05.11.06

В.Н. Хмелев д.т.н., А.В. Шалунов д.т.н., В.А. Нестеров к.т.н., Р.С. Доровских, Р.Н. Голых к.т.н., К.В. Шалунова к.т.н., А.А. Нестеров

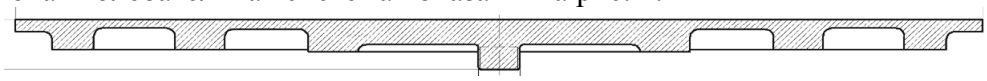
Бийский технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, nva@bti.secna.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

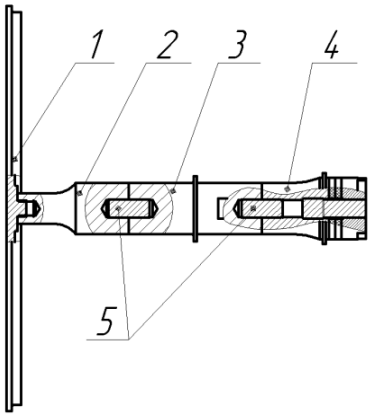
Статья посвящена исследованию влияния анизотропии механических свойств материала на распределение колебаний ультразвуковых дисковых излучателей. Такие излучатели предназначенных для создания высокоинтенсивных колебаний в газодисперсных средах. В результате исследований установлено, что при 4,5 % анизотропии происходит снижение равномерности амплитуд колебаний более чем в 5 раз.

Ключевые слова: *ультразвук, дисковый излучатель, резонансная частота, амплитуда, анизотропия механических свойств.*

В настоящее время ультразвуковые (УЗ) колебания высокой интенсивности широко используются для интенсификации технологических процессов в различных средах (коагуляция, сушка, распыление, пеногашение и т.д.). Созданные в последние годы дисковые излучатели не получили широкого распространения, т.к. не позволяют интенсифицировать перечисленные процессы в промышленных масштабах. Это вызвано тем, что они обладают невысокой эффективностью из-за малой площади излучения, низкой амплитуды колебаний излучателя, что приводит к ограничению мощностных характеристик всей системы и не позволяет создавать акустические поля высокой интенсивности. При этом сложность создания излучателей больших диаметров обусловлена появлением неравномерности амплитуд колебаний излучателя, вследствие чего в его материале возникают высокие механические напряжения, приводящие к разрушению диска. Одной из возможных причин проявления неравномерности колебаний является наличие анизотропии механических свойств в материале, из которого изготавливаются излучатели. В связи с этим, для оптимизации конструкций дисковых излучателей было проведено исследование влияния анизотропии механических свойств на распределение амплитуд колебаний. Исследования были проведены на акустическом излучателе в виде диска ступенчато-переменного сечения диаметром 420 мм, работающем на 7-й кольцевой моде колебаний. Форма излучателя и ультразвуковая колебательная система показаны на рис. 1.



а)



1 – дисковый излучатель;
2 – концентратор;
3 – волновод;
4 – пьезоэлектрический преобразователь;
5 –шпильки

б)

Рис. 1. Форма дискового излучателя (а) и ультразвуковая колебательная системы (УЗКС) (б)

Разработка пьезопреобразователя и концентратора УЗКС осуществлялась по известным методикам [1,2]. Конструкция ультразвукового дискового излучателя рассчитана с помощью метода конечных элементов (МКЭ) таким образом, чтобы обеспечивалась равномерная амплитуда колебаний на каждом кольцевом участке. При этом разница амплитуд между различными тонкими кольцевыми участками не превышала 10%.

Анизотропия материалов связана с их структурной неоднородностью и существенным различием упругих и прочностных свойств при различных видах нагружения. При разработке УЗ дисковых излучателей, изготавливаемых из пластин, важными характеристиками материала являются значения модуля Юнга в поперечном и продольном направлениях, т.к. они влияют на равномерность распределения колебаний на различных кольцевых резонансных модах дискового излучателя. На рисунке 2 приведен график зависимости модуля Юнга образца титанового сплава ВТ-1-0 от направления, в котором проводилось контрольное испытание

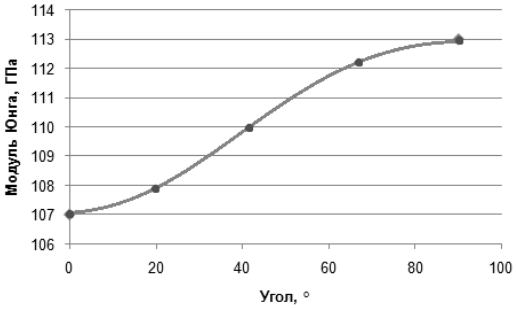
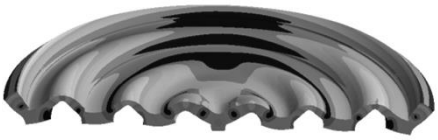


Рис. 2. Анизотропия модуля Юнга листа титан

На рисунке 3 показаны распределения колебаний при различных значениях модуля Юнга в продольном направлении, при этом в поперечном и вертикальном направлениях модулюь Юнга был задан постоянным.

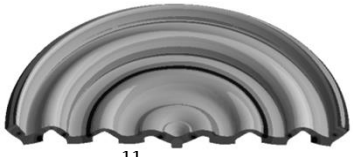


А) E_x=1,13*10^{11} Па; E_y=1,13*10^{11} Па; E_z=1,08*10^{11} Па

Б) E_x=1,13*10^{11} Па; E_y=1,13*10^{11} Па; E_z=1,1*10^{11} Па

В) E_x=1,13*10^{11} Па; E_y=1,13*10^{11} Па; E_z=1,11*10^{11} Па

Г) E_x=1,13*10^{11} Па; E_y=1,13*10^{11} Па; E_z=1,12*10^{11} Па



Д) E_x=1,13*10^{11} Па; E_y=1,13*10^{11} Па; E_z=1,125*10^{11} Па

Е) E_x=1,13*10^{11} Па; E_y=1,13*10^{11} Па; E_z=1,13*10^{11} Па

Рис. 3. Распределение колебаний дискового излучателя в зависимости от значений модуля Юнга в продольном направлении

Темные участки на трехмерных моделях, показанных на рисунке 3 указывают на малые значения амплитуд колебаний («нули колебаний»). В результате выполненных расчетов получена зависимость, показанная на рисунке 4.

Анализ полученных данных показывает, что чем больше разница модулей Юнга в продольном и поперечном направлениях, тем ниже равномерность распределения колебаний дискового излучателя.

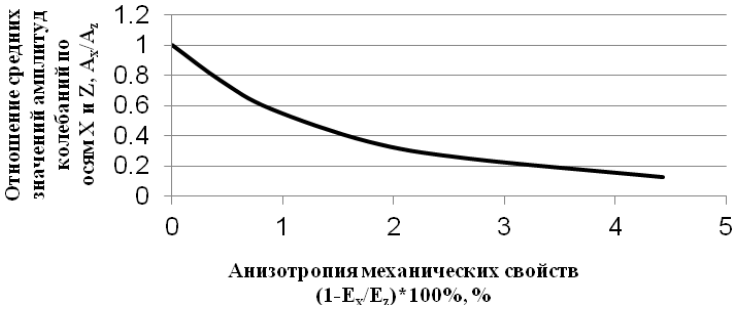


Рис. 4. Зависимость отношения средних значений амплитуд колебаний по осям X и Z от анизотропии механических свойств

Далее, для подтверждения теоретических результатов был изготовлен УЗ дисковый излучатель из титановой пластины, обладающей анизотропией механических свойств. Для визуального определения расположения «нулей» колебаний и сравнения распределений с теоретическими на поверхность дискового излучателя был нанесен индикаторный порошок. Таким образом, при запуске дискового излучателя на рассчитанной моде частички порошка отбрасывает с колеблющихся участков диска в области нулей колебаний. На рисунке 5 приведены фото излучателей и расположение «нулей» колебаний (а – исходный излучатель, б – излучатель с анизотропией).

а)

б)

Рис. 5. Картины «нулей» колебаний на поверхности дисковых излучателей

Анализ картины «нулей» колебаний и сравнение ее с теоретическими расчетами позволили установить, что материал излучателя обладает 4,5 % анизотропией, что соответствует измерениями модуля Юнга заготовки излучателя. Дальнейшие исследования были направлены на определение относительных значений амплитуд колебаний дискового излучателя с использованием приемного пьезопреобразователя с сухим точечным контактом для сопоставления с результатами теоретических расчётов. В результате измерений было установлено, что отношения измеренных значений амплитуд колебаний на разных участках диска расходятся с теоретическими значениями не более чем на 10%. Это свидетельствует об адекватности использованной для расчетов модели колеблющегося твёрдого тела. Проведенные далее модельные расчеты позволили оптимизировать конструкцию дискового излучателя для обеспечения равномерности амплитуд колебаний (рисунок 5,б). Полученная остаточная неравномерность может быть связана с наложением паразитных мод на рабочую кольцевую моду колебаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-41-220768 р_а.

Список литературы

1. *Khmelev, V.N.* Multifrequency Ultrasonic Transducer with Stepped-Plate Disk / A. N. Galahov, A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, S.S. Khmelev, A.N. Lebedev, K.V. Shalunova // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.250–253.

2. *Хмелев, В.Н.* Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев, А.Н. Галахов // Известия Тульского Государственного университета, серия: технические науки. – 2010. – Вып.1 – С.148–153.

3. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 505 с.