

5. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Nekhoroshev V.O., Shiyanov D.V., Torgaev S.N. CuBr-Ne-HBr laser with a high repetition frequency of the lasing pulses at a reduced energy deposition in the discharge // *Physics of Wave Phenomena* – 2015– Vol. 23– Issue 1– PP. 1–13
6. Федоров В.Ф., Федоров К.В., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Слаботочный разряд в лазере на парах меди // *Лазеры на парах металлов (ЛПМ - 2014): сборник трудов симпозиума, Верхнее Лоо, 22-26 Сентября 2014– Ростов-на-Дону: ЮФУ–2014–С. 84*
7. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп//*Квантовая электроника–1974–№ 1– С. 14–15*
8. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савелов А.С., Саранцев С.А., Терехин А.Н. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // *Физика плазмы – 2010 – Т.36 – №5 – С.463–472*
9. Buzhinskij O.I., Vasiliev N.N., Moshkunov A.I., Slivitskaya I.A., Slivitsky A.A. Copper vapor laser application for surface monitoring of divertor and first wall in ITER // *Fusion Engineering and Design – 2002 – No 60– PP. 141–155*
10. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. CuBr-лазер с частотой следования импульсов до 300 кГц // *Квантовая электроника – 1999. – Т.28. – №3. – С. 220–222*
11. Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Суханов В.Б., Заикин С.С. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов 400 кГц // *Известия Томского политехнического университета – 2008 – Т.312 – №2. – С. 106–107*
12. Nekhoroshev V. O. , Fedorov V. F. , Evtushenko G. S. , Torgaev S. N. Copper bromide vapour laser with a pulse repetition rate up to 700 kHz // *Quantum Electronics– 2012– Vol. 42– №. 10– PP. 877–879*
13. Trigub M. V. , Shiyanov D. V. , Vlasov V. V. Brightness Amplifiers with PRF up to 100 kHz // *15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2014): proceedings, Алтай, 30 June-4 July 2014– Novosibirsk: NSTU–2014– PP. 301–304*
14. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости// *ИПН АФ СССР. Горький, 1988. –173 с.*
15. Рыбка Д. В. , Андроников И. В. , Евтушенко Г. С. , Козырев А. В. , Кожевников В. Ю. , Костыря И. Д. , Тарасенко В. Ф. , Тригуб М. В. , Шутько Ю. В. Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // *Оптика атмосферы и океана– 2013– Т. 26– №. 1 – С. 85–90*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Герасимов С.И. , Сыч Т.В., Кулешов В.К.<sup>1</sup>*

Сибирский государственный университет путей сообщения

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля является перспективным методом неразрушающего контроля, который находит широкое применение при контроле литых деталей, сосудов и цистерн, трубопроводов. Наиболее ответственным узлом в акустико-эмиссионном канале регистрирующей аппаратуры является преобразователь акустической эмиссии, который преобразует акустическое смещение поверхности объекта контроля (ОК) в электрическое напряжение, поступающее в АЭ систему. АЭ преобразователи выполняются на основе пьезоэлектрической керамики, работающей на

основе пьезоэффекта. Анализ проблем, протекающих в пьезоэлектрическом преобразователе, проводился такими авторами, как Наседкин, Шихман, Буйло. Основное внимание авторами сосредоточено на исследовании АЧХ преобразователей. В данной работе сделан анализ поведения пьезоэлектрической пластины под воздействием двух видов волн – продольной и поперечной. В первом случае анализируется отклик модели от воздействия фронта акустической волны, приложенной по нормали к площадке пьезоэлектрической пластины, что моделирует приход продольной волны. Во втором случае – отклик этой же модели, но от воздействия фронта касательных перемещений, что моделирует приход поперечной волны. Такой анализ актуален, так как до конца механический отклик пьезоэлектрической пластины на воздействие различных типов волн не изучен.

В данной работе рассматривается модель, представленная на рис.1.

Для Модели 1 были выбраны физические свойства керамики. Основные физико-механические характеристики для Модели следующие: модуль упругости  $E=2,2 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu=0,22$ , плотность  $\rho=2,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, длина волны  $\lambda_{\min}=10$  мм, скорость продольной волны  $C_l=9780$  м/с.

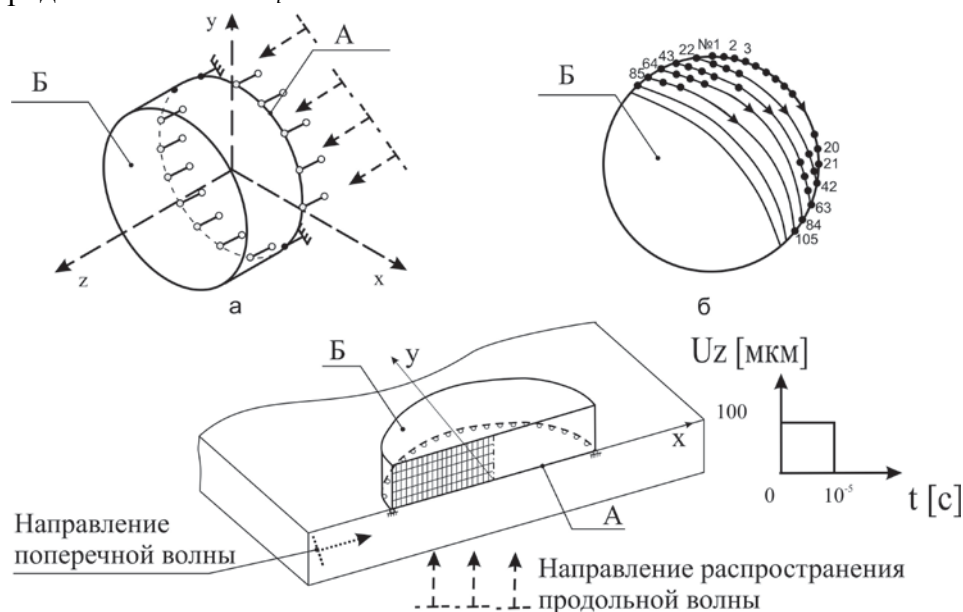


Рис. 1. Модель пьезокерамики для расчета

Граничные условия представлены на рис. 1. По кромке нижней грани введен запрет перемещений по оси  $z$ . Кроме того, в двух узлах грани  $A$ , лежащих на одном диаметре (узлы 21 и 221), введен запрет перемещений по оси  $x$  и поворотов относительно осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Во всех узлах грани  $A$  Модели 1 приложено перемещение по оси  $z$ , по модулю равное 100 мкм в форме ступеньки (меандра) длительностью  $1 \cdot 10^{-5}$  с, моделируя, таким образом, приход на пьезопластину продольной акустической волны (по нормали к поверхности пластин). Расчет производился в программном комплексе COSMOS/M в модуле нелинейного динамического расчета. Параметры расчета полностью соответствуют требованиям пространственной и временной дискретизации, подробно изложенным в [1]. Данные расчета Модели 1 приведены на рис. 2. в фиксированной шкале  $-300 \dots 300$  мкм.

На рис. 2а представлено распределение перемещений  $U_z$  в момент времени  $2,5 \cdot 10^{-7}$  с, фронт волны распространяется от грани  $A$  и доходит до середины модели. По теоретическим расчетам время прихода волны на грань  $B$  составляет  $5 \cdot 10^{-7}$  с. Следующий рис. 2б показывает, что теоретические расчеты и результаты численного моделирования совпадают. На рис. 2в наблюдаются максимальные положительные перемещения грани  $B$ . В следующие моменты времени  $1 \cdot 10^{-6}$  с и  $1,25 \cdot 10^{-6}$  с происходит процесс отражения волны от свободной грани  $B$ . В момент времени  $1,5 \cdot 10^{-6}$  с наблюдаются нулевые поля

перемещений – волна отразилась и проходит нулевое положение. В момент времени  $1,75 \cdot 10^{-6}$  с, наблюдаются максимальные отрицательные перемещения грани Б. На рис.2з фронт волны сжатия идет к грани А, в момент времени  $2,25 \cdot 10^{-6}$  с происходит отражение, в момент времени  $2,5 \cdot 10^{-6}$  с Модель снова имеет «нулевые» перемещения. В момент времени  $2,75 \cdot 10^{-6}$  с наблюдаются положительные перемещения грани Б и процесс повторяется.

Таким образом, приход на пьезопластину продольной акустической волны приводит к возникновению продемонстрированной на рис. 2 *a-p* моды колебаний, основной деформацией является «растяжение-сжатие». При этом в рамках поставленной задачи очевидно, что колебания пластины на этой моде будут приводить к максимальному электрическому сигналу на обкладках пьезоэлектрической бочки, так как суммарная деформация верхней грани в определенные моменты времени при такой моде максимальна.

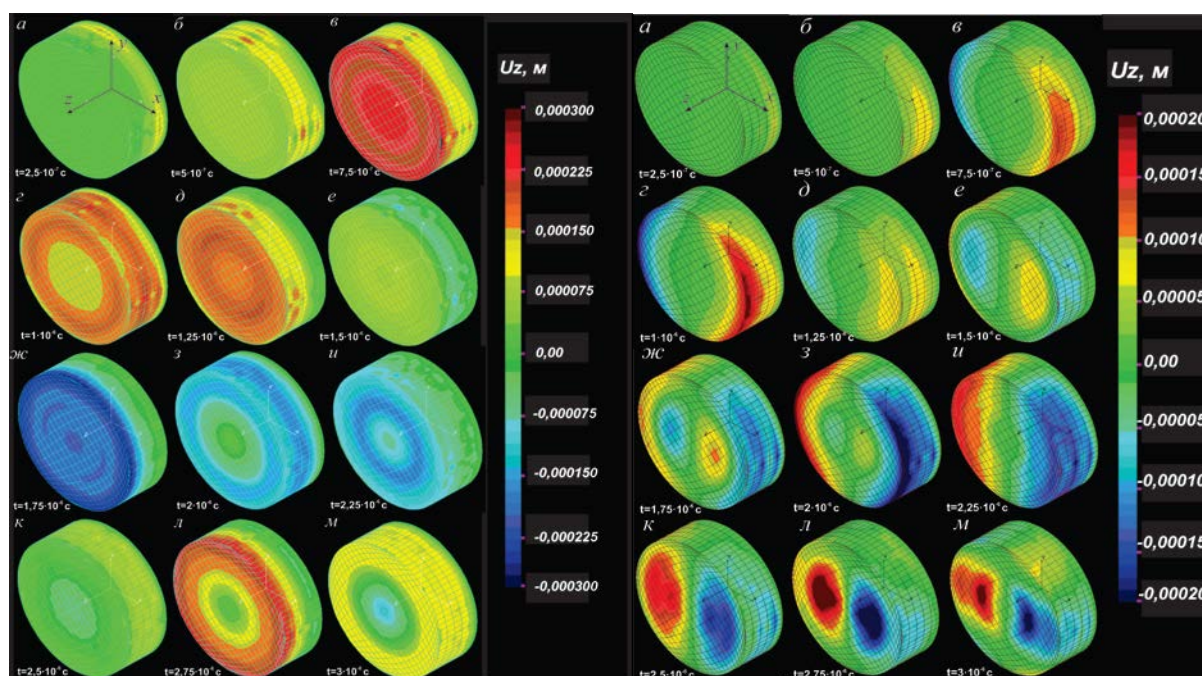


Рис. 2.Эпюры перемещений  $U_z$  для Модели 1 при приходе продольной волны

Рис. 3.Эпюры перемещений  $U_z$  для Модели 1 при приходе поперечной волны

Второй эксперимент с Моделью 1 состоял в изменении направления возмущающих перемещений на  $U_x$ . Остальные граничные и начальные условия остались без изменений. На рис. 3 *a-p* анализируются перемещения  $U_z$  грани Б Модели.

В момент времени  $2,5 \cdot 10^{-7}$  с рис.3а волна поступает от грани А, рис.3б максимум волны распространяется к середине модели, рис.3в максимум доходит до верхней грани, на рис. 3г волна доходит до верхней грани и перемещения  $U_z$  становятся максимальными на двух участках верхней грани. К моменту времени  $1,5 \cdot 10^{-6}$  с зоны максимальных перемещений смещаются к центру, эпюра становится более сложной, с двумя перегибами, к моменту времени  $2 \cdot 10^{-6}$  с максимальные перемещения  $U_z$  снова наблюдаются на краях, при этом зоны отрицательных (синий цвет) и положительных (красный цвет)

перемещений меняются местами, если сравнивать с рис.3г. Далее максимумы положительных и отрицательных перемещений смещаются снова к центру модели и процесс повторяется.

Результаты математического моделирования показывают, что мода колебаний определяет распределение перемещений узлов верхней грани модели. В реальной пьезоэлектрической платине напыленной является верхняя грань (т.н. электрод), с которого снимается электрический потенциал. В рассмотренных примерах такой электрический потенциал (суммарное перемещение  $U_z$ ) будет для поперечной волны на несколько порядков меньше, чем для волны продольной. Для отстройки от зависимостей и максимально эффективного использования пьезопреобразователей могут применяться различные конструкции, в том числе описанные в [2].

#### **Список использованных источников**

1. Сыч Т.В., Герасимов С.И., Кулешов В.К. Моделирование распространения ультразвуковой волны через сварной шов // Контроль. Диагностика – 2013 – № 13 – С. 203-206
2. Сыч Т.В., Герасимов С.И., Бехер С.А. Акустическая головка / Патент на полезную модель **RUS 152495** 10.12.2014

### **УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР**

*Хамматов А.Н., Белкин Д.С.*

Томский политехнический университет

Несмотря на интенсивное развитие цифровой обработки изображений и широкий спектр программ для металлографического анализа, остаются актуальными методы металлографии, основанные на сравнении с эталонными шкалами. Одним из основных условий наблюдения в стандартах считается общее увеличение микроскопа, без дополнительных требований к его разрешающей способности или апертуре соответствующего объектива [1–10]. Именно это требование учитывает специалист при выборе оборудования. Обоснование дополнительных требований к оборудованию бывает затруднено при отсутствии этих требований в соответствующем стандарте.

Основное преимущество методов сравнения – оперативность (для анализа требуется несколько секунд). Кроме того, существуют различные при анализе, необходимо оценивать форму структурных составляющих, их распределение и сочетания, которые трудно описать количественно. Таким образом методы сравнения стали наиболее распространёнными в практике металлографии среди производственных лабораторий, несмотря на существенные недостатки. Основными недостатками метода сравнения являются низкая точность при количественной оценке и субъективное восприятие оператором (часто два оператора не могут сойтись во мнении).

В тоже время, одним из направлений развития микроскопической техники стало повышение эргономичности и оперативности смены настроек и увеличений. Так, использование сухих (не иммерсионных) оптических систем позволяет избежать затрат времени на очистку образца и объектива после анализа. При этом снижается числовая апертура объектива и, как следствие, разрешение микроскопа. Использование объективов с увеличенным рабочим расстоянием позволяет повысить оперативность смены увеличения без опасности повредить объект контроля и фронтальную линзу. Однако, увеличение рабочего расстояния часто так же достигается снижением числовой апертуры. Таким образом, всё чаще металлографические микроскопы выпускаются с максимальным увеличением в  $1000^x$ , получаемом применением объективов с апертурой  $N.A.=0,75 \div 0,95$ , что соответствует разрешающей способности соответственно  $d=0,45 \div 0,35$  мкм.