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

Применение бегущих волн в определении поврежденности интерфейсов в слоистых композитах

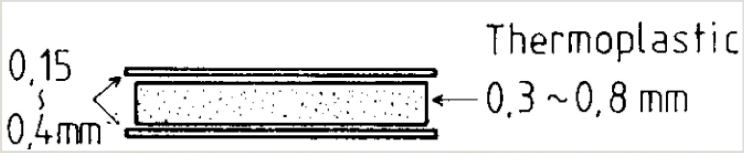
Дорошенко О.В., Голуб М.В., Еремин А.А., Вильде М.В.

Кубанский государственный университет,
Институт математики, механики и информатики

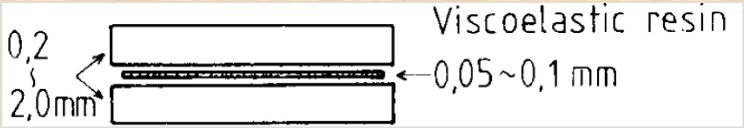
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Слоистые композиты

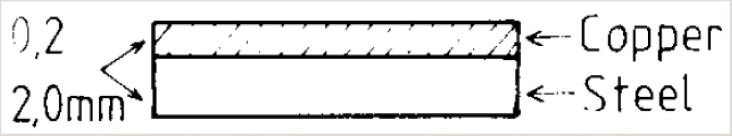
Ламинаты низкой плотности – ламинаты с полимерным сердечником 40-60% от общей толщины и низкой плотности, разработанные в основном для экономии веса автомобильных компонентов.



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

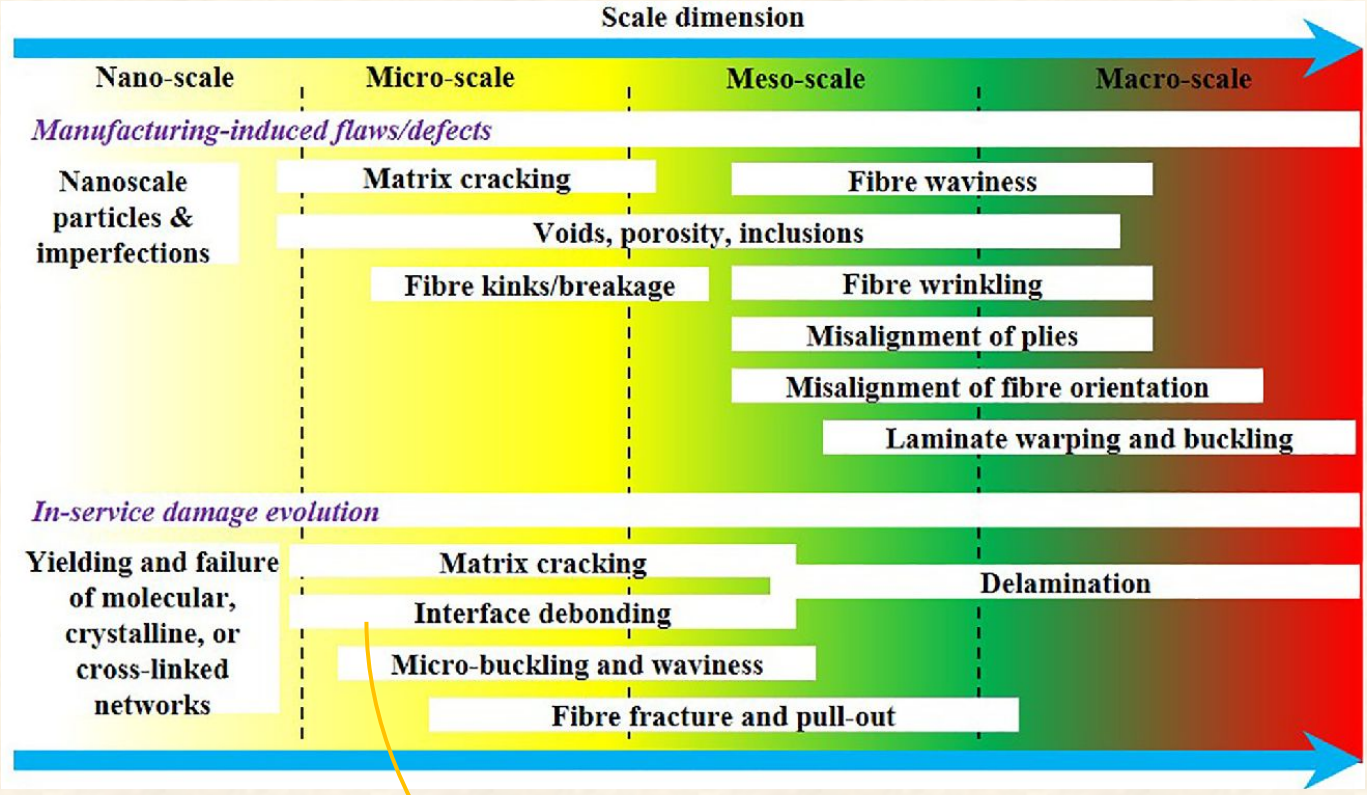


Плакированные листы – ламинаты, состоящие только из металлических листов, различных по природе и толщине, с очень тонким клеевым слоем или скрепленных диффузией.

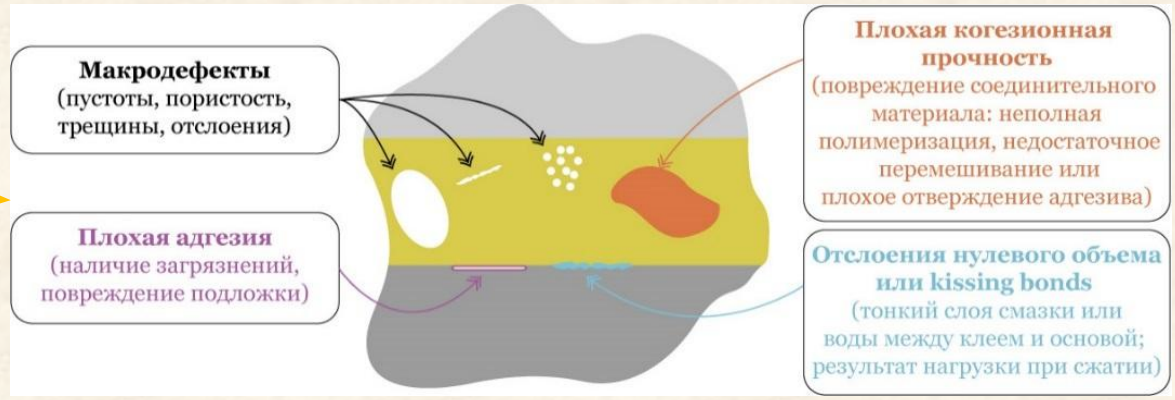


J.-K. Kim, T.-X. Yu J. Mater. Process. Technol. (*1997*)

Типы повреждений



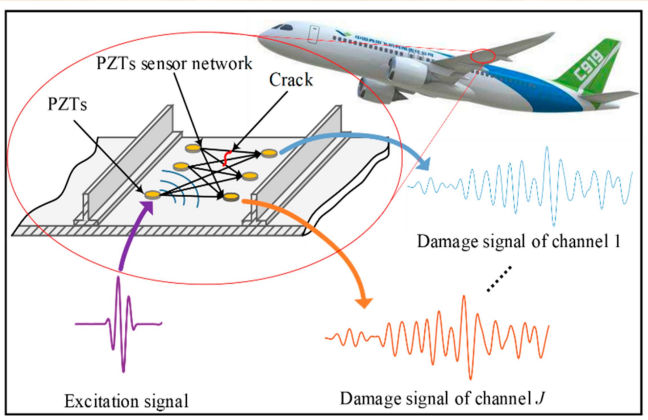
B. Wang, Sh. Zhong, T.-L. Lee, K. S. Fancey, J. Mi
AIME (2020)



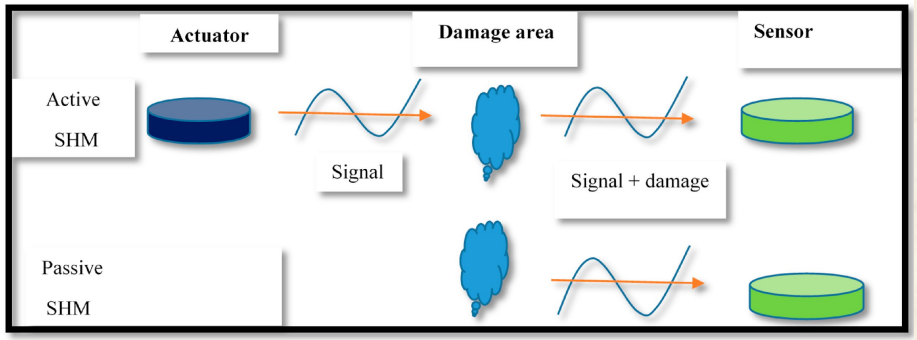
P. Cawley, R.D. Adams
Mater. Sci. Technol. (1989)

Системы мониторинга

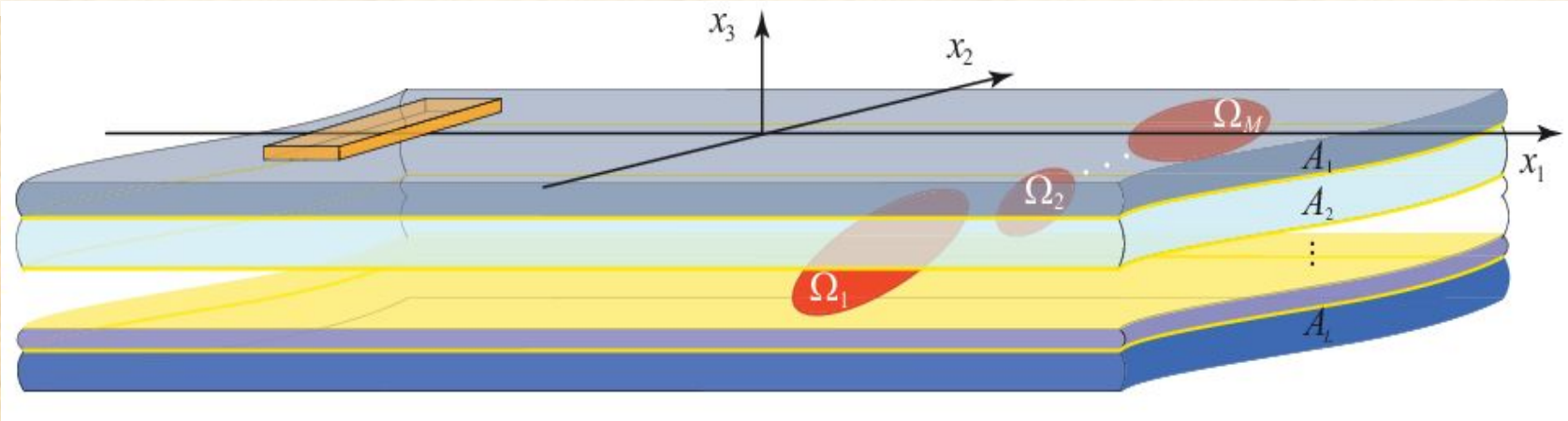
Project GW4SHM – Guided Waves for Structural Health Monitoring. (2020)



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



Моделирование слоистых композитов



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

$$\boldsymbol{\tau}|_{x_3=0} = q, \qquad q(x_1, x_2) \equiv 0, (x_1, x_2) \notin \Omega$$
$$\boldsymbol{\tau}|_{x_3=-H} = 0$$

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

Граничные условия идеального контакта

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

Граничные условия пружинного типа для ослабленного интерфейса

Дисперсионные кривые

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

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

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

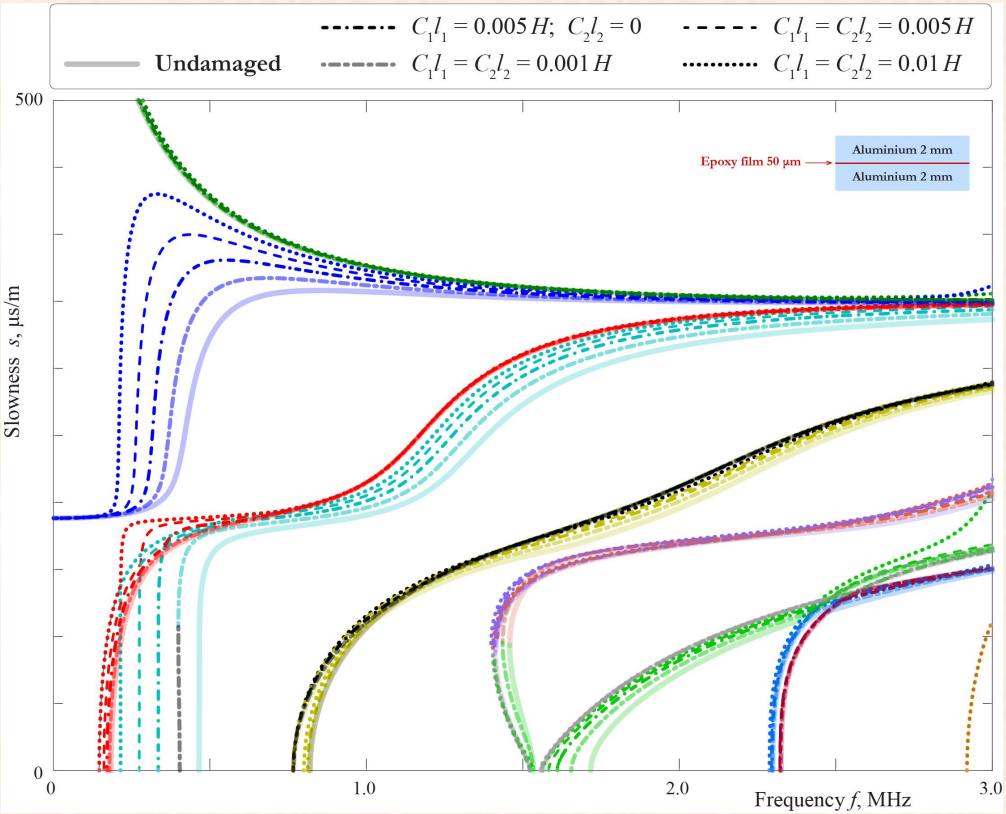
$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{s}_1^+ & 0 & 0 & & 0 & 0 \\ \boldsymbol{c}_1^- & -\boldsymbol{c}_2^+ & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & -\boldsymbol{c}_2^- & -\boldsymbol{c}_3^+ & & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdot & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & & \boldsymbol{c}_{L-1}^- & -\boldsymbol{c}_L^+ \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & \boldsymbol{s}_L^- \end{pmatrix}$$

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

$\pm\zeta_k$ волновые числа нормальных мод

E. Glushkov, N. Glushkova, A. Eremin J. Acoust. Soc. Am. (**2011**)

Дисперсионные кривые

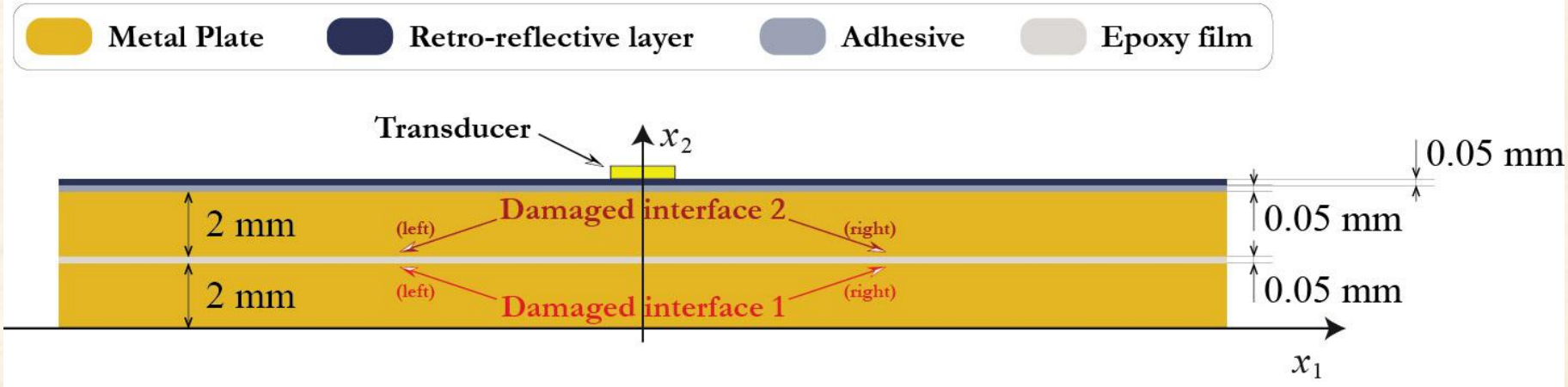


$C_i \in [0, 1]$ – поврежденность интерфейса (плотность распределения микродефектов)

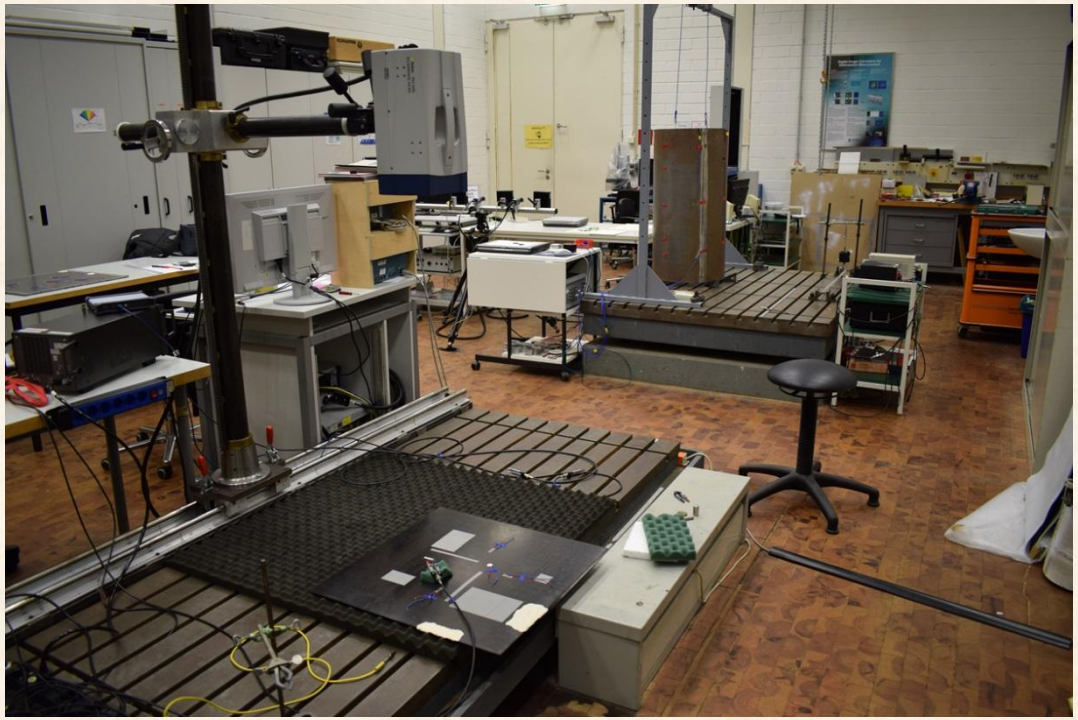
l_i – характерный размер микро-дефекта

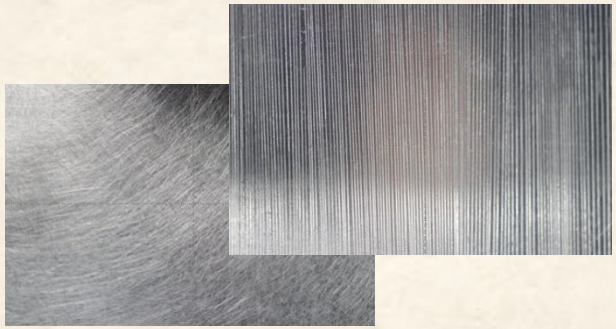
Расчетные значения медленностей волн Лэмба в трехслойном ламинате (Алюминий 2 мм/Эпоксидная пленка 50 мкм / Алюминий 2 мм) для различных значений коэффициентов жесткости.

Экспериментальная верификация



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

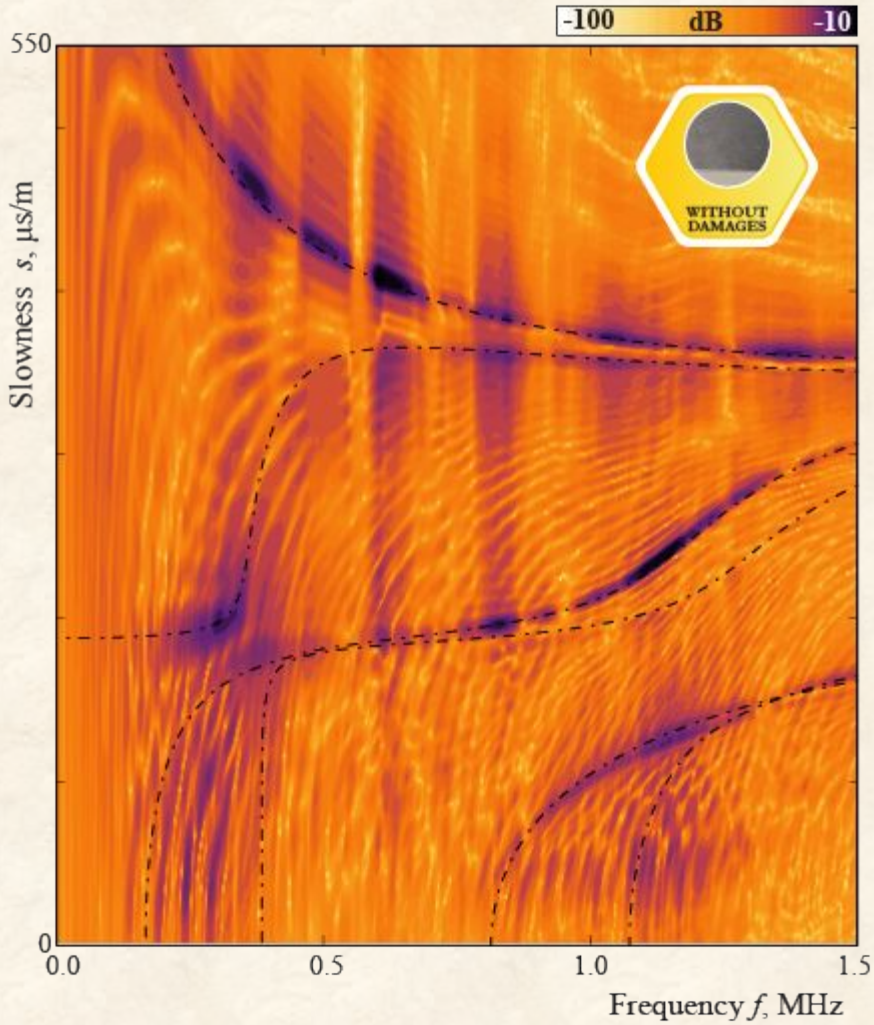


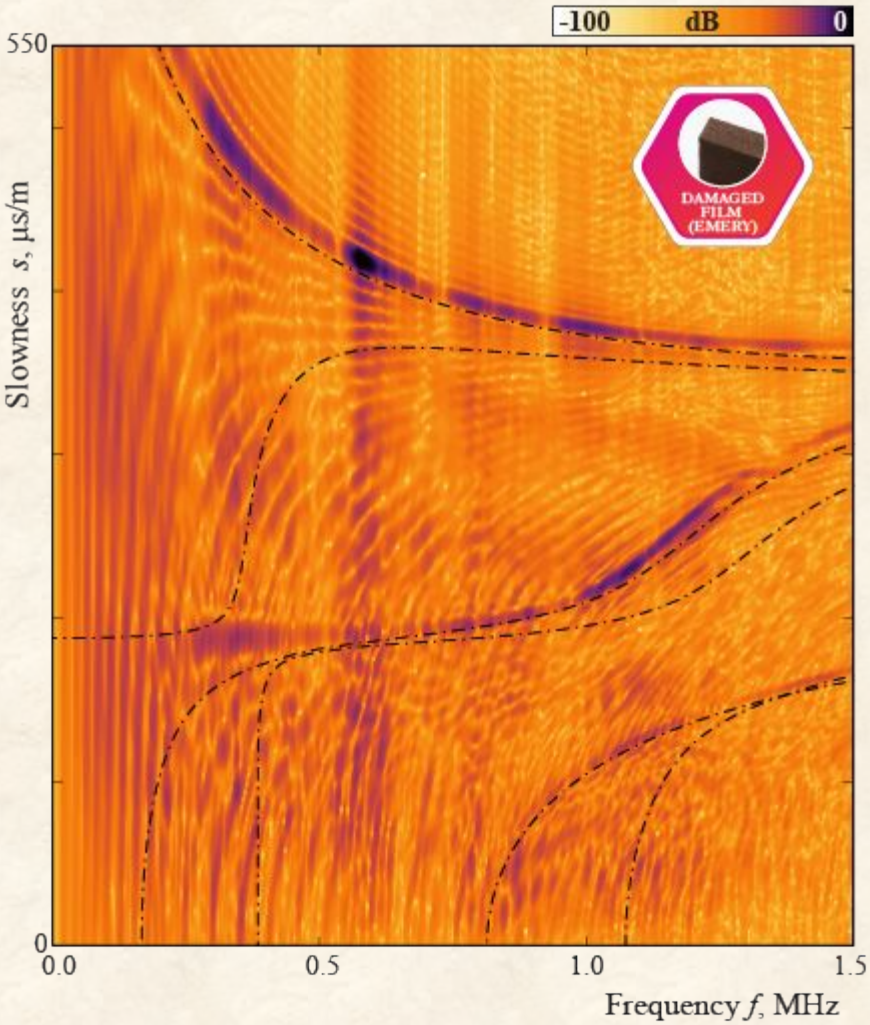


Авторы выражают благодарность профессору Р. Ламмерингу за помощь в проведении экспериментальных работ.

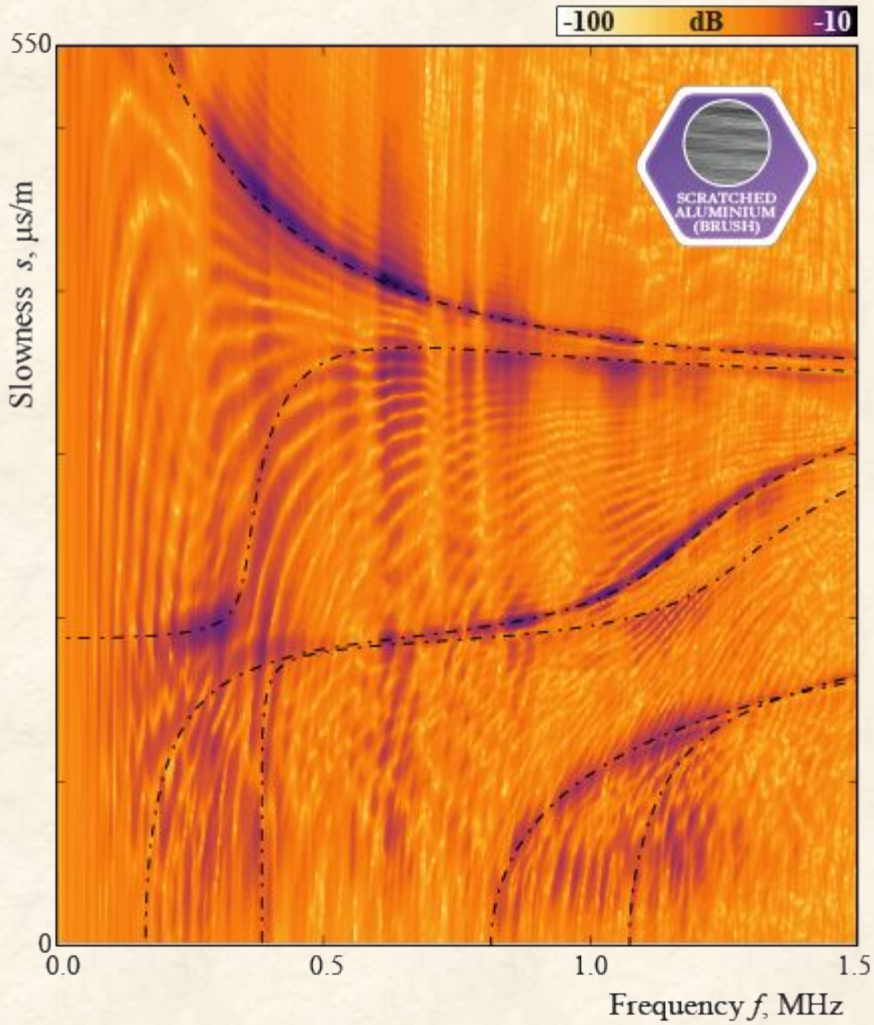
Экспериментальная верификация

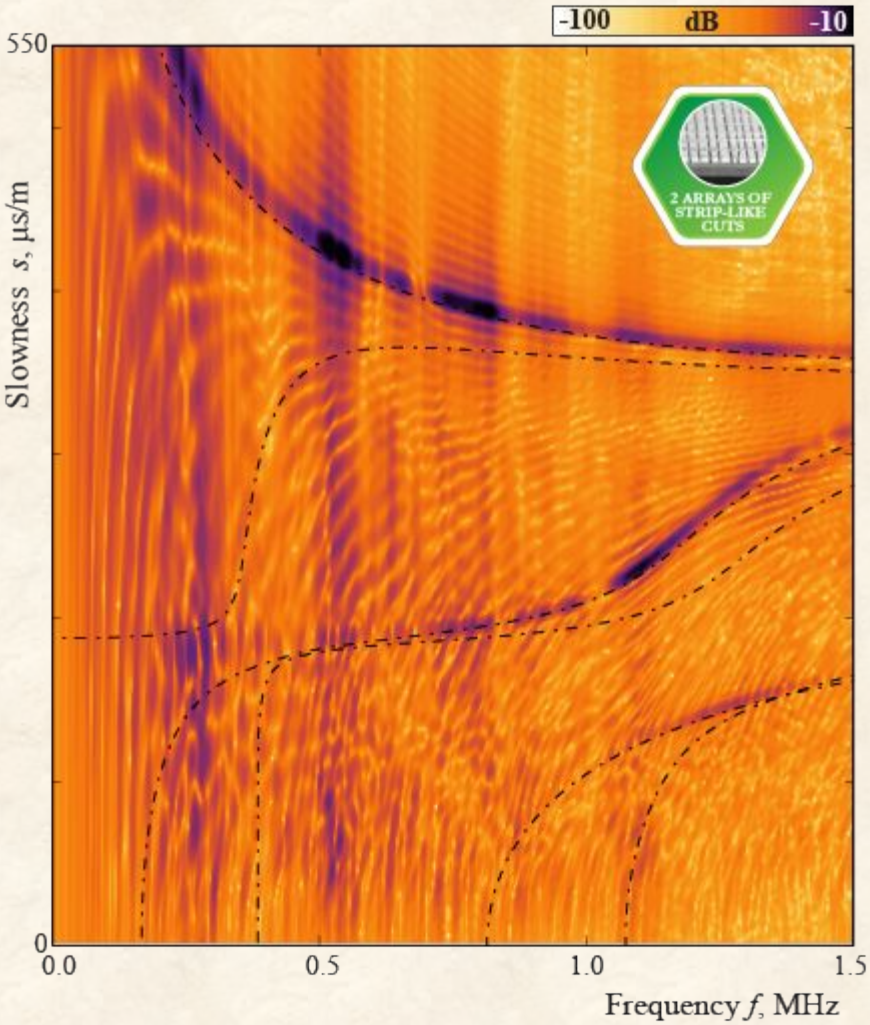
Экспериментальная верификация



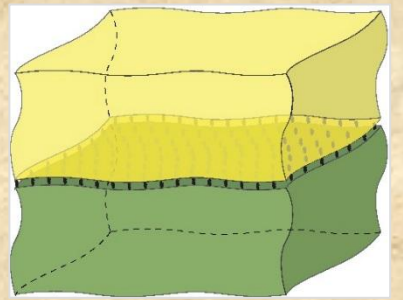


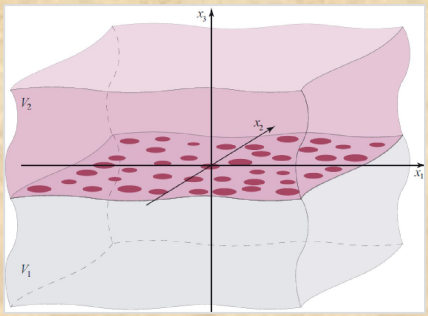
Экспериментальная верификация





Определение повреждённости интерфейса





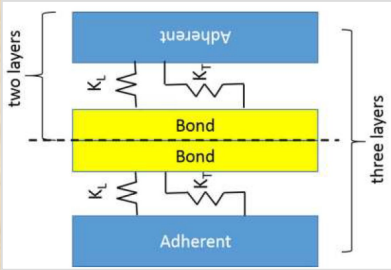
$$T_s(\kappa_s) = \frac{2c_{1s}k_{1s}\cdot\kappa_s}{(c_{1s}k_{1s}+c_{2s}k_{2s})\cdot\kappa_s + \mathrm{i}c_{1s}k_{1s}c_{2s}k_{2s}}$$

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

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

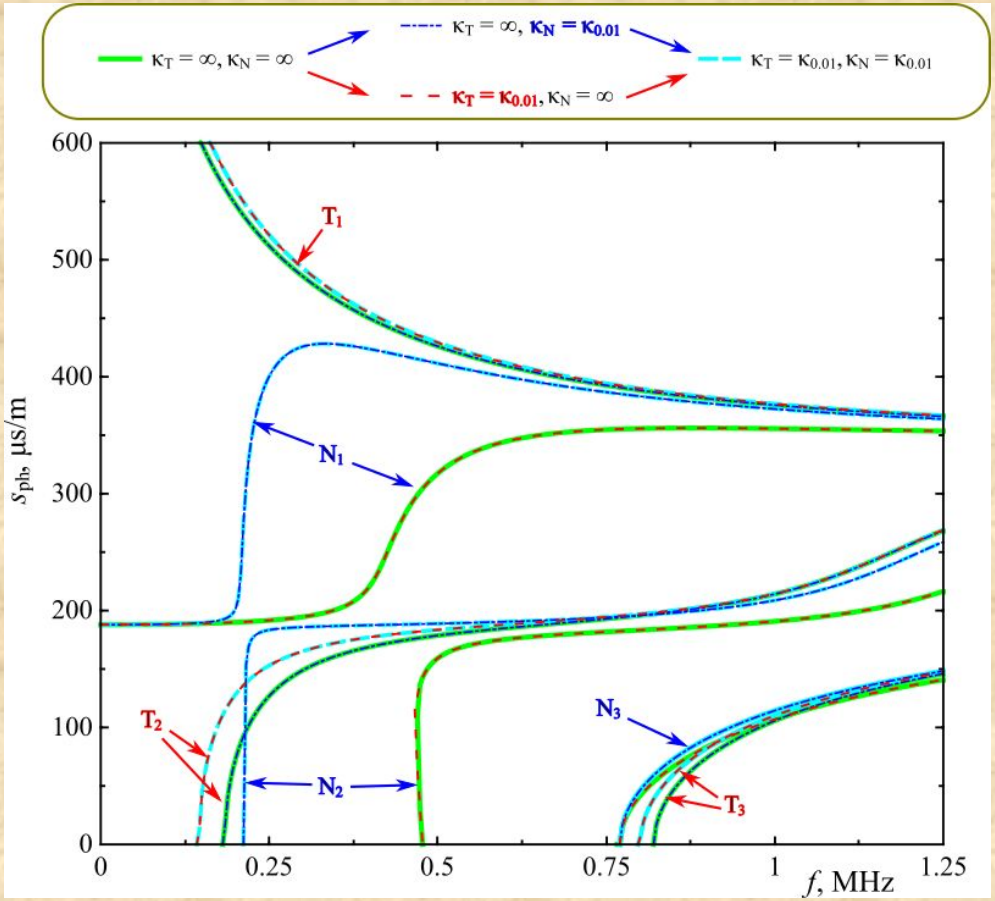
κ_N нормальная жесткость

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 повреждённости интерфейса

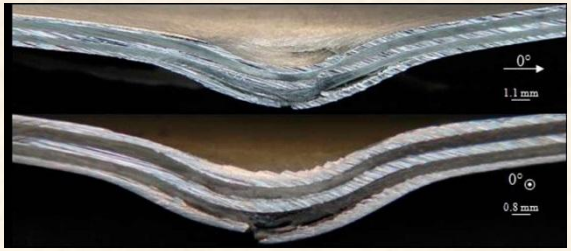


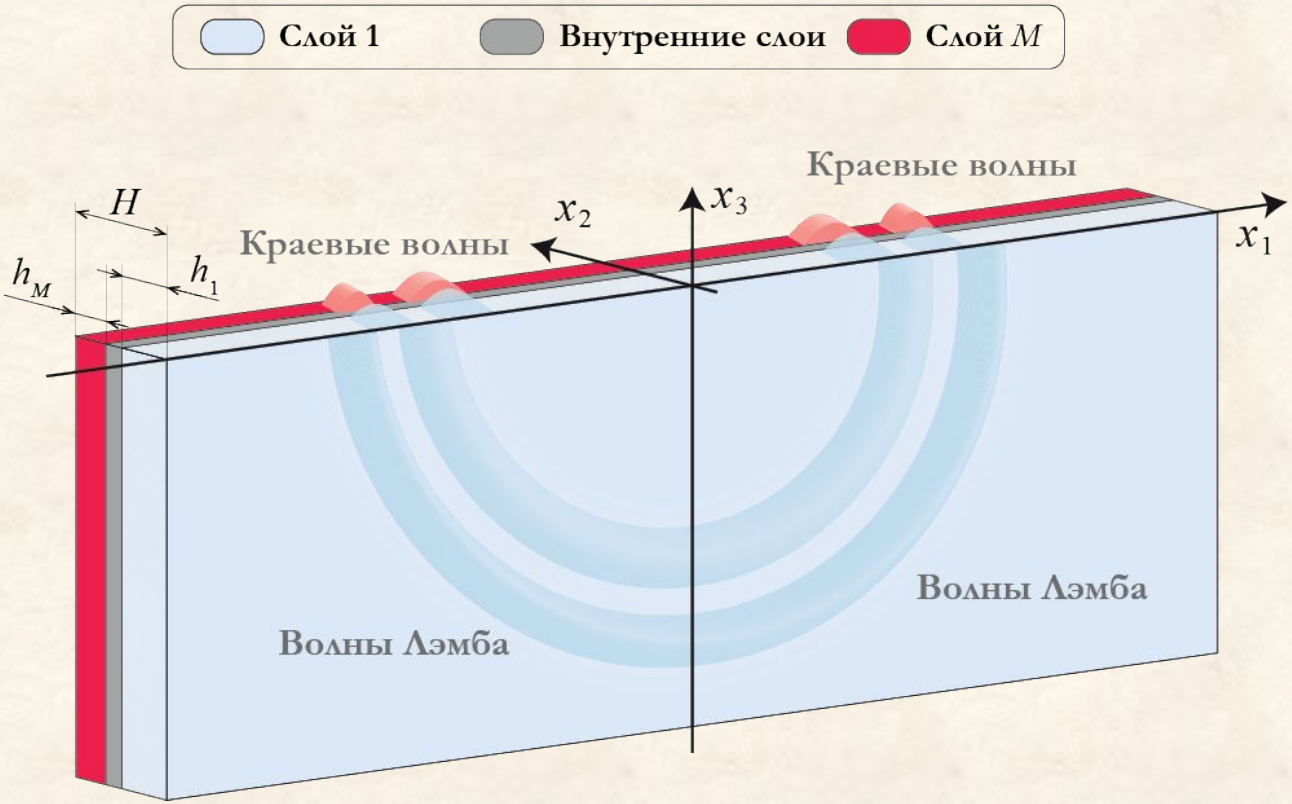
Моды типа T_k чувствительны к изменению тангенциальной жесткости

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)

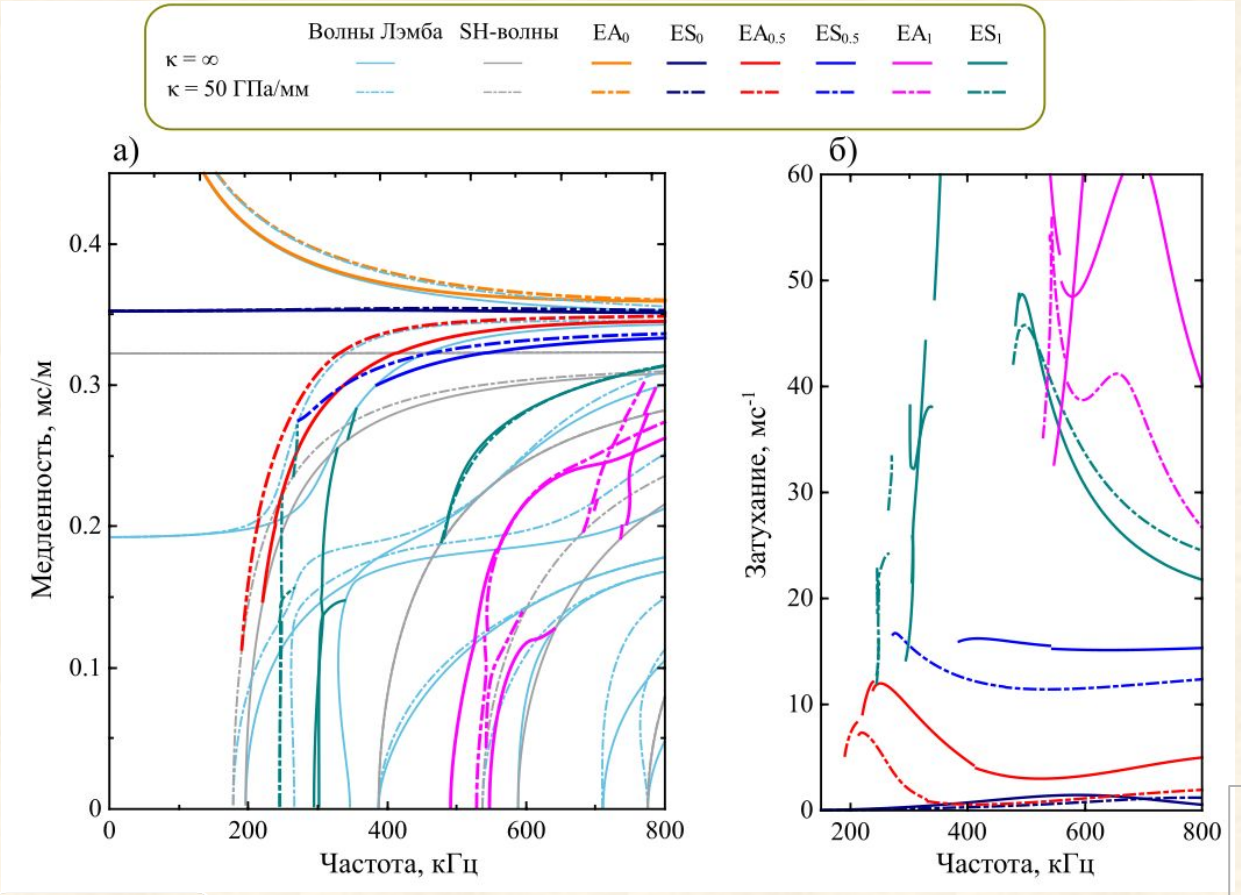
Wilde M.V., Golub M.V., Eremin A.A. *J. Sound Vib.* (2019)

$$\boldsymbol{u}(x_2, x_3, \omega, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{0}^{\infty} \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}, t) e^{-\mathrm{i}(\omega t - \xi x_1)} \mathrm{d}x_1 \mathrm{d}\alpha$$

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

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

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

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

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

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).

Кубанский государственный университет
1920
Россия

СГУ

Helmut Schmidt Universität
Universität der Bundeswehr Hamburg