**Steel-Wax (Сталь/Парафин), предварительные расчеты**

**Двуслойная свободная пластина**

Сталь: h1 = 10 мм; Парафин: h2 = 0 – 5 мм (с шагом 1 мм)

Сталь 09Г2С:

E = 200 GPa cp = 5845.8 m/s ~ 5.8 km/s λ = 114.26 GPa

μ = 77 GPa ==> cs = 3132 m/s ~ 3.1 km/s λ+2μ = 268.26 GPa

ρ = 7850 kg/m^3 ν = 0.2987 ~ 0.3

Парафин:

1. А.В. Уткин, В.А. Сосиков, А.Н. Зубарева, Журнал технической физики, 2014, том 84, вып. 12

при to = 20o C cp = 1.46 km/s ρ = 910 kg/m^3

при to = 70o C cp = 1.32 km/s ρ = 777 kg/m^3

ν близок к 0.5

2. от АЕ:

E ~ 50 – 250 MPa (комнатная to )

μ ~ (1000 + *i*100) Pa (liu2018)

ν ~ 0.37

Принимаем вариант входных данных:

**2FL\_Steel/Wax: [v] = 1000 m/s; [rho] = 1000\*kg/m^3;**

**[h] = 0.001 m = 1 mm;**

**==> [f] = 1 MHz; [E] = 10^9Pa = 1GPa**:

**V\_p(1) = 5.8 V\_s(1) = 3.1 rho(1) = 7.85 hs(1) = 10. ! steel**

**V\_p(2) = 1.4 V\_s(2) = 0.3 rho(2) = 0.9 hs(2) = 1-5. ! wax**

Безразмерные параметры:

*l0 = h1=0.01m = 10 mm;*

*v0 = vs1 = 3100 m/s;*

*ρ0 = rho1 = 7850 kg/m^3*

*==> f0 = v0/l0 = 3.1\*10^5 Hz =310 kHz; f* = 1.3 ==> *f* = 403 kHz

*E0 = ρ0\*v0^2 = 75.4385 GPa*

*s0 = 1/3100 = 3.2258e-4 s/m = 0.32258 s/km*

**V\_p(1) = 1.870 V\_s(1) = 1. rho(1) = 1. hs(1) = 1. !steel**

**V\_p(2) = 0.452 V\_s(2) = 0.0968 rho(2) = 0.115 hs(2) = 0.1 ! wax**

1. **Пластина без парафина** (h2 = 0)

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Дисперсионные кривые бегущих волн: медленность (слева), групповая скорость (справа).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

Частотные спектры элементов матрицы Грина *|*ωKij(f,sl)|, (i,j): (1,1) (1,3) / (3,1) (3,3)

1. **Пластина со слоем парафина толщины** h2 = 1 мм

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Дисперсионные кривые бегущих волн: медленность (слева), групповая скорость (справа).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

Частотные спектры элементов матрицы Грина *|*ωKij(f,sl)|, (i,j): (1,1) (1,3) / (3,1) (3,3)

1. **Слой парафина толщины** h2 = 3 мм

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Дисперсионные кривые бегущих волн: медленность (слева), групповая скорость (справа).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

Частотные спектры элементов матрицы Грина *|*ωKij(f,sl)|, (i,j): (1,1) (1,3) / (3,1) (3,3)

1. **Слой парафина толщины** h2 = 5 мм

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Дисперсионные кривые бегущих волн: медленность (слева), групповая скорость (справа).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

Частотные спектры элементов матрицы Грина *|*ωKij(f,sl)|, (i,j): (1,1) (1,3) / (3,1) (3,3)

Амплитуды возбуждаемых волн (отклик на единичную нагрузку)

Здесь все результаты в **безразмерном** виде: f = 0.1 --> 31 кГц,

0 < f < 0.65 --> 0 < f < 200 кГц

1. **Горизонтальный отклик на горизонтальное воздействие** (Kij = 1, resK11)

|  |  |
| --- | --- |
| без парафина (h2 = 0) | h2 = 1 мм |
| h2 = 3 мм | h2 = 5 мм |

2. **Вертикальный отклик на горизонтальное воздействие** (Kij = 2, resK31) или

**3. Горизонтальный отклик на вертикальное воздействие** (Kij = 3, resK13)

Графики resK31и resK13получаются абсолютно одинаковыми. Видимо какое-то свойство взаимности. Поэтому ниже картинки только для resK31.

|  |  |
| --- | --- |
| без парафина (h2 = 0) | h2 = 1 мм |
| h2 = 3 мм | h2 = 5 мм |

4. **Вертикальный отклик** **на вертикальное воздействие** (Kij = 4, resK33)

|  |  |
| --- | --- |
| без парафина (h2 = 0) | h2 = 1 мм |
| h2 = 3 мм | h2 = 5 мм |

Численные эксперименты (МКЭ)

Сталь

Парафин

*x*

*z*

Пьезоэлемент

Пьезосенсор

Область B-скана

200 мм

А) Определение наличия парафина по изменению в поведении дисперсионных кривых волн лэмбовского типа:

1. сканирование бесконтактным способом вдоль поверхности образца (область B-скана)
2. частотно-волновой анализ полученных сигналов (применение преобразования вида, где  - измеренный сигнал [вертикальная компонента скорости смещений (или самих смещений) точек поверхности / отклик бесконтактного air-coupled преобразователя / …])

Пьезоэлемент (толщина 0.5 мм, длина 20 мм, материал в МКЭ-модели – PZT-5H, при  задавались условия симметрии для уменьшения размерности МКЭ-модели) возбуждался широкополосной тональной посылкой в форме прямоугольного импульса шириной 2.5 мкс. В качестве сигнала  рассматривалась вертикальная компонента поля перемещений на поверхности стали. На графиках – нормированные поверхности ; локальные максимумы функции  (темные области на рисунках) указывают на дисперсионные кривые , описывающие зависимость волновых чисел возбуждаемых бегущих волн от частоты.

Изображение выглядит как стол, компьютер, сидит, рабочий стол

Автоматически созданное описание

1 - Сталь без парафина

Изображение выглядит как стол, компьютер, сидит, ноутбук

Автоматически созданное описание

2 - толщина парафина - 1 мм

Изображение выглядит как стол, сидит, компьютер, ноутбук

Автоматически созданное описание

3 - толщина парафина - 3 мм

Б) Возможные индикаторы наличия парафина в частотном отклике отдаленного пьезосенсора

Гипотеза: резкие провалы на графике спектра  сигнала, принятого пьезосенсором, после возбуждения пьезопреобразователя широкополосной посылкой в виде прямоугольного импульса шириной 3 мкс могут быть ассоциированы с особенностями поведения элементов матрицы Грина -> можно рассматривать в качестве индикаторов наличия слоя парафина.

|  |  |
| --- | --- |
| МКЭ ()  Изображение выглядит как текст, карта  Автоматически созданное описание | h2 = 1 мм |
| h2 = 3 мм | h2 = 5 мм |