

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ОЦЕНКЕ ТОЛЩИНЫ КОРАБЕЛЬНЫХ ПАЛУБНЫХ БАЛОК МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ ВОЛН ЛЭМБА

© 2020 г. Зе-Ю Дон<sup>1,\*</sup>, Хай-Тао Ван<sup>1</sup>, Сиань-Мин Ян<sup>2</sup>, Синь Ли<sup>1</sup>, Джун Шу<sup>1</sup>, Мэн Хао Цзян<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Нанкинский университет авиации и космонавтики, Нанкин, Китай

<sup>2</sup>Шаньдунская автоматизационная технологическая компания Чуангке, Яньтай, Китай

<sup>3</sup>Полиция провинции Цзянси, Цзянси, Китай

\*e-mail: dongzeyu@nuaa.edu.cn

Поступила в редакцию 03.07.2019; после доработки 04.10.2019

Принята к публикации 18.10.2019

Как основной силовой элемент конструкции современных кораблей, корабельная палубная балка имеет большое значение и регулярно находится в условиях больших длительных внешних переменных нагрузок. Методы, используемые при техобслуживании, как правило, зависят от толщины балок. Из-за ограничений используемых методов контроля толщины балок не могут точно оцениваться во время техобслуживания. Поэтому в этой статье предлагается метод контроля, основанный на активных волнах Лэмба, с помощью которого можно оценивать толщину балок. С одной стороны, разработана двумерная (2D) конечно-элементная модель балок и изучена возможность оценки толщины балок с помощью трех индексов повреждения сигнала моды А0. С другой стороны, проводятся также эксперименты. Для эффективного подавления шумов в измеренных сигналах используется декомпозиция по вариационным модам (ДВМ) для определения параметров сигнала в эксперименте, а также используются три индекса повреждения для оценки толщины балок. Экспериментальные результаты показывают, что тенденция изменения трех индексов повреждения согласуется с результатами моделирования. Кроме того, индекс повреждения по энергии рассеянного сигнала на основе моды А0 является более подходящим для определения толщины балок. Таким образом, этот метод оказался подходящим для контроля балок с различной толщиной.

*Ключевые слова:* волны Лэмба, индекс повреждения, палубная балка, декомпозиция по вариационным модам, толщина.

DOI: 10.31857/S0130308220070027

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях длительных тяжелых волновых нагрузок корабли всегда сталкиваются с структурными повреждениями и деформациями, которые являются незначительными и незаметными. Корабельная палубная балка (ПБ) является основным несущим элементом конструкции судов. Выдерживаемые нагрузки напрямую связаны с толщиной балки [1, 2]. Если нагрузка превышает несущую способность ПБ, палуба и ПБ деформируются и даже могут стать причиной несчастного случая. Кроме того, обслуживающему персоналу необходимо строить стальные леса на палубе корабля в процессе технического обслуживания ключевых элементов конструкции корабля. Однако из-за малой толщины, палуба судна не может выдерживать большие нагрузки при обслуживании судна. Поэтому стальные строительные леса должны быть установлены над ПБ. Учитывая толщину ПБ, леса должны быть различными. Если балка не может выдержать на себе леса, это может привести к частичному углублению палубы и разрушению лесов. Чтобы сделать судно более надежным в течение работы и технического обслуживания, судно должно регулярно проверяться. На новых кораблях на палубах изображены отметки для идентификации балок, находящихся под палубой. Однако у старых кораблей эти отметки исчезают из-за истирания и коррозии. В результате, довольно трудно правильно оценить толщину балки палубы корабля и улучшить качество обслуживания корабля. Поэтому важно использовать осуществимый метод оценки балок различной толщины.

Активный контроль с помощью волн Лэмба на основе пьезоэлектрических датчиков считается одним из наиболее перспективных методов контроля состояния конструкций [3]. Он широко используется при контроле дефектов поверхности металлических и композитных материалов. Lu в работе [4] проанализировал отраженные и прошедшие сигналы от волн Лэмба, воздействующих на дефекты. Senyurek [5] использовал волны Лэмба для контроля авиационных элеронов. Burkov M.V. [6] изучал методику ультразвукового контроля, основанную на волнах Лэмба, для мониторинга состояния алюминиевого сплава. Gurevich S.Yu [7] предложил методику измерения толщины тонких металлоконструкций, основанную на зависимости между дисперсионными кривыми. Кроме того, с точки зрения теоретических исследований, Shen Y. [8] изучал эффективную неотражающую границу для волн Лэмба. Murav'eva [9] и A.V. Plyashenko [10] исследовали теоретические аспекты волн

Лэмба в анизотропном металле. Тем не менее в существующих исследованиях по контролю с помощью волн Лэмба в основном оценивались небольшие дефекты, и оценка структуры еще требует дальнейшего изучения.

В данной статье разработан метод, основанный на волнах Лэмба, для контроля ПБ различной толщины. А закон распространения волн Лэмба в балках различной толщины анализируется методом конечных элементов. В то же время ДВМ используется для уменьшения шума и разложения волновых мод для извлечения параметров экспериментальных сигналов. Результаты дают хорошую теоретическую и экспериментальную основу для отрасли технического обслуживания судов.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### 2.1. Основные принципы волн Лэмба и обработки сигнала

В отличие от объемной волны существует факт, что для распространения направленных волн требуется граница. Когда волны Лэмба отскакивают назад и вперед внутри тонкой пластинчатой среды, происходит модальная конверсия [11], одновременно сопровождаемая интерференционными явлениями. Бесконечные волновые моды имеются в конечном теле, и их параметры распространения зависят от угла входа, частоты и структурной геометрии [12, 13]. По направлению движения частиц в пластине волны Лэмба делятся на симметричные моды и антисимметричные моды. Антисимметричные моды обычно используются при контроле.

Для обработки сигналов существует множество алгоритмов, которые могут решить такие проблемы, как наложение сигналов и уменьшение шума. Вейвлет-преобразование является одним из самых популярных алгоритмов обработки сигналов. Под влиянием базисной функции и масштаба разложения вейвлет-преобразование часто не дает желаемых результатов [14]. Декомпозиция по эмпирическим модам (ДЭМ) и локальная средняя декомпозиция (LMD) также являются популярными алгоритмами обработки сигналов. Тем не менее в процессе расчета огибающей по крайней точке происходит накопление ошибки, что вызывает сглаживание сигнала и краевые эффекты [15]. Множественная декомпозиция на эмпирические моды (КДЭМ) может уменьшить наложение модальных сигналов путем введения гауссовского белого шума [16]. Но КДЭМ значительно увеличивает объем вычислений. И в то же время, это нарушает вывод обработанного сигнала, что приводит к появлению ложных компонентов [16—18]. ДВМ [19] является нерекурсивным алгоритмом адаптивной обработки сигналов. ДВМ может найти оптимальное решение вариационной модели с помощью нерекурсивного итеративного метода и определить центральную частоту и ширину полосы каждой эмпирической моды (ЭМ), что подходит для контроля с помощью направленных волн.

### 2.2. Индекс повреждения

В конструкции корабля ПБ обычно свариваются под углом на нижней поверхности палубы. В этой статье сварочные линии между нижней поверхностью палубы и балками рассматриваются как поверхностные дефекты. Поэтому балки считаются поверхностными дефектами различной ширины. Волны Лэмба могут распространяться в палубе, и волновые моды будут изменяться, когда они проходят через ПБ. Однако характеристические параметры изменения мод обычно смешиваются с прямыми сигналами и не могут быть легко разделены. Таким образом, трудно оценить толщину балок по изменению скорости моды А0 волны Лэмба. Индекс повреждения [20, 21] обычно связывает дефект с определенным характеристическим параметром сигнала, который может определить связь между дефектом и сигналом. Из-за влияния сварочных линий в сигнал прямого отклика волн Лэмба вызываются изменения амплитуды и фазы во временной области. В этой статье были выбраны три индекса повреждения для количественной оценки толщины балок.

#### 1. Индекс повреждения по разности энергий [22]

Этот индекс повреждения может отражать изменение энергии, которая принадлежит сигналу от ПБ с различной толщиной. Индекс повреждения:

$$DI_1 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |x_i(t)| dt - \int_{t_1}^{t_2} |x_0(t)| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |x_0(t)| dt}, (i = 0, 1, \dots, n), \quad (1)$$

где  $x_i(t)$  — прямая волна ответного сигнала волн Лэмба, которая представляет собой волновой пакет датчика, принимающего ответный сигнал волн Лэмба;  $x_0(t)$  — прямая волна ответного сигнала, который является фоновым сигналом. Фоновый сигнал может уменьшить помехи прямых волн и таким образом извлечь рассеянный сигнал;  $t_0 \sim t_1$  — начальные и конечные моменты времени фонового сигнала.

### 2. Индекс повреждения по рассеянной энергии

Этот индекс повреждения определяется как отношение рассеянной энергии к фоновой энергии. Это соотношение может быть получено путем интегрирования по времени спектральной плотности рассеяния мощности, которая затем может быть приведена к безразмерному виду посредством исходной информации [22]. Уравнение выглядит следующим образом:

$$DI_2 = \left( \frac{\int_{t_1}^{t_2} |x_i(t) - x_0(t)|^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} |x_0(t)|^2 dt} \right)^\alpha, (i = 0, 1, \dots, n), \quad (2)$$

когда  $\alpha = 0,5$ , данный индекс имеет хороший линейный отклик.

### 3. Индекс повреждения по корреляции сигналов [23]

Данный индекс повреждения представляет разность между сигналом отклика и фоновым сигналом:

$$DI_3 = 1 - \frac{\sqrt{\left( \int_{t_1}^{t_2} x_i(t)x_0(t)dt \right)^2}}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} (x_i(t))^2 dt \int_{t_1}^{t_2} (x_0(t))^2 dt}}, (i = 0, 1, \dots, n). \quad (3)$$

Когда величина равна 0, два сигнала обладают наибольшей корреляцией. Если величина равна 1, это обозначает, что сигналы не обладают корреляцией.

## 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 3.1. Конечно-элементная модель

Так как ПБ симметрична, 2D-модель конечных элементов может использоваться вместо 3D-модели конечных элементов для повышения эффективности моделирования. Следовательно, двумерная конечно-элементная имитационная модель разрабатывается с использованием ANSYS на основе параметров корабельной стали CCSA. Параметры показаны в табл. 1, а модель показана на рис. 1,

Таблица 1

Параметры стали CCSA

Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
206	0,28	7860

где  $d$  — толщина ПБ, а  $h$  — толщина палубы. В соответствии с требованиями «Правил классификации и постройки стальных морских судов», толщина палубы грузовых судов составляет 10 мм. В то же время, ПБ могут иметь четыре разные толщины в зависимости от их функций. Таким образом, толщина балок в модели составляет 6, 8, 10 и 12 мм соответственно. Точки, в которых будут находиться источник и приемник колебаний, расположены на верхней поверхности палубы. Если расстояние между двумя точками слишком мало, моды S0 и A0 нельзя будет разделить. Если расстояние слишком велико, энергия сигнала будет слишком слабой. Согласно результатам моделирования, на листе из стали CCSA расстояние должно быть 300 мм. ПБ расположена между двумя точками, в 150 мм от излучателя. На участке контакта нижней поверхности палубы с ПБ наплавлены два по 4 мм сварных катета.

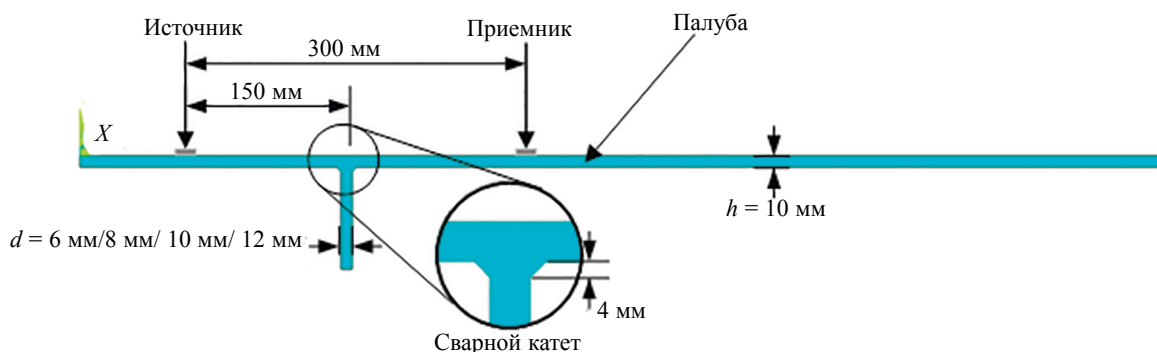


Рис. 1. Двумерная конечно-элементная модель.

Согласно уравнениям Рэлея—Лэмба [12] и табл. 1, дисперсионные кривые волн Лэмба в стали CCSA показаны на рис. 2. Предпочтительная частота возбуждения может понизить сложность преобразования мод и дальнейшего анализа сигналов. Исследования [24—26] установили моды для различных видов идентификации повреждений: симметричные моды имеют преимущества при обнаружении повреждений в конструкциях, тогда как антисимметричные моды превосходят симметричные при выявлении поверхностных трещин. Ф. Yeо [27] подтвердил, что импульс возбуждения был задан как пятитактный импульсный сигнал с переменной центральной частотой, обычно 50 или 100 кГц для десятимиллиметровой стальной пластины. Won-Joon Song и Joseph L. Rose [28] также получили аналогичные результаты: использовалась мода А0 при 1,2 МГц·мм (результат умножения частоты  $f$  на толщину  $h$ ) для дисперсионной кривой фазовой скорости попереч-

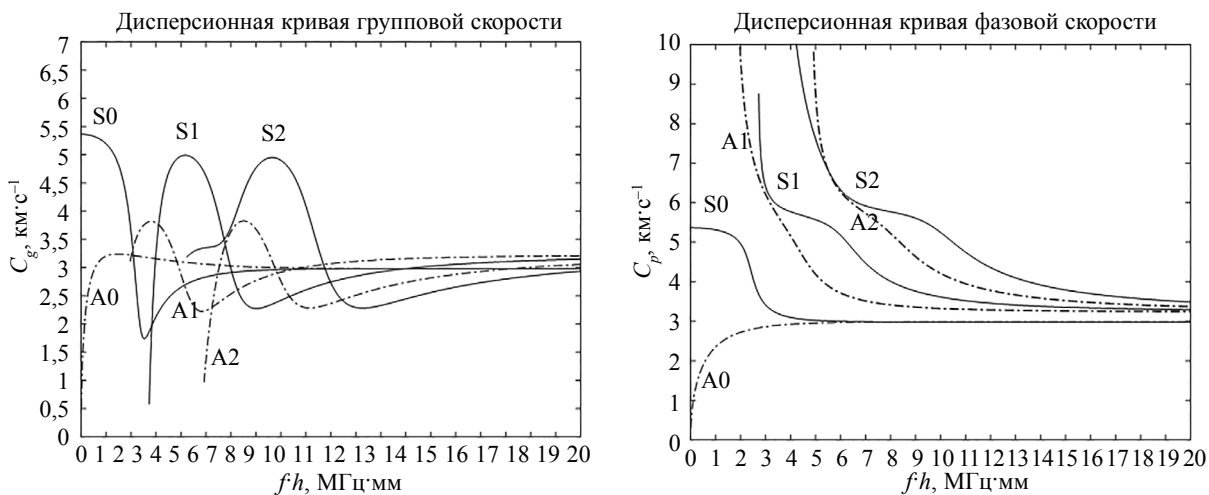


Рис. 2. Дисперсионные кривые волн Лэмба в пластине из стали CCSA.

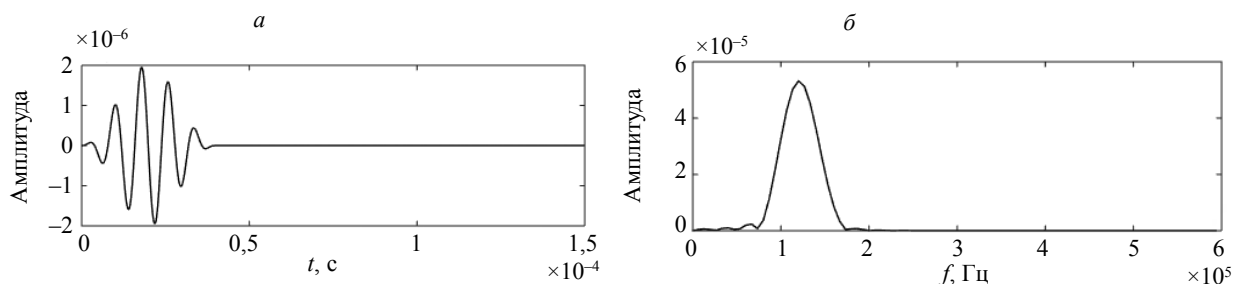


Рис. 3. Временная область сигнала возбуждения (а); частотная область сигнала возбуждения (б).

ной горизонтальной волны в стальной пластине, поскольку мода  $A_0$  не является дисперсионной и имеет меньшую модальную конверсию. Таким образом, диапазон центральной полосы частот составляет от 80 до 200 кГц. Кроме того, согласно экспериментам, проведенным на палубе без балки, известно, что сигнал с диапазоном центральной полосы частот от 125 до 135 кГц имеет наименьшее наложение волн и относительно большую амплитуду. Получается высокая надежность и чувствительность для контроля балок. По указанным выше причинам центральная частота сигнала возбуждения выбрана равной 125 кГц. Сигнал возбуждения показан на рис. 3.

Чтобы обеспечить достаточную точность результатов моделирования, размер сетки должен быть меньше или равен  $1/10$  длины волны сигнала, а размер шага для анализа переходной динамики в ANSYS должен быть меньше  $1/20$  периода сигнала. Следовательно, размер сетки равен 2 мм, а шаг интегрирования —  $1,5 \times 10^{-7}$  с.

### 3.2. Результаты моделирования

В конструкции 5000-тонных грузовых судов толщина балок составляет 6, 8, 10 и 12 мм соответственно. Сигнал, полученный для палубы без балок, рассматривается как фоновый сигнал. В точке приема сигналы отклика в основном содержат волны, прошедшие через балку, что показано на рис. 4. Учитывая, что антисимметричные моды волн Лэмба чувствительны к поверхностным дефектам, и скорость волны, как правило, меньше, чем скорость симметричных мод [29], что выгодно для снижения сложности анализа сигналов. Согласно дисперсионной кривой групповой скорости, мода  $S_0$  и мода  $A_0$  также обозначены на рис. 4.

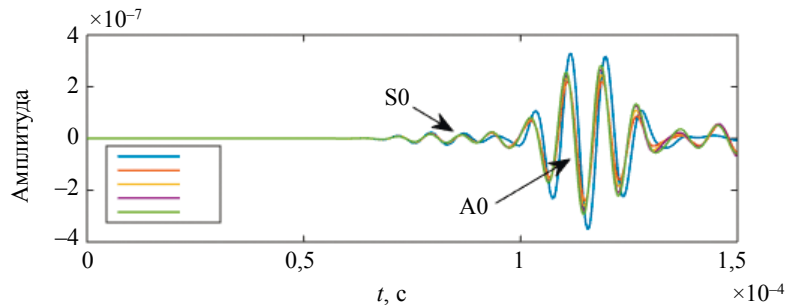


Рис. 4. Пределы сигналов в интервале от 0 до 150 мкс.

После построения огибающей сигналов отклика можно видеть, что мода  $A_0$  имеет наибольшую амплитуду для балки 0 мм, то есть для фонового сигнал. А амплитуда моды  $A_0$  постепенно увеличивается с увеличением толщины. Эта тенденция показана на рис. 5.

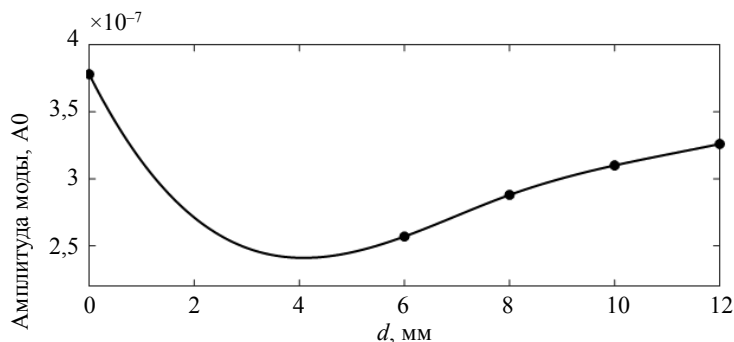


Рис. 5. Кривая огибающей амплитуды моды  $A_0$ .

Сигнал фона записывается как  $x_0(t)$ , а другие сигналы отклика записываются как  $x_i(t)$ ,  $i = 6, 8, 10, 12$ , что соответствует толщине ПБ. Три индекса повреждений для моды  $A_0$  сигнала отклика рассчитываются по уравнениям (1)—(3), результаты показаны в табл. 2. Зависимость между тремя индексами повреждения и толщиной показана на рис. 6.

Таблица 2

Значения трех индексов повреждения ПБ для различных толщин

Толщина, мм	$DI_1$	$DI_2$	$DI_3$
0	0	0	0
6	-0,33	0,57	0,29
8	-0,23	0,65	0,43
10	-0,19	0,71	0,50
12	-0,12	0,75	0,54

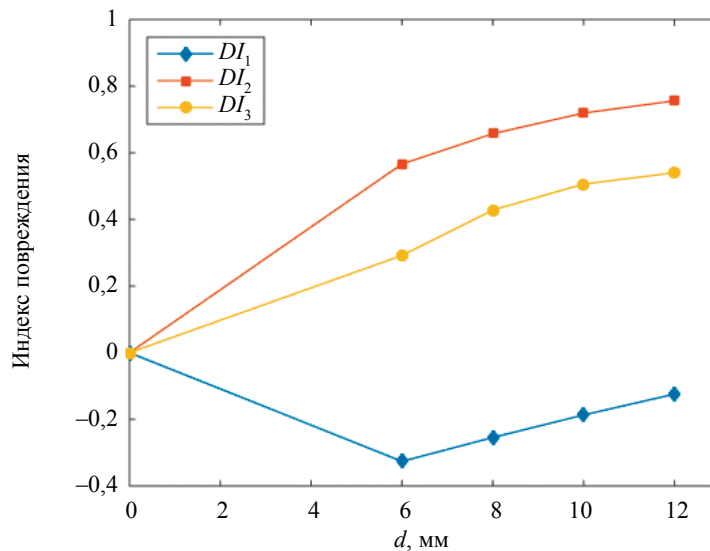


Рис. 6. Зависимость между индексами повреждения и толщиной балок.

Из рис. 6 видно, что с увеличением толщины индексы повреждения для моды А0 демонстрируют тенденцию к росту.  $DI_1$  представляет разницу энергии между  $x_i(t)$  и  $x_0(t)$ . Результаты показывают, что разница в энергии увеличивается с увеличением толщины балок, когда толщина превышает 6 мм. Однако при толщине менее 6 мм разница в энергии уменьшается с увеличением толщины.  $DI_2$  представляет энергию рассеяния между  $x_i(t)$  и  $x_0(t)$ . По мере увеличения толщины энергия рассеяния также увеличивается.  $DI_3$  показывает изменения фазы и амплитуды сигнала и отражает взаимную корреляцию между  $x_i(t)$  и  $x_0(t)$ . С увеличением толщины величина взаимной корреляции уменьшается.

## 4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 4.1. Экспериментальная установка

Эксперименты должны быть проведены, чтобы проверить результаты моделирования. Экспериментальная система состоит из нескольких элементов: программируемый генератор сигналов, цифровой осциллограф, схема формирования сигнала, модуль импульсного источника питания и датчики PZT. Экспериментальная установка показана на рис. 7а. Рис. 7 б, в детально показывает образцы ПБ корабля. Размеры палубы 1300 мм в длину, 600 мм в ширину и 10 мм в толщину. Под палубой есть четыре балки с 6, 8, 10 и 12 мм, которые приварены к нижней поверхности.

### 4.2. Эксперимент и результаты

Согласно расчетной модели, датчики PZT наклеиваются на верхнюю поверхность палубы. Генератор сигналов подает волну возбуждения с центральной частотой 125 кГц в точке возбуждения. После прохождения через схему формирования сигналы отклика подаются на цифровой

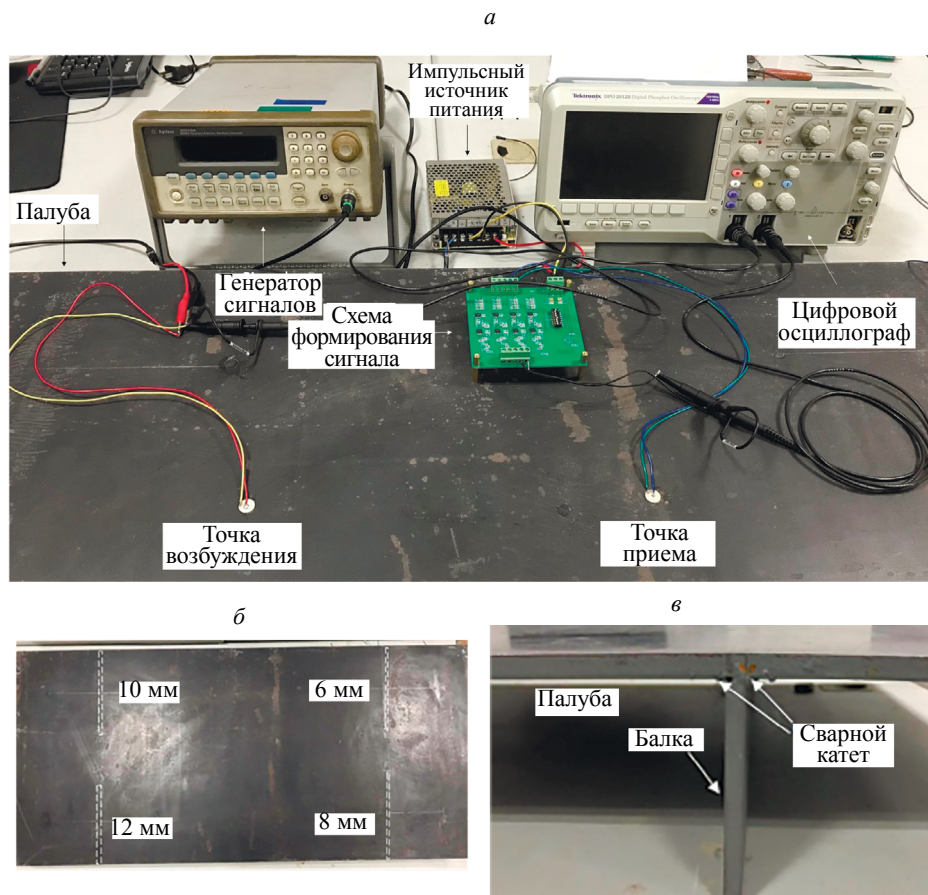


Рис. 7. Экспериментальная установка (а); образец — вид сверху (б); образец — вид сбоку (в).

осциллограф. Рис. 8а показывает сигналы отклика. Во временной области мода  $S_0$  и мода  $A_0$  сосредоточены в  $50 \sim 125$  мкс, как показано на рис. 8б.

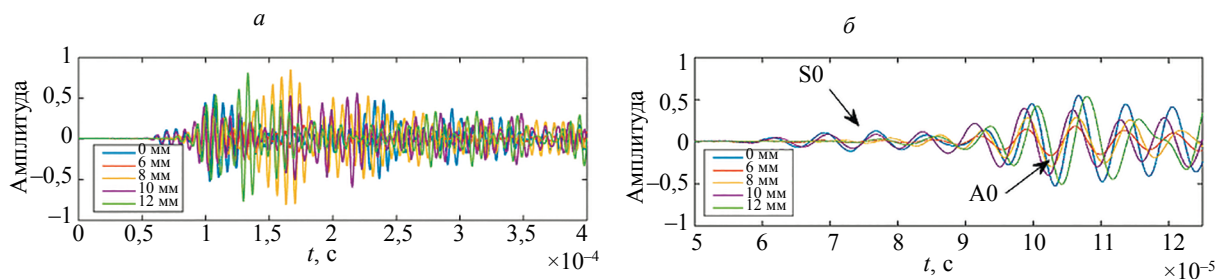


Рис. 8. Сигналы отклика (а); пределы сигналов в интервале от 50 до 125 мкс (б).

Из-за широкополосного гармонического шума в образце и аппаратного шума в аппаратной части для обработки данных в частотной области применяется полосовой фильтр с полосой пропускания в диапазоне от 50 до 200 кГц. Кроме того, размер образца намного меньше реальной палубы корабля, поэтому граничные эхосигналы будут смешиваться с сигналами, проходящими через балку, что приводит к наложению сигналов. В целях уменьшения влияния наложения сигналов используется алгоритм ДВМ для разложения сигналов отклика. На основании величины и полосы частот будут выбраны соответствующие суб-сигналы для дальнейшей обработки. На рис. 9 показаны сигналы во временной области после обработки ДВМ и соответствующий спектр быстрого фурье-преобразования.

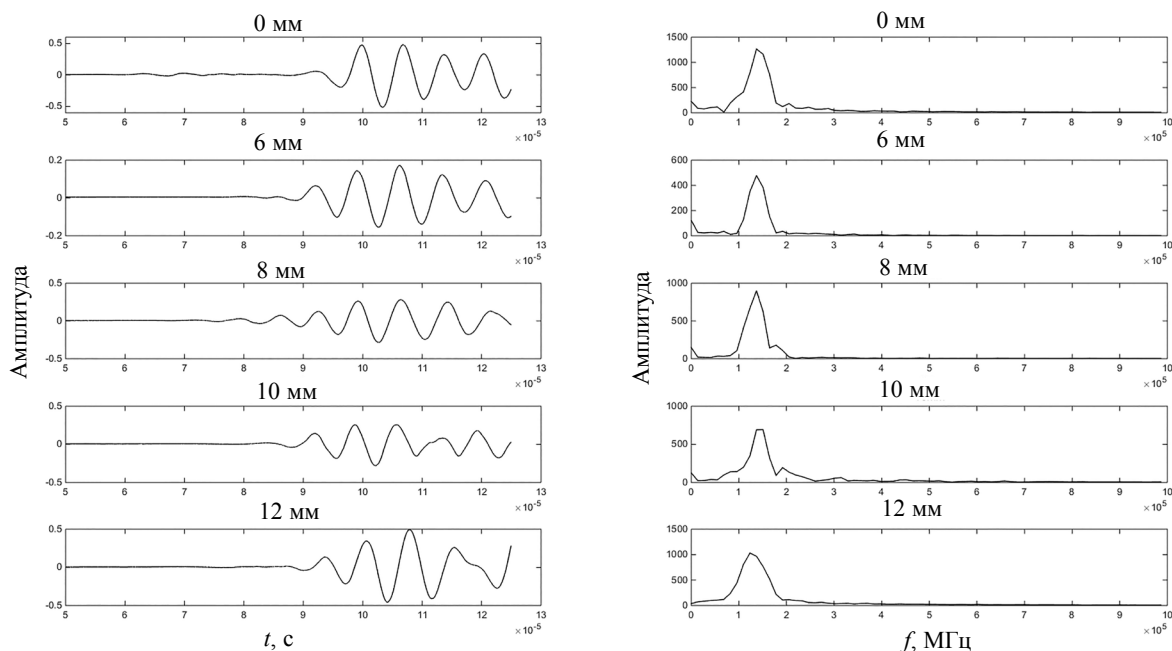


Рис. 9. Сигналы отклика и соответствующий спектр FFT, полученные с использованием ДВМ.

При анализе огибающих этих сигналов отклика видно, что мода A0 находится в интервале от 88 до 116 мкс. Аналогично результатам моделирования, значение фонового сигнала больше, чем у других сигналов отклика. С увеличением толщины амплитуда огибающей моды A0 постепенно увеличивается. Тенденция показана на рис. 10а. Аналогичная тенденция в частотной области сигналов отклика показана на рис. 10б. Предполагается, что существует зависимость между коэффициентом затухания, половинной толщиной пластины и толщиной балки. Половина толщины составляет 5 мм. Когда толщина меньше 5 мм, коэффициент увеличивается с увеличением толщины. Когда толщина превышает 5 мм, коэффициент уменьшается с увеличением толщины. Следовательно, можно видеть, что амплитуда сигнала A0 для 12-миллиметровой балки больше, чем амплитуды сигнала A0 балок другой толщины. В противном случае амплитуда сигнала A0 фонового сигнала является наибольшей, поскольку толщина балки равна нулю, что оказывает наименьшее влияние на коэффициент ослабления.

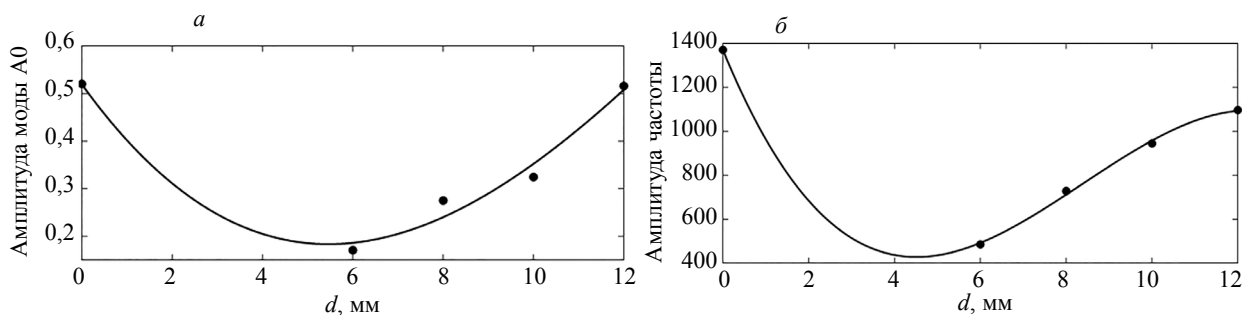


Рис. 10. Линия тренда амплитуды моды A0 (а); линия тренда амплитуды частоты (б).

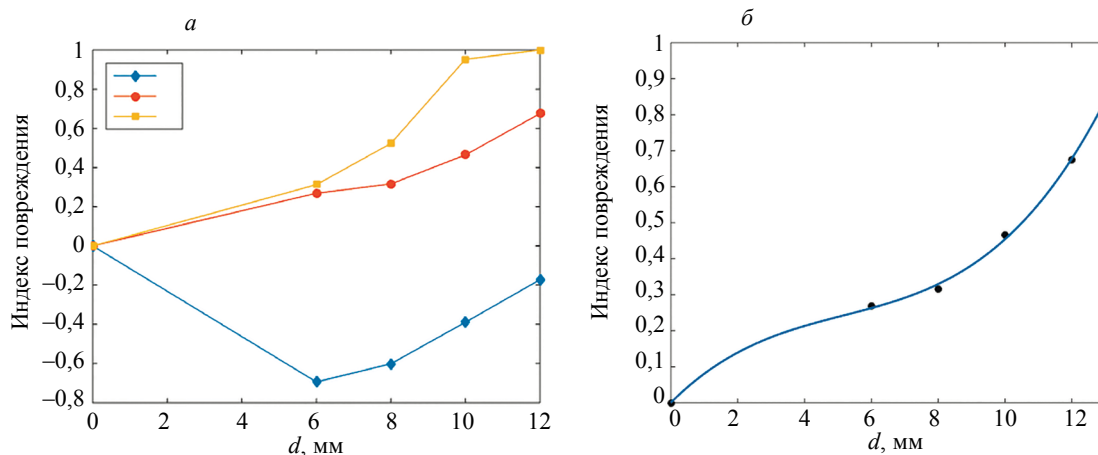
Сигнал фона записывается как  $x_0(t)$ , а другие сигналы отклика записываются как  $x_i(t)$ ,  $i = 6, 8, 10, 12$ , что соответствует толщине ПБ. По уравнениям (1), (2), (3) рассчитываются значения трех индексов повреждений соответственно. Результаты расчета приведены в табл. 3. Линия тренда для каждого индекса повреждения представлены на рис. 11а.

Тренд для трех индексов повреждения согласуется с результатами моделирования. График  $DI_1$  не является монотонным, поэтому  $DI_1$  не подходит для оценки изменения толщины балок настила.



Значения трех индексов повреждения ПБ для различных толщин

Толщина, мм	$DI_1$	$DI_2$	$DI_3$
0	0	0	0
6	-0,69	0,27	0,31
8	-0,60	0,32	0,52
10	-0,39	0,46	0,95
12	-0,17	0,67	0,99

Рис. 11. Линия тренда для  $DI_1$ ,  $DI_2$  и  $DI_3$  (а); аппроксимирующая кривая для  $DI_2$  (б).

$DI_2$  отражает взаимосвязь между энергией рассеянных сигналов и толщиной ПБ, что представляет собой монотонно возрастающую линию тренда.  $DI_3$  показывает ситуацию, аналогичную результатам моделирования, когда толщина ПБ увеличивается,  $DI_3$  также растет. Однако, когда толщина превышает 8 мм, значения  $DI_3$  близки к единице, демонстрируя высокую тенденцию роста. Это явление отражает то, что корреляция между сигналами отклика при 10 и 12 мм и фоновым сигналом мала, фаза и амплитуда сигналов отклика сильно различаются, и это также отражается на диаграмме временной области, поэтому она не подходит для оценки толщины балки. Таким образом, считается, что  $DI_2$  показывает зависимость между энергией рассеяния сигналов отклика и толщиной ПБ, которая подходит для оценки толщины ПБ корабля. Зависимость аппроксимируется полиномиальной кривой третьего порядков, и уравнение аппроксимации:

$$DI_2 = 0,00086d^3 - 0,013d^2 + 0,098d + 0,00029. \quad (4)$$

Аппроксимирующая кривая показана на рис. 11б.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье для оценки толщины палубной балки корабля используется метод контроля волнами Лэмба. Зависимость между тремя индексами повреждения и толщиной балок изучается путем моделирования и экспериментов. Результаты показывают, что три индекса повреждения могут показывать изменение толщины балки. Линия тренда индекса повреждения по разности энергии показывает немонотонный рост, и она не подходит для оценки толщины ПБ. Для индекса повреждения, описывающего корреляцию сигналов, когда толщина превышает 8 мм, значения корреляции экспериментальных сигналах намного меньше, чем при моделировании. Таким образом, индекс повреждения по корреляции сигналов также не подходит для оценки толщины.

В итоге, линия тренда индекса повреждения по энергии рассеяния показывает монотонный рост, что может отражать изменение толщины, значит, данный метод более подходит в качестве способа для оценки толщины палубных балок.

Данное исследование поддержано программой аспирантских исследований и прикладной инноватики провинции Цзянсу (Грант № KYCX18\_0270). Мы также благодарим за поддержку «Ведущую лабораторию технологий неразрушающего контроля и мониторинга на высокоскоростном транспорте Министерства промышленности и информационных технологий».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Z.Y., Ren H.L., Qi Y.W. Structural Parametric Modeling and Analysis of a Ship Stiffened Deck Plate Based on the Patran Command Language // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. V. 733. P. 842—845.
2. Laakso A., Avi E., Romanoff J. Correction of local deformations in free vibration analysis of ship deck structures by equivalent single layer elements // *Ships and Offshore Structures*. 2019. V. 1—13.
3. Shen Y., Giurgiutiu V. Combined analytical FEM approach for efficient simulation of Lamb wave damage detection // *Ultrasonics*. 2016. V. 69. P. 116—128.
4. Lu Y., Ye L., Su Z.Q. et al. Quantitative assessment of through-thickness crack size based on Lamb waves scattering in aluminum plates // *NDT & E International*. 2008. V. 31(1). P. 210—222.
5. Senyurek V.Y. Detection of cuts and impact damage at the aircraft wing slat by using Lamb waves method // *Measurement*. 2015. V. 67. P. 10—23.
6. Burkov M.V., Eremin A.V., Lyubutin P.S. et al. Applying an Ultrasonic Lamb Wave Based Technique to Testing the Condition of V96ts3T12 Aluminum Alloy // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. V. 53 (12). P. 817—829.
7. Yu. G.S., Petrov Y.V., Golubev E.V. Thickness Gauging of Thin Metalware with Ultrasound Excited by Laser Nanopulses // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54 (3). P. 147—150.
8. Shen Y., Giurgiutiu V. Effective non-reflective boundary for Lamb waves: Theory, finite element implementation, and applications // *Wave Motion*. 2015. V. 58. P. 22—41.
9. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Methodological peculiarities of using SH- and Lamb waves when assessing the anisotropy of properties of flats // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52 (7). P. 363—369.
10. Ilyashenko A.V., Kuznetsov S.V. Theoretical Aspects of Applying Lamb Waves in Nondestructive Testing of Anisotropic Media // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. V. 53 (4). P. 243—259.
11. Rose J.L. *Ultrasonic guided waves in solid media*. New York: Cambridge University Press. 2014.
12. Su Z.Q., Ye L. *Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer Press, 2009.
13. Rose J.L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential // *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2002. V. 124 (3). P. 273—282.
14. Kudela P., Radzienski M., Ostachowicz W. et al. Structural Health Monitoring system based on a concept of Lamb wave focusing by the piezoelectric array // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. V. 108. P. 21—32.
15. Wang Y.X., Market R., Xiang J.W. Research on variational mode decomposition and its application in detecting rub-impact fault of the rotor system // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. V. 66—61. P. 243—254.
16. Wu Z.H., Huang N.E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method // *Advances in Adaptive Data Analysis*. 2009. V. 1 (1). P. 1:41.
17. Huang N.E., Shen Z., Long S.R. A new view of nonlinear waves: the Hilbert spectrum // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1999. V. 31. P. 417—457.
18. Yang Y., Cheng J.S., Zhang K. An ensemble local means decomposition method and its application to local rub-impact fault diagnosis of the rotor system // *Measurement*. 2012. V. 45(3). P. 561—570.
19. Konstantin D., Dominique Z. Variational Mode Decomposition // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2014. V. 62 (3). P. 531—544.
20. Ziemowit D., Likasz A., Pawel P. Application of artificial neural networks for damage indexes classification with the use of Lamb waves for the aerospace structures // *Key Engineering Materials*. 2014. V. 588. P. 12—21.
21. Daigo S. A novel damage index for fatigue damage detection in a laminated composite using Lamb waves // *Dissertations & Theses – Gradworks*. 2015. V. 55—03. P. 1—81.
22. Ihn J.B., Chang F.K. Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: I. diagnostics // *Smart Materials & Structures*. 2004. V. 13 (3). P. 609.
23. Shon H., Park H.W. et al. Combination of a time reversal process and a consecutive outlier analysis for baseline-free damage diagnosis // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2007. V. 18 (4). P. 335—346.

24. Ghosh T., Kundu T., Karpur P. Efficient use of Lamb modes for detecting defects in large plates // *Ultrasonics*. 1998. V. 36 (7). P. 791—801.
25. Cho S., Spencer Jr. B.F. Sensor attitude correction of wireless sensor network for acceleration-based monitoring of civil structures // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015. V. 30 (11). P. 859—871.
26. Hodge V., O'Keefe S., Weeks M. et. al. Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: A survey // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015. V. 16 (3). P. 1088—1106.
27. Yeo F., Fromme P. Guided Ultrasonic Wave Inspection of Corrosion at Ship Hull Structures // *AIP Conference Proceedings*. 2006. V. 37. P. 202—209.
28. Song W.J., Rose J.L., Whitesel H. Detection of damage in a ship hull using ultrasonic guided waves // *AIP Conference Proceedings*. 2002. V. 21. P. 173—180.
29. Fromme P. Lamb Wave (A0 Mode) Scattering Directionality at Defects // *AIP Conference Proceedings*. 2017. V. 36. P. 1—9.
-