ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/143

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПОРИСТЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
ИЗЛУЧАТЕЛЯХ**

Наседкин А.В.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

В современной технике широко используются различные ультразвуковые приборы, причем области их применения постоянно расширяются. Для возбуждения и регистрации акустических волн в этих устройствах часто применяются пьезоэлектрические преобразователи. Эффективность пьезоэлектрических актуаторов и сенсоров в таких приложениях зависит от ряда характеристик. Наиболее существенную роль играют свойства пьезокерамического материала и их стабильность. Материальные модели пьезокерамики, геометрические особенности устройства и типы генерируемых волн определяют такие характеристики, как коэффициенты электромеханической связи, акустический импеданс, полосу пропускания и др.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, в акустических приложениях пористые пьезокерамические материалы имеют ряд преимуществ по сравнению с плотными. Так, пористая пьезокерамика имеет меньший импеданс, что обеспечивает лучшее акустическое согласование излучателя с внешней акустической средой. В связи с этим, в пьезоизлучателе можно обойтись без добавления согласующих слоев, что упрощает конструкцию и повышает ее долговечность. Кроме того, для многих видов пористой пьезокерамики толщинный пьезомодуль d_{33} практически не зависит от пористости, а ее коэффициенты пьезочувствительности g_{33} и g_{31} возрастают с ростом пористости. В итоге даже для высокопористой пьезокерамики ее толщинный коэффициент электромеханической связи остается достаточно высоким. Однако поперечный пьезомодуль d_{31} обычной пористой пьезокерамики убывает с ростом пористости, а также понижаются ее прочностные свойства.

Недавно стали разрабатываться новые пористые пьезокерамические материалы, которые обладают улучшенными характеристиками и сохраняют при этом все основные достоинства обычной пористой пьезокерамики. Эти пористые пьезокерамические материалы имеют модифицированные свойства в окрестностях пор, а также, возможно, пористую наноструктуру. Так, использование в порообразователях микро- или наногранул с металлическими частицами или с частицами других веществ позволяет получать пористые материалы с полностью или частично металлизированными или с легированными другими веществами поверхностями пор.

Для наноразмерных пор наблюдается масштабный эффект, в силу которого материальные свойства нанопористого материала могут существенно отличаться от свойств материала с обычной или с микро- пористостью. Наиболее интересен известный и для упругих тел феномен возрастания жесткости нанопористого материала по сравнению с жесткостью сплошного материала при уменьшении размеров нанопор.

Для определения эффективных модулей пористой пьезокерамики использовались теория электроупругости, метод эффективных модулей, конечно-элементные технологии генерирования представительных объемов и решения задач гомогенизации.

Были созданы программы на языке APDL ANSYS, позволяющие в автоматизированном режиме решать в пакете ANSYS задачи гомогенизации пьезоэлектрических композитов различных типов связности и определять их эффективные модули. Для генерации структур представительных объемов, помимо простого случайного алгоритма ANSYS, были использованы также внешние программы, реализующие разнообразные алгоритмы: 3-х алгоритм, поддерживающий связанность материала первой фазы вплоть до 90 % включений второй фазы; 3-0 алгоритм с регулярной структурой связности первой фазы по трем осевым направлениям и с закрытой структурой элементов второй фазы; кластерные алгоритмы (метод Виттена-Сандера, создающий кластерные структуры второй фазы; метод «роста из плоскости»; метод начальной концентрации и др.)

Секция 3. Проблемы компьютерного конструирования материалов с иерархической структурой

Конечно-элементный пакет ACELAN-COMPOS, разрабатываемый на кафедре математического моделирования ЮФУ, ориентирован на решение задач гомогенизации со связанностью механических и электромагнитных полей. В этом пакете реализованы новые алгоритмы 3-3 связности, поддерживающие связанность двух фаз; алгоритм 3-0 связности, создающий гранулированные структуры; и алгоритм 3-1 связности, создающий структуры со стержневыми элементами в матрице.

Для всех этих моделей были разработаны алгоритмы автоматизированного поиска конечных элементов, контактирующих с межфазными границами, и размещения на них оболочечных элементов, имитирующих наличие поверхностных эффектов для наноразмерных включений или пор. В случае материала с металлизированными границами пор дополнительно на этих границах задавались краевые условия, принятые в теории электроупругости для свободных электродов.

Была также реализована возможность учета неоднородной поляризации пористой пьезокерамики. Для этого в представительном объеме предварительно решалась задача электростатики, имитирующая процесс поляризации. Из решения данной задачи определялись векторы поляризации, которые запоминались для каждого пьезоэлектрического конечного элемента и определяли элементные системы координат для последующих расчетов в пьезоэлектрических задачах гомогенизации.

В качестве примеров использования пористых пьезокерамيك в ультразвуковых преобразователях были исследованы следующие модели:

- сферические излучатели со сплошными [1] и с разрезными [4] электродами, работающие на толщинных модах колебаний,
- дисковые излучатели с одной плосковогнутой поверхностью [2] и тарелкообразные излучатели [3], работающие как на толщинных, так и на планарных модах колебаний;
- пьезопреобразователи с естественно закрученными элементами, работающие на крутильных модах.

Для расчетов пьезопреобразователей применялась однотипная техника. Вначале проводился модальный и гармонический анализ пьезоэлектрических преобразователей без акустической среды. Далее для рассматриваемых преобразователей решались связанные задачи электроупругости и акустики в режиме установившихся колебаний в окрестности основных резонансных частот и определялись генерируемые волновые поля в акустической среде. При этом, расчеты амплитудно-частотных характеристик проводились вблизи частот электрических резонансов при возбуждении колебаний электрическим напряжением и вблизи частот электрических антирезонансов, когда колебания возбуждались электрическим током. Для сферических пьезоизлучателей были также исследованы нестационарные задачи.

Проведенные расчеты показали эффективность рассмотренных видов ультразвуковых пьезоизлучателей, выполненных из пористой пьезокерамики, особенно при возбуждении колебаний электрическим током.

Работа выполнена в рамках проекта конкурсной части государственного задания Минобрнауки России, № 9.1001.2017/4.6.

1. Домашенкина Т.В., Наседкин А.В., Рыбьянец А.Н. Конечно-элементный анализ фокусирующего ультразвукового пьезоизлучателя в режиме установившихся колебаний // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 6 (107). С. 174-179.
2. Наседкин А.В., Наседкина А.А., Рыбьянец А.Н. Моделирование и конечно-элементный анализ преобразователя из пористой пьезокерамики в форме диска с плосковогнутой поверхностью // Дефектоскопия. 2018. № 6. С. 23–31.
3. Nasedkin A.V., Nasedkina A.A., Rajagopal A. Analysis of cymbal transducer from porous piezoceramics PZT-4 with various material properties based on ANSYS / Advanced Materials – Proc. Int. Conf. “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications”, PHENMA 2017. Springer Proceedings in Physics. Vol. 207. Eds. I.A. Parinov, S.-H. Chang, V.K. Gupta. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer Cham. 2018. Ch. 42. P. 533-547.
4. Nasedkin A.V., Rybyanets A.N. Finite element analysis of ultrasonic spherical piezoelectric phased array with split electrodes // 2016 Joint IEEE Int. Symp. on the Applications of Ferroelectrics, Europ. Conf. on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (ISAF/ECAPD/PFM), 21-25 Aug. 2016, Darmstadt, Germany. IEEE Conf. Publ., 2016. P. 1-4.