

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗРЕЖЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

© 2022 г. Хунвэй Ху^{1,2}, Цзя Тиан¹, Хуицзе Цзэн¹, Сяофэн Юй^{1,2}, Сянхун Ван^{1,2,*}

¹Университет науки и технологии Чанши, Чанши, Хунань, 410114, Китай

²Ключевая лаборатория интеллектуальных технологий производства высокопроизводительного механического оборудования провинции Хунань, Чанши, Хунань, 410114, Китай

*E-mail: wangxianghong@csust.edu.cn

Поступила в редакцию 11.11.2021; после доработки 14.01.2021

Принята к публикации 14.01.2021

Ориентация углеродных нанотрубок оказывает значительное влияние на характеристики композитных материалов из углеродных нанотрубок и эпоксидной смолы (УНТ/ЭС). Скорость ультразвука чувствительна к степени ориентации углеродных нанотрубок. Однако время пролета (ВП) трудно точно измерить из-за наложения ультразвукового эхосигнала и искажения формы волны, возникающих в тонком композитном материале УНТ/ЭП. Поэтому в данной работе исследуется ультразвуковой метод определения параметров ориентации углеродных нанотрубок, основанный на разреженном представлении. Объектами исследования являются два набора образцов, изготовленных при различных значениях электрического напряжения и имеющих различное содержание углеродных нанотрубок. Во-первых, с помощью функции Габора строится словарь, и исследуется степень соответствия между словарем и ультразвуковыми эхосигналами. Затем используется алгоритм согласованного преследования (СП) для решения задачи избыточности словаря и получения атома наилучшего согласования; восстановление сигнала завершается, и ВП ультразвука в углеродных нанотрубках извлекается более точно. Наконец, устанавливается модель расчета ориентации углеродных нанотрубок, основанная на разреженном представлении. Результат показывает, что словарь Габора имеет хорошее сходство с ультразвуковыми эхосигналами, а относительное среднеквадратическое отклонение составляет 0,0147. Степень ориентации углеродных нанотрубок и скорость ультразвука имеют положительную корреляцию. Относительная погрешность модели расчета ориентации углеродных нанотрубок составляет 5,58 %. В этой статье предложен эффективный метод для определения степени ориентации углеродных нанотрубок.

Ключевые слова: расчет ориентации, измерение скорости ультразвука, разреженное представление, алгоритм согласованного преследования, углеродные нанотрубки.

DOI: 10.31857/S0130308222020038

1. ВВЕДЕНИЕ

Соединение «углеродные нанотрубки/эпоксидная смола» (УНТ/ЭС) является нанокompозитным материалов с повышенными адгезией, химической стойкостью и термостабильностью. УНТ/ЭС широко используется, например, в автомобилях и в строительстве [1,2]. Ориентация углеродных нанотрубок является ключом к улучшению характеристик композиционных материалов УНТ/ЭС [3,4]. В настоящее время разрушающий метод контроля, представленный сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) [5], повреждает контролируемые материалы и неэффективен, поскольку не позволяет проводить измерения в реальном времени. Тем не менее существующий неразрушающий метод контроля, представленный рамановской спектроскопией [6], может использоваться в реальном времени, но он чувствителен к параметрам оптической системы и явлениям флуоресценции [7].

Метод ультразвукового неразрушающего контроля обладает такими преимуществами, как высокая проникающая способность, высокая чувствительность, оптимальная направленность звукового луча и высокая эффективность обнаружения [8, 9]. Он широко используется при определении параметров материалов [10,11]. Исследования показывают, что ориентация материалов тесно связана со скоростью ультразвука, и использование метода измерения скорости ультразвука для определения ориентации материалов широко изучалось [12, 13]. Edwards и Thomas [14] установили ультразвуковой датчик поперечной волны на пресс-форму, чтобы определять ориентацию полимера. Yang и др. [15] используют ультразвуковой эхоимпульсный метод для обнаружения и оценки ориентации однонаправленных композитных слоистых материалах из армированного углеродным волокном пластика. Однако, поскольку образцы УНТ/ЭС очень тонкие, при измерениях скорости ультразвука проявляются эффекты наложения и искажения сигнала ультразвука. По этой причине трудно получить точное ВП, используя такие традиционные методы оценки, как взаимная корреляция, пик огибающей и методы пороговой обработки [16].

Разреженное представление обладает хорошей противозумовой способностью, компактным представлением и сверхвысоким разрешением, которое преодолевает проблему выбора начального значения в традиционных методах оценки параметров. Проводились исследования по оценке параметров ультразвукового сигнала. Применяется алгоритм СП, основанный на разреженном представлении. Qi и др. [17] объединили алгоритм СП и алгоритм оптимизации искусственного пчелиного роя для оценки ультразвукового сигнала и повысили точность оценки ультразвукового сигнала. При поиске атомов использование традиционного метода разреженного восстановления привело бы к неправильному выбор, поэтому для решения этой проблемы Cui и др. [18] предложили циклический алгоритм оценки временной задержки с разреженным восстановлением СП, который эффективно улучшает быстроту разреженного разложения сигнала и точность оценки. Используя разреженное представление, можно уменьшить шум, что позволяет точнее оценивать ультразвуковой эхосигнал и ВП.

В этой статье скорость ультразвука используется для определения степени ориентации углеродных нанотрубок. Поскольку традиционный ультразвуковой метод оценки ВП не может точно получить ВП в тонком образце, предлагается использовать алгоритм СП, основанный на разреженном представлении, для точного определения ВП и скорости ультразвука. Для анализа корреляции между скоростью ультразвука и степени ориентации использовались 2 группы образцов УНТ/ЭС. Представлена модель расчета ориентации углеродных нанотрубок на основе разреженного представления.

2. МЕТОД ОЦЕНКИ ВП УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА, ОСНОВАННЫЙ НА РАЗРЕЖЕННОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Суть разреженного представления состоит в том, чтобы выразить большую часть исходного сигнала через линейную комбинацию нескольких базовых сигналов. Результат разложения сигнала тем более разрежен, чем он ближе к реальному сигналу. Разреженное представление сигнала может получить более краткое представление сигнала и информацию о его параметрах. Метод широко применяется при разреженной выборке, ультразвуковой дефектоскопии и шумоподавлении, разделении и оценки эха [19].

Одним из важнейших факторов разреженного представления сигналов является построение переполненного словаря. Ключом к построению переполненного словаря является выделение основных функций, составляющих словарь. Модель прохождения обратно рассеянного сигнала [20] согласуется с разреженным представлением сигнала. Другая гауссова модель сигнала соответствует атомам с разными коэффициентами в переполненном словаре, а шум соответствует ошибке аппроксимации. Поскольку гауссова модель сигнала [21] соответствует характеристикам сигнала, базовая функция Габора [22] может использоваться для построения полного словаря следующим образом:

$$g(\theta, t) = K_0 e^{-\frac{(t-\tau)^2}{s}} \cos[2\pi f_c(t-\tau) + \varphi], \quad (1)$$

где $\cos[2\pi f_c(t-\tau) + \varphi]$ — гармоническая функция; $K_0 e^{-\frac{(t-\tau)^2}{s}}$ — это функция демпфирования; K_0 представляет собой нормировочную константу; s — масштаб; τ — ВП; f_c — центральная частота; φ — фаза.

Поскольку ультразвуковой сигнал, раскладываемый в переполненный словарь, неоднозначный, оптимальное разреженное разложение сигнала является неопределенной полиномиальной задачей [23]. Mallet и Zhang [24] предложили СП для решения этой задачи. СП используется для нахождения условно оптимального разреженного разложения для замены им оптимального разреженного разложения и эффективно выделить наиболее важные параметры сигнала.

Процесс использования СП для разреженного разложения сигнала следующий.

(1) Измеренный сигнал s проецируется в словарь, и атом наилучшего согласования g_{γ_0} измеренного сигнала s выбирается из словаря. Условие выбора должно удовлетворять максимальной абсолютной величине скалярного произведения измеренного сигнала s и атома g_{γ_0} :

$$\left| \langle s, g_{\gamma_0} \rangle \right| = \max_{\gamma \in \Gamma_\alpha} \left| \langle s, g_\gamma \rangle \right| \geq \alpha \sup_{\gamma \in \Gamma} \left| \langle s, g_\gamma \rangle \right|, \quad (2)$$

где Γ_α — множество параметра, $\Gamma_\alpha \in \Gamma$; α — коэффициент оптимизации, $\alpha = 1$.

В то же время измеренный сигнал s раскладывается на:

$$s = \langle r_0, g_{\gamma_0} \rangle g_{\gamma_0} + r_1, \quad (3)$$

где r_1 — остаточный сигнал после того, как измеренный сигнал s аппроксимируется в направлении g_{γ_0} , r_0 приблизительно равен s .

(2) Используя метод на шаге (1), чтобы провести n аппроксимаций для r_1 , получается остаточный сигнал r_n . Атом наилучшего согласования выбирается так, что он удовлетворяет:

$$\left| \langle r_n, g_{\gamma_n} \rangle \right| = \max_{\gamma \in \Gamma} \left| \langle r_n, g_{\gamma} \rangle \right| \geq \alpha \sup_{\gamma \in \Gamma} \left| \langle r_n, g_{\gamma_n} \rangle \right|. \quad (4)$$

В то же время остаточный сигнал r_n раскладывается на:

$$r_n = \langle r_n, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} + r_{n+1}, \quad (5)$$

где r_{n+1} — это остаточный сигнал после того, как аппроксимируется остаточный сигнал r_n .

(3) Когда разложение выполняется m раз или остаточная энергия $\|r_m\|^2$ достигает порогового значения, разложение завершается. Сигнал s выражается как:

$$s = \sum_{n=0}^{m-1} \langle r_n, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} + r_m, \quad (6)$$

где r_m — остаточный сигнал после m -кратного разложения.

Согласно непрерывной итерации [25], параметры γ , соответствующие атому наилучшего согласования g_{γ} , являются характеристическими параметрами эха измеренного сигнала. Параметры τ_n являются точной оценкой ВП на основе разреженного представления.

3. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВП УЛЬТРАЗВУКА

ВП ультразвука можно оценить более точно, используя алгоритм СП, основанный на разреженном представлении. Достоверность алгоритма СП проверяется путем сравнения метода взаимной корреляции и метода пиков огибающей. В данной статье построены смоделированные эхосигналы с различными отношениями сигнал—шум (ОСШ) и различными характеристиками.

Метод взаимной корреляции нуждается в опорном сигнале, когда он используется для оценки ВП. Поэтому формула (1) использовалась для построения смоделированного двойного ультразвукового эхосигнала при различных параметрах. ОСШ смоделированных сигналов составляет 12 и 27 дБ, пробная точка $N = 1024$, частота дискретизации $f_s = 200$ МГц. В сигнале A частотно-временной параметр первого эха равен $\theta_1 = (1/6, 1,775, 5, \pi/6)$, амплитуда $A_1 = 4,68$ В, частотно-временной параметр второго эха $\theta_2 = (1/6, 3,65, 5, \pi/6)$, а амплитуда $A_2 = 2,13$ В. В сигнале B частотно-временной параметр первого эха равен $\theta_1 = (1/5, 1,37, 4,3, \pi/6)$, амплитуда $B_1 = 4,31$ В, частотно-временной параметр второго эха $\theta_2 = (1/5, 3,425, 5, 2\pi/3)$, а амплитуда $B_2 = 2,32$ В.

Таблица 1

Сравнение методов оценки ВП ультразвука

ОСШ, дБ	Теоретическое время, мкс	Взаимная корреляция		Огибающая		СП	
		Расчетное время, мкс	Относительная ошибка, %	Расчетное время, мкс	Относительная ошибка, %	Расчетное время, мкс	Относительная ошибка, %
27	1,875	1,8752	0,008	1,8839	0,475	1,8744	0,032
	2,055	2,0603	0,258	2,0475	0,365	2,0558	0,039
12	1,875	1,8789	0,205	1,9628	4,683	1,8748	0,011
	2,055	2,0512	0,187	2,1250	3,404	2,0530	0,1

Смоделированные эхосигналы нормируются. Три метода оценки ВП ультразвука используются для расчета сигнала A и сигнала B 100 раз. Затем можно получить среднее расчетное время и относительную ошибку. На рис. 1—3 соответственно показано влияние обработки тремя методами на сигнал B , когда ОСШ равно 27 дБ. Сравнение результатов трех методов показано в табл. 1.

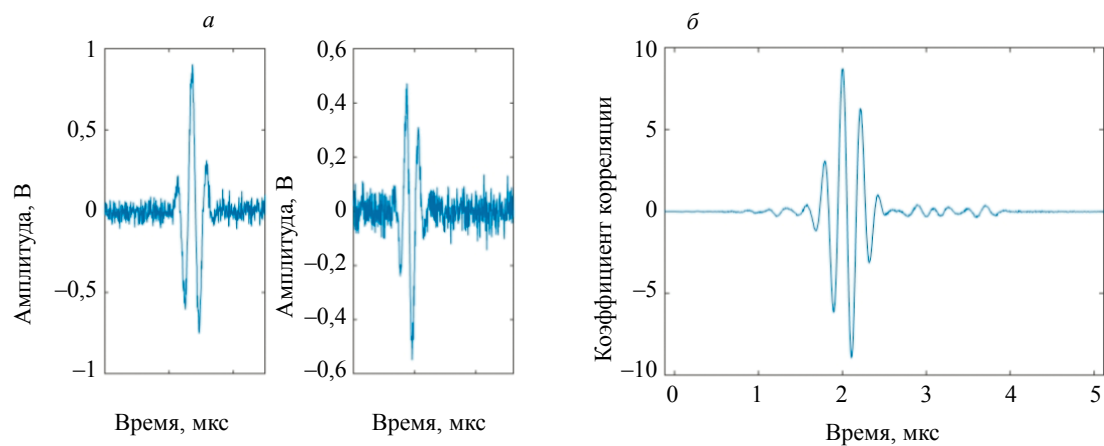


Рис. 1. Оценка ВП методом взаимной корреляции:
а — опорный сигнал и экосигнал; б — восстановленный сигнал.

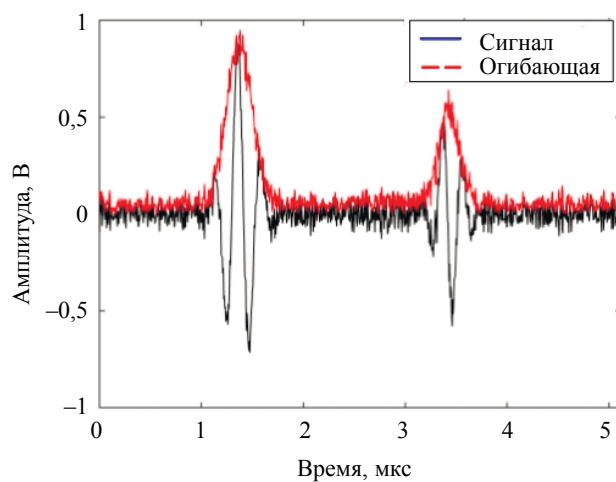


Рис. 2. Оценка ВП методом огибающей.

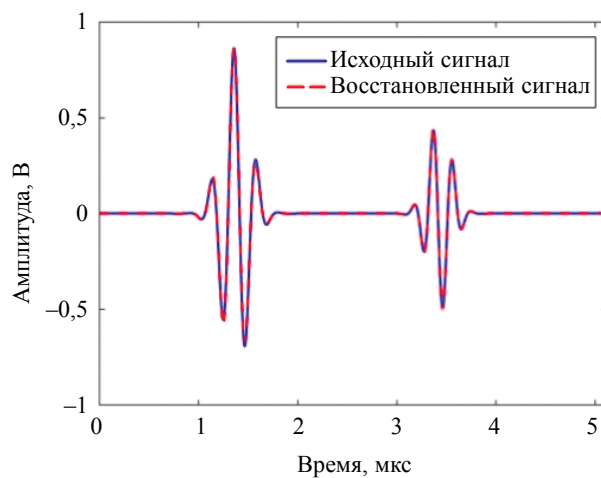


Рис. 3. Оценка ВП методом СП.

Согласно табл. 1 и рис. 1—3, можно сделать вывод, что метод взаимной корреляции обладает хорошей помехоустойчивостью, но у него есть требования к сигналам. Он высокоточно оценивает ВП только при изменении временной задержки и амплитуды эхосигнала по отношению к опорному сигналу. Метод пика огибающей чувствителен к шумовым помехам. Он может точно измерить ВП только при низком уровне шума. Однако алгоритм СП, основанный на разреженном представлении, может точно различать шум и измерять ВП. Таким образом, алгоритм СП является эффективным методом оценки ВП.

4. ЭКСПЕРИМЕНТ

4.1. Проверка правильности подбора функции

Из-за высокого сходства между функцией Габора и ультразвуковым эхосигналом правильность функции Габора в эксперименте проверяется путем сравнения приблизительного эхосигнала функции Габора с фактическим сигналом дефекта. В данной статье для проведения иммерсионного ультразвукового контроля используется плоский стальной образец с дефектами.

Погружная ультразвуковая испытательная платформа показана на рис. 4а. Эхосигнал исследуемого образца измеряли эхоимпульсным методом. Центральная частота иммерсионного преобразователя OLYMPUS-V309 — 5 МГц, а частота дискретизации — 200 МГц. Толщина образца составляет 35 мм, а внутри образца имеются отверстия с плоским дном. Глубина отверстий составляет 25 мм, а размеры отверстий различаются, как показано на рис. 4б. В качестве сигнала сравнения используется эхосигнал дефектов с апертурой 4 мм.

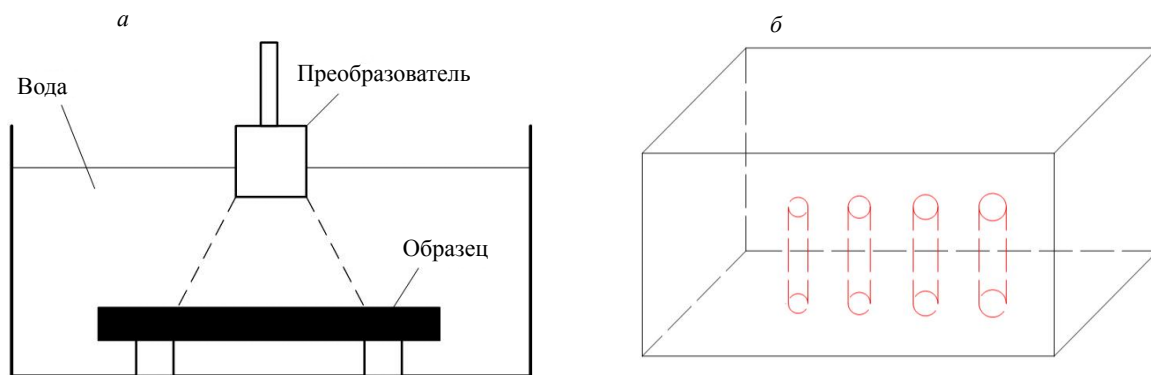


Рис. 4. Оборудование для эксперимента и образец:
а — оборудование для эксперимента; б — образец.

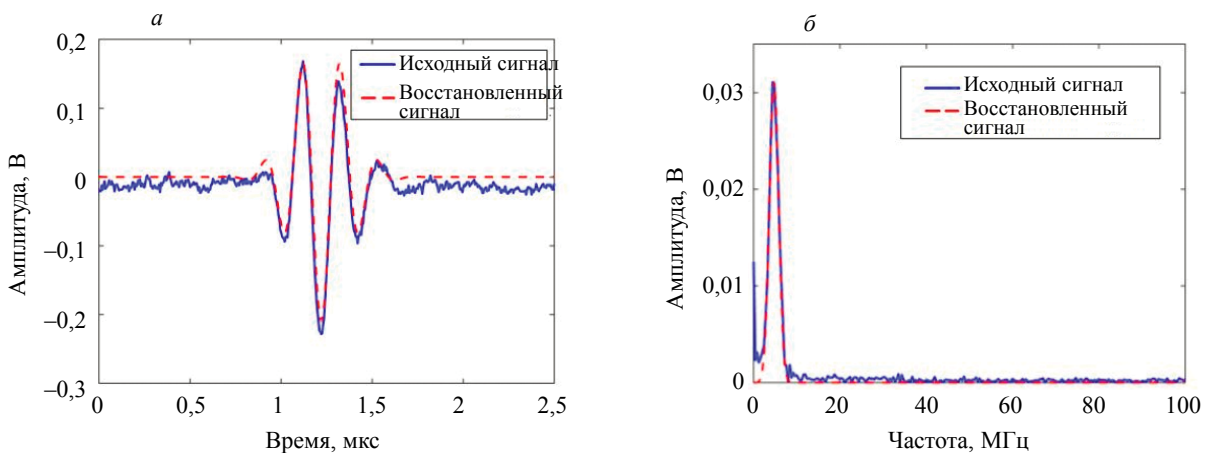


Рис. 5. Исходный сигнал от дефекта и восстановленный сигнал Габора:
а — временная область; б — частотная область.

Картины во временной области и в частотной области показаны на рис. 5. Синяя сплошная линия представляет исходный сигнал в эксперименте. Красная пунктирная линия — восстановленный сигнал по модели Габора. Из рис. 5 можно заключить, что исходный сигнал и восстановленный сигнал хорошо согласуются, а среднеквадратическая относительная ошибка составляет 0,0147. Это означает, что функция Габора может воспроизводить одиночный ультразвуковой сигнал, а это подтверждает эффективность словаря Габора.

4.2. Ультразвуковое определение ориентации углеродных нанотрубок

На расположение углеродных нанотрубок в полимере влияют различные факторы. Эти факторы включают в себя тип электрического поля, размер и содержание углеродных нанотрубок, а также напряженность электрического поля [26, 27]. В данной статье были исследованы 2 группы образцов УНТ/ЭС. В группе А ориентация углеродных нанотрубок менялась с напряжением электрического поля, а в группе В — при изменении содержания углеродных нанотрубок. Ориентация на контролируемой поверхности каждого образца измеряется с помощью СЭМ. Экспериментальные значения параметров каждого образца приведены в табл. 2.

Таблица 2

Величины параметров каждого образца

Образцы	Температура отвердевания, град	Время зарядки, ч	Содержание УНТ, масс. %	Величина напряжения, кВ	Степень ориентации, %
A-1	50	4	0,5	1	0,617
A-2	50	4	0,5	2	0,639
A-3	50	4	0,5	4	0,773
B-1	50	4	0,2	4	0,095
B-2	50	4	0,5	4	0,773
B-3	50	4	1	4	0,568
B-4	50	4	1,5	4	0,520
B-5	50	4	2	4	0,507

Среди них образцы А-3 и В-2 одинаковы. Эти два номера используются для более четкого различения различных значений параметров процесса. На рис. 6 показан реальный вид обкомпозиата УНТ/ЭС А-1. СЭМ-изображение поперечного сечения каждого образца, наблюдаемого с помощью TESCAN MIRA3, показано на рис. 7. При одинаковом содержании углеродных нанотрубок их ориентация увеличивается с увеличением напряжения. При значении напряжения 4 кВ степень ориентации наивысшая. При одном и том же значении напряжения ориентация углеродных нанотрубок сначала увеличивается, а затем уменьшается с увеличением содержания углеродных нанотрубок. Когда содержание углеродных нанотрубок составляет 0,5 масс. %, степень ориентации является самой высокой.



Рис. 6. Композитный материал УНТ/ЭС.

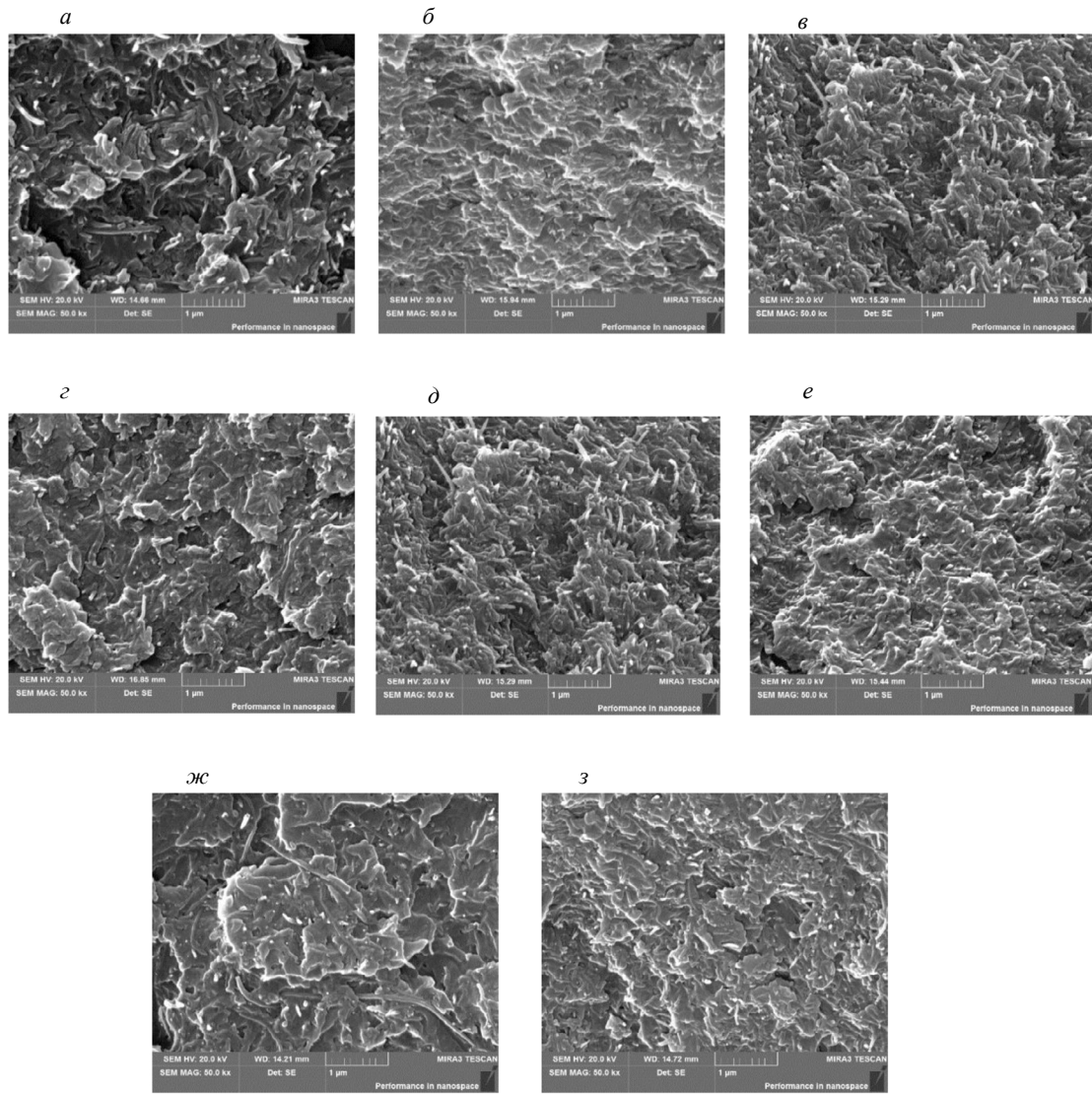


Рис. 7. СЭМ-изображение поперечного сечения образцов:

a — образец А-1; *б* — образец А-2; *в* — образец А-3; *г* — образец В-1; *д* — образец В-2; *е* — образец В-3; *ж* — образец В-4; *з* — образец В-5.

Углеродные нанотрубки неравномерно распределены в эпоксидной смоле, что приводит к разным скоростям ультразвука в разных участках. Чтобы лучше оценить ориентацию углеродных нанотрубок и уменьшить случайные ошибки, в эксперименте применяется метод разделения областей в образце. Чтобы избежать возникновения помех при отражении эха от боковых стенок, формула расстояния [28] эхопомехи от нижней боковой стенки до границы может быть выражена как

$$d_1 \geq 5 \sqrt{\frac{d_2}{f}}, \quad (7)$$

где d_2 — расстояние от нижней поверхности до верхней, мм; f — центральная частота ультразвукового преобразователя, МГц.

В этом эксперименте центральная частота ультразвукового преобразователя составляла 5 МГц. Диаметр преобразователя — 13 мм. Максимальная толщина образца — 4 мм. Минимальное расстояние между преобразователем и краем образца было около 4,47 мм. Как показано на рис. 8,

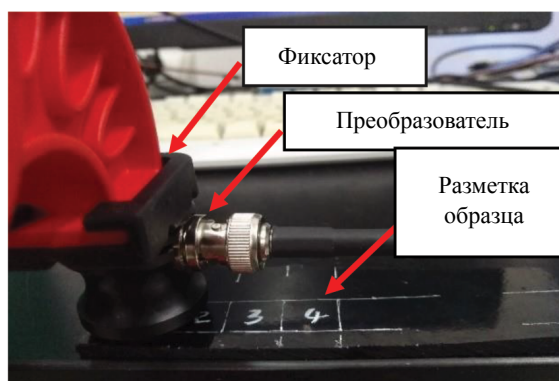


Рис. 8. Образец с обозначенными контролируемыми участками.

область контроля разделяется на 4 участка 13×13 мм. За величину скорости ультразвука в образце принимается среднее значение скоростей ультразвука, измеренных в 4 участках каждого образца. Скорость ультразвука измеряется в том же направлении.

Ультразвуковой сигнал каждого образца регистрировали контактным эхоимпульсным методом. Частота дискретизации 200 МГц, напряжение возбуждения 100 В. Система сбора данных ультразвукового сигнала показана на рис. 9. Центральная частота преобразователя V109 — 5 МГц. Генератор/приемник сигналов JSR-DPR300 использовался в качестве генератора и приемника сигналов. Высокоскоростная плата сбора данных PCIe-9852 передает данные на компьютер. Фиксатор был отрегулирован таким образом, чтобы преобразователь и поверхность образцов находились в хорошем контакте. Была задана величина порога, затем первичный и вторичный эхосигналы отображаются в прямоугольном окне. Сигнал анализируется с помощью MATLAB для получения интервала времени между первичным и вторичным донными эхоимпульсами. С помощью винтового микрометра измеряется толщина образца в 4 участках, а затем вычисляется среднее значение.

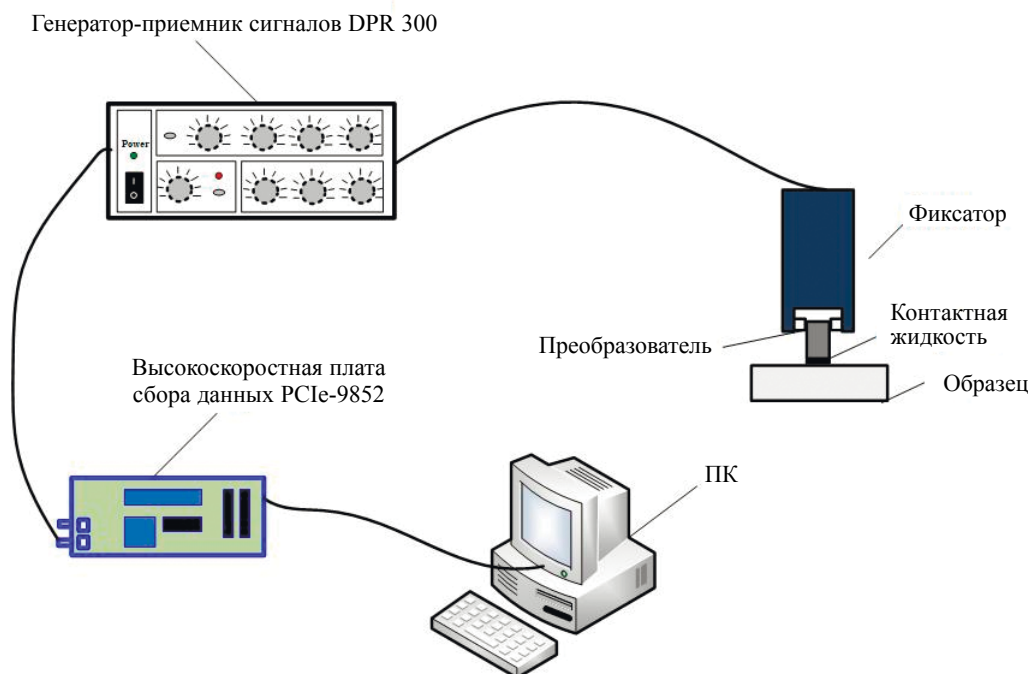


Рис. 9. Система сбора данных ультразвукового сигнала.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Экспериментальные результаты и анализ

Отраженные эхосигналы искажаются из-за помех. На ВП также влияют форма и интенсивность отраженных эхоимпульсов. Поэтому результат определения ВП ультразвука по разнице во времени между пиками отраженных эхоимпульсов будет неточным. В этой статье для получения точной оценки ВП применяется алгоритм СП.

Для улучшения разрешающей способности во времени для эхосигналов и для уменьшения времени расчёта в данной статье выбираются большая длина N сигнала, дискретные точки M с относительно малым периодом, дискретные точки L центральной частоты и дискретные точки фазы P , и устанавливаются значения $N = 910$, $M = 4$, $L = 50$, $P = 20$. Центральная частота и период эхосигнала выбираются в соответствии с характеристиками фактических эхосигналов и ультразвукового преобразователя. В этой статье центральная частота лежала в пределах $(f_{\min}, f_{\max}) = (1,5)$, а периоды эхосигнала — $(c_{\min}, c_{\max}) = (1,4)$.

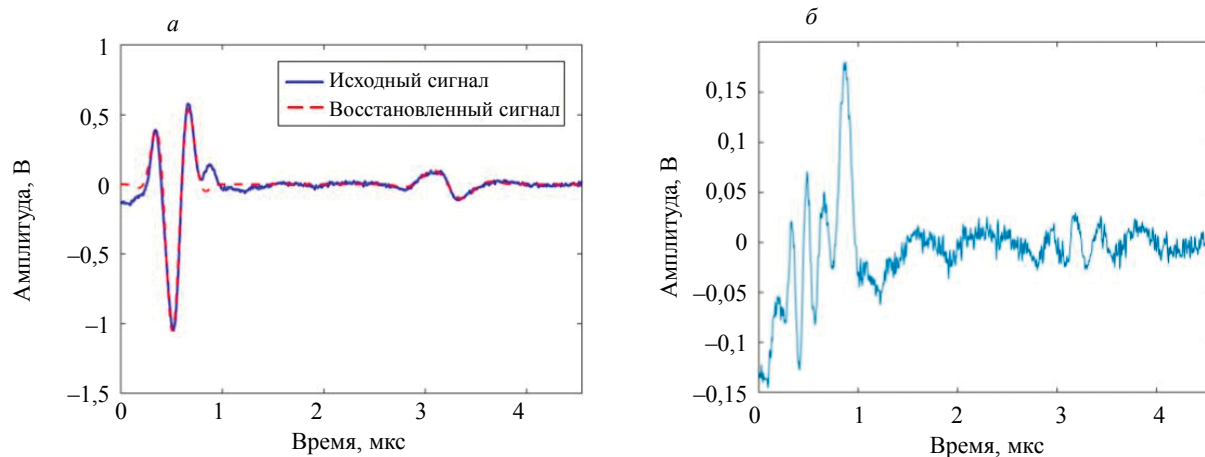


Рис. 10. Результат применения СП-алгоритма:

a — исходный и восстановленный сигнал; b — остаточный сигнал после разреженного разложения.

Результаты СП-алгоритма показаны на рис. 10. На рис. 10а показаны исходный и восстановленный сигнал в точке измерения 1 на образце В-4, а рис. 10б представляет собой остаточный сигнал исходного сигнала после разреженного разложения. Исходя из рис. 10, можно сделать вывод, что исходный сигнал и восстановленный сигнал имеют почти одинаковую форму. Однако в первой полузоне остается некоторая энергия остаточного сигнала после разреженного разложения, что было вызвано слишком тонким образцом и интерференцией из-за наложения проходящих волн. Во второй полузоне остаточная энергия уменьшалась, а распределение было относительно однородным, что согласуется с параметрами шума. Это также показывает, что алгоритм СП, основанный на разреженном представлении, не только получает эффективную информацию из исходного сигнала, но также эффективно подавляет шум и другие помехи в сигнале.

Чтобы обеспечить точность данных, значение скорости ультразвука в образце представляет собой среднее значение скорости ультразвука для 4 точек данных, полученных для каждого образца. Результаты измерения скорости ультразвука в образцах приведены в табл. 3.

Согласно данным в табл. 2 и 3, можно проанализировать взаимосвязь между скоростью ультразвука и степенью ориентации при различных условиях, как показано на рис. 11 и 12. Тенденции изменения степени ориентации также соответствовали таковым на СЭМ-изображениях (см. рис. 7). Когда содержание углеродных нанотрубок было фиксированным, степень ориентации увеличивалась с увеличением значения напряжения электрического поля; при фиксированном значении напряжения электрического поля степень ориентации сначала увеличивается, а затем уменьшается с увеличением содержания углеродных нанотрубок. С одной стороны, углеродные нанотрубки создают силу кручения под действием внешнего

Таблица 3

Результаты измерения скорости ультразвука в образцах

Образец	Скорость ультразвука, $\times 10^3$ м/с
A-1	2,689
A-2	2,696
A-3	2,705
B-1	2,646
B-2	2,705
B-3	2,684
B-4	2,679
B-5	2,675

электрического поля, поэтому степень ориентации увеличивается с увеличением величины напряжения электрического поля. С другой стороны, степень ориентации невидима в случае малого содержания углеродных нанотрубок; степень ориентации увеличивается с увеличением содержания углеродных нанотрубок. Но когда содержание углеродных нанотрубок увеличивается до определенного значения, интервал углеродных нанотрубок в матрице становится меньше, что приводит к более высокому сопротивлению, а степень ориентации уменьшается. Образец с нулевым значением напряжения электрического поля и содержанием углеродных нанотрубок не рассматривается, поскольку теоретическое значение степени ориентации такого образца равно нулю. Но на самом деле образец имеет небольшую степень ориентации. Из рис. 11 можно сделать вывод, что с увеличением степени ориентации скорость ультразвука в образцах А-1, А-2 и А-3 также постепенно увеличивалась. Это показывает, что степень ориентации углерода нанотрубок в матрице эпоксидной смолы связано со скоростью ультразвука. На рис. 12 содержание углеродных нанотрубок является переменной величиной. Видно, что тенденция изменения скорости ультразвука для образца типа В согласуется со степенью ориентации, что дополнительно подтверждает, что скорость ультразвука может эффективно характеризовать степень ориентации углеродных нанотрубок.

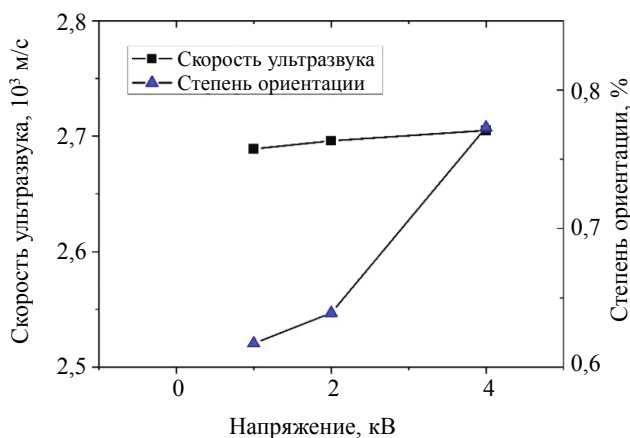


Рис. 11. Зависимость скорости ультразвука от степени ориентации с различными значениями напряжения электрического поля.

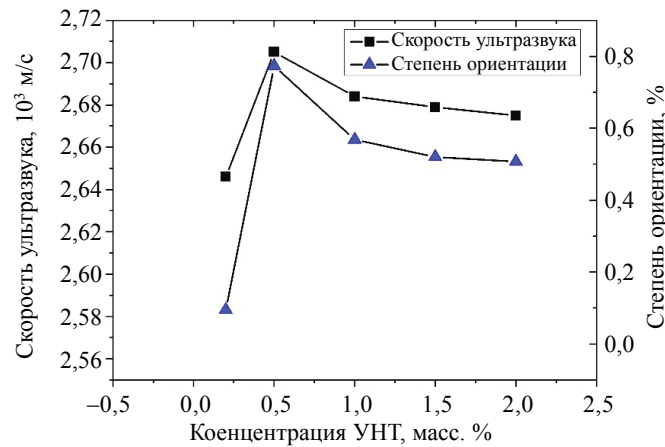


Рис. 12. Зависимость скорости ультразвука и степени ориентации при различных содержаниях УНТ.

5.2. Модель расчета и ее верификация

Экспериментальные данные образцов А-1, А-2, А-3, В-1, В-2, В-3 и В-5 использовали для построения зависимости скорости ультразвука от степени ориентации, как показано на рис. 13. Исходя из анализа зависимости, каждая точка, в целом, укладывается на прямую линию, и было определено уравнение линейной регрессии:

$$y = 0,08757x + 2,636, \quad (8)$$

где коэффициент детерминации $R^2 = 0,9746$, а x представляет собой степень ориентации УНТ в образцах, y — измеренная скорость ультразвука, км/с.

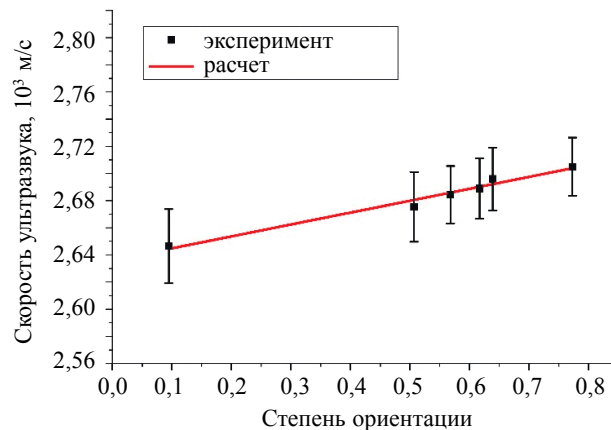


Рис. 13. Линейная зависимость степени ориентации от скорости ультразвука.

Для проверки точности модели оценки образец В-4 использовали в качестве контрольного образца и его заменили моделью оценки. Рассчитанная степень ориентации образца составила 0,491, в то время как измеренная степень ориентации фактически составила 0,52, относительная ошибка составила 5,58 %. Можно сделать вывод, что метод измерения скорости ультразвука, основанный на разреженном представлении, может точно характеризовать степень ориентации углеродных нанотрубок. Это может обеспечить эффективный метод оценки степени ориентации углеродных нанотрубок.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье исследуется ультразвуковой метод определения параметров ориентации углеродных нанотрубок с использованием СП-алгоритма, основанного на разреженном представлении.

(1) Предложен высокоточный метода оценки ВП, основанный на разреженном представлении. Он может эффективно снижать уровень шума, наложения эхосигналов и искажения формы волны, вызываемые тонким композитным материалом УНТ/ЭС.

(2) Когда содержание углеродных нанотрубок является определенным, углеродные нанотрубки создают силу кручения под действием внешнего электрического поля, а степень ориентации увеличивается с увеличением значения напряжения электрического поля. При определенном значении напряжения электрического поля степень ориентации сначала увеличивается, а затем уменьшается с увеличением содержания углеродных нанотрубок; степень ориентации максимальна при содержании углеродных нанотрубок 0,5 масс. %.

(3) Существует сильная положительная корреляция между скоростью ультразвука и степенью ориентации. Используя эту корреляцию, скорость ультразвука можно использовать для определения степени ориентации углеродных нанотрубок.

(4) Создана модель прогнозирования ориентации углеродных нанотрубок, основанная на разреженном представлении, и относительная ошибка прогнозирования составляет 5,58 %, что делает метод эффективным для определения степени ориентации углеродных нанотрубок.

Кроме того, ультразвуковое определение ориентации углеродных нанотрубок, как метод, находится на экспериментальной стадии, его можно считать применимым в реальном производстве. Стоит изучить влияние других различных технологических параметров на ультразвуковое определение ориентации углеродных нанотрубок.

Данная работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (№ 52075049) и фондом естественных наук провинции Хунань (№ 2020JJ2028), Ведущей Программой Исследования и Развития Провинции Хунань и Плановым Научно-технологическим Проектом города Чанша.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sohel R.* A Review on Carbon Epoxy Nanocomposites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 2009. V. 28 (4). P. 461—487.
2. *Wang H., Chang L., Yang X.* et al. Anisotropy in tribological performances of long aligned carbon nanotubes/polymer composites // *Carbon.* 2014. V. 67. P. 38—47.
3. *Esma A., Ferhat K., Cevdet K.* Contribution of carbon nanotubes to vibration damping behavior of epoxy and its carbon fiber composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 2020. V. 39 (7—8). P. 311—323.
4. *Herrera-Ramirez J.M., Perez-Bustamante R., Aguilar-Elguezabal A.* Carbon-Based nanofillers and their rubber nanocomposites. Holland: Elsevier, 2019. P. 47—75.
5. *Fan Z., Advani S.G.* Characterization of orientation state of carbon nanotubes in shear flow // *Polymer.* 2005. V. 46 (14). P. 5232—5240.
6. *Chapkin W.A., McNerny D.Q., Aldridge M.F.* et al. Real-time assessment of carbon nanotube alignment in a polymer matrix under an applied electric field via polarized Raman spectroscopy // *Polymer Testing.* 2016. V. 56. P. 29—35.
7. *Robert S.P., Liu X.L.* Exploiting the optical reflectance behaviour of carbon fibre composites for low-cost inspection and orientations analysis // *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 2020. V. 39 (23—24). P. 869—879.
8. *Shah A., Ali G., Khan T.M.R.* et al. Evaluation of Heat Treatment Effect on the Tensile Strength of Mild Steel Welded Joints Using Ultrasonic Testing // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2021. V. 57. No. 6. P. 455—464.
9. *Krysztofik J., Kukla D., Manaj W.* et al. Evaluation of Damage Degree of Inconel 718 Alloy with the Use of Non-Destructive Methods // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2019. V. 55. No.4. P. 299—307.
10. *Mutlu I., Oktay E., Ekinci S.* Characterization of microstructure of H13 tool steel using ultrasonic measurements // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2013. V. 49. No. 2. P. 112—120.
11. *Li X.B., Song Y.F., Hu H.W.* et al. Evaluation of grain size using the ultrasonic attenuation rate // *Journal of Mechanical Engineering.* 2015. V. 51 (14). P. 1—7.
12. *Zhao P., Xia N., Zhang J.F.* et al. Measurement of molecular orientation using longitudinal ultrasound and its first application in in-situ characterization // *Polymer.* 2020. P. 187—198.
13. *Dryburgh P., Smith R.J., Marrow P.* et al. Determining the crystallographic orientation of hexagonal crystal structure materials with surface acoustic wave velocity measurements // *Ultrasonics.* 2020. P. 108—138.

14. *Edwards R., Thomas C.* On-line measurement of polymer orientation using ultrasonic technology // *Polymer Engineering Science*. 2001. V. 41 (9). P. 1644—1653.
 15. *Yang I.Y., Im K.H., Hsu D.K.* et al. Feasibility on fiber orientation detection of unidirectional CFRP composite laminates using one-sided pitch-catch ultrasonic technique // *Composites Science and Technology*. 2009. V. 69 (13). P. 2042—2047.
 16. *Barshan B., Ayrulu B.* Performance comparison of four time-of-flight estimation methods for sonar signals // *Electronics Letters*. 1998. V. 34 (16). P. 1616—1617.
 17. *Qi A.L., Zhang G.M., Dong M.* et al. An artificial bee colony optimization based matching pursuit approach for ultrasonic signal estimation // *Ultrasonics*. 2018. V. 88. P. 1—8.
 18. *Cui W.J., Zhang P., Ba B.* Time of arrival estimation based on sparse reconstruction loop matching pursuit algorithm // *Journal of Electronics & Information Technology*. 2019. V. 41 (3). P. 523—529.
 19. *Zhang G.M., Zhang C.Z., Harvey D.M.* Sparse signal representation and its applications in ultrasonic NDE // *Ultrasonics*. 2012. V. 52 (3). P. 351—363.
 20. *Zeira A., Schultheiss P.M.* Thresholds and related problems in time-delay estimation. In: *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing // IEEE*. 1991. P. 1261—1264.
 21. *Demirli R., Saniie J.* Model-based estimation of ultrasonic signals. Part I: Analysis and algorithms // *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*. 2001. V. 48 (3). P. 787—802.
 22. *Mor E., Azoulay A., Aladjem M.* A matching pursuit method for approximating overlapping ultrasonic signals // *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*. 2010. V. 57 (9). P. 1996—2004.
 23. *Davis G., Mallat S., Avellaneda M.* Adaptive greedy approximations // *Constructive Approximation*. 1997. V. 13 (1). P. 57—98.
 24. *Mallat S., Zhang Z.* Matching Pursuits with Time-Frequency Dictionaries // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1993. V. 41 (12). P. 3397—3415.
 25. *Tropp J.A., Gilbert A.C., Strauss M.J.* Strauss, Algorithms for simultaneous sparse approximation. Part I: Greedy pursuit // *Signal Processing*. 2006. V. 86 (3). P. 572—588.
 26. *Dong H.B., Li C.Q., Zou X.H.* Research progress of orientation and alignment of carbon nanotubes in polymer implemented by applying electric field // *Materials Reports*. 2018. V. 32 (3). P. 427—433+442.
 27. *Zhu Y.F.* Process improvement in preparation of epoxy/carbon nanotube composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011. V. 30 (9). P. 809—814.
 28. *Shi J.* Research on the relationship between GH738 tissue and ultrasonic signal based on quantitative metallography. Master Thesis, Nanchang Hangkong University, China. 2018. P. 42—45.
-