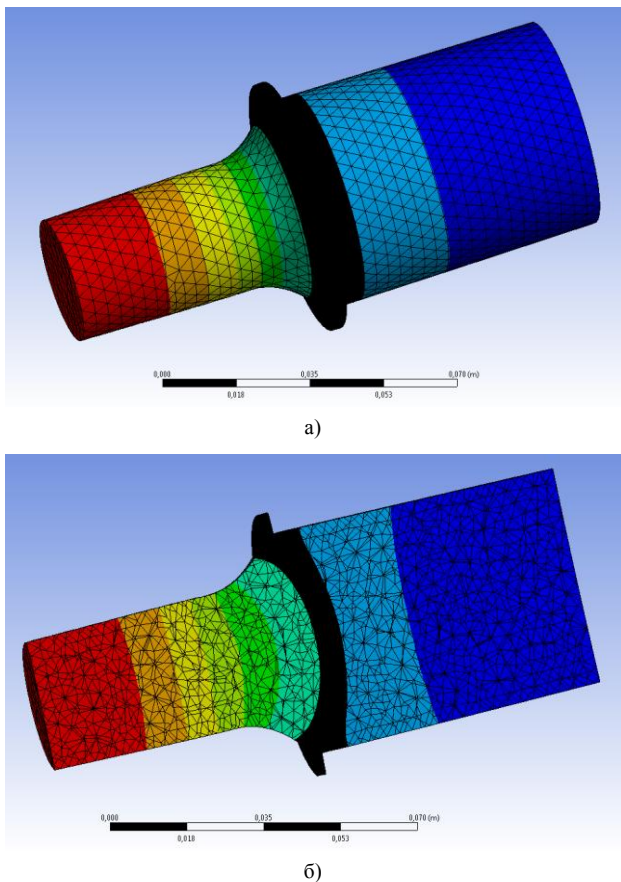


Рис. 2. Конечно-элементная модель концентратора с крепежным пояском (а) и в разрезе (б)

Коэффициент трансформации определялся при помощи пьезоэлектрического щупа с сухим точечным контактом [1] и рассчитывался как отношение максимальной амплитуды колебаний на излучающем торце концентратора к амплитуде колебаний на задней отражающей накладке пьезоэлектрического преобразователя, являющегося источником колебаний.

Табл. 3. Коэффициенты трансформации концентраторов

D_1 , мм	D_2 , мм	K , для концентратора без крепежного пояса	K , для концентратора с крепежным пояском
24	10	4,6	4,1
38	16	4,5	4,0
50	30	2,2	2

Как видно из таблицы, коэффициент трансформации снижается на 10 % для случая концентратора с крепежным пояском, что необходимо учитывать при проектировании ультразвукового технологического оборудования.

Применение методов конечных элементов для расчета подобного типа концентраторов и новых аналитических выражений 1–3 позволило разработать необходимые узлы с требуемыми характеристиками, внешний вид которых приведен на рис. 3.



Рис. 3. Концентраторы с крепежным пояском

Также по предложенной методике был рассчитан и разработан концентратор, выполненный заедино с крепежным фланцем. Такая конструкция требуется при решении некоторых технологических задач, когда требуется высокая точность позиционирования УЗКС при реализации технологического процесса, например, при реализации процесса ультразвукового вырезания полупроводниковых пластин. Твердотельная 3D-модель такого концентратора и продольный разрез конечно-элементной модели с визуализацией распределения колебаний показаны на рис. 4.

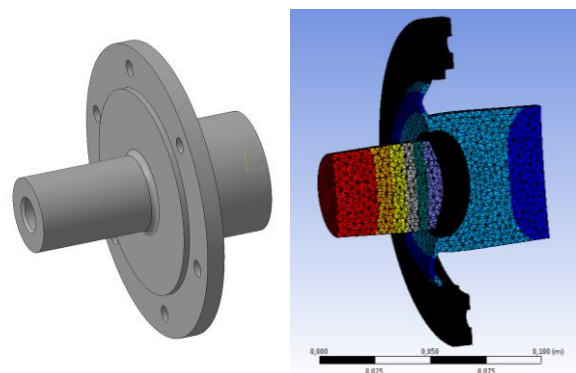


Рис. 4. Концентратор, выполненный заедино с крепежным фланцем

Все перечисленные в данной статье концентраторы для ультразвукового технологического оборудования могут выполняться как из титанового сплава, так и из дюралюминиевого сплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были получены поправочные коэффициенты для методики расчета концентраторов с крепежным пояском и установлено, что коэффициент трансформации снижается на 10 % для случая концентратора с крепежным пояском по сравнению с концентраторами, где минимум колебательных смещений находится на радиальном переходе.

Разработанные типы концентраторов нашли широкое применение для использования в УЗКС для кавитационной обработки жидких сред, ультразвуковой сварки, станках размерной обработки и др.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-179.2014.8

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хмелев, В.Н. Источники ультразвукового излучения. Особенности построения и конструкции: монография [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок, С.В. Левин. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. – 196 с.
2. Меркулов, Л.Г. Теория и расчет составных концентраторов [Текст] / Л.Г. Меркулов, А.В. Харитонов // Акустический журнал. – 1959, т.5. – № 2.

3. Хмелев, В.Н. Проектирование пьезоэлектрических колебательных систем [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, К.А. Карзакова, Г.А. Боброва // Ползуновский вестник. – 2013.– № 2.– С. 119–123.

4. Khmelev V.N. Calculation Features of the Ultrasonic Vibrating System [Текст] / V.N. Khmelev, S.S. Khmelev, G.A. Bobrova, S.N. Tsyganok, K.A. Karzakova // 14th International Conference of Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM2013: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – pp. 143–146.

Хмелев Владимир Николаевич – д.т.н., заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432481, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Хмелев Сергей Сергеевич – к.т.н., доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432470, e-mail: ssh@bti.secna.ru.

Левин Сергей Викторович – ведущий инженер кафедры технической графики, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432481, e-mail: lsv@bti.secna.ru.

CALCULATION FEATURES OF ULTRASOUND CONCENTRATORS WITH MOUNTING FLANGE

V.N. Khmelev, S.S. Khmelev, S.V. Levin
Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU

Abstract – Article is devoted to concentrators of ultrasonic vibrations having mounting flange to allow for the installation of ultrasonic systems in technological equipment. By analyzing the concentrators using the finite element method defined correction factors, and new analytical expressions for concentrators with mounting flange.

Index terms: ultrasound concentrator gain factor finite element method.

REFERENCES

1. Khmelev, V.N., S.S. Khmelev, S.N. Tsyganok and S.V. Levin, *A source of ultrasonic radiation. Features of construction and design: monograph*, Biysk, 2013.
2. Merkulov, L.G. and A.V. Kharitonov, Theory of compound concentrators, *Acoustic journal*, vol. 5, No. 2, 1959.
3. Khmelev, V.N., S.S. Khmelev, K.A. Karzakova and G.A. Bobrova, Design piezoelectric vibration systems, *Polzunovsky vestnik*, No. 2, 2013, pp. 119–123.
4. Khmelev V.N., S.S. Khmelev, S.N. Tsyganok, G.A. Bobrova and K.A. Karzakova, Calculation Features of the Ultrasonic Vibrating System, in *Proc. 14th International Conference of Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Novosibirsk, 2013, pp. 143–146.

Khmelev Vladimir Nikolaevich – professor, deputy director for science, Biysk Technological Institute, (3854)432481, e-mail: vnh@bti.secna.ru

Khmelev Sergey Sergeevich – docent, Biysk Technological Institute, (3854)432481, e-mail: ssh@bti.secna.ru.

Levin Sergey Viktorovich – leading engineer of the department of technical graphics, Biysk Technological Institute, (3854)432481, e-mail: lsv@bti.secna.ru.