

**К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ
В МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПУТЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОБЛАСТЕЙ РАСТАЛКИВАНИЯ БЕГУЩИХ УПРУГИХ ВОЛН**
**Евгения Луговцова¹, Хеннинг Цейперт², Зара Йоханнесманн², Марсель Николай¹,
Йенс Прагер¹, Бернд Хеннинг²**

¹*Федеральный институт материаловедения (БАМ), Берлин, Германия,
yevgeniya.lugovtsova@bam.de*

²*Университет Падерборна, Падерборн, Германия.*

Бегущие упругие волны часто используются в области неразрушающего контроля для определения механических характеристик материалов. Поскольку склеивание различных материалов является широко используемым методом в автомобильной и авиационной промышленности, необходима надежная система измерения для определения качества таких клеевых соединений. Дисперсионные кривые для многослойных волноводов при наличии клеевых прослоек характеризуются появлением эффекта расталкивания нормальных мод в тех областях, где соответствующие моды для отдельных материалов пересекались бы. Таким образом, в зависимости от качества клеевого соединения расстояние между этими модами изменяется. Используя комбинацию экспериментальных и численных данных, в настоящей работе представлен подход к определению параметра, указывающего на качество клеевого соединения.

Ключевые слова: многослойный волновод, волны лэмбовского типа, контроль качества клеевого соединения

Клеевое соединение предпочтительнее механически закрепленных болтовых соединений в автомобильной и авиационной промышленности [1]. До сих пор основной проблемой при контроле клеевых соединений остается невозможность отличить слабое соединение от сильного с помощью неразрушающих методов и, таким образом, сделать вывод о его механической прочности. Поэтому разрушающие механические испытания являются единственным общепринятым способом определения механических характеристик таких соединений. Исследователи продолжают работать над неразрушающими методами контроля, исследуя объемные ультразвуковые волны [2], бегущие волны лэмбовского типа [3,4] или SH-волны [5]. Представленный в настоящей работе подход исследует ширину областей расталкивания мод волн лэмбовского типа, распространяющихся в многослойных упругих материалах и их изменение в зависимости от прочности соединения [6–8].

Эффект расталкивания мод рассматривается на примере численных результатов, полученных с помощью метода полуаналитических конечных элементов (SBFEM) [9]. На рис. 1 приведены дисперсионные кривые фазовой скорости для не сцепленных и сцепленных пластин. В первом случае дисперсионные диаграммы рассчитаны для алюминиевой пластины толщиной 1 мм (серые квадраты) и для поликарбонатной пластины такой же толщины (розовые круги); соответствующие упругие модули материалов приводятся в работе [6]. При рассмотрении двухслойного волновода, получаемого при жестком сцеплении этих двух материалов, возникают моды, состоящие из комбинации нормальных мод отдельных пластин (показаны голубыми треугольниками). В частотных диапазонах, где траектории

дисперсионных кривых, рассчитанные для каждого из отдельных слоев, пересекаются, для двухслойного волновода возникают так называемые области расталкивания мод, к примеру, как показано на рис. 1 (б).

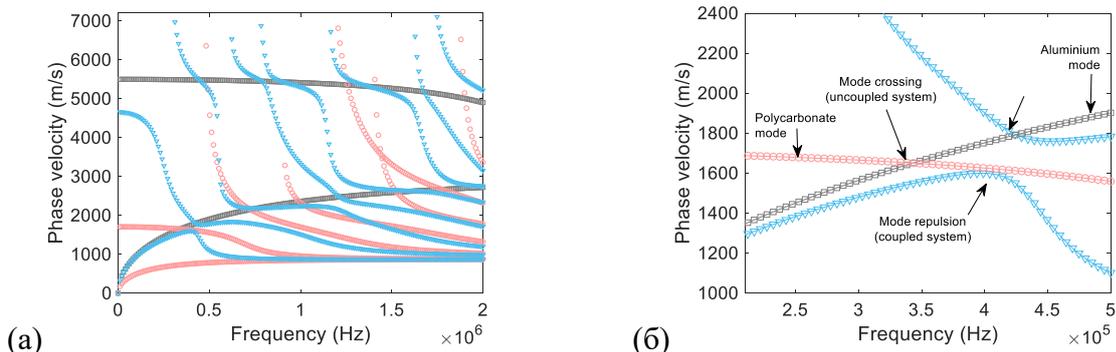


Рис. 1. (а) – сравнение дисперсионных кривых фазовой скорости для двух несвязанных между собой пластин с двухслойной пластиной; (б) – увеличенное изображение одной из областей расталкивания мод. Серые квадраты обозначают моды в алюминиевой пластине толщиной 1 мм; розовые круги – моды в поликарбонатной пластине такой же толщины; голубые треугольники – моды этих двух пластин соединенных друг с другом [6].

Далее анализируется изменение расстояния между модами в области расталкивания в зависимости от качества клеевого соединения. Для этого в двухслойную пластину добавлен тонкий упругий слой толщиной 1 мкм. Чтобы сохранить общую толщину многослойной пластины (2 мм), толщина поликарбонатной пластины соответственно уменьшена на толщину клеевой прослойки. Для моделирования качества клеевого соединения, упругие свойства тонкого слоя изменялись следующим образом: 100% свойств слоя поликарбоната обозначает сильную связь, 2% – среднюю и 1% – слабую. Результаты представлены на рис. 2, на котором видно, что с ухудшением качества клеевого соединения, точка расталкивания (частота, на которой групповые скорости обеих мод равны) смещается в область более низких частоты, а расстояние между кривыми фазовых скоростей увеличивается.

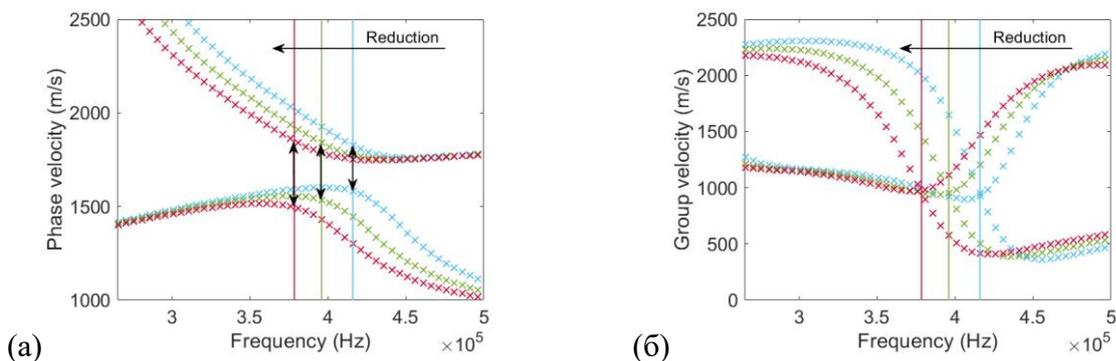


Рис. 2. Пример влияния качества клеевого соединения на (а) фазовую и (б) групповую скорости в области расталкивания низкочастотных мод. Синие, зеленые и красные крестики обозначают сильную, среднюю и слабую связь пластин соответственно.

Экспериментальные данные были получены с помощью импульсного лазерного возбуждения широкополосных волновых сигналов в пластинах, которые регистрировались пьезоэлектрическим преобразователем [10]. Образец представляет собой две пластины, склеенные с помощью эпоксидного

клея, прочность которого зависит от времени отверждения. Для анализа прочности соединения было проведено два измерения: после 48 часов (частичное отверждение) и 120 часов (полное затверждение). На рис. 3 (а) показаны дисперсионные кривые, измеренные после 120 ч. в сравнении с идеальной моделью (сильная связь). Обнаружено хорошая согласованность между экспериментальными данными и результатами расчетов. Относительные расстояния между дисперсионными кривыми были оценены, как показано на рис. 3 (б), и равны 0,92 (48 ч.) и 1,05 (120 ч.), тем самым подтверждаются результаты моделирования: с увеличением прочности увеличивается расстояние между отдельными кривыми в области расталкивания мод.

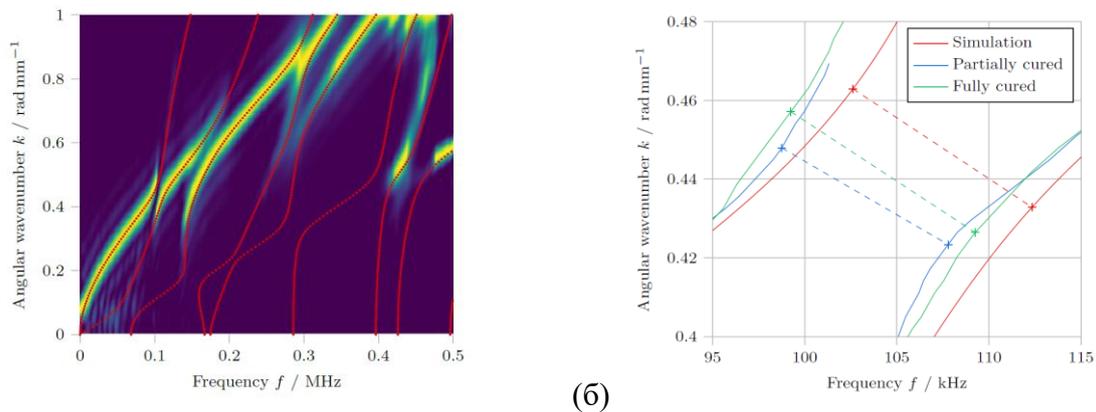


Рис. 3. (а) – данные измерений полностью отвержденного клеевого соединения алюминиево-поликарбонатного образца; красными пунктами показаны результаты моделирования для идеального соединения [8]. (б) – минимальные модальные расстояния в области расталкивания мод того же образца на разных стадиях отверждения клея [8].

Работа выполнена в рамках проекта № 449607253 немецкого научно-исследовательского сообщества (DFG).

Литература

1. P. Mallick. Joining for lightweight vehicles. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*. 275–308, (2010).
2. A. Pilarski and J. L. Rose. A transverse-wave ultrasonic oblique-incidence technique for interfacial weakness detection in adhesive bonds. *J. Applied Physics* **63** (2), 300–307, (1988).
3. S. Mezil, J. Laurent, D. Royer, and C. Prada. Non contact probing of interfacial stiffnesses between two plates by zero-group velocity Lamb modes. *Appl. Phys. Lett.* **105** (2), (2014).
4. M.V. Golub, O.V. Doroshenko, M.V. Wilde, A.A. Eremin. Experimental validation of the applicability of effective spring boundary conditions for modelling damaged interfaces in laminate structures. *Composite Structures* **273**, 114141, (2021).
5. M. Castaings. SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion. *Ultrasonics* **54** (7), 1760-1775, (2014).
6. Y. Lugovtsova, S. Johannesmann, B. Henning, J. Prager. Analysis of Lamb wave mode repulsion and its implications to the characterization of adhesive bonding strength. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics* **38**, (2019).
7. H. Zeipert, L. Claes, S. Johannesmann, M. Webersen, Y. Lugovtsova, J. Prager, B. Henning. Measurement and Simulation of Lamb Waves in Adhesive-bonded Multilayer Systems. In: *SMSI 2021*, 91-92, (2021).
8. H. Zeipert, S. Johannesmann, M. Nicolai, Y. Lugovtsova, J. Prager, B. Henning. Quantifying the coupling strength of adhesively bonded materials by investigating mode repulsion regions. In: *DAGA 2021*, (2021).
9. H. Gravenkamp, C. Song, and J. Prager. A numerical approach for the computation of dispersion relations for plate structures using the Scaled Boundary Finite Element Method. *J. Sound and Vibration* **331** (11), 2543-2557, (2012).
10. L. Claes, T. Meyer, F. Bause, J. Rautenberg, and B. Henning. Determination of the material properties of polymers using laser generated broadband ultrasound. *J. Sens. Sens. Syst.* **5** (1), 187–196, (2016).