

УДК: 534-6/-8

## Расчет амплитудно-частотных характеристик ультразвуковых преобразователей продольных и продольно-крутильных колебаний с помощью пакета Abaqus

А. Д. Лавриненков<sup>а</sup>

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
механико-машиностроительный факультет  
Украина, 03056, г. Киев, Соломенский район, пр-т Победы, 37

E-mail: <sup>а</sup>alavrinenkov@hotmail.com

Получено 30 мая 2014 г.  
после доработки 13 ноября 2014 г.

В работе проведен расчет 1/2-волнового преобразователя продольных ультразвуковых колебаний и волнового преобразователя продольно-крутильных ультразвуковых колебаний методом конечных элементов в среде программного пакета Abaqus. В результате расчета определены размеры концентратора продольно-крутильных колебаний и частотно-амплитудные характеристики преобразователей продольных и продольно-крутильных колебаний. Наложение продольно-крутильных колебаний на инструмент в процессах поверхностно-упрочняющей обработки деталей из титановых сплавов позволит уменьшить адгезионную составляющую трения в зоне контакта. Проведено сравнение результатов конечно-элементного расчета частотно-амплитудных характеристик преобразователей с экспериментальными данными, погрешность расчета не превышает 2.5 %.

Ключевые слова: продольно-крутильные ультразвуковые колебания, пьезоэлектрический преобразователь, ультразвуковой волновод, концентратор ультразвуковых колебаний, частотно-амплитудная характеристика

## Calculation of amplitude-frequency characteristics of ultrasonic transducers of longitudinal and longitudinal-torsional oscillations using Abaqus package

A. D. Lavrinenkov

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Institute of mechanical engineering,  
37 Peremohy Pros., Kyiv, 03056, Ukraine

**Abstract.** — In this study the calculation of 1/2-wave transducer of longitudinal ultrasonic oscillations and one wave transducer of longitudinal-torsion ultrasonic oscillations were carried out by finite element method with use of Abaqus. Dimensions of the concentrator of longitudinal-torsional oscillations and frequency-amplitude characteristics of the transducers of longitudinal and longitudinal-torsional oscillations were defined by calculation. Application of ultrasonic longitudinal-torsional oscillations at tool during surface-strengthening treatment of details made of titanium will allow to reduce adhesion portion of friction in the contact zone. A comparison of results of finite-element calculation of frequency-amplitude characteristics with experimental ones were made and calculation error does not exceed 2.5 %.

Keywords: longitudinal-torsional ultrasonic vibrations, piezoelectric transducer, ultrasonic waveguide, hub of ultrasonic vibration, frequency-amplitude characteristics

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 957–968 (Russian).

## Введение

Использование энергии ультразвука нашло широкое применение в различных сферах медицины, например, в хирургии и терапии [Хилл, 1989], в промышленности, в технологических процессах, как в жидкофазной обработке металлов, процессах диспергирования и очистки [Агранат, Дубровин, Хавский, 1987].

Успешно применяется ультразвук в процессах обработки твердых сред: размерной обработке хрупких материалов, таких как керамика, стекло, сверхтвердые сплавы; резании различных материалов, шлифовании и полировке; поверхностном упрочнении металлов. В абсолютном большинстве работ по применению ультразвука в технологических процессах используются волновые, 1/2-волновые и 3/2-волновые преобразователи ультразвуковых колебаний с поперечным сечением в виде круга и с концентраторами ультразвуковых колебаний (УЗК) ступенчатой, экспоненциальной, конической и других форм. Аналитический расчет преобразователей и концентраторов продольных, изгибных и крутильных колебаний основывается на решении уравнений соответствующих колебаний [Кумабэ, 1985].

Для расчета ультразвуковых преобразователей простой геометрии с концентраторами ступенчатой формы [Abdullah, Pak, 2008], преобразователей продольных колебаний сложной геометрии [Bao, Bar-Cohen, Chang, 2008; Левин, Хмелев, Цыганок, 2010], преобразователей крутильных колебаний сложной геометрии [Cardoni, Harkness, Lucas, 2010] используется метод конечных элементов.

## Постановка задачи

Применение ультразвука в процессе алмазного выглаживания цилиндрических деталей позволяет интенсифицировать поверхностно-пластическое деформирование деталей из труднообрабатываемых материалов, например, титановых сплавов [Титов, Никитенко, Лавриненков и др., 2009]. В исследовании авторами использовался 1/2-волновой пьезоэлектрический преобразователь продольных колебаний (рис. 1), рассчитанный аналитическим способом [Богуслав, Качан и др., 2012].



Рис. 1. 1/2-волновой преобразователь продольных колебаний

Авторами исследования отмечается, что поверхность деталей из титановых сплавов с высокими параметрами качества достигается на небольших скоростях обработки детали (до 18 м/мин). При увеличении скорости обработки (свыше 20 м/мин) параметры качества поверхности ухудшаются, на поверхности детали появляются задиры и микровырывы материала. При ультразвуковом (УЗ) выглаживании титановых сплавов увеличение относительной скорости перемещения инструмента и поверхности детали интенсифицирует адгезионный механизм износа, что и выражается в формировании задиры на поверхности детали и налипания титана на поверхность инструмента. Существует несколько решений данной проблемы. 1) Оксидирование поверхности детали при повышенных температурах. В итоге увеличивается микротвёрдость поверхностного слоя, и как результат — улучшение антифрикционных свойств титановых сплавов. Недостатком оксидирования является изменения механических свойств сплава, что в ряде случаев является недопустимым по технологическому процессу изготовления детали. 2) Использование специальных смазочных материалов, например, твердых смазок [Розен-

берг, Пашенко, 2007; Титов, Лабур, 2008;] и металлосодержащих смазок [Kotnarowski, 2006; Титов, Герасимова, 2014]. Применение данных смазочных материалов позволяет разграничить поверхности инструмента и детали промежуточным смазочным слоем, в результате чего повышаются параметры качества поверхности обработанной детали. Недостатком применения твердых смазок является необходимость ее удаления пламенным нагревом, что влечет за собой изменения механических свойств сплава детали. Для создания эффективных металлосодержащих смазок необходимо применять дорогостоящие ультрадисперсные и нанодисперсные порошки мягких металлов. 3) Реализация схемы обработки, при которой будет происходить уменьшение относительной скорости перемещения инструмента и поверхности детали при УЗ выглаживании без уменьшения скорости обработки детали. В результате этого уменьшится адгезионная составляющая трения, так как схема деформирования поверхности будет приближаться к вдавливанию инструмента в поверхность детали без скольжения его вдоль поверхности. Также уменьшится сдвиговая составляющая деформации поверхностного слоя, что скажется на остаточном напряженно-деформированном состоянии поверхностного слоя. Реализация данной схемы обработки возможна за счет наложения на инструмент продольно-крутильных УЗК. Продольно-крутильные УЗК создаются за счет неоднородностей поперечного сечения концентратора колебаний в виде винтовых канавок или спиральных окон [Северденко, 1973]. Как отмечается в [Розенберг, 1967], применение известных аналитических зависимостей для расчета концентраторов продольно-крутильных колебаний, поперечное сечение которых непостоянно, затруднительно из-за наличия винтовых канавок.

Целью работы является расчет волнового преобразователя с концентратором продольно-крутильных колебаний на базе 1/2-волнового преобразователя продольных колебаний методом конечных элементов (КЭ) в среде пакета Abaqus.

## Методика исследований

Было проведено моделирование 1/2-волнового преобразователя продольных колебаний (рис. 1) по схеме, представленной на рисунке 2.

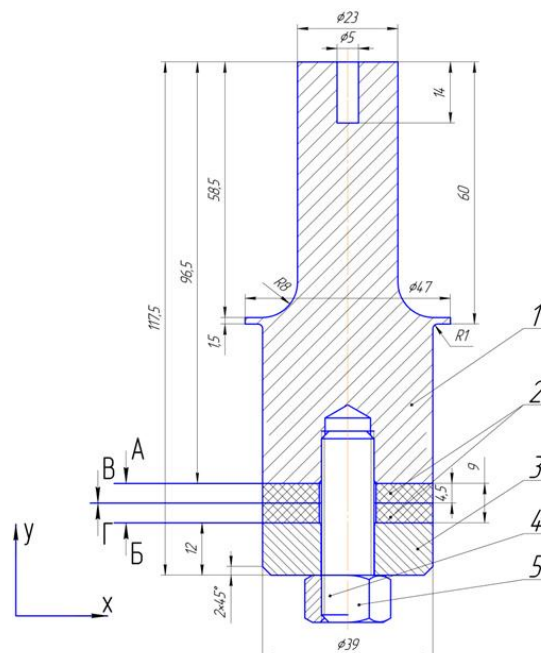


Рис. 2. Расчетная схема 1/2-волнового преобразователя продольных колебаний: 1 — ступенчатый концентратор продольных колебаний, 2 — пьезоэлектрические кольца, 3 — частотно-понижающая накладка, 4 — шпилька, 5 — гайка; А, Б, В, Г — поверхности приложения электрического потенциала

Преобразователь колебаний состоит из ступенчатого концентратора (1), материалом которого является сталь 30ХГСА, двух пьезоэлектрических колец (2) из пьезокерамики РСМ-41, частотопонижающей накладки (3) из стали 40Х13. Все детали стягиваются в один пакет с помощью шпильки (4) и гайки (5) из стали 40Х.

Преобразователь моделировался в осесимметричной и объемной постановках с дальнейшим сравнением полученных амплитудно-частотных характеристик с характеристиками реального преобразователя. При моделировании между всеми контактирующими деталями преобразователя задавалась связь, моделирующая акустический контакт. К поверхностям А, Б, В и Г прикладывался электрический потенциал.

Были сделаны следующие допущения:

- шпилька и гайка рассматривались как болт;
- резьбовое соединение деталей в расчете не учитывалось, так как между деталями существует акустический контакт, и резьбовое соединение находится в месте, близком к пучности амплитуд колебаний, где напряжения минимальны.

Механические свойства материалов деталей преобразователя представлены в таблице 1.

Таблица 1

Деталь	Концентратор	Частотопонижающая накладка	Болт	Пьезокерамика
Материал	30ХГСА	40Х13	40Х	РСМ-41
Модуль Юнга, МПа	$2,15 \cdot 10^5$	$2,18 \cdot 10^5$	$2,14 \cdot 10^5$	(приведены ниже)
Коэффициент Пуассона	0.3	0.3	0.3	(приведены ниже)
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7850	7650	7820	7850

Пьезокерамика РСМ-1 характеризуется диэлектрическими, механическими и пьезоэлектрическими свойствами.

Диэлектрические свойства задаются в виде диэлектрической матрицы  $[\epsilon^T]$  (1):

$$[\epsilon^T] = \begin{bmatrix} 1.505 & 0 & 0 \\ 0 & 1.303 & 0 \\ 0 & 0 & 1.505 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \text{ F/m}. \quad (1)$$

Механические свойства представлены механическими постоянными по трем главным осям, это три модуля Юнга  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ , три коэффициента Пуассона  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ , три модуля сдвига  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$ , значения которых представлены в таблице 2.

Механические постоянные задаются матрицей жесткости  $[C^D]$  (2):

$$[C^D] = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Пьезоэлектрические свойства материалов задаются в виде пьезоэлектрической матрицы  $[d^E]$  (3):

$$[d^E] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 741 & 0 & 0 \\ -274 & 593 & -274 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 741 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \text{ m/V}. \quad (3)$$

Таблица 2

E1	70.92 ГПа
E2	55.86 ГПа
E3	70.92 ГПа
v12	0.512
v13	0.289
v23	0.512
G12	21.7 ГПа
G13	23.4 ГПа
G23	21.7 ГПа

Направление поляризации пьезокерамических колец задавалось по оси Y.

При моделировании ультразвуковых систем определяются собственные частоты, формы колебаний и их тона, расположение узлов напряжений и амплитуд для выбора места крепления преобразователя, а также амплитуды колебаний рабочей поверхности преобразователя.

Расчет состоит из двух этапов:

1) частотного анализа, который позволяет определять собственные частоты, формы и тона колебаний преобразователя. В качестве решателя частотного анализа был выбран решатель Lanczos. На всех 4-х поверхностях пьезокерамических колец действует нулевое напряжение;

2) совместного пьезоэлектрического анализа и отклика системы на гармоническое возбуждение, которые позволяют определять амплитуды колебаний и напряжения в теле преобразователя. В качестве возбуждения волновой системы выступает обратный пьезоэлектрический эффект, возникающий при приложении электрического потенциала к пьезокерамическим кольцам. При этом один из полюсов пьезокерамического кольца соединен с нулевым напряжением, а второй — с напряжением, отличным от нуля. К прилегающим друг к другу сторонам пьезокерамических колец задается одинаковое напряжение, как и к сторонам пьезокерамических колец, которые контактируют с металлическими деталями преобразователя.

В реальности между всеми деталями преобразователя существует акустический контакт, обеспечивающий прохождение ультразвуковой волны по всей длине преобразователя и гарантирующийся стягиванием всех деталей в пакет болтом. Для моделирования акустического контакта между деталями преобразователя использовался коннектор Tie.

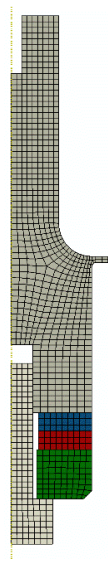


Рис. 3. Осесимметричная КЭ модель

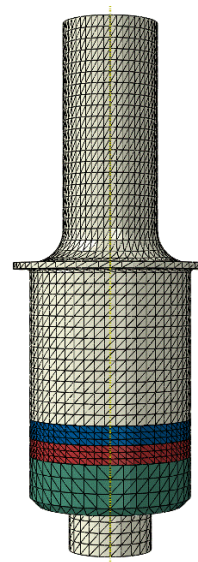


Рис. 4. Объемная КЭ модель

Типом конечного элемента для металлических деталей осесимметричной модели был выбран 4-х узловой билинейный осесимметричный четырёхсторонний элемент CAX4R (рис. 3),

для пьезоэлектрических колец — 4-х узловой билинейный осесимметричный пьезоэлектрический четырёхсторонний элемент CAX4E. Типом конечного элемента для металлических деталей объемной модели (рис. 4) был выбран 10-ти узловой тетраэдр C3D10, для пьезоэлектрических дисков — 10-ти узловой тетраэдр C3D10E.

Замер амплитуды продольных колебаний производился бесконтактным ёмкостным виброметром БМ1-1. Замер амплитуды крутильных колебаний торца концентратора продольно-крутильных колебаний производился оптическим методом с помощью лазерного луча, направленного на зеркальце, которое было закреплено на цилиндрической поверхности концентратора у кромки торца. По отклонению луча определялся угол колебания кромки торца, и рассчитывалась амплитуда колебания.

Для замера собственных частот использовался генератор сигналов ГЗ-33.

## Результаты расчета 1/2-волнового преобразователя продольных колебаний

По результатам моделирования определялись напряжения в опасных сечениях преобразователя и полуамплитуды колебания рабочего торца (места крепления инструмента).

Место перехода со ступени большего диаметра концентратора преобразователя на ступень меньшего диаметра характеризуется максимальной интенсивностью напряжений величиной 175–195 МПа (рис. 5а, рис. 6а). Максимальная полуамплитуда колебаний соответствует рабочему торцу концентратора и составляет в среднем 27–30 мкм (рис. 5б, рис. 6б).

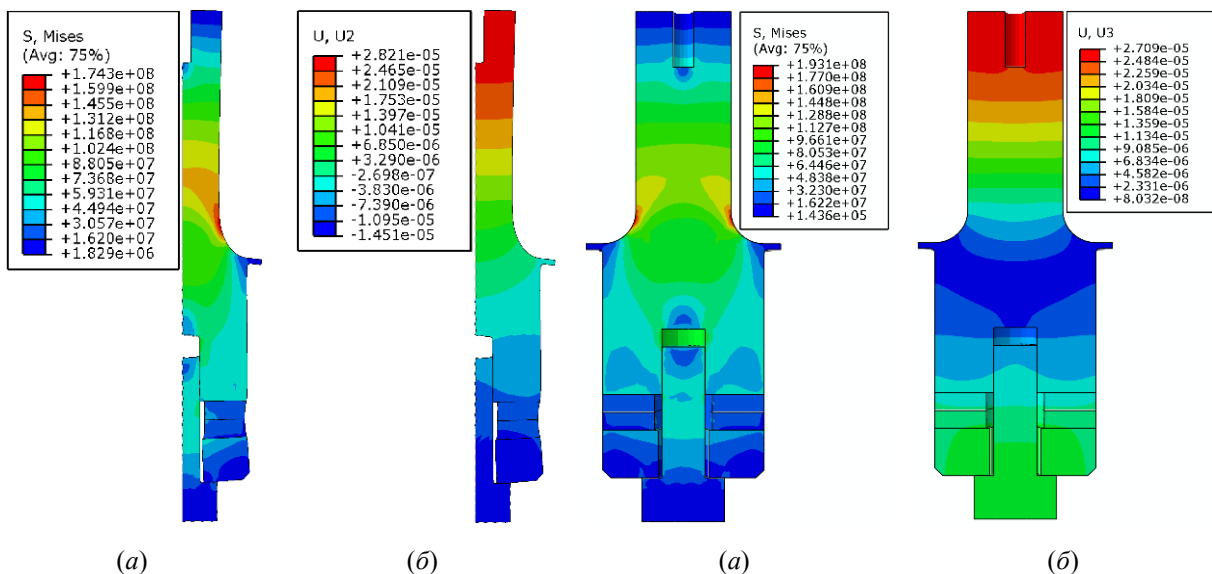


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу (а) и полуамплитуды продольных колебаний (б) осесимметричной модели

Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу (а) и полуамплитуды продольных колебаний (б) объемной модели

Полуамплитуда продольных колебаний реального преобразователя ультразвуковой установки (рис. 7), находящегося в корпусе, составила 43 мкм (рис. 8).

Частотно-амплитудные характеристики торцов концентраторов моделируемых преобразователей представлены на рисунке 9. Частотно-амплитудные характеристики торцов моделируемых и реального преобразователей занесены в таблицу 3.

Резонансная частота реального преобразователя составила 21000 Гц против расчетных частот 21463 Гц осесимметричной и 21444 Гц объемной моделей. Погрешность расчета частот составила 2.1–2.2 %, что соответствует допустимым погрешностям в инженерных расчетах.



Разница между реальной частотой и расчетными составила 440–460 Гц и возникла из-за того, что вводимые при расчете механические свойства деталей преобразователя являются справочными. Для максимальной корректности расчета механические свойства материалов необходимо получать по результатам механических испытаний.



Рис. 7. Ультразвуковая установка

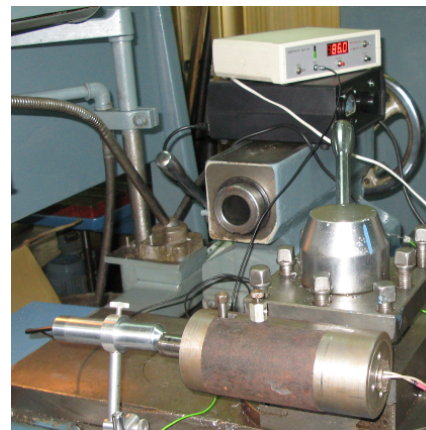
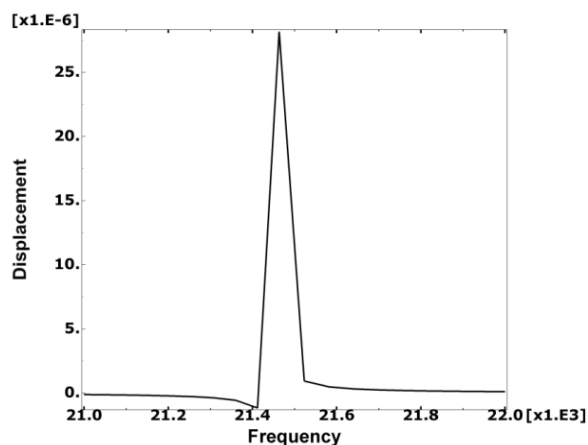
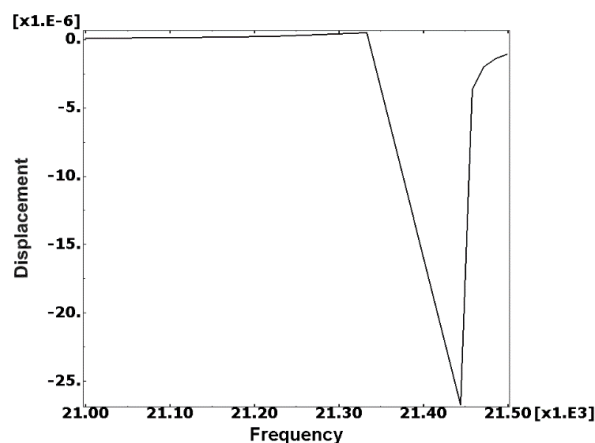


Рис. 8. Замер амплитуды продольных колебаний



(a)



(б)

Рис. 9. Частотно-амплитудная характеристика осесимметричной модели (a) и объемной модели (б) 1/2-волнового преобразователя

Таблица 3

	Осесимметричная модель	Объемная модель	Реальный преобразователь
Параметр			
Частота, Гц	21463	21444	21000
Полуамплитуда, мкм	28	27	43

## Моделирование волнового преобразователя продольно-крутильных колебаний

В исследованиях автор использует 1/2-волновой преобразователь продольных колебаний для УЗ выглаживания различных сплавов. Особое внимание уделяется титановым сплавам, ко-

торые благодаря таким свойствам, как малый удельный вес, высокая прочность, вибропрочность, стойкость против ползучести, широко применяются в авиа- и ракетостроении. Наряду с положительными свойствами, титановые сплавы характеризуется малой теплопроводностью и высокими адгезионными свойствами по отношению к обрабатываемому инструменту, что при обработке приводит к микроразрушениям поверхности детали в виде задигов, микровыворотов, налипанию титана на инструмент и, как следствие, увеличению износа инструмента.

Применение продольно-крутильных УЗК может улучшить параметры качества поверхности и поверхностного слоя детали, а также расширить технологические режимы УЗ выглаживания титановых сплавов за счет уменьшения сил трения по сравнению с УЗ выглаживанием с продольными УЗК инструмента. Для получения продольно-крутильных УЗК инструмента в качестве основы используется 1/2-волновой преобразователь продольных колебаний (рис. 1), к которому крепится концентратор продольно-крутильных колебаний с винтовыми канавками (рис. 10). Как отмечалось ранее, рассчитать данный концентратор аналитическим способом проблематично из-за непостоянства его поперечного сечения. Задачей конечно-элементного моделирования является подбор длины концентратора продольно-крутильных колебаний, при которой место крепления волнового преобразователя в корпусе по фланцу концентратора продольных колебаний будет характеризоваться минимальными амплитудами продольных и крутильных колебаний, а рабочий торец концентратора продольно-крутильных колебаний будет характеризоваться максимальными амплитудами продольных и крутильных колебаний (рис. 10). Для симметрии поперечного сечения концентратор продольно-крутильных колебаний имеет две винтовые канавки глубиной — 5 мм, шириной — 4 мм и с углом наклона — 45°.

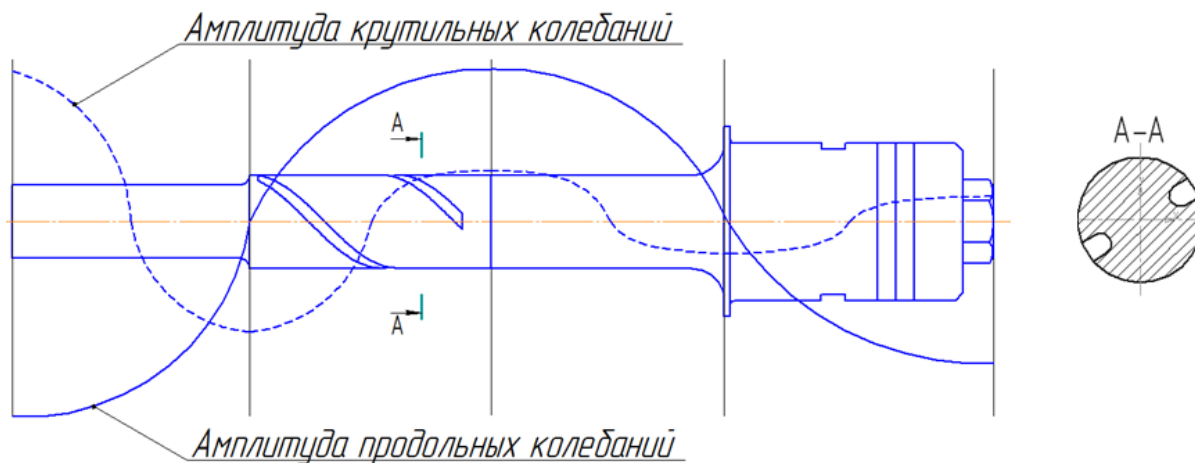


Рис. 10. Схема амплитуд продольных и крутильных УЗК по длине преобразователя

По результатам моделирования была подобрана длина концентратора продольно-крутильных колебаний, при которой распределение продольных и крутильных колебаний по длине преобразователя соответствует схеме на рисунке 10. Следует отметить, что при присоединении к 1/2-волновому преобразователю концентратора без винтовых канавок длиной  $58,5 \times 2 = 117$  мм (двойная длина ступени меньшего диаметра концентратора 1/2-вонового преобразователя (поз.1 на рис. 2)), резонансная частота волнового преобразователя составила 21430 Гц, что практически совпадает с частотой 1/2-волнового преобразователя — 21444 Гц, и фланец крепления преобразователя находится в узле амплитуд колебаний (пучности напряжений). При присоединении к 1/2-волновому преобразователю концентратора с винтовыми канавками длиной 117 мм частота волнового преобразователя составила 21405 Гц, что также близко к частоте 1/2-волнового преобразователя, однако, смещение узла амплитуд колебаний относительно фланца крепления составила более 10 мм (на рис. 11 не показано), что при работе преобразователя приведет к большим потерям в месте крепления преобразователя в корпусе. Для того чтобы узел амплитуд колебаний волнового преобразователя совпадал с местом расположения, фланца крепле-



ния необходимо уменьшить длину концентратора продольно-крутильных колебаний на 13 мм до 104 мм (рис. 11б). При этом резонансная частота колебаний увеличится до 22191 Гц.

При присоединении концентратора продольно-крутильных колебаний полуамплитуда продольных колебаний рабочего торца преобразователя (рис. 12) уменьшилась на 3 мкм по сравнению с полуамплитудой торца 1/2-волнового преобразователя с 27 мкм до 24 мкм. Картина упругих деформаций преобразователя (рис. 13) соответствует схеме распределения продольных и крутильных колебаний, представленной на рисунке 10. Коэффициент масштабирования упругих деформаций составил 400:1.

Максимальная интенсивность напряжений соответствует углублениям винтовых канавок, в отличие от 1/2-волнового преобразователя, у которого максимальная интенсивность напряжения соответствует месту перехода со ступени концентратора большего диаметра на ступень меньшего диаметра (рис. 14).

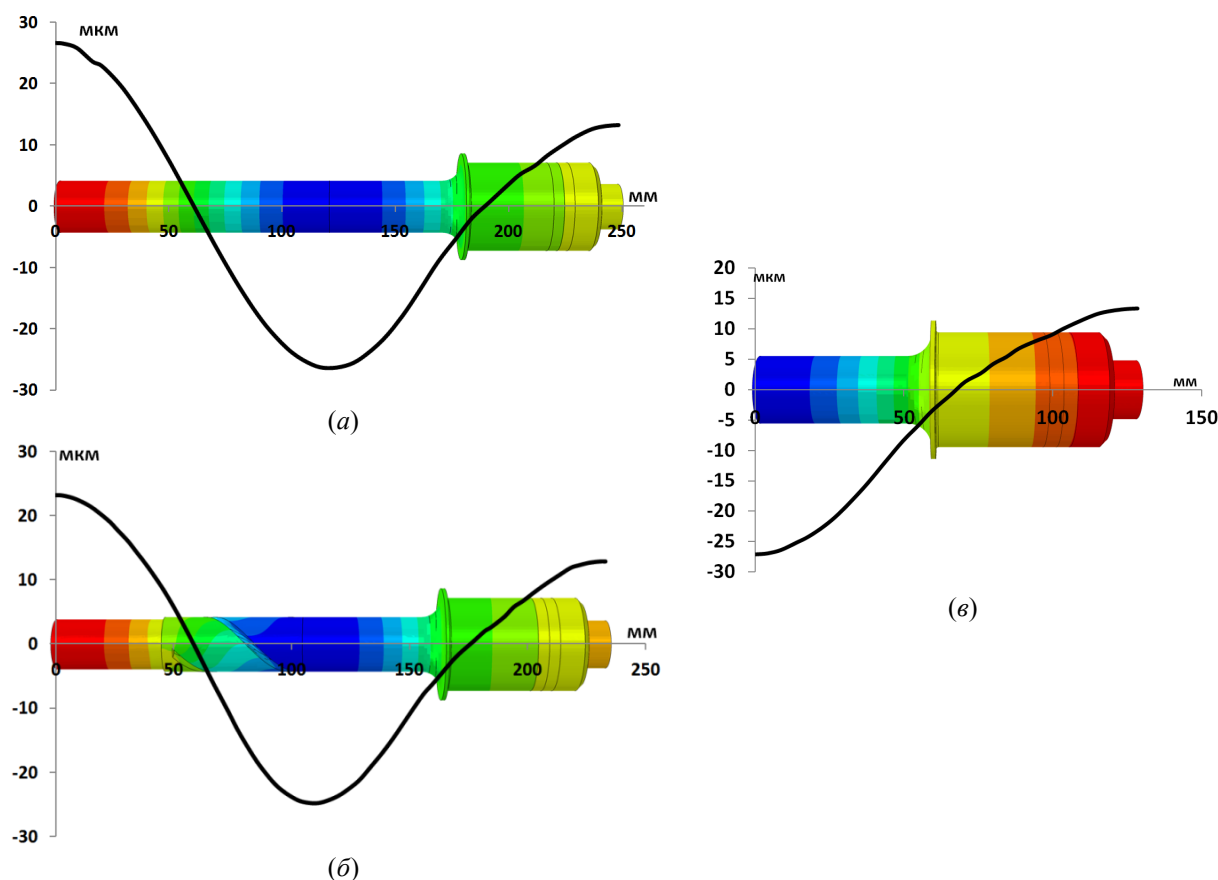


Рис. 11. Распределение амплитуды колебания продольной волны волнового преобразователя с концентратором продольно-крутильных колебаний с непостоянным поперечным сечением из-за наличия винтовых канавок (а), волнового преобразователя с концентратором с поперечным сечением в виде круга (б) и 1/2-волнового преобразователя с концентратором с поперечным сечением в виде круга (в)

По частотно-амплитудным характеристикам торца концентратора продольно-крутильных колебаний можно говорить о соизмеримости его полуамплитуд продольных (23 мкм) и крутильных (15 мкм) колебаний (рис. 15).

При работе реального преобразователя минимальные колебания фланца крепления его в корпусе (рис. 7) необходимы для получения максимального КПД и стабильной работы УЗ системы. Максимальная полуамплитуда продольных и крутильных колебаний края фланца

преобразователя составила 1.5 и 2.0 мкм соответственно, что допустимо при работе и не будет вызывать больших потерь в месте крепления.

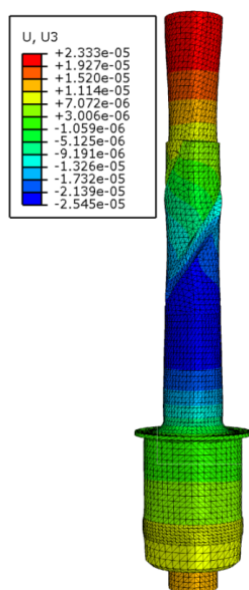


Рис. 12. Распределение амплитуд продольных колебаний

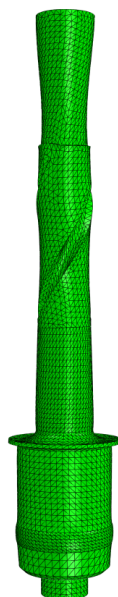


Рис. 13. Упругие деформации

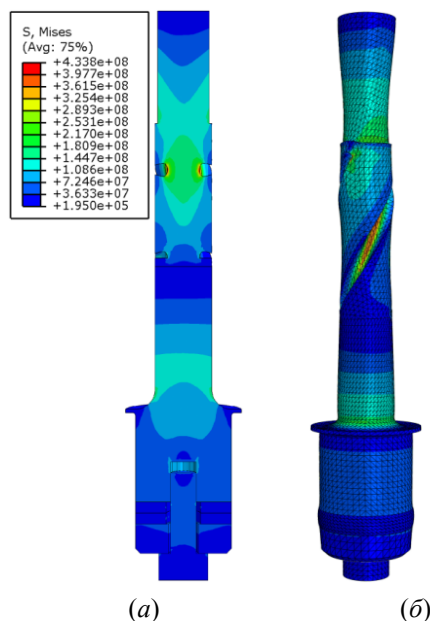


Рис. 14. Распределение интенсивности напряжений по Мизсу по сечению (а) и на поверхности (б)

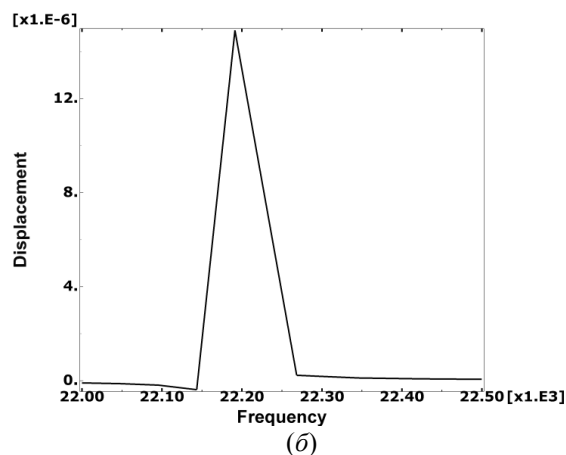
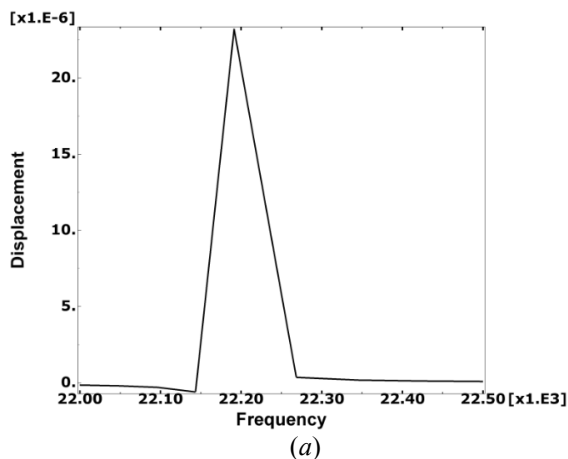


Рис. 15. Частотно-амплитудная характеристика продольных (а) и крутильных (б) колебаний

## Сравнение результатов

По размерам, полученным в результате расчета, был изготовлен концентратор продольно-крутильных колебаний (рис. 16). С помощью шпильки он был соединен с 1/2-волновым преобразователем продольных колебаний, и произведен замер собственных частот продольных колебаний (рис. 17), а также полуамплитуд продольных и крутильных колебаний.

Частотно-амплитудные характеристики рабочего торца преобразователя, полученные в результате расчета и реального преобразователя, занесены в таблицу 4.



Рис. 16. Концентратор продольно-крутильных колебаний



Рис. 17. Замер частоты продольных колебаний

Таблица 4

	КЭ модель	Реальный преобразователь
Параметр		
Частота, Гц	22191	21900
Полуамплитуда продольных колебаний, мкм	23	34
Полуамплитуда крутильных колебаний, мкм	15	10–11

Разница в частотах собственных колебаний реального и моделируемого преобразователей продольно-крутильных колебаний составила 291 Гц, которая появляется по тем же причинам, что и разница частот при исследовании 1/2-волнового преобразователя продольных колебаний. По причине того, что фланец крепления преобразователя имеет амплитуды продольных и крутильных колебаний, фиксация его в корпусе будет понижать амплитуды колебаний рабочего торца концентратора по сравнению с незакрепленным преобразователем.

## Выводы

В работе произведен КЭ расчет 1/2-волнового преобразователя УЗК в осесимметричной и объемной постановках, по результатам которого были определены частотно-амплитудные характеристики преобразователей. Погрешность обеих моделей по величинам собственных частот продольных колебаний относительно реального преобразователя составила 2.2–2.5 %.

Использование осесимметричной модели при моделировании преобразователей простой геометрии сокращает время расчета без потери точности расчета амплитудно-частотных характеристик преобразователя в сравнении с объемной моделью.

Наличие винтовых канавок на концентраторе продольно-крутильных колебаний приводит к смещению узла амплитуд колебаний относительно фланца крепления преобразователя в корпусе. Для совпадения узла амплитуд колебаний и фланца крепления необходимо производить корректировку размеров концентратора продольно-крутильных колебаний.

Установлено, что погрешность расчета собственных частот колебаний преобразователя продольно-крутильных колебаний по сравнению с частотами реального преобразователя составила 1.5 %, что позволяет использовать Abaqus в качестве инструмента расчета ультразвуковых преобразователей сложной геометрии. Для большей точности КЭ расчета вводимые механиче-

ские свойства материалов деталей преобразователя следует получать на основании механических испытаний.

## Список литературы

- Агранат Б. А., Дубровин М. Н., Хавский Н. Н. и др. Основы физики и техники ультразвука: Учебное пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1987. — 352 с.
- Богуслаев В. А., Титов В. А., Качан А. Я., Луговской А. Ф. и др. Формирование поверхностного слоя деталей выглаживанием с ультразвуковым нагружением. Монография. — Запорожье: Издательство АО «Мотор Сич», 2012. — 236 с.
- Кумабэ Д. Вибрационное резание / Пер. с яп. С. Л. Масленникова. Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. — М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.
- Левин С. В., Хмелев В. Н., Цыганок С. Н., Хмелев С. С. Создание ультразвуковых колебательных систем с увеличенной поверхностью излучения // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях. Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. — Бийск: Издательство АГТУ. — 2010. — С. 147–150.
- Розенберг Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука. Источники мощного ультразвука. — М.: Изд. «Наука», 1967. — 319 с.
- Розенберг О. А., Пащенко Е. А., Шейкин С. Е., Ростоцкий И. Ю. К вопросу разработки технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из сплава ВТ 1-0 / О. А. Розенберг, Е. А. Пащенко, С. Е. Шейкин, И. Ю. Ростоцкий // Технологические системы. — 2007. — № 2(38). — С. 27–32.
- Северденко В. П. Обработка металлов давлением с ультразвуком. — Минск: Наука и техника, 1973, 287 с.
- Титов А. В., Лабура Т. М., Пузырёв А. Л. Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-23 с использованием твердой смазки / А. В. Титов // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. — К.: НТУУ «КПИ». — 2008. — № 53. — С. 202–207.
- Титов В. А., Лавриненков А. Д., Герасимова О. В. Особенности влияния металлосодержащей смазки на контактное взаимодействие инструмента с поверхностью детали при УЗ выглаживании титановых сплавов // Проблемы трения и износа. — 2014. — №3(64). — С. 40–52.
- Титов В. А., Никитенко В. А., Лавриненков А. Д., Титов А. В., Пливак А. А. Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-22 с дополнительным ультразвуковым воздействием на инструмент // Обработка материалов давлением. — 2009. — №1(20). — С. 166–172.
- Хилл К. Применение ультразвука в медицине. Физические основы. — М., 1989. — 568 с.
- Abdullah A., Pak A. Correct prediction of the vibration behavior of a high power ultrasonic transducer by FEM simulation // International Journal of advanced manufacturing technology. — 2008. — No. 39. — P. 21–28.
- Bao X., Bar-Cohen Y., Chang Z. Modeling and computer simulation of ultrasonic/sonic driller/corer (USDC) // IEEE Transactions of ultrasonic, sonics and frequency control. — 2003. — Vol. 50, No. 9 — P. 1147–1160.
- Cardoni A., Harkness P., Lucas M. Ultrasonic rock sampling using ultrasonic-torsional vibrations // Physics Procedia. — 2010. — No. 3. — P. 125–134.
- Kotnarowski A. Searching for Possibilities of Lubricating and Cutting Fluids Modification with Copper Micro- and Nanopowders / A. Kotnarowski // Materials science. — 2006. — Vol. 12, No. 3. — P. 202–208.