



**XXII Зимняя школа по механике сплошных сред
22-26 марта 2021 г., Пермь**

Применение бегущих волн в определении поврежденности интерфейсов в слоистых композитах

Дорошенко О.В., Голуб М.В., Еремин А.А., Вильде М.В.



**Кубанский государственный университет,
Институт математики, механики и информатики**



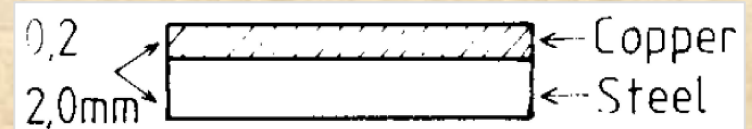
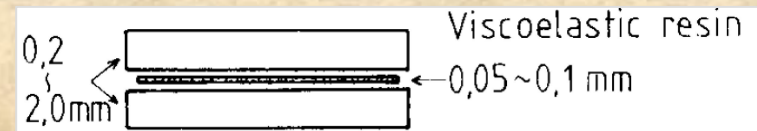
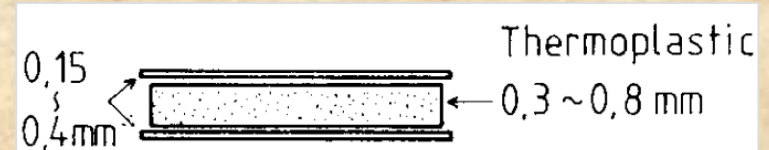
**Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского**

Слоистые композиты

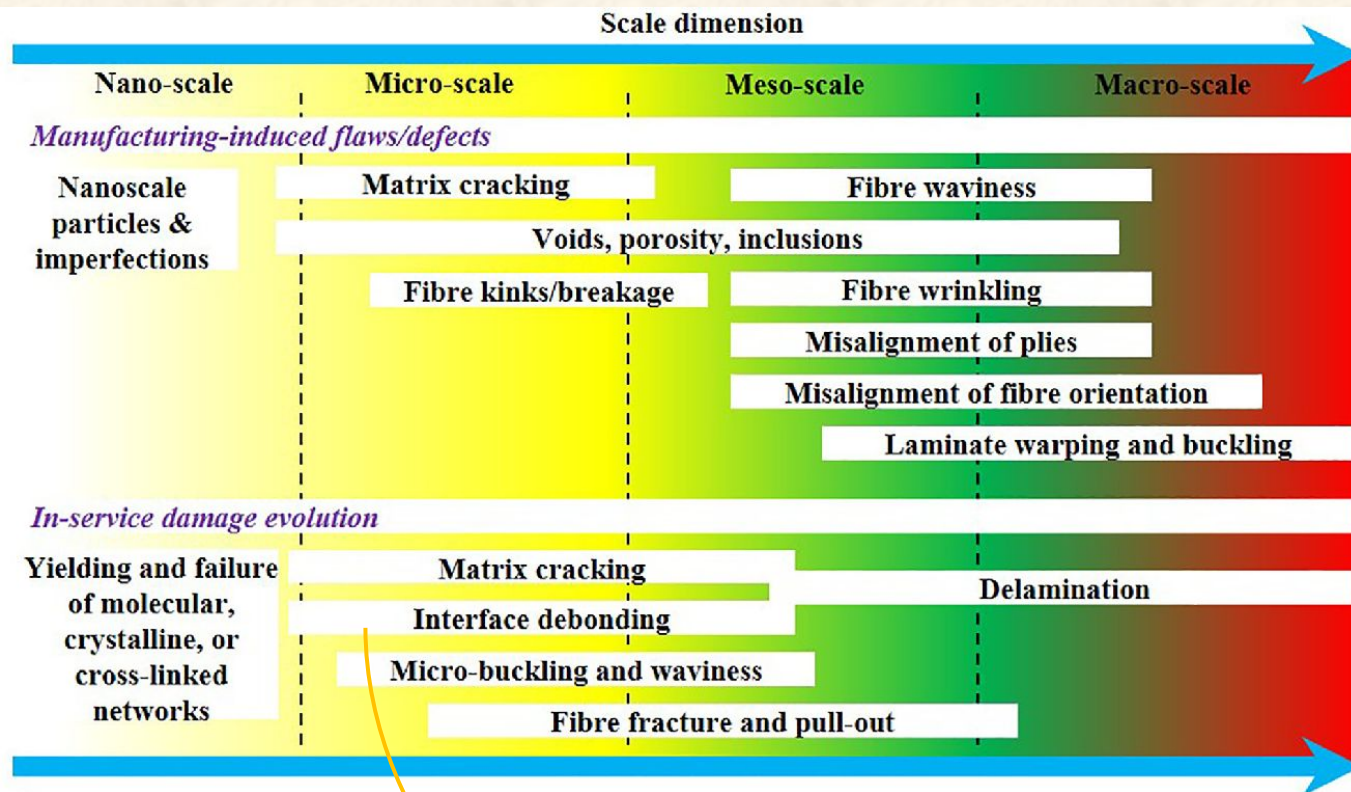
Ламинаты низкой плотности – ламинаты с полимерным сердечником 40-60% от общей толщины и низкой плотности, разработанные в основном для экономии веса автомобильных компонентов.

Звукопоглощающие ламинаты – ламинаты с тонким вязкоупругим клеевым слоем толщиной менее 20% от общей толщины, разработанные для звукопоглощения.

Плакированные листы – ламинаты, состоящие только из металлических листов, различных по природе и толщине, с очень тонким клеевым слоем или скрепленных диффузией.

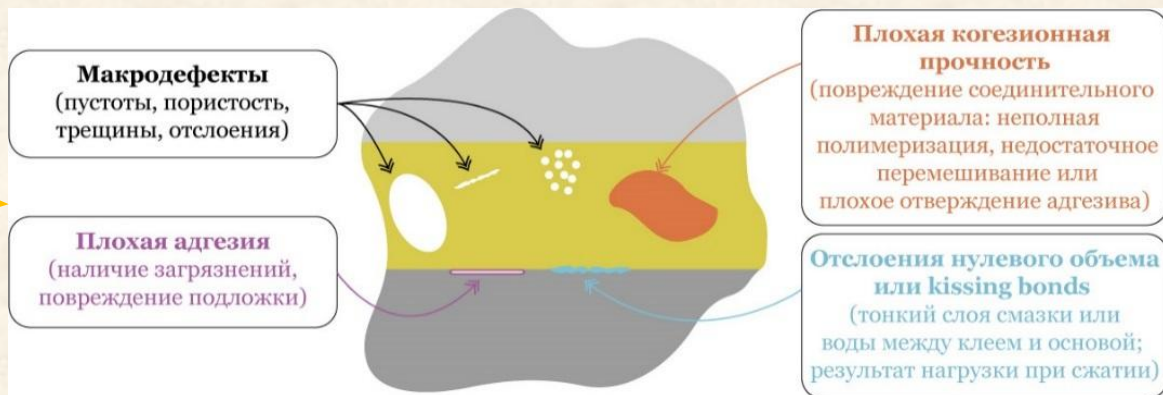


Типы повреждений



B. Wang, Sh. Zhong,
T.-L. Lee, K. S. Fancey, J. Mi
AIME (2020)

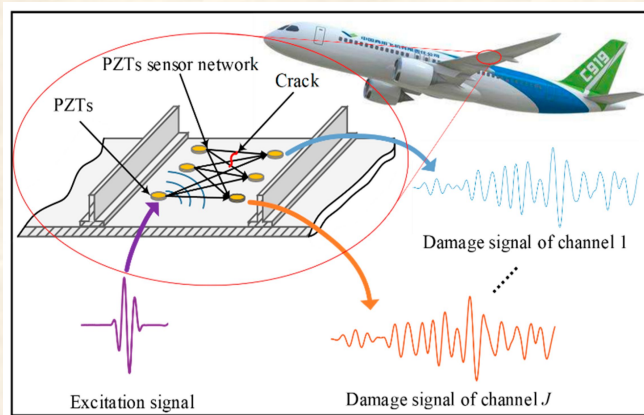
P. Cawley, R.D. Adams
Mater. Sci. Technol. (1989)



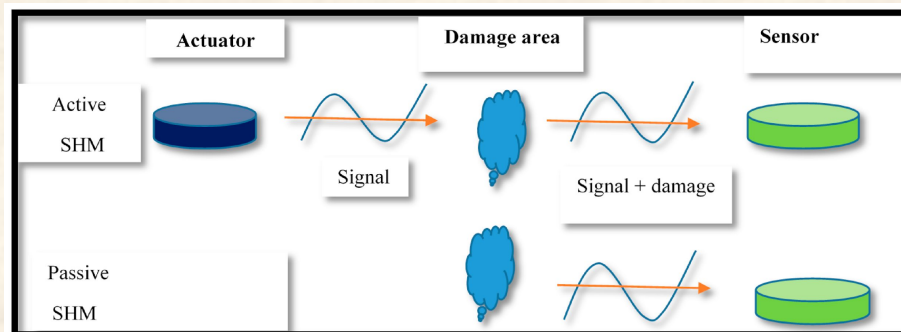
Системы мониторинга



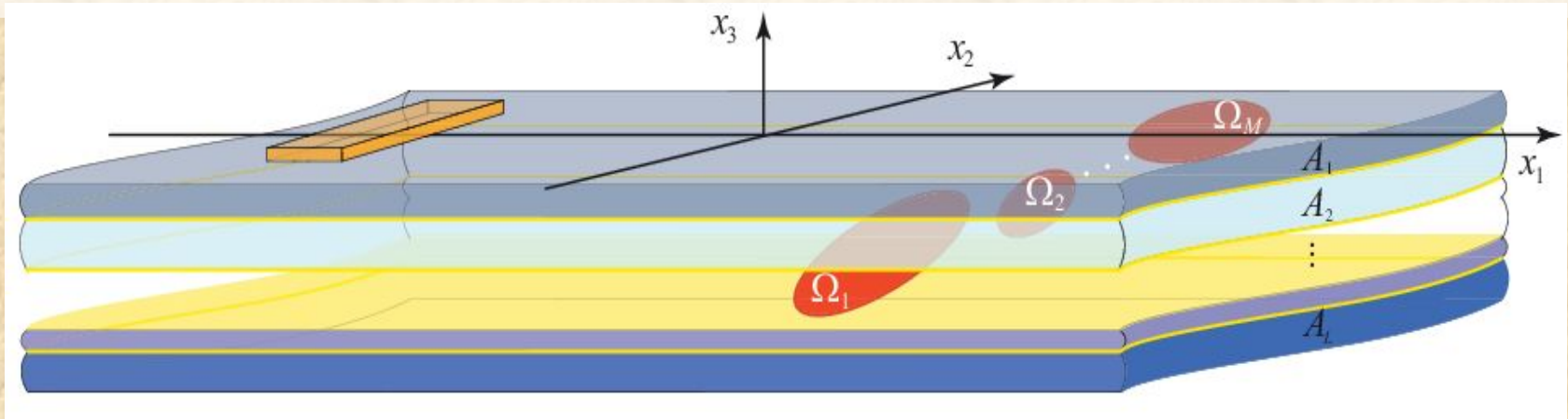
Project GW4SHM – Guided Waves for Structural Health Monitoring. (2020)



Инспекция коллекторов на газокomppressorных станциях в Монтане и Северной Дакоте в США



Моделирование слоистых композитов



$$(\lambda_m + \mu_m)\nabla\nabla\mathbf{u}_m - \mu_j\nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}_m) + \omega^2\rho_m\mathbf{u}_m = 0$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}|_{x_3=0} &= \mathbf{q}, & \mathbf{q}(x_1, x_2) &\equiv 0, (x_1, x_2) \notin \Omega \\ \boldsymbol{\tau}|_{x_3=-H} &= 0 \end{aligned}$$

$$[\mathbf{u}]_m = 0, [\boldsymbol{\tau}]_m = 0$$

Граничные условия идеального контакта

$$\boldsymbol{\tau}_m = \boldsymbol{\tau}_{m+1} = \boldsymbol{\kappa}[\mathbf{u}]_m$$

Граничные условия пружинного типа для ослабленного интерфейса

Дисперсионные кривые

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} \mathbf{K}(\alpha_1, \alpha_2, x_1) \mathbf{Q}(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2)} d\alpha_1 d\alpha_2$$

$$U(\alpha_1, \alpha_2, x_3) = \sum_{n=1}^N t^{(n)} \mathbf{m}_n e^{\lambda_n x_3}$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{f}, \quad \mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{Q})$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}_1^+ & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_1^- & -\mathbf{C}_2^+ & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{C}_2^- & -\mathbf{C}_3^+ & \cdot & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \cdot & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \mathbf{C}_{L-1}^- & -\mathbf{C}_L^+ \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & \mathbf{S}_L^- \end{pmatrix}$$

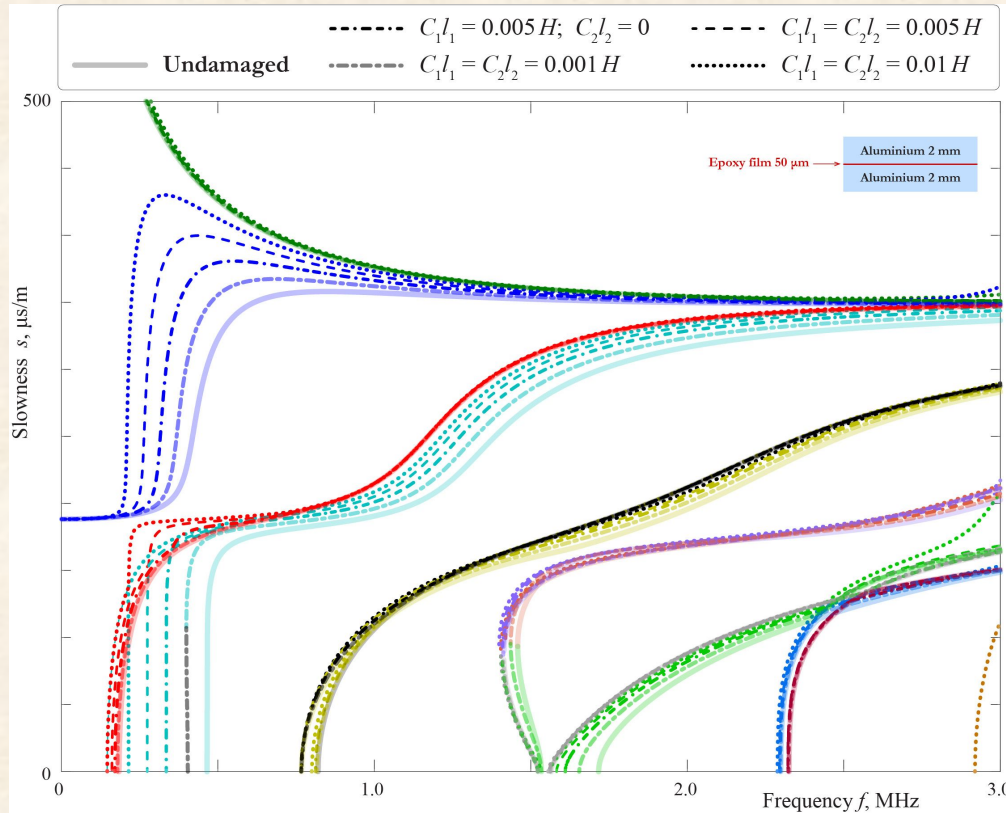
$$\det(\mathbf{A}(\pm\zeta_k)) = 0$$

дисперсионное уравнение

$$\pm\zeta_k$$

волновые числа нормальных мод

Дисперсионные кривые



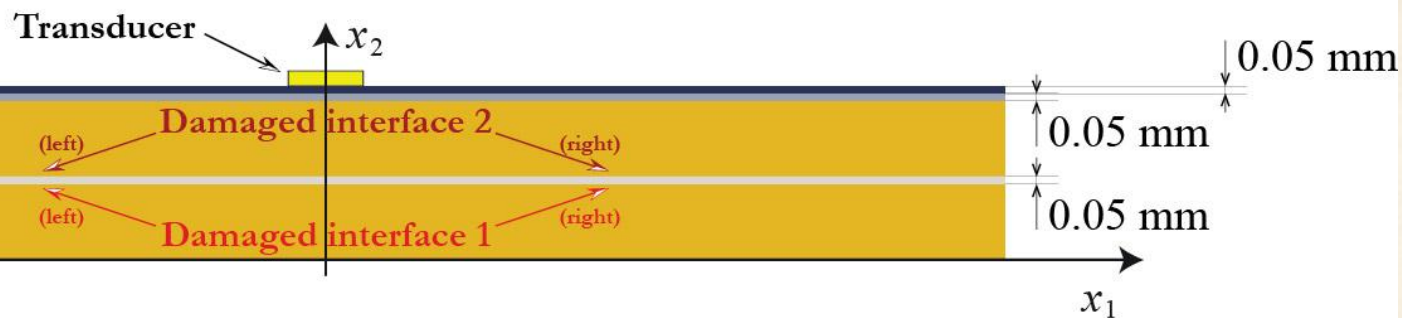
$C_i \in [0, 1]$ –
поврежденность
интерфейса
(плотность
распределения
микродефектов)

l_i – характерный размер
микро-дефекта

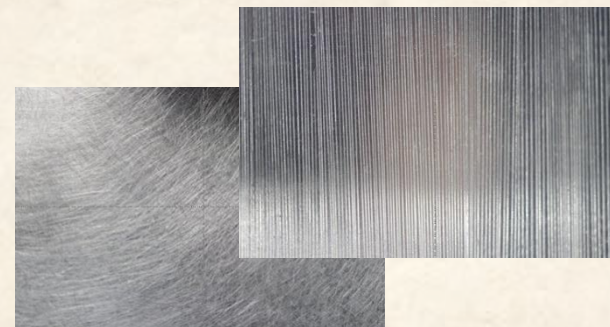
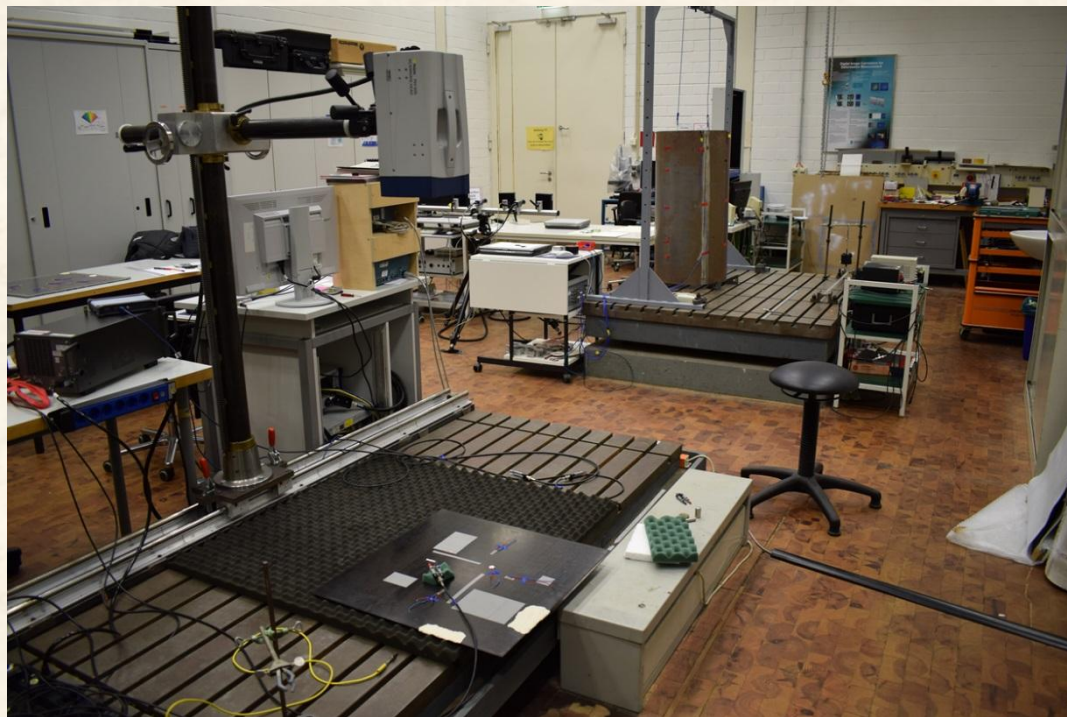
Расчетные значения медленностей волн Лэмба в трехслойном ламинате
(Алюминий 2 мм/Эпоксидная пленка 50 мкм / Алюминий 2 мм)
для различных значений коэффициентов жесткости.

Экспериментальная верификация

Metal Plate
 Retro-reflective layer
 Adhesive
 Epoxy film



Лаборатория в Университете им. Хельмута Шмидта (г. Гамбург, ФРГ).

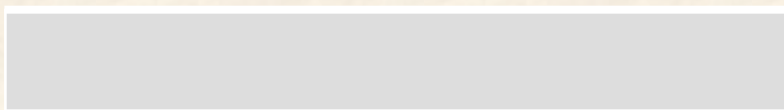
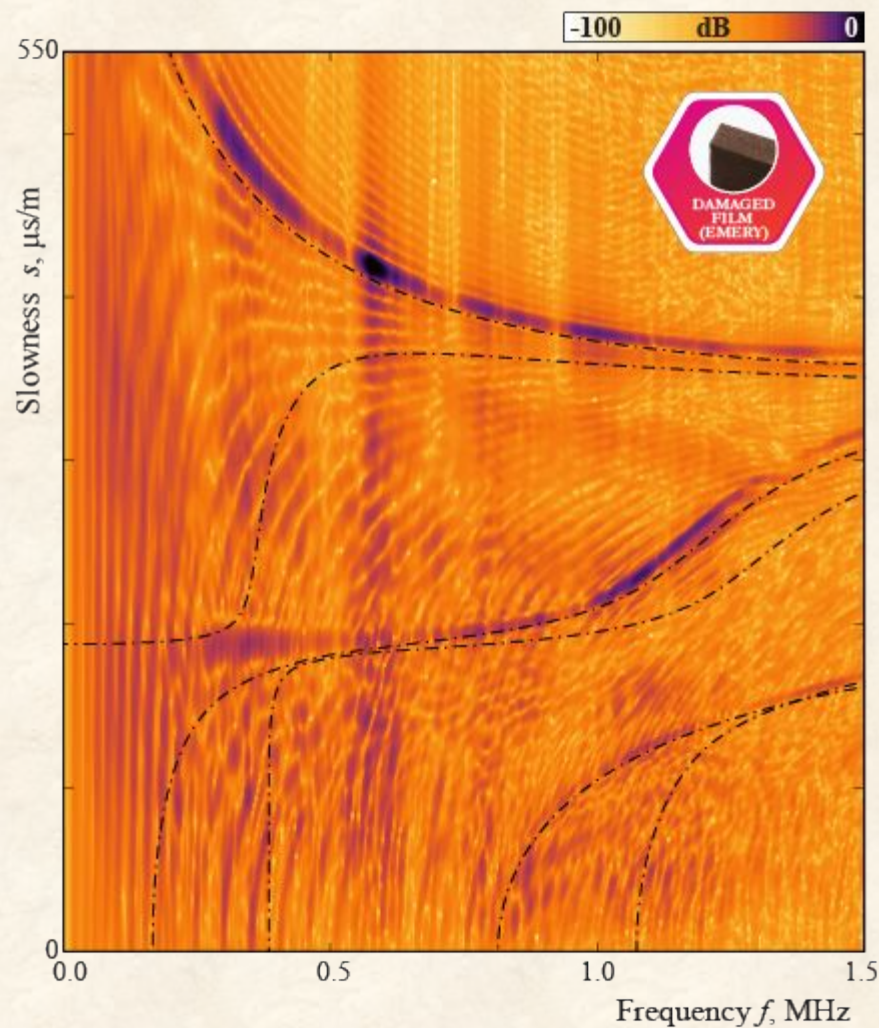
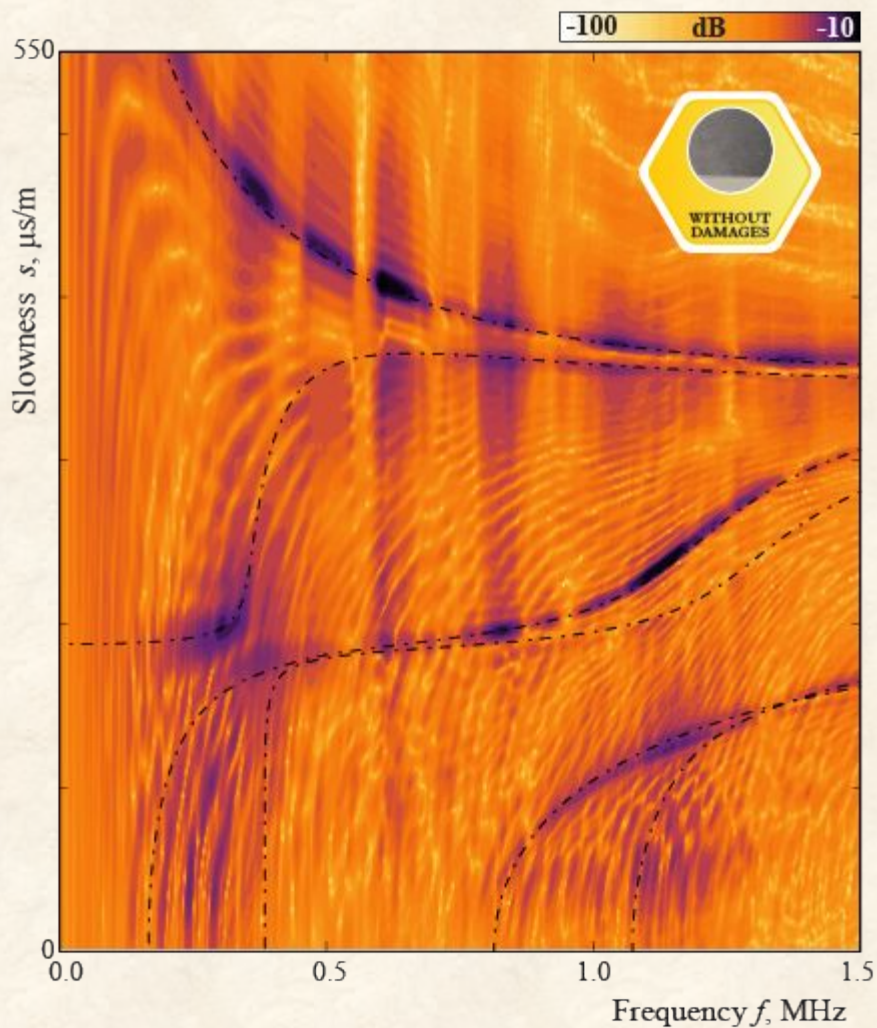


Авторы выражают благодарность профессору Р. Ламмерингу за помощь в проведении экспериментальных работ.

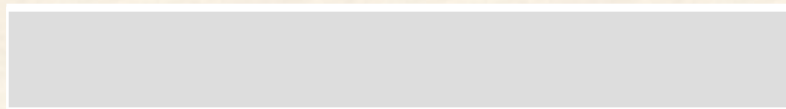
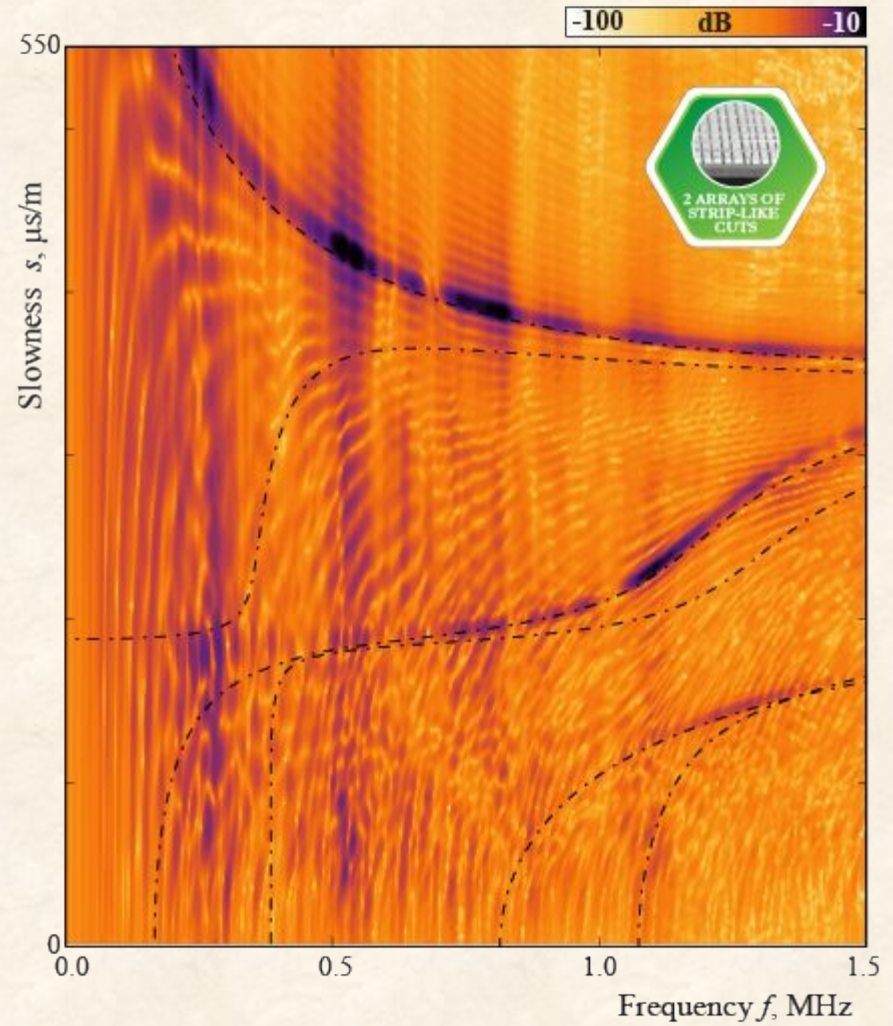
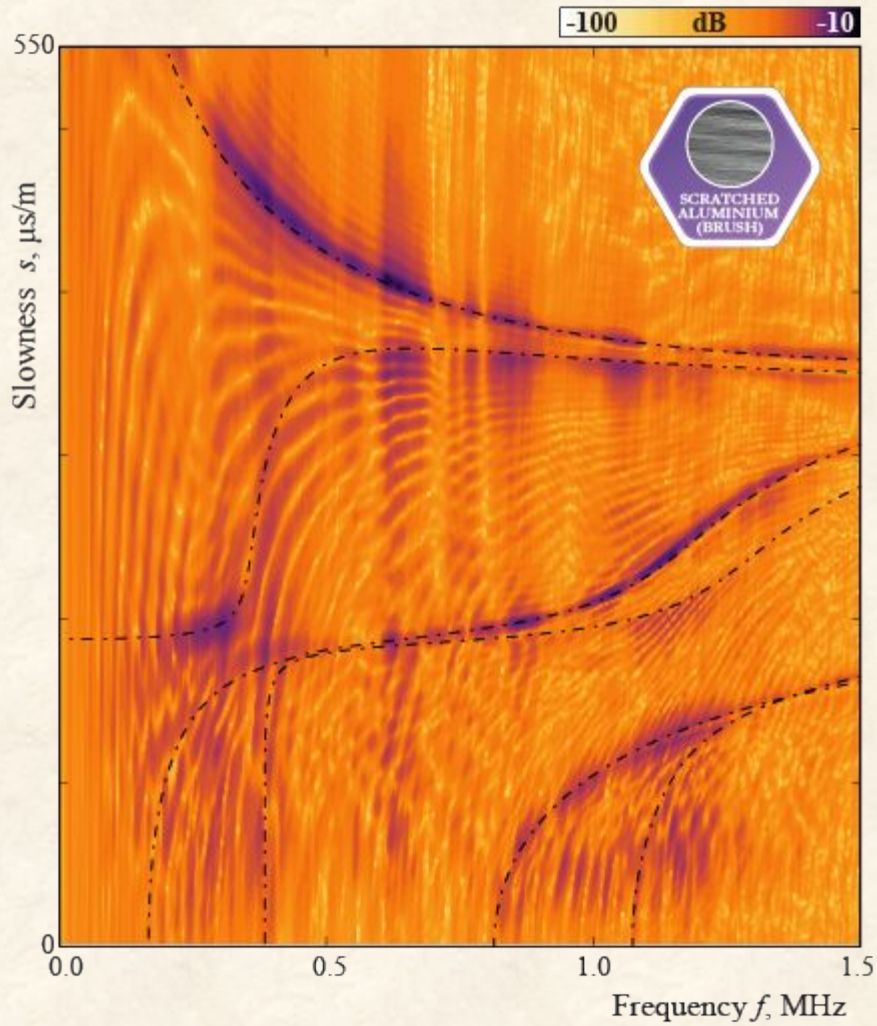
Экспериментальная верификация



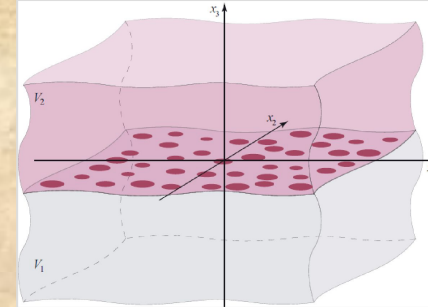
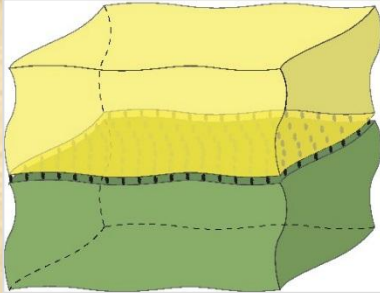
Экспериментальная верификация



Экспериментальная верификация



Определение поврежденности интерфейса



$$T_s(\kappa_s) = \frac{2c_{1s}k_{1s} \cdot \kappa_s}{(c_{1s}k_{1s} + c_{2s}k_{2s}) \cdot \kappa_s + ic_{1s}k_{1s}c_{2s}k_{2s}}$$

$$\tilde{T}_s = T_s \left(1 - \frac{1}{2} C(\mathbf{p}_s \cdot \overline{\Delta \mathbf{u}_s}) \right)$$

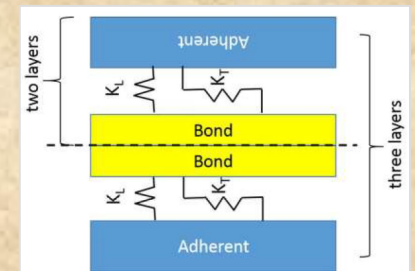
$$\kappa_s = \frac{f_s}{C(\mathbf{p}_s \cdot \overline{\Delta \mathbf{u}_s})}, \quad f_s(E_i, \nu_i, \omega)$$

 κ_N

нормальная жесткость

 κ_T

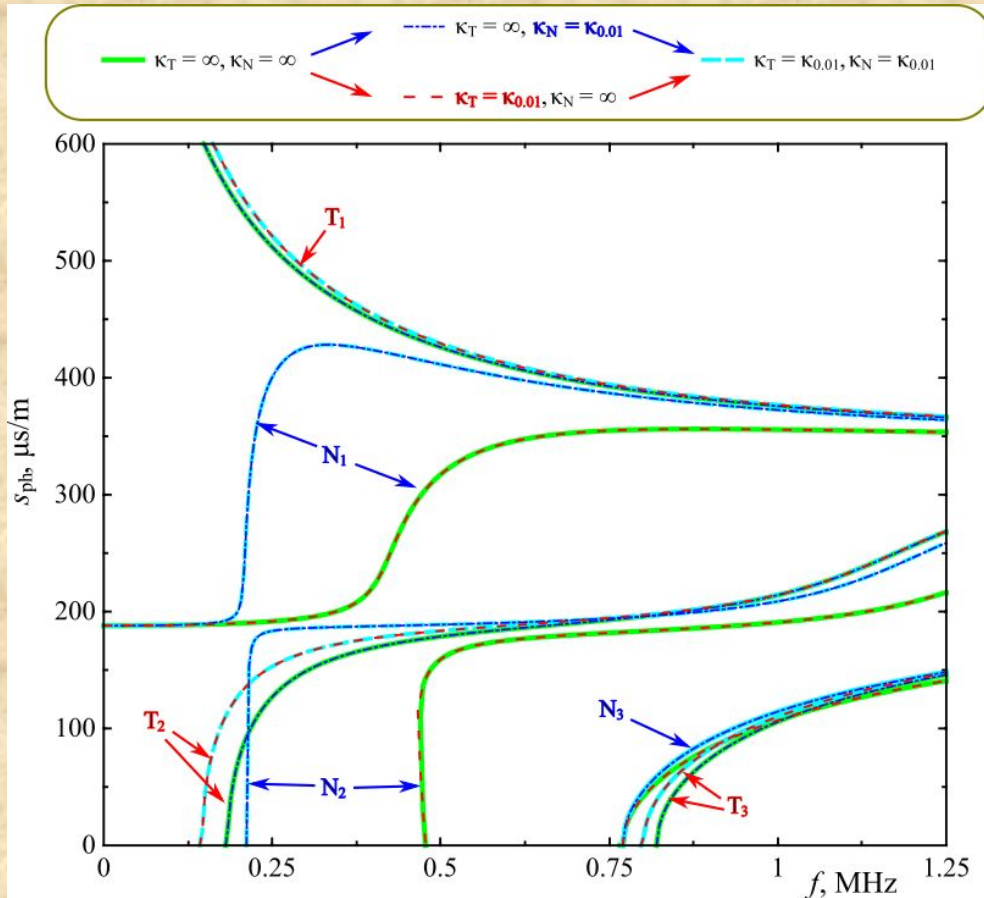
тангенциальная жесткость



M.V. Golub, O.V. Doroshenko, A.E. Boström, Int. J. Solids Struct. (2016)

M.V. Golub, O.V. Doroshenko, Int. J. Solids Struct. (2019)

Определение поврежденности интерфейса

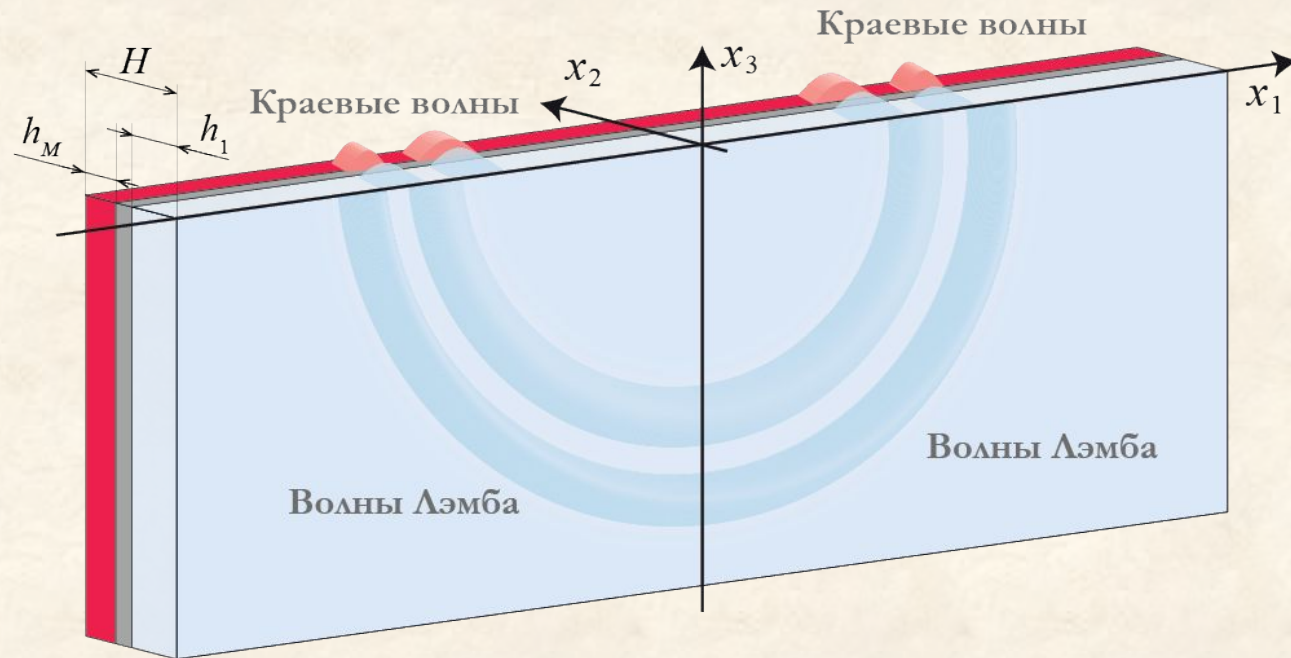
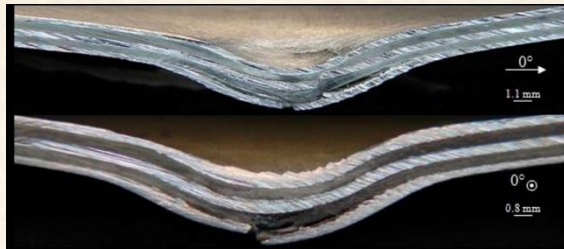
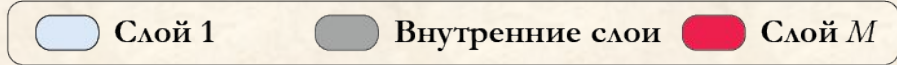


Моды типа T_k чувствительны к изменению тангенциальной жесткости

Моды типа N_k чувствительны к изменению нормальной жесткости

Двуслойная модель, клеевая прослойка моделируется граничными условиями пружинного типа

Краевые волны



Wilde M.V., Golub M.V., Eremin A.A.
Ultrasonics (2019)

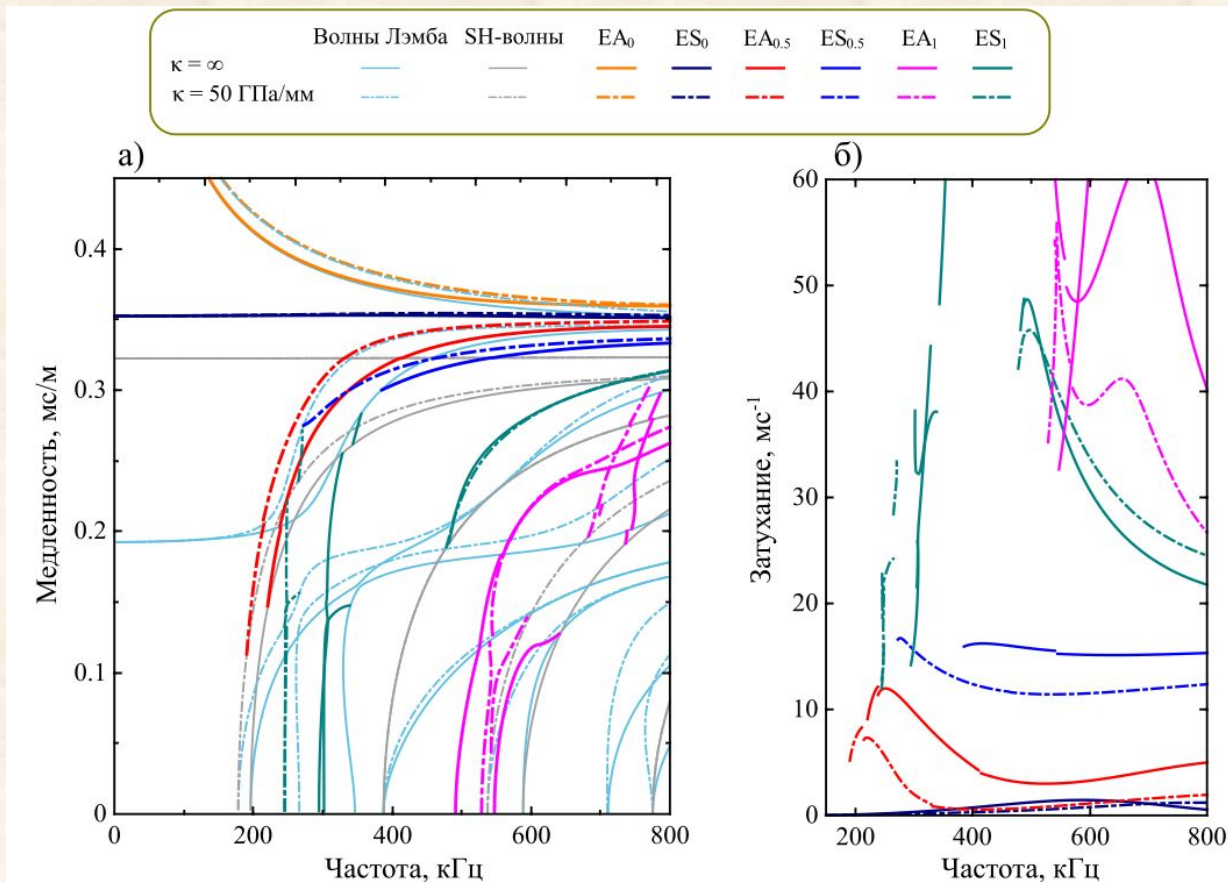
Wilde M.V., Golub M.V., Eremin A.A.
J. Sound Vib. (2019)

$$\mathbf{u}(x_2, x_3, \omega, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) e^{-i(\omega t - \xi x_1)} dx_1 d\alpha$$

$$\mathbf{U}(x_2, x_3, \omega, \xi) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \mathbf{U}_n(x_2) e^{-i\xi_n x_3} + \sum_{n=0}^{\infty} C_n^H \mathbf{U}_n^H(x_2) e^{-i\xi_n^H x_3}$$

Краевые волны

Медленности краевых волн в полубесконечной двухслойной пластине из стекла и стали с идеальным и ослабленным контактом (ГУ ПТ)



Полюса $\omega_m(k)$
соответствуют
модам краевых волн

$\text{Im}\omega_m(k)$
затухание
краевых волн

ES_0, EA_0

фундаментальные моды

ES_n, EA_n

моды высших порядков

$ES_{0,5}, EA_{0,5}$

дополнительные моды между E_0 и E_1

M.V. Golub, M.V. Wilde,
A.A. Eremin, O.V. Doroshenko
Lecture Notes in Civil
Engineering (2021)

Заключение

В работе был рассмотрен (теоретически и экспериментально) неидеальный контакт между слоями композита.

Показано, что бегущие волны, распространяющиеся в ламинате с поврежденным интерфейсом, изменяют свои дисперсионные свойства.

Преимущества метода:

- эффективные граничные условия пружинного типа могут быть успешно применены для описания распространения волны через границу раздела сред.
- моделирование, основанное на пружинной модели, предсказывает те же изменения дисперсионных свойств, которые были получены на основе экспериментальных данных.
- краевые волны высокого порядка позволяют выявить ослабление адгезии в окрестности краев пластины, где применение волн Лэмба затруднено.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Авторы выражают благодарность Минобрнауки России
за финансовую поддержку



Авторы выражают благодарность профессорам Е.В. Глушкову и Н.В. Глушковой (Кубанский государственный университет) и профессору Р. Ламмерингу (Университет Гельмута-Шмидта, Гамбург).



HELMUT SCHMIDT
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg