

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 7
2022

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

- Е.Г. Базулин, И.В. Евсеев.** Уменьшение уровня шума изображения отражателей с помощью технологии plane wave imaging..... 3
- Тугба Йылмаз Айдын.** Анизотропные упругие параметры сосны под влиянием температуры..... 14

Радиационные методы

- Е.Л. Кротова, С.В. Варушкин, С.С. Стариков, Н.А. Мусихин, К.А. Рожков, Д. Н. Трушников.** Зависимость сигнала с датчика тормозного рентгеновского излучения от значений технологических параметров в гибридном аддитивном процессе электронно-лучевой проволочной наплавки 29
- В.Ю. Жвырбля, С.П. Осипов, Д.А. Седнев.** Повышение проникающей способности систем цифровой радиографии на основе анализа сигналов низкой интенсивности 39

Электромагнитные методы

- А.А. Абоуеллаиль, Ц. Чан, А.И. Солдатов, А.А. Солдатов, М.А. Костина, С.И. Борталевич, Д.А. Солдатов.** Влияние дестабилизирующих факторов на результаты контроля термоэлектрическим методом 54

Оптические методы

- А.А. Антонов, А.А. Бондаренко, И.В. Стрельников, И.Ю. Уткин.** Повышение чувствительности метода лазерной интерферометрии, предназначенного для оценки остаточных сварочных напряжений.. 64

УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ ШУМА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ PLANE WAVE IMAGING

© 2022 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, И.В. Евсеев²

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,
Россия 123458, Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»

²Московский Энергетический Институт (Национальный исследовательский университет),
Россия 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 23.03.2022; после доработки 12.04.2022

Принята к публикации 13.05.2022

Восстановление изображения отражателей методом цифровой фокусировки антенной решеткой (ЦФА) имеет ряд недостатков, таких как большой объем измеренных эхосигналов и малая энергия ультразвуковых волн, вводимая в объект контроля (ОК). Второе обстоятельство может привести к малому отношению сигнал/шум в объектах контроля с высоким поглощением. Метод Plane Wave Imaging (PWI) позволяет совместить преимущества технологии фазированных антенных решеток (ФАР) и технологии ЦФА. В режиме PWI при излучении плоской волны излучают все элементы антенной решетки (АР), как в ФАР-режиме, что увеличивает вводимую в ОК энергию. Для получения изображения обычно используют от 15 до 20 плоских волн. Это приводит к уменьшению объема измеренных эхосигналов, повышению скорости их регистрации и уменьшению уровня шума изображения. Так как в ультразвуковом неразрушающем контроле часто используют АР, установленные на наклонные призмы, то была разработана версия PWI, учитывающая это обстоятельство. Модельные эксперименты показали, что метод PWI по сравнению с методом ЦФА позволяет получать изображения отражателей с меньшим уровнем шума в случае использования призмы как для материалов с большим поглощением, так и для материалов с высоким уровнем структурного шума.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, двойное сканирование, тройное сканирование, цифровая фокусировка антенной (ЦФА), Full Matrix Capture (FMC), Plane Wave Imaging (PWI), Total Focusing Method (TFM).

DOI: 10.31857/S0130308222070016, EDN: BOBHYQ

1. ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации промышленных объектов актуальной задачей является получение информации об их внутренней структуре для безаварийной работы. Один из способов ее решения — это восстановление изображения отражателей при излучении и приеме ультразвуковых волн в объект контроля (ОК). В настоящее время широкое применение в практике ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) нашли две технологии восстановления изображения отражателей с использованием антенных решеток (АР): фазированные антенные решетки (ФАР) [1] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей.

Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов АР. Такой режим называется режим двойного сканирования (в зарубежной литературе Full Matrix Capture (FMC) [4]). Набор эхосигналов при излучении одним элементом АР называется выстрел, а набор эхосигналов по всем выстрелам будем называть залп. На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5] восстанавливается изображение отражателей. Корректнее использовать название Total Focusing Method (TFM) [6]. Однако метод ЦФА имеет недостатки, и первый заключается в том, что регистрируется большой объем эхосигналов, который растет квадратично количеству ее элементов N_e . Для линейной 32-элементной АР количество измеренных эхосигналов (залп) равно $N_e^2 = 1024$, а для 64-элементной — уже 4096. Второй недостаток ЦФА — это небольшая акустическая энергия, которая вводится в объект контроля каждым элементом АР. Третий недостаток — большое время восстановления изображения по эхосигналам методом C-SAFT во временной области. Однако метод C-SAFT хорошо распараллеливается и для его ускорения можно воспользоваться технологией CUDA [7] или технологией ПЛИС [8]. Разработаны методы получения изображения отражателей при обработке эхосигналов в области пространственного спектра [9, 10]. Так как при расчетах в этих методах основной операцией является преобразование Фурье, то

выполняя его по технологии быстрого преобразования, время восстановления изображения можно существенно уменьшить.

Для решения упомянутых проблем в медицинской диагностике была разработана технология Plane Wave Imaging (PWI) [11, 12]. Для использования в неразрушающем контроле технология была модифицирована [13—15]. Технологию PWI можно рассматривать как симбиоз технологий ФАР и ЦФА. Излучение плоской волны под заданным углом в ОК происходит всеми элементами АР, как в режиме ФАР. Эхосигналы регистрируются всеми элементами без задержек, как в методе ЦФА. После регистрации эхосигналов для заданного набора плоских волн изображение отражателей восстанавливается методом C-SAFT. Как показывает опыт, число углов излучения плоской волны может быть в диапазоне от 10 до 20 [16], что повышает по сравнению с режимом FMC скорость регистрации эхосигналов 32-элементной линейной АР примерно в два или три раза, а для 64-элементной — в три или шесть раз. Так как в режим PWI излучение происходит всеми элементами АР, то в ОК вводится больше энергии в сравнении с режимом FMC. Это может оказаться очень важным при контроле ОК из материалов с большим поглощением (полиэтилен, плексиглас и т.п.). К сожалению, увеличение энергии, вводимой в объекты контроля со структурным шумом, не приведет к повышению отношения сигнал/шум (ОСШ). Для уменьшения уровня структурного шума, кроме известного приема, связанного с уменьшением длительности импульсов за счет математической обработки эхосигналов [17], можно воспользоваться способом, предложенным в работе [18], и который будет рассмотрен в следующем разделе.

2. ОБЪЕДИНЕНИЕ ПАРЦИАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОГЕРЕНТНОГО ФАКТОРА

Увеличить ОСШ при использовании АР можно следующим образом. Пусть АР находится в точке \mathbf{r}_w . Обозначим через $I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ ЦФА-изображение, восстановленное в заданных точках \mathbf{r}_i ОВИ по выстрелу номер m , т.е. по эхосигналам, измеренным всеми элементами АР при излучении элементом номер m . Тогда обычное ЦФА-изображение можно получить, сложив когерентно все изображения по выстрелам:

$$I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = \sum_{m=1}^{N_e} I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w), \quad (1)$$

где N_e — число элементов АР.

Но объединить парциальные повывстрельные изображения $I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ можно и иными способами. Например, можно рассчитать когерентный фактор для каждой точки \mathbf{r}_i повывстрельных изображений по формуле:

$$I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = CF \sum_{m=1}^{N_e} (I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)), \quad (2)$$

а в качестве восстановленного изображения рассматривать функцию:

$$I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) \cdot I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w). \quad (3)$$

Важное свойство когерентного фактора состоит в том, что при отсутствии шума амплитуды CF бликов отражателей равны единице. Поэтому амплитуды бликов изображения, полученные по формуле (1) или (3), будут примерно одинаковы.

В режиме тройного сканирования, когда АР сканирует, итоговое изображение можно получить по формулам (1) или (3), но в качестве парциальных изображений будут использоваться N_p изображений $I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ или $I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$, восстановленных для каждого положения АР:

$$I(\mathbf{r}_i) = \sum_{p=1}^{N_p} I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_{w,p}). \quad (4)$$

Понятно, что такой подход подходит и для повышения качества изображения при регистрации эхосигналов в режиме PWI.

3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для регистрации эхосигналов использовался ЦФА-дефектоскоп «АВГУР АРТ», разработанный и изготавливаемый «Научно-производственным центром неразрушающего контроля «ЭХО+» [19].

3.1. Образцы с отражателями малых размеров или с высоким поглощением

Для образцов такого типа уровень шума изображения отражателей определяется малыми размерами отражателя или высоким поглощением в ОК. И в первом, и во втором случае приходится увеличивать усиление при регистрации эхосигналов. Для таких случаев шум можно считать шумом белым, что позволяет предположить эффективную работу технологии PWI.

3.1.1. Образец с ПДО диаметром 1 мм на глубине 36 мм

Образец толщиной 60 мм с гранями с углом наклона 30 град был изготовлен из стали Ст20 со скоростью продольной волны 5,9 и поперечной 3,23 мм/мкс. В образце сделано четыре плоскодонных цилиндрических отверстий (ПДО) диаметром 1,0 мм, с глубиной залегания 2, 10, 20 и 36 мм. Для регистрации эхосигналов от ПДО № 4 на глубине 36 мм использовалась АР с частотой 5 МГц с 64 элементами размерами 0,55 мм с зазором между краями элементов 0,05 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град (стрела 40 мм, пробег в призме 20 мм). АР находилась на поверхности образца левее ПДО № 4 на расстоянии примерно –36 мм.

На рис. 1а представлено ФМС-изображение¹, полученное как когерентная сумма по формуле (1), а на рис. 1б — с учетом CF по формуле (3), и которое далее будем обозначать как ФМС×CF-изображение. На изображения линиями черного цвета нанесены контуры ПДО № 4. На обоих изображениях из-за высокого уровня шума идентифицировать блик ПДО № 4 не удастся, так как ОСШ можно оценить как –3дБ.

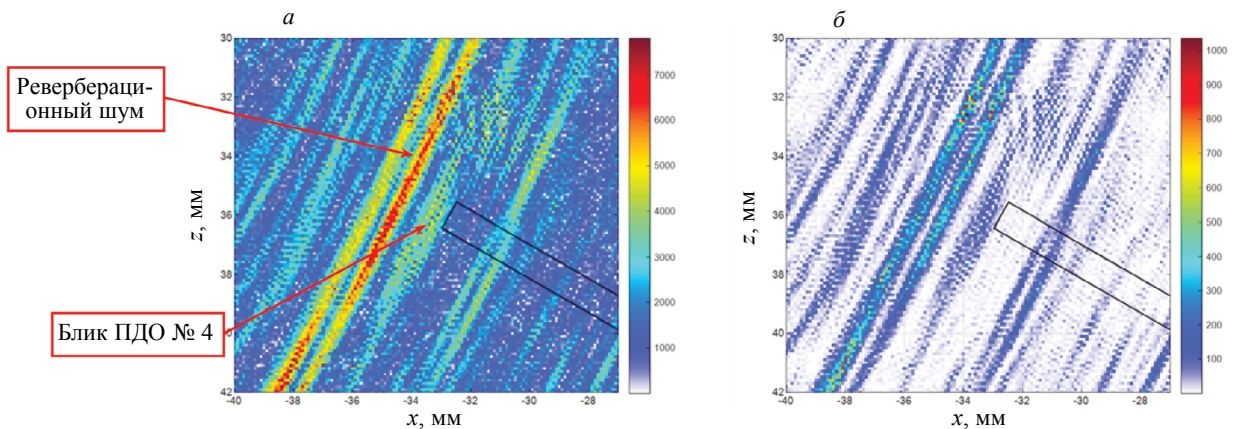


Рис. 1. Изображения ПДО № 4, полученные по эхосигналам измеренным методом ФМС при сложении повывстрельных парциальных изображений (а) и с учетом CF (б).

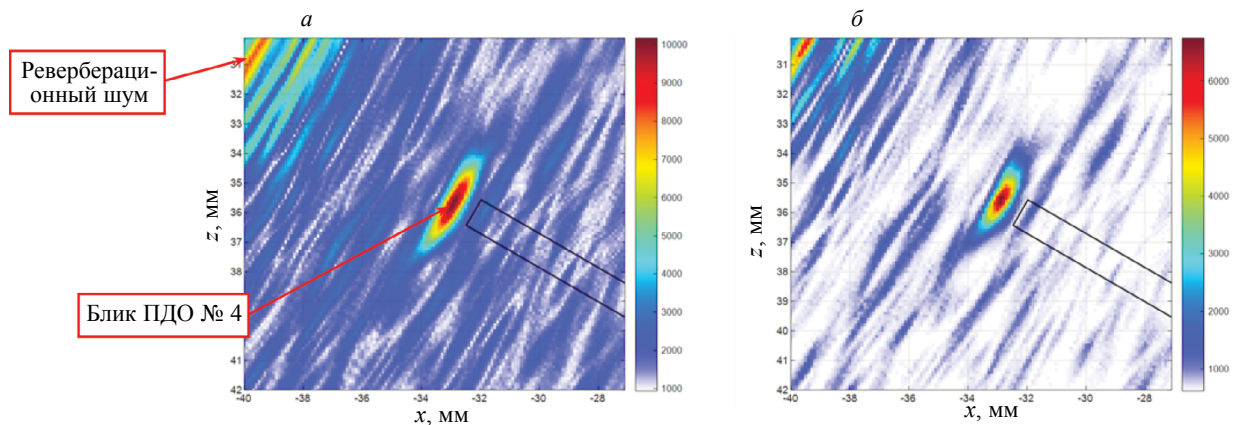


Рис. 2. Изображения ПДО № 4, полученные по эхосигналам измеренным методом PWI при сложении повывстрельных парциальных изображений (а) и с учетом CF (б).

¹Использование цвета для пояснения рисунков доступно только в электронном варианте статьи или в ее печатном издании журнала «Дефектоскопия».

На рис. 2а показано PWI-изображение, полученное как когерентная сумма по формуле (1), а на рис. 2б — с учетом CF по формуле (3). На изображения линиями черного цвета нанесены контуры ПДО № 4. На обоих изображениях блик ПДО № 4 можно уверенно обнаружить, так как ОСШ на PWI×CF-изображении повысился примерно на 10 дБ.

3.1.2. Сварное соединение в трубопровод толщиной стенки 120 мм из полиэтилена

В образце трубопровода со сварным соединением толщиной стенки 120 мм из полиэтилена были просверлены 5 боковых цилиндрических отверстий (БЦО) диаметром 3 мм на глубинах 20, 40, 60, 80 и 100 мм. Трубопровод состоит из двух слоев, которые хорошо видны на рис. 3, так как слои отличаются цветом. Неровность поверхности образца (рис. 3, выноска справа) достигает 1,5 мм. На левой выноске рис. 3 показана фотография корня сварного соединения, на котором обозначены точки L и R, стрелки желтого цвета определяют систему координат.

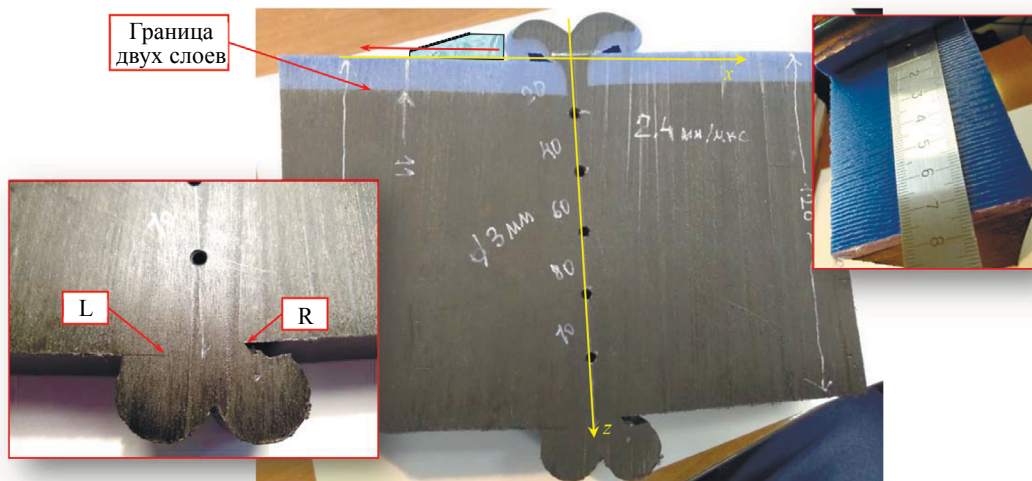


Рис. 3. Фрагмент трубопровода толщиной 120 мм из полиэтилена.

Для регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования использовалась АР с частотой 2,25 МГц и 20 элементами размером 1,1 мм с зазором между краями элементов 0,1 мм, установленная на плексигласовую призму с углом наклона 20 град. АР перемещалась по поверхности образца 35 раз с шагом 1 мм. Апертура сканирования (стрелка красного цвета) и АР в начале апертуры схематически показаны на рис. 3.

На рис. 4а показано FMC-изображение, объединенное по формулам (1) и (4), на котором видны блики БЦО за исключением самого верхнего. То, что не удалось увидеть блик самого верхнего

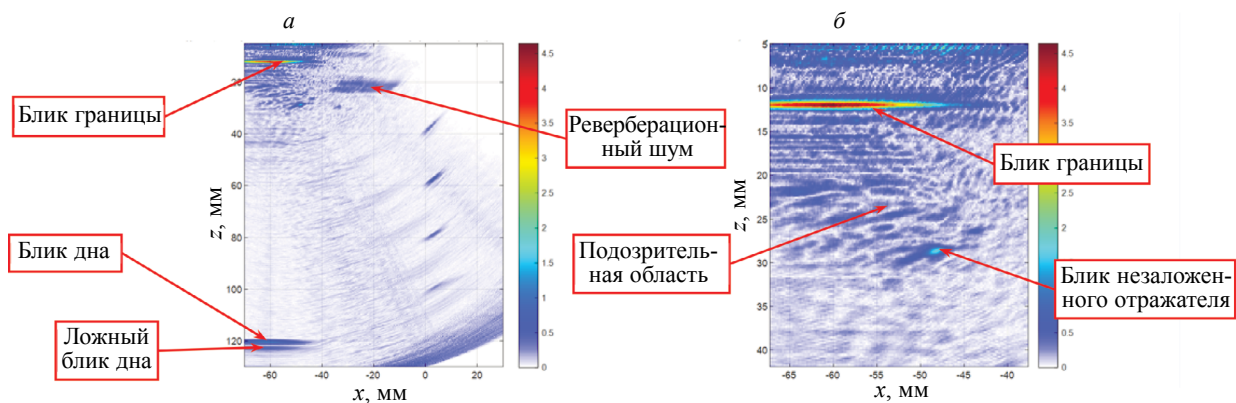


Рис. 4. FMC-изображение (а) и его фрагмент (б).

БЦО, объясняется тем, что скорость продольной волны материала призмы равна 2,7 мм/мкс, а скорость продольной волны в полиэтилене высокого давления — около 2,4 мм/мкс, поэтому максимальный угол ввода в ОК равен 58 град. Выбор для призмы другого материала, например, рексолита позволит вводить ультразвук в трубу под большими углами. На рис. 4б хорошо видна граница между материалами черного и голубого цвета, блик незаложенного отражателя и подозрительная область с бликами малой амплитуды. Неровная граница поверхности образца (см. рис. 3, выноска справа) привела к тому, что на изображении появился ложный блик дна из-за того, что зондирующий импульс многократно перерассеивается на неровностях поверхности, заполненных глицерином, который использовался в качестве контактной жидкости.

На рис. 5 показано FMC×CF-изображение, объединенное с учетом когерентного фактора по формулам (3) и (4). Отношение сигнал/шум по сравнению с рис. 4а, возросло примерно на 8 дБ, однако амплитуда блика самого глубокого БЦО уменьшилась примерно на 6 дБ. Это объясняется тем, что уровень шума достаточно близок к амплитуде этого БЦО.

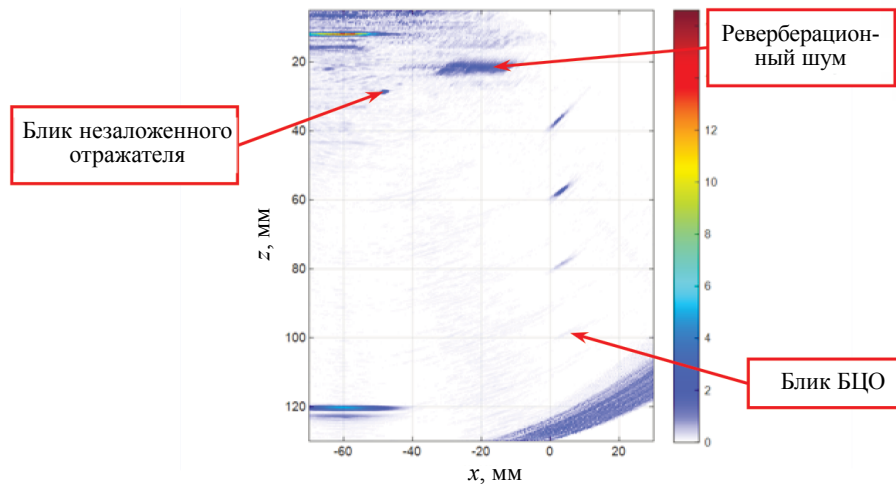


Рис. 5. FMC×CF-изображение.

На рис. 6 показано PWI-изображение, объединенное по формулам (1) и (4), на котором видны блики БЦО за исключением самого верхнего. По сравнению с рис. 4а уровень шума в области бликов БЦО уменьшился примерно на 6 дБ, но ревербационный шум стал больше. Из-за многократного перерассеивания зондирующего импульса на неровностях, заполненных глицерином, на PWI-изображении появились ложные блики довольно значительной амплитуды.

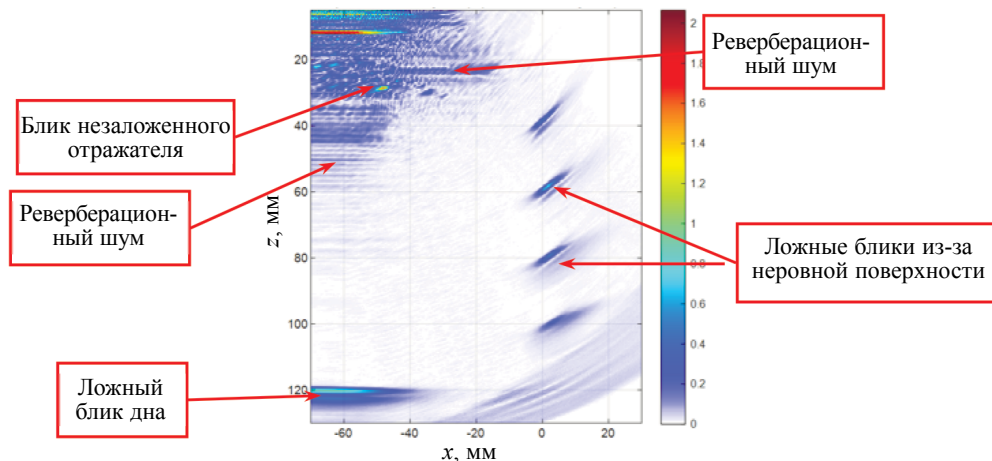


Рис. 6. PWI-изображение.

На рис. 7а показано PWI×CF-изображение, объединенное с учетом когерентного фактора по формулам (3) и (4). ОСШ по сравнению с рис. 6 возросло примерно на 10 дБ. Можно предположить, что на этом изображении видны точки L и R, показанные на левой выноске рис. 3. Блик между ними скорее всего сформирован по акустической схеме «прямой луч — отражатель — луч с отражением от дна». Появление такого блика характерно при использовании одноэлементных преобразователей или при контроле ОК большой толщины АР малых размеров. На рис. 7б показан фрагмент изображения. На нем подтверждается наличие незаложенного рассеивателя и подозрительной области, которые видны и на рис. 4а.

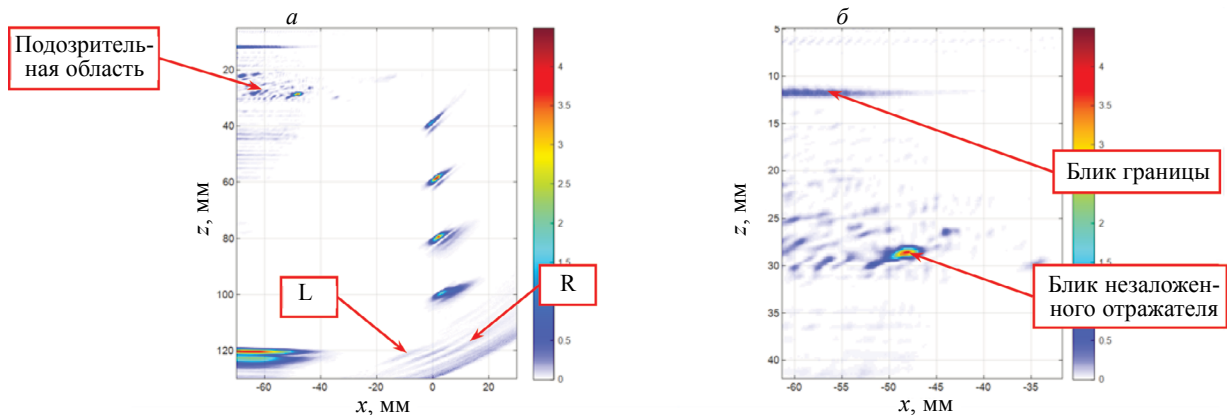


Рис. 7. PWI×CF-изображение (а) и его фрагмент (б).

3.2. Образцы с высоким структурным шумом

Режим PWI изначально не предназначался для работы с ОК из материалов с высоким уровнем структурного шума, так как увеличение энергии, излучаемой в образец, существенно не должно увеличивать ОСШ. Поэтому не стоит ожидать значительного уменьшения уровня структурного шума изображений, полученных по PWI-эхосигналам, в отличие от контроля объектов из материалов с высоким поглощением.

3.2.1. Образец с аустенитным V-образным сварным соединением

В образце толщиной 52 мм из нержавеющей стали с аустенитным V-образным сварным соединением было просверлено три БЦО диаметром 4 мм, которые пронумерованы от 1 до 3. Для регистрации эхосигналов использовалась АР с частотой 5 МГц и 64 элементами размером 0,55 мм с зазором между краями элементов 0,05 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 17 град (стрела 40 мм, пробег в призме 10 мм). Антенная решетка перемещалась по поверхности образца 5 раз с шагом 6 мм (режим тройного сканирования). Аустенитное сварное соединение незаметно на фотографии и поэтому показано на рис. 8 многоугольником с полупрозрачной заливкой желтого цвета, стрелка красного цвета соответствует области сканирования, стрелки желтого цвета определяют систему координат. АР схематически показана на рис. 8 в начальной точке апертуры сканирования.

3.2.1.1. Призма расположена на расстоянии –21 мм

Так как при таком расположении АР наиболее плохо будет восстанавливаться изображение БЦО № 1, расположенное у поверхности, то сосредоточим внимание на нем. На рис. 9 представлено FMC-изображение (а) и FMC×CF-изображение (б). На изображения линиями черного цвета нанесены контуры БЦО № 1. На обоих изображениях из-за ОСШ, равным примерно –3 дБ, идентифицировать блик БЦО № 1 не удастся.

На рис. 10 представлено PWI-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б). ОСШ PWI×CF-изображения возросло более чем на 12 дБ по сравнению с PWI-изображением. На обоих изображениях удастся уверенно идентифицировать блик БЦО № 1.

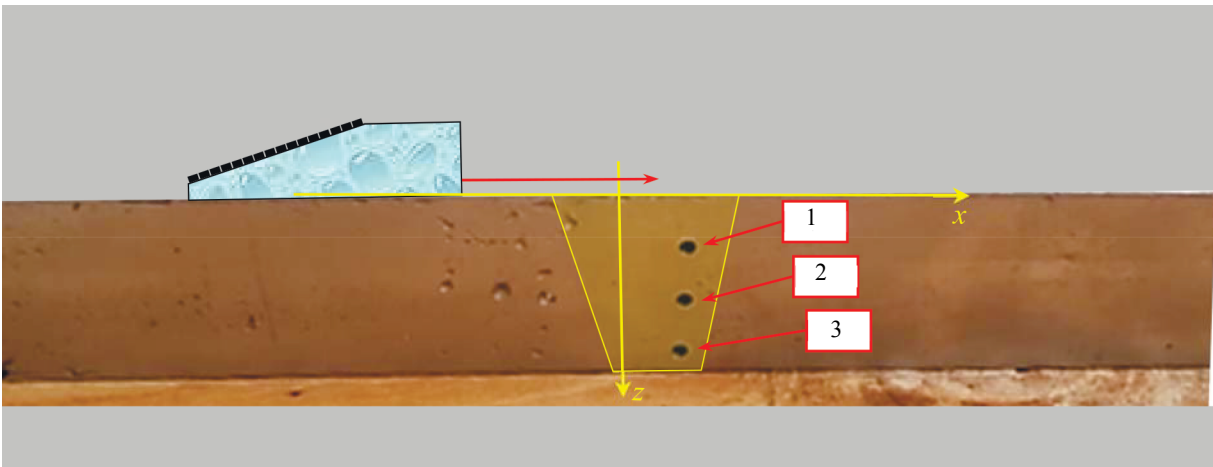


Рис. 8. Образец с аустенитным V-образным сварным соединением.

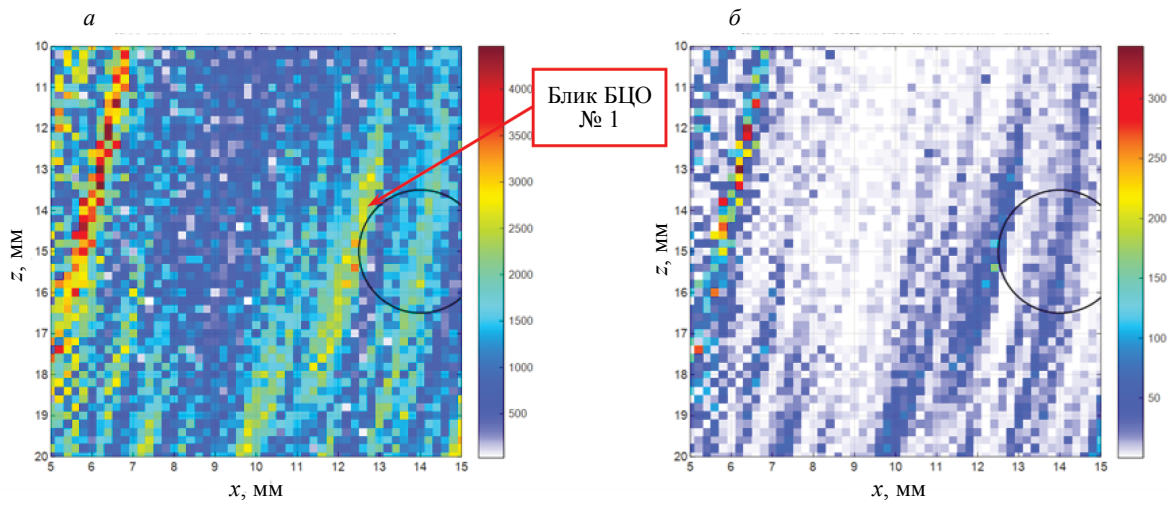


Рис. 9. FMC-изображение (а) и FMC×CF-изображение (б) блика границы БЦО № 1.

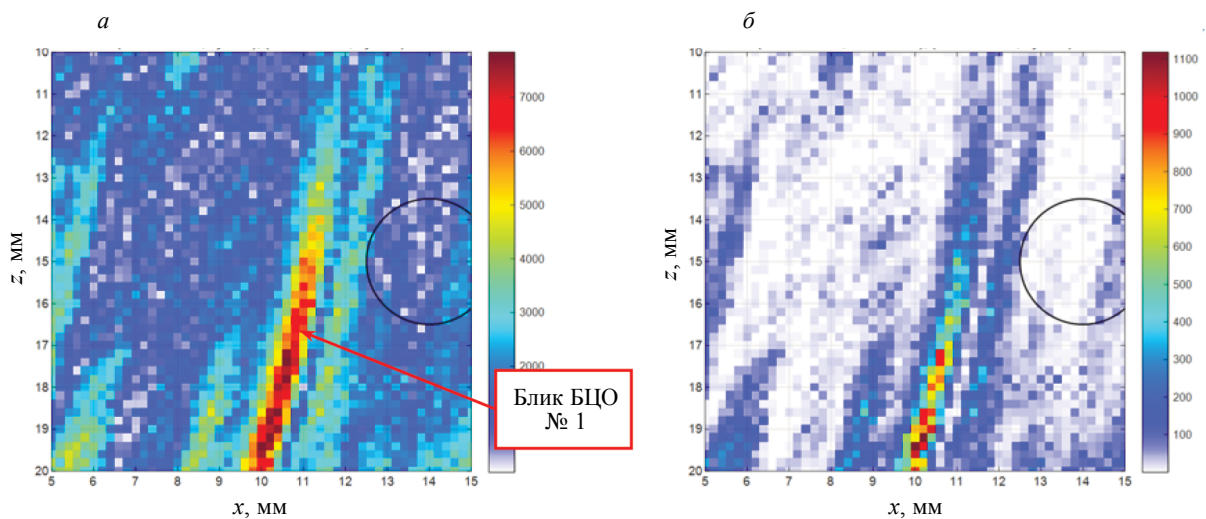


Рис. 10. PWI-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) блика границы БЦО № 1.

На рис. 11 показано FMC×CF-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) всего сварного соединения. На обоих рисунках хорошо видна левая граница сварного соединения, структурный шум сварного соединения и границы БЦО № 2 и № 3, а вот блик границы БЦО № 1 заметен только на рис. 11б.

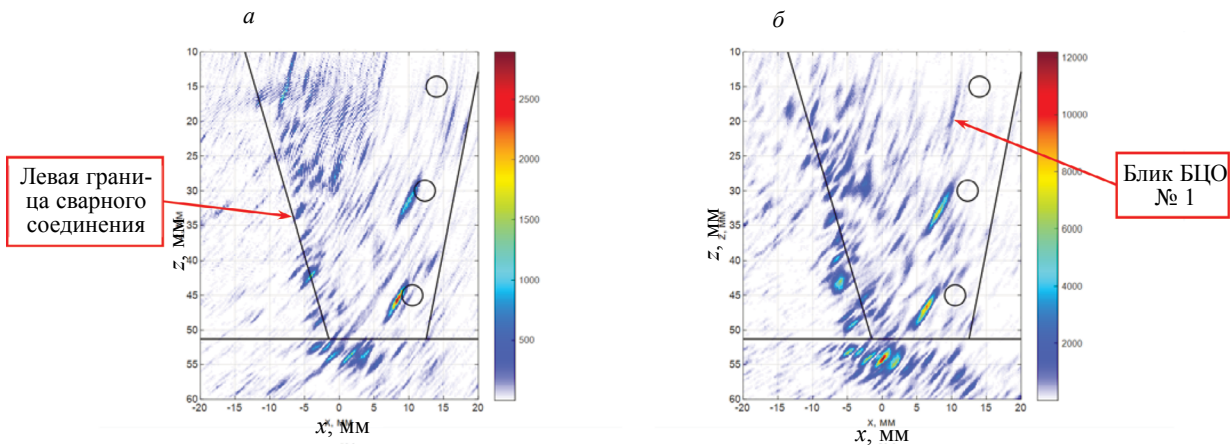


Рис. 11. FMC×CF-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) всего сварного соединения.

3.2.1.2. Режим тройного сканирования

На рис. 12 показано FMC×CF-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) всего сварного соединения, полученные в режиме тройного сканирования. На обоих рисунках хорошо видна левая граница сварного соединения, структурный шум сварного соединения и границы БЦО № 2 и № 3. Уровень шума по сравнению с рис. 11 уменьшился примерно на 8 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла примерно в два раза. Блик границы БЦО № 1 заметен только на рис. 11б.

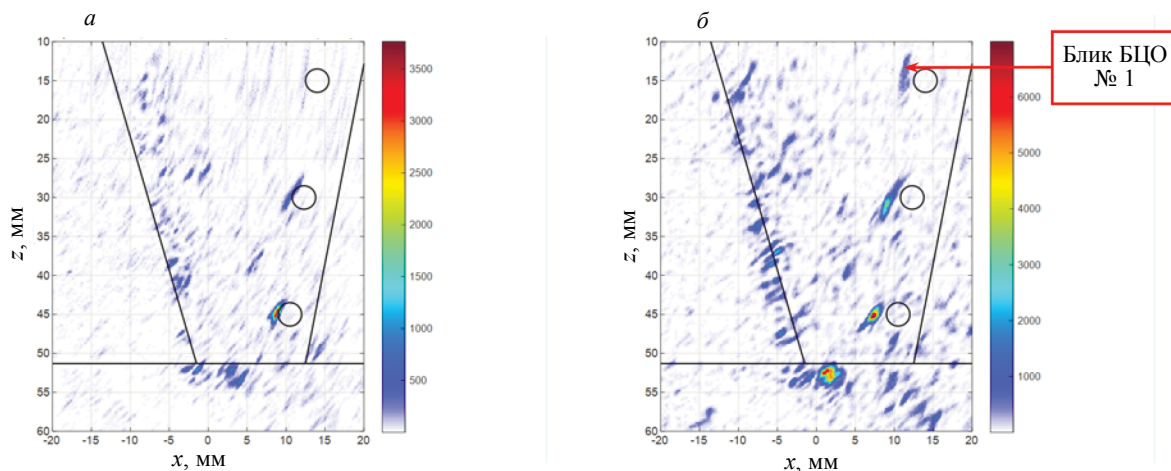


Рис. 12. FMC×CF-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) всего сварного соединения, полученные в режиме тройного сканирования.

3.2.2. Образец композитного сварного соединения трубопровода Ду1100

Образец трубопровода Ду1100 толщиной 64 мм представляет собой композитное сварное соединение, которое хорошо видно на рис. 13, соединяющее трубу из низкоуглеродистой стали и нержавеющей стали. В образце были просверлены три пронумерованных БЦО диаметром 3 мм. Для регистрации эхосигналов использовалась АР с частотой 5 МГц и 64 элементами размером

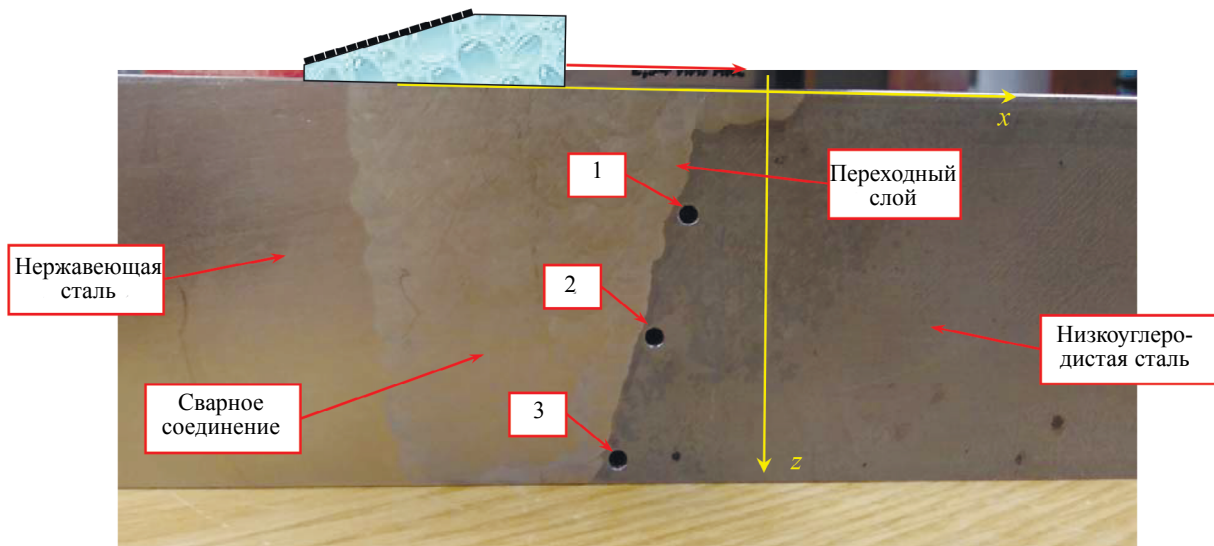


Рис. 13. Образец с композитным сварным соединением трубопровода Ду1100.

0,55 мм с зазором между краями элементов 0,05 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 17 град (стрела 40 мм, пробег в призме 10 мм). Антенная решетка перемещалась по поверхности образца 20 раз с шагом 1 мм (режим тройного сканирования). Стрелки желтого цвета на рис. 13 определяют систему координат, а стрелка красного цвета соответствует области сканирования.

Восстановление блика границы БЦО № 1 не является существенной проблемой, а вот обнаружение БЦО № 2 и особенно БЦО № 3 — это более сложные задачи. При восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным в режиме FMC и PWI, предполагалось, что звук распространяется в трех областях [20]: левая сторона это нержавеющая сталь (скорость продольной и поперечной волны 5,7 и 3,1 мм/мкс, плотность 7900 кг/м³), сварное соединение обладает трансверсальной анизотропией ($C_{11} = 261$, $C_{12} = 99$, $C_{13} = 107$, $C_{33} = 242$, $C_{44} = 89$, $C_{66} = 81$) ГП, плотность 7900 кг/м³, поворот кристаллических осей -45 град). Правая сторона — это перлитная сталь (скорость продольной и поперечной волны 5,94 и 3,24 мм/мкс, плотность 7800 кг/м³).

На рис. 14 представлено FMC-изображение (а) и FMC×CF-изображение (б). На изображениях линиями черного цвета нанесены контуры БЦО № 2 и № 3 и границы переходного слоя. На FMC-изображении на фоне структурного шума можно обнаружить БЦО № 2, а блик БЦО № 3 имеет

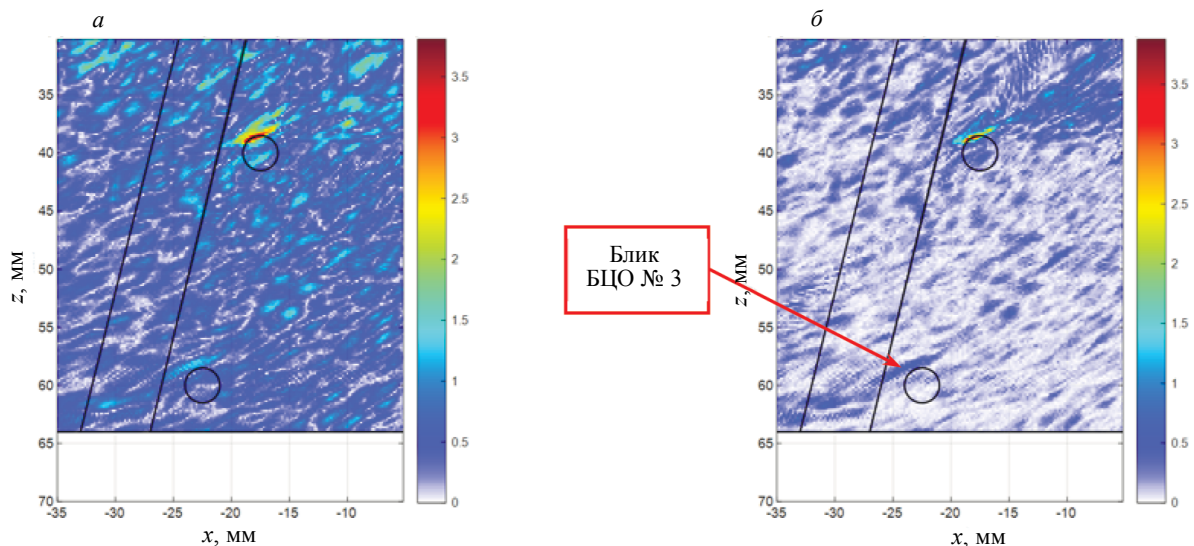


Рис. 14. FMC-изображение (а) и FMC×CF-изображение (б) блика границы БЦО № 2 и № 3.

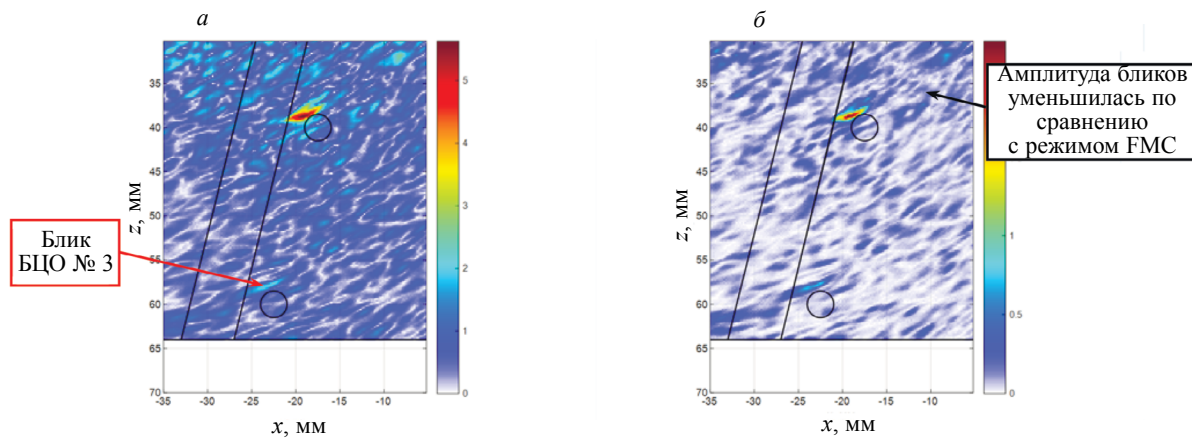


Рис. 15. PWI-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) блика границы БЦО № 2 и № 3.

амплитуду соразмерную уровню структурного шума. На FMC×CF-изображении уровень шума уменьшился примерно на 10 дБ и блик БЦО № 3 стал более заметен.

На рис. 15 представлено PWI-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б). На изображениях линиями черного цвета нанесены контуры БЦО № 2 и № 3 и границы переходного слоя. На PWI-изображении блик БЦО № 3 на фоне структурного шума едва заметен. На FMC×CF-изображении уровень шума по сравнению с рис. 15б уменьшился примерно на 10 дБ и блик БЦО № 3 стал более заметен.

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы.

1. При работе с образцами, имеющими высокое поглощение, режим PWI показывает заметное превосходство над режимом FMC по уровню шума изображения. Например, ОСШ в режиме PWI на 9 дБ выше, чем в режиме FMC (см. рис. 1 и рис. 2).

2. Объединение парциальных изображений как для режима PWI, так и для FMC с использованием когерентного фактора по формулам (3) и (4) позволило повысить ОСШ более чем на 6 дБ, что особенно ценно при работе со сложноструктурными материалами.

3. В режиме PWI по сравнению с режимом FMC удалось повысить ОСШ изображений более чем на 3 дБ (см. рис. 14б и рис. 15б), несмотря на то, что режим PWI изначально не предназначался для работы с образцами с высоким структурным шумом.

4. Так как в режиме PWI использовались от 15 до 20 плоских волн, то скорость регистрации эхосигналов для 64-элементной АР возросла примерно в 3,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications // Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 12.03.2022).
2. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
3. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
4. Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. The Wavenumber Algorithm for Full-Matrix Imaging Using and Ultrasonic Array // NDT Int. 2006. V. 39. № 7. P. 525—541.
5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
6. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.
7. Технология NVIDIA CUDA™. URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/technologies/cuda-x/> (дата обращения: 12.03.2022).

8. Угрюмов Е.П. Глава 7. Программируемые логические матрицы, программируемая матричная логика, базовые матричные кристаллы / Цифровая схемотехника. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2. БХВ-Петербург, 2004. С. 357.
9. Stolt R.H. Migration by Fourier transform // *Geophysics*. 1978. V. 43. № 1. P. 23—48.
10. Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. М.: Издательство МГУ, 1989. 152 с.
11. Montaldo G., Tanter M., Bercoff J., Bence N., Fink M. Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*. 2009. V. 56. No. 3. P. 489—506.
12. Merabet L., Robert S., Prada C. Comparative study of 2D ultrasound imaging methods in the f-k domain and evaluation of their performances in a realistic NDT configuration // *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2019. V. 66. No. 4. P. 772—788. DOI: 10.1063/1.5031654
13. Jeune L., Robert S., Villaverde E.L., Prada C. Plane Wave Imaging for ultrasonic non-destructive testing: Generalization to multimodal imaging // *Ultrasonics*, Elsevier. 2016. V. 64. P. 128—138. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.08.008
14. Bazulin E.G., Evseev I.V. Applying Plane Wave Imaging Technology in Ultrasonic Nondestructive Testing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 6. P. 423—436. [Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Применение технологии Plane Wave Imaging в ультразвуковом неразрушающем контроле // *Дефектоскопия*. 2021. № 6. С. 3—16.]
15. Shevaldykin V.G., Samokrutov A.A. Digital Focusing of Aperture when Probing Test Object by All Elements of Antenna Array in One Emission–Reception Cycle // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 58. No. 2. P. 81—95. [Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А. Цифровая фокусировка апертуры при зондировании объекта контроля всеми элементами антенной решетки в одном цикле излучение-прием // *Дефектоскопия*. 2022. № 2. С. 13—27.]
16. Jensen J., Stuart M.B., Jensen J.A. Optimized Plane Wave Imaging for Fast and High-Quality Ultrasound Imaging // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2016. V. 63. № 11. P. 1922—1934. DOI: 10.1109/TUFFC.2016.2591980
17. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум // *Контроль. Диагностика*. 2015. № 9. С. 10—27.
18. Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Уменьшение уровня шума изображения отражателей, восстановленного по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой / Россия, Москва, «XXVII международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», МЭИ, 11-12 марта 2021 г. С. 303.
19. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 12.03.2022).
20. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учетом анизотропии материала объекта контроля // *Дефектоскопия*. 2015. № 4. С. 42—52.

АНИЗОТРОПНЫЕ УПРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ СОСНЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2022 г. Тугба Йылмаз Айдын^{1,*}

¹Университет прикладных наук Испарты,
Испарта, Турция

*e-mail: tugbayilmaz@isparta.edu.tr

Поступила в редакцию 26.02.2022; после доработки 27.05.2022

Принято к публикации 27.05.2022

О влиянии температуры и продолжительности воздействия на 12 констант упругости турецкой красной сосны до сих пор не сообщалось. В данной работе с помощью методов неразрушающего контроля исследовали влияние температуры (110, 160 и 210 °С) и длительности обработки (2, 5 и 8 ч) на модули Юнга, модули сдвига, коэффициенты Пуассона. Ультразвук (поперечная волна — 1 МГц, а продольная — 2,25 МГц) проходил по оси и под углом 45 ° к оси в образцах размерами около 20×20×20 мм. Скорости ультразвуковой волны (СУЗ) рассчитывали для определения диагональных и недиагональных элементов матрицы жесткости. Матрица податливости, которая использовалась для расчета упругих констант, была получена путем обратного преобразования матрицы жесткости. Согласно полученным результатам, последовательного увеличения или уменьшения упругих констант с увеличением продолжительности воздействия и величины самой температуры, как правило, не наблюдалось. Только E_L при 110 и 160 °С, G_{TL} при 110 °С, а также νRL и νLR при 210 °С показали последовательное уменьшение. Однако, согласно литературе, при обработке при низких температурах наблюдали некоторые улучшения, которые противоречат результатам данного исследования, особенно для значений модуля упругости. Например, при обработке 210 °С — 2 ч величины модулей увеличились, за исключением G_{TR} . То же самое верно и для 210 °С — 5ч, за исключением E_L и G_{TR} . Согласно результатам дисперсионного анализа, различия между средними значениями всех свойств статистически значимы, за исключением νLT и νRT ($P > 0,05$). При сравнении с заявленными значениями имеются значительные различия между V_{LL} и E_L , в то время как для плотности все совпадает. Среднее значение V_{LL} немодифицированных образцов было примерно на 28,8 % ниже, чем заявленная скорость, и считается, что это может быть одной из причин низкого среднего динамического значения E_L (5792 МПа) немодифицированных образцов, чем заявленное статическое значение 9200 МПа, хотя в литературе говорится, что динамические значения обычно выше, чем статические.

Ключевые слова: красная сосна, ультразвук, константы упругости, термообработка.

DOI: 10.31857/S0130308222070028, EDN: BOBIDP

1. ВВЕДЕНИЕ

Турецкая красная сосна является одним из местных видов в Средиземноморском регионе. Это один из основных видов деревьев, используемых при восстановлении лесов в данном регионе [1]. Кроме того, она является одним из основных источников древесины и древесных продуктов в Турции не только в производстве конструкционных строительных материалов, но и для производства целлюлозы, бумаги и т.д. Когда материал рассматривается как строительный, на первый план должны выходить физико-механические свойства. Однако, если рассматривать древесину как строительный материал, то порода, направление волокон, нагрузка (тип и продолжительность), содержание влаги, температура и наличие дефектов [2] являются одними из основных факторов, влияющих на механические свойства древесины. Действительно, в некоторых из них вызываются необратимые деформации, которые являются критическими для использования в качестве конструкционного материала. Например, при воздействии температуры на древесину наблюдаются как обратимые, так и необратимые эффекты. Но особенно высокие температуры и длительное воздействие оказывают негативное влияние на физические и механические свойства. Более того, механические свойства имеют тенденцию к снижению при повышении температуры, а чувствительность древесины к температуре высока во влажных условиях, когда повышение температуры вызывает снижение содержания влаги в древесине [2]. Поэтому для получения оптимальных свойств, подразумевая эстетический вид, несущую способность, срок службы и т.д., необходимы оптимальные параметры термообработки.

Взаимодействие с окружающей средой является основным механизмом для образования деградации в древесине или изделиях на ее основе. Взаимодействие между древесиной (или изделиями из древесины) и окружающей средой может быть ограничено или исключено различными способами, например, нанесением поверхностных покрытий или модификациями, такими как термическая обработка. Окраска древесины является одним из широко используемых, самых старых и

дешевых способов формирования консервирующего слоя, защищающего от внешних факторов. Однако покраска требует регулярного обслуживания в течение жизненного цикла древесины или деревянного изделия из-за образования трещин, впитывания влаги и потускнения поверхности. В частности, термообработка является одним из методов модификации древесины. Благодаря полученным улучшениям, термообработка древесины становится одним из основных и широко используемых коммерческих методов модификации.

К текущему моменту термообработке подвергалось большое разнообразие пород и определялись их свойства. Однако упругие свойства термообработанной турецкой красной сосны были оценены в ограниченном контексте следующим образом: температура (120, 150, 180 и 210 °C) и продолжительность (2, 5 и 8 ч) повлияли на продольный модуль Юнга (E_L) при испытании на сжатие (ИС) с использованием экстензометра контактного типа [3, 4], при ультразвуковом (УЗ) контроле [4] — на модуль упругости (МУ) при изгибе [3], а температура (130, 180 и 230 °C) и продолжительность (2 и 8 ч) повлияли на МУ при изгибе [5]. Кроме того, работа Akyıldız и Ateş [6] — одно из немногих исследований, посвященных физическим свойствам термообработанной турецкой красной сосны. Авторы оценили влияние термообработки (130, 180 и 230 °C в течение 2 и 8 ч) на равновесную влажность (РВ), а значение РВ (14,8%) снизилось до 7,8 и 7,3 %, когда образцы подвергались воздействию 230 °C в течение 8 ч соответственно. Авторы заявили, что из-за высокого содержания смолы влияние термической обработки на турецкую красную сосну отличается в сравнении с другими видами древесины.

Помимо влияния термической обработки на константы упругости в следующих исследованиях касались некоторых физико-механических свойств турецкой красной сосны. Анатомические (количество лучей и ширина трахеид, ранней и поздней древесины), химические (соотношения лигнина, холоцеллюлозы и альфа-целлюлозы и т. д.) и волокнистые (длина и ширина волокон, ширина просвета и толщина клеточной стенки) свойства для четырех различных зон сообщались Ateş et al. [7]. Aydın [8] оценил образование смолы и провел ее анализ. Baysal и др. [9] выяснили свойства горения. Бекташ и др. [10] оценили влияние местообитания на прочность на сжатие (ПС), коэффициент прочности на разрыв (КПР) и прочность при растяжении (ПР). Göker et al. [11] оценили влияние углов спиральных зерен на плотность, усадку, точку насыщения волокна и максимальное содержание влаги (МСВ). Göker et al. [12] оценили влияние углов спиральных зерен на МУ при изгибе (6822—9806 МПа). Güntekin et al. [13] определили статический и динамический МУ с использованием трех различных классов бревен путем испытания на изгиб в трех точках и измерения волны напряжения соответственно. Güntekin et al. [14] с помощью линейного моделирования и искусственной нейронной сети предсказал МУ при изгибе пиломатериалов разных классов. Güntekin et al. [15] определили модули Юнга (МЮ) и коэффициенты Пуассона (КП) и модули сдвига (МС) для немодифицированной турецкой красной сосны (плотность 0,53 г/см³ и 12,5 % МСВ). Aydın и Ciritcioğlu [16] определили модули сдвига с использованием ультразвука (1 МГц) с использованием многогранных образцов. Günay и Sönmez [17] определили модуль сдвига (G_{12}), модуль Юнга (E_{33}) и коэффициент Пуассона (ν_{31}) турецкой сосны. Однако авторы не упомянули, была ли это сосна турецкая или нет.

Shukla and Kamdem [18] сравнили различия физических (при сушке) и механических свойств (КПР, МУ и ПР) сосны красной для трех разных зон произрастания. МУ варьировался от 5,43 до 5,94 ГПа для сосны, произрастающей в Оскоде (Мичиган) и Манитобе (Массачусетс), и 9,5 и 11,2 ГПа для Канады и США соответственно в целом [19]. Эти значения сопоставимы со значениями, указанными вышеупомянутыми исследователями для турецкой красной сосны. Кроме того, ниже приведены некоторые исследования, проведенные для сосны красной. Gao et al. [20] рассмотрели влияние температурного диапазона (от -40 до 40) на скорость ультразвуковой волн (СУЗ) частоты 22 кГц, а также статические и динамические МУ. Newton [21] оценил взаимосвязь между скоростью волны продольного напряжения и динамической МУ и плотностью. Özşahin et al. [22] использовали метод анализа иерархии и многокритериальную оптимизацию на основе методов анализа относительных значений для отбора хвойных пород.

Так же имеется недавняя работа по определению упругих констант хвойных деревьев (Сосна лучистая) с использованием ультразвука (УЗ) [23]. Однако упругие свойства термообработанной турецкой красной сосны определялись в ограниченном количестве исследований, а полноупругие свойства не оценивались до сих пор. Кроме того, все физические, механические и химические характеристики сосны красной турецкой в значительной степени зависят от температуры [5]. Поэтому в этом исследовании была предпринята попытка выяснить влияние уровней продолжительности воздействия при трех различных значениях температуры на полные упругие свойства турецкой красной сосны с помощью неразрушающего контроля и оценки с использованием УЗ.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании изучали калабрийскую сосну или турецкую красную сосну. Бревна высотой до 1,5 м использовались для распиловки и подготовки реек. Заболонные участки досок использовались для подготовки кубических образцов. Как видно на рис. 1, для измерений были подготовлены образцы не менее $20 \times 20 \times 20$ мм (по оси и с отклонением от оси на 45°). Образцы последовательно готовились из реек, и каждая группа для конкретной температуры имела свои контрольные образцы для выяснения возможных изменений. Таким образом, средние показатели групп, подвергнутых температурной обработке, сравнивались внутри и между группами.

Сушильный шкаф (Nuve FN 500, Анкара, Турция) использовался для температурной обработки кубических образцов при трех различных уровнях температуры (110, 160 и 210 °C) и продолжительности воздействия (2, 5 и 8 ч). Некоторые образцы разломались на части, особенно при восьмичасовой выдержке при температуре 210 °C. Разломанные образцы были заменены последовательно вырезанными устойчивыми образцами. После температурной обработки для кондиционирования образцов применяли камеру влажности Memmert (Mettler+Co. KG, Швабах, Германия) при температуре 20 ± 1 °C и относительной влажности 65 %. Затем рассчитывали плотность в соответствии со стандартом TS 2472 [24].

Ортотропные упругие параметры как функция температурной обработки определяли динамически с помощью распространения ультразвуковых волн в кубических образцах. Продольные 2,25 МГц и поперечные 1 МГц ультразвуковые волны распространялись и измерялось время пролета (ВП) для расчета СУЗ. Диагональные (C_{ii}) и недиагональные (C_{ij} и C_{ji}) элементы матрицы жесткости $[C]$ (1) были рассчитаны по формулам, представленным в табл. 1. Следовательно, как представлено в [25], двенадцать упругих констант, зависящих от температуры, были определены с помощью матрицы соответствия $[S]$ (2), которая является обратной матрицей жесткости.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где C_{ii} и C_{ij} — диагональные и недиагональные элементы матрицы жесткости соответственно.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{21}}{E_R} & -\frac{\nu_{31}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{32}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_L} & -\frac{\nu_{23}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где E_i и G_{ij} — модули Юнга и модули сдвига в главном направлении, а ν_{ij} — коэффициент Пуассона.

Таблица 1

Компоненты СУЗ и соответствующие уравнения для расчета элементов матрицы жесткости [26, 27]

Распространение-Поляризация	Тип волны		Уравнение для диагональных и недиагональных элементов
Ось (<i>L</i> , <i>R</i> и <i>T</i>)	V_{LL}	Продольная	$C_{11} = C_{LL} = \rho V_{LL}^2$
	V_{RR}		$C_{22} = C_{RR} = \rho V_{RR}^2$
	V_{TT}		$C_{33} = C_{TT} = \rho V_{TT}^2$
	$V_{TR/RT}$	Поперечная (поперечная)	$C_{44} = C_{RT} = (\rho V_{RT}^2 + \rho V_{TR}^2)/2$
	$V_{LT/TL}$		$C_{55} = C_{LT} = (\rho V_{LT}^2 + \rho V_{TL}^2)/2$
	$V_{LR/RL}$		$C_{66} = C_{RL} = (\rho V_{RL}^2 + \rho V_{LR}^2)/2$
От оси (<i>RT</i> 45°)	$V_{RT/RT}$	Квазипоперечная (Поперечная)	$(C_{23} + C_{44})n_2n_3 = \pm\sqrt{[(C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]}$
От оси (<i>LT</i> 45°)	$V_{LT/TL}$		$(C_{13} + C_{55})n_1n_3 = \pm\sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{55}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{55}n_1^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]}$
От оси (<i>LR</i> 45°)	$V_{LR/RL}$		$(C_{12} + C_{66})n_1n_2 = \pm\sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]}$

Примечание: ρ , кг/м — плотность древесины; V_{ii} — скорость продольной волны по направлению оси, м/с; V_{ij} — скорость поперечной волны по направлению оси с поляризации вдоль перпендикулярных осей, м/с; V_{ij45° — скорость квазипоперечной волны, измеряемая при смещении по плоскости на угол 45° [28], где V_α — скорость квазипоперечной волны α в плоскости *LR*, $n_1 = \cos\alpha$, $n_2 = \sin\alpha$, $n_3 = 0$ для C_{23} ; V_α — скорость квазипоперечной волны α в плоскости *LT* и $n_1 = \cos\alpha$, $n_3 = \sin\alpha$, $n_2 = 0$ для C_{13} ; V_α — скорость квазипоперечной волны α в плоскости *RT* и $n^2 = \cos\alpha$, $n_3 = \sin\alpha$, $n_1 = 0$ для C_{12} [27].



Рис. 1. Изменение цвета образцов, подвергнувших трем различным температурам и временам выдержки.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средние значения плотностей и СУЗ представлены в табл. 2. Плотности немодифицированных образцов варьировались от 0,49 до 0,51 г/см³. Согласно исследованиям, плотность (гр/см³) немодифицированной древесины турецкой красной сосны составляла 0,49—0,53 [11], 0,54 [3], 0,49—0,50 [4], 0,56 (12,7 % МС) [16], 0,5—0,62 (18—36 % МС) [13, 14] и 0,51 [10]. Как видно из таблицы, результаты данного исследования находились в диапазоне указанных значений. Ожидаемо, что плотность снижалась с повышением температуры, но длительная обработка при более высоких температурах вызывала ее интенсивное снижение. Более того, максимальное снижение (20,4 %) наблюдалось при 210 °С в течение 8 ч обработки, что примерно в два раза выше, чем по данным [4] для той же температуры и продолжительности.

Атеş и др. [5] сообщили, что плотность (0,53 г/см³) уменьшилась примерно на 15 % при обработке образцов при 230 °С (8 ч). Снижение плотности не превысило 5 % при 130 °С, в то время как при 180 °С относительное снижение составило более 5 %. Как и в данном исследовании, наблюдается, что при увеличении продолжительности воздействия влияние температуры становится более выраженным.

В отличие от плотности в плане тенденции к снижению с увеличением времени и температуры обработки, скорости продольной и поперечной УЗ волн продемонстрировали нестабильное поведение. Как видно из табл. 2, в группах наблюдалось как их уменьшение, так и их увеличение при увеличении продолжительности обработки. Такое поведение очевидно, особенно для V_{TT} (от 24,4 до -2,1 %) и V_{RT} (от 3,9 до -4,7 %). Наиболее выраженное положительное и отрицательное влияние температуры и продолжительности на СУЗ наблюдалось для V_{TT} (24,4 % @160 °С—2 ч) и V_{RT} (-17 % @210 °С—8 ч) соответственно. Наименьшее положительное и отрицательное влияние температуры и продолжительности на СУЗ наблюдалось для V_{LL} (0,1 % @110 °С—2 ч) и V_{RR} (-0,2 % @110 °С—2 ч) соответственно. Таким образом, более высокая температура и длительная экспозиция вызывали интенсивное влияние на СУЗ, но не линейно в положительную или отрицательную сторону. Yılmaz Aydın и Aydın [4] сообщили, что из продольных и поперечных СУЗ только V_{LL} термообработанной турецкой красной сосны имеет значения от 4847 (210 °С—8 ч) до 5520 (120 °С—5 ч) м/с. Действительно, V_{LL} значительно увеличилась (7,1 %) при обработке при 120 °С в течение 2 ч.

Таблица 2

Средние значения и коэффициенты вариации для плотности и СУЗ

Группы	Плотность, кг/м ³	СУЗ, м/с								
		V_{LL}	V_{RR}	V_{TT}	V_{LR}	V_{LT}	V_{RT}	V_{LR45}	V_{LT45}	V_{RT45}
110°С—С	491 [4]	3808 [4]	1908 [6]	1160 [6]	1296 [2]	1238 [2]	635 [18]	1432 [3]	1096 [3]	760 [9]
110°С—2 ч	484 [6] (-1.4)	3811 [3] (0.1)	1903 [7] (-0.2)	1292 [8] (11.4)	1299 [3] (0.3)	1230 [2] (-0.7)	694 [15] (9.3)	1421 [5] (-0.7)	1129 [4] (3)	762 [12] (0.3)
110°С—5 ч	480 [2] (-2.2)	3750 [4] (-1.5)	1914 [5] (0.3)	1208 [6] (4.2)	1320 [5] (1.9)	1232 [1] (-0.5)	609 [11] (-4)	1403 [7] (-2)	1101 [3] (0.5)	765 [6] (0.8)
110°С—8 ч	475 [4] (-3.2)	3670 [2] (-3.6)	1944 [5] (1.9)	1258 [8] (8.5)	1304 [2] (0.6)	1230 [2] (0.7)	605 [10] (-4.7)	1385 [5] (-3.2)	1111 [4] (1.4)	737 [8] (3)
160°С—С	505 [5]	3597 [8]	1890 [9]	1352 [10]	1353 [3]	1272 [4]	642 [23]	1367 [5]	1159 [5]	816 [10]
160°С—2 ч	486 [5] (-3.8)	3539 [6] (-1.6)	1952 [7] (3.3)	1682 [7] (24.4)	1337 [4] (-1.2)	1246 [2] (-2)	744 [16] (15.8)	1384 [6] (1.2)	1215 [5] (4.8)	831 [8] (1.9)
160°С—5 ч	450 [5] (-10.8)	3573 [7] (-0.7)	1977 [5] (4.6)	1324 [8] (-2.1)	1360 [5] (0.5)	1260 [3] (-1)	714 [18] (11.2)	1375 [4] (0.6)	1124 [4] (-3)	784 [7] (-3.9)
160°С—8 ч	455 [6] (-10.0)	3508 [8] (-2.5)	1955 [6] (3.4)	1437 [15] (6.3)	1385 [4] (2.4)	1279 [4] (0.5)	761 [14] (18.5)	1343 [8] (-1.7)	1126 [4] (-2.8)	787 [10] (-3.5)
210°С—С	505 [7]	3622 [4]	1801 [7]	1228 [8]	1309 [4]	1209 [3]	730 [14]	1320 [5]	1070 [5]	705 [5]
210°С—2 ч	489 [8] (-3.0)	3683 [5] (1.7)	1918 [9] (6.5)	1265 [13] (3)	1380 [7] (5.4)	1261 [6] (4.3)	726 [17] (-0.6)	1416 [7] (7.3)	1105 [7] (3.3)	746 [7] (5.8)
210°С—5 ч	465 [10] (-7.9)	3584 [9] (-1)	2030 [9] (12.7)	1345 [10] (9.6)	1398 [5] (6.8)	1301 [4] (7.6)	693 [18] (-5)	1484 [6] (12.5)	1154 [6] (7.8)	765 [8] (8.6)
210°С—8 ч	402 [10] (-20.4)	3444 [4] (-4.9)	1780 [12] (-1.2)	1314 [6] (7)	1345 [3] (2.7)	1268 [4] (4.9)	606 [22] (-17)	1377 [7] (4.4)	1113 [3] (4.1)	759 [6] (7.8)

Примечание: [] — коэффициент вариации, () — % отличия от контрольного значения.

Напротив, наибольшее снижение составило 7,8 % при обработке при 210 °С в течение 8 ч. Как видно из таблицы, наибольшее увеличение и уменьшение V_{LL} составило 1,7 % (210 °С—2 ч) и 4,9 % (210 °С—8 ч) соответственно. Более того, такого заметного положительного влияния продолжительности воздействия при относительно низких температурах (110 или 150 °С) в данном исследовании

не наблюдалось. Действительно, при сравнении скоростей V_{LL} в данном исследовании значительно ниже, чем сообщаемые значения. Например, среднее значение в данном исследовании примерно на 28,8 % ниже, чем заявленные значения. Эти значительные различия могут быть связаны с различием в насаждениях и условиях выращивания. Однако такие большие различия не наблюдались для скоростей поперечных волн. Например, зарегистрированные значения для V_{LR} , V_{LT} и V_{RT} составляют 1408, 1306 и 666 м/с соответственно [16], а различия между целыми контрольными значениями данного исследования составляют -6,3, -5,1 и 0,4 % соответственно. Таким образом, скорости поперечных волн через ось сопоставимы, в то время как вне оси (V_{ij45°) недоступны из-за отсутствия зарегистрированных значений. Как видно из таблицы, влияние продолжительности воздействия на скорость смещенной от оси поперечные УЗ волны является умеренным при температурах 110 и 160 °С, а при 210 °С — интенсивным. Максимальный положительный и отрицательный эффект (12,5 %) наблюдался для V_{LR45° при 210 °С в течение 5 ч и V_{RT45° при 160 °С в течение 5 ч соответственно. Однако, как и при распространении продольных и поперечных волн вдоль оси, линейного отрицательного или положительного влияния не наблюдалось, за исключением V_{LR45} и V_{RT45} — для температурного уровня 110 °С с увеличением продолжительности.

Средние значения модулей упругости представлены в табл. 3. E_L , E_R и E_T варьировались от 4165 МПа (210 °С—8 ч) до 6356 МПа (110 °С—С), 956 МПа (210 °С—8 ч) до 1415 МПа (110 °С—С) и 512 МПа (210 °С—8 ч) до 858 МПа (160 °С—2 ч) соответственно. Зарегистрированные значения модулей Юнга (12,5 % МС), определенные методом ИС, составляют 9200, 975 и 672 МПа соответственно [15]. Guntekin et al. [3] сообщили о средних значениях 10111 МПа (2 ч), 13022 МПа (8 ч) и 17093 МПа (5 ч) E_L для контрольных образцов и 11145 МПа (210 °С—8 ч) — 20104 МПа (120 °С—5 ч) для условной выборки, рассчитанных методом ИС. Авторы также сообщили о влиянии термообработки на средние значения МУ при изгибе: 8181 МПа (2 ч), 10519 МПа (8 ч) и 12365 МПа (5 ч) для контрольных образцов и от 8034 МПа (180 °С—2 ч) до 13584 МПа (120 °С—5 ч) для условной выборки. Yılmaz Aydın и Aydın [4] сообщили о средних значениях 13263 МПа и 8566 МПа для контрольных образцов, полученных методом УЗ и ИС соответственно. Авторы также сообщили о влиянии термообработки на динамические и статические значения E_L в диапазоне 10843 МПа (210 °С—8 ч) и 15009 МПа (120 °С—С), 7359 МПа (210 °С—8 ч) и 9622 МПа (150 °С—5 ч) соответственно. Кроме того, при сравнении самых высоких и самых низких значений в данного исследования они значительно ниже.

Таблица 3

Средние значения и коэффициенты вариации, отличия для модулей

Группы	Модуль Юнга, МПа			Модуль сдвига, МПа		
	E_L	E_R	E_T	G_{TR}	G_{TL}	G_{LR}
110°С—С	6356 [5]	1415 [18]	540 [16]	203 [35]	752 [2]	824 [5]
110°С—2 ч	6122 [10] (-3.7)	1266 [25] (-10.5)	583 [20] (8)	239 [31] (17.5)	733 [8] (-2.5)	819 [10] (-0.6)
110°С—5 ч	5780 [5] (-9.1)	1331 [17] (-5.9)	557 [12] (3.1)	181 [23] (-11.1)	729 [3] (-3.1)	837 [9] (1.6)
110°С—8 ч	5432 [7] (-14.5)	1222 [16] (-13.6)	542 [14] (0.3)	175 [20] (-13.6)	719 [5] (-4.4)	808 [4] (-2)
160°С—С	5520 [13]	1339 [24]	721 [21]	219 [47]	818 [8]	926 [9]
160°С—2 ч	4912 [18] (-11)	1201 [17] (-10.3)	858 [17] (19)	275 [31] (25.5)	754 [4] (-7.8)	869 [9] (-6.2)
160°С—5 ч	4768 [16] (-13.6)	1217 [14] (-9.1)	577 [13] (-20)	237 [37] (8.1)	715 [6] (-12.6)	833 [9] (-10.1)
160°С—8 ч	4504 [22] (-18.4)	1140 [14] (-14.9)	631 [23] (-12.5)	269 [28] (22.8)	744 [9] (-9.1)	871 [6] (-6)
210°С—С	5500 [5]	1114 [19]	531 [11]	272 [25]	740 [11]	867 [11]
210°С—2 ч	5639 [9] (2.5)	1271 [18] (14.1)	565 [28] (6.4)	264 [33] (-2.9)	785 [20] (6.1)	940 [20] (8.4)
210°С—5 ч	5398 [27] (-1.9)	1310 [17] (17.6)	584 [27] (10.1)	236 [42] (-13)	787 [12] (6.3)	915 [17] (5.5)
210°С—8 ч	4165 [11] (-24.3)	956 [15] (-14.2)	512 [20] (-3.6)	156 [45] (-42.5)	649 [14] (-12.3)	728 [12] (-16.1)

Примечание: [] — коэффициент вариации, () — % отличия от контрольного значения.

При умеренной обработке МУ, по-видимому, увеличивается, в то время как интенсивная обработка приводит к уменьшению [29]. Однако за исключением некоторых случаев (например,

E_T @110 °С), ни значения модулей Юнга и сдвига в целом не увеличились, даже если образцы были обработаны при 110 и 160 °С. Напротив, умеренная продолжительность (особенно 2 ч) при высокой температуре (210 °С) обеспечила некоторое увеличение, но не самое высокое среди всех.

По данным Esteves и Pereira [29], влияние термообработки на МУ незначительно по сравнению с другими прочностными свойствами. То же самое особенно верно для значений модулей, когда учитывалось высокое снижение (42,5 %) в G_{TR} .

Как известно из литературы, упругие технические параметры, предсказанные по US, обычно выше, чем статически определенные, но E_L и E_T в данном исследовании примерно на 37 и 11 % ниже, а E_R примерно на 32 % выше, чем статические значения, указанные в [15]. Плотность и СУЗ являются двумя основными определяющими факторами для расчета динамических упругих свойств. Как уже упоминалось ранее, плотность образцов находится в соответствии с приведенными значениями. Однако предполагается, что примерно на 29 % более низкие значения СУЗ в данной работе являются существенным фактором для значительного расхождения расчетных значений E_L от заявленных значений E_L или МУ при изгибе. Кроме того, как видно из табл. 3, в этих исследованиях также сообщалось о подобном нестабильном поведении при воздействии температуры и продолжительности воздействия.

Зарегистрированные значения МУ для пиломатериалов из турецкой красной сосны классов 1, 2 и 3 (среднее значение 27 % МСВ) варьировались от 7299 до 10760 МПа и от 7169 до 11377 МПа, полученные при испытании на изгиб и волной сжатия соответственно [13], а средние значения МУ при изгибе пиломатериалов классов 1, 2 и 3 составляли 11555, 9974 и 8372 МПа соответственно [14]. При сравнении с E_L данного исследования даже значения немодифицированных образцов заметно ниже. Однако следует учитывать, что способы получения данных, такие как инструменты и средства для измерений, могут играть решающую роль.

Как видно из табл. 3, модули сдвига (G_{LR} , G_{TL} и G_{TR}) варьируются от 728 МПа (210 °С—8 ч) до 940 МПа (210 °С—2 ч), 649 МПа (210 °С—8 ч) до 818 МПа (160 °С—С) и 156 МПа (210 °С—8 ч) до 275 МПа (160 °С—2 ч) соответственно. Зарегистрированные значения динамических модулей (около 12,5 % МСВ), рассчитанные по УЗ, составляют 1108 МПа [16] и 1150 МПа [15] для G_{LR} , 952 МПа [16] и 850 МПа [15] для G_{LT} , 248 МПа [16] и 235 МПа [15] для G_{RT} соответственно. Средние значения модулей для контрольных образцов примерно на 21,3 и 24,1 %, 19,3 и 9,7 %, 6,7 и 1,6 % ниже, чем значения, указанные в [16] и [15] соответственно.

Как и в случае с модулями Юнга, стабильное положительное и отрицательное влияние продолжительности на модули сдвига не наблюдалось ни внутри, ни между температурными диапазонами, за исключением 110 °С для G_{TL} и 210 °С для G_{TR} . Как на G_{TL} , так и на G_{TR} при температурах 110 и 210 °С увеличение продолжительности оказывало отрицательное влияние. Более того, среди значений модуля упругости G_{TR} является наиболее подверженным влиянию температуры и продолжительности упругим параметром, примерно на 42,5 % (210 °С—8 ч) уменьшение и 25,5 % (160 °С—2 ч) увеличение.

Средние значения коэффициентов Пуассона представлены в табл. 4. Средние значения νRL , νTL , νLR , νTR , νLT и νRT для контрольных образцов составляют 0,117, 0,047, 0,507, 0,270, 0,467 и 0,580 соответственно. Описанные коэффициенты Пуассона турецкой красной сосны изменяются в конкретном диапазоне [15], а различия между коэффициентами колеблются от -29,7 до 65 %. Как видно из таблицы, вместо линейных изменений (за исключением νRL и νLR) при увеличении продолжительности воздействия в пределах температурных уровней наблюдалось аналогичное флуктуационное поведение. Такие неравномерные реакции на влияние температуры и продолжительности выдержки затрудняют сделать четкие выводы, как и для модулей упругости. Однако среди упругих констант, в отличие от модулей Юнга и сдвига, наибольшая разница (увеличение на 109,4 %) для коэффициентов Пуассона была рассчитана для νTL при 160 °С—2 ч вместо интенсивной обработки. С другой стороны, наибольшее уменьшение (45,2 %) было определено для νLR , который несколько линейно изменялся под влиянием обработки, как для νRL . Однако проводить сравнение с противоположным поведением непросто из-за сложной полярно-ортотропной природы древесины, даже образцы были подготовлены с минимальной кольцевой кривизной, углом наклона фибрилл и т.д.

Результаты дисперсионного анализа для средних значений свойств представлены в табл. 5. Даже колебания значений очевидны, за исключением некоторых свойств, влияние температуры и продолжительности воздействия на упругие константы было значительным, кроме νLT и νRT ($P > 0,05$), как видно из таблицы. Кроме того, существуют статистически значимые различия в средних значениях и результаты многогранного теста Дункана (табл. 6—8) показали, какие средние значения различны.

Таблица 4

Средние значения и коэффициенты вариации коэффициента Пуассона

Группы	Коэффициент Пуассона					
	ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{RT}
110°C–C	0.11 [31]	0.04 [39]	0.47 [22]	0.22 [35]	0.45 [35]	0.57 [31]
110°C–2 ч	0.09 [61] (–17.9)	0.05 [68] (28.3)	0.43 [59] (–8.6)	0.30 [39] (37.1)	0.51 [65] (12.4)	0.62 [33] (9.7)
110°C–5 ч	0.12 [39] (11.7)	0.04 [46] (3.9)	0.54 [43] (13.9)	0.24 [30] (8.5)	0.42 [52] (–6.5)	0.56 [25] (–1.9)
110°C–8 ч	0.13 [32] (18.6)	0.04 [58] (1.4)	0.57 [31] (20.5)	0.31 [25] (38.3)	0.37 [55] (–18.2)	0.68 [18] (19.3)
160°C–C	0.13 [39]	0.05 [49]	0.53 [43]	0.27 [37]	0.41 [44]	0.51 [35]
160°C–2 ч	0.09 [42] (–30.7)	0.11 [44] (109.4)	0.37 [44] (–30.6)	0.42 [25] (52)	0.60 [27] (47.8)	0.59 [25] (15.9)
160°C–5 ч	0.14 [36] (9.3)	0.05 [39] (4)	0.54 [32] (2.8)	0.29 [25] (6.6)	0.45 [36] (9.9)	0.61 [20] (19.8)
160°C–8 ч	0.13 [42] (4.7)	0.08 [40] (49.3)	0.50 [26] (–5.8)	0.33 [30] (22.2)	0.55 [31] (35.9)	0.60 [20] (19.1)
210°C–C	0.11 [56]	0.05 [44]	0.52 [47]	0.32 [22]	0.54 [37]	0.66 [11]
210°C–2 ч	0.09 [66] (–12.7)	0.06 [53] (10.2)	0.41 [57] (–20.4)	0.30 [23] (–7.4)	0.58 [40] (6.3)	0.67 [13] (1.9)
210°C–5 ч	0.08 [50] (–23.4)	0.05 [34] (2.6)	0.30 [38] (–41.7)	0.32 [17] (0.2)	0.49 [32] (–9.3)	0.74 [18] (12.3)
210°C–8 ч	0.07 [50] (–37.1)	0.08 [48] (51.4)	0.28 [47] (–45.2)	0.30 [19] (–6.1)	0.62 [32] (14.2)	0.58 [28] (–11.3)
[15] СТ– 12.5% МС	0.082 (–29.7)*	0.077 (65)	0.48 (–5.3)	0.37 (37)	0.49 (5)	0.66 (13.8)

Примечание: [] — коэффициент вариации, () — % отличия от контрольного значения и * — % отличия среднего от контрольного значения.

Таблица 5

Результаты дисперсионного анализа для плотности, СУЗ, и упругих констант

Свойство		F	Sig.
Плотность		8.300	0.000
Продольная СУЗ	V_{LL}	2.785	0.003
	V_{RR}	2.076	0.028
	V_{TT}	10.810	0.000
Поперечная СУЗ	V_{LR}	3.447	0.000
	V_{LT}	3.582	0.000
	V_{RT}	2.297	0.014
Квазипоперечная СУЗ	V_{LR45°	2.531	0.007
	V_{LT45}	4.615	0.000
	V_{RT45}	2.535	0.007
Модули Юнга	E_L	7.202	0.000
	E_R	2.561	0.006
	E_T	6.259	0.000
Модули сдвига	G_{TR}	2.498	0.008
	G_{TL}	3.012	0.002
	G_{LR}	3.288	0.001
Коэффициенты Пуассона	ν_{RL}	2.182	0.020
	ν_{TL}	5.000	0.000
	ν_{LR}	2.337	0.013
	ν_{TR}	3.098	0.001
	ν_{LT}	1.454	0.160
	ν_{RT}	1.752	0.072

Группы гомогенности Дункана (ГГД) для плотности и СУЗ

Группы	Плотность	ГГД	Группы	V_{LL}	ГГД	Группы	V_{RR}	ГГД	Группы	V_{TT}	ГГД	Группы	V_{LR}	ГГД
210°C–8ч	402	a	210°C–8ч	3444	a	210°C–8ч	1780	a	110°C–C	1160	a	110°C–C	1296	a
160°C–5ч	450	b	160°C–8ч	3508	ab	210°C–C	1801	bc	110°C–5ч	1208	ab	110°C–2ч	1299	ab
160°C–8ч	455	bc	160°C–2ч	3539	abc	160°C–C	1890	abc	210°C–C	1228	abc	110°C–8ч	1304	ab
210°C–5ч	465	bcd	160°C–5ч	3573	abc	110°C–2ч	1903	abc	110°C–8ч	1258	abc	210°C–C	1309	ab
110°C–8ч	475	bcde	210°C–5ч	3584	abc	110°C–C	1908	abc	210°C–2ч	1265	abc	110°C–5ч	1320	abc
110°C–5ч	480	bcde	160°C–C	3597	abcd	110°C–5ч	1914	abc	110°C–2ч	1292	bc	160°C–2ч	1337	abcd
110°C–2ч	484	cde	210°C–C	3622	abcd	210°C–2ч	1918	abc	210°C–8ч	1314	bcd	210°C–8ч	1345	abcd
160°C–2ч	486	cde	110°C–8ч	3670	bcd	110°C–8ч	1944	bc	160°C–5ч	1324	bcd	160°C–C	1353	abcd
210°C–2ч	489	de	210°C–2ч	3683	bcd	160°C–2ч	1952	bc	210°C–5ч	1345	cd	160°C–5ч	1360	bcd
110°C–C	491	de	110°C–5ч	3750	cd	160°C–8ч	1955	bc	160°C–C	1352	cd	210°C–2ч	1380	cd
210°C–C	505	e	110°C–C	3808	d	160°C–5ч	1977	c	160°C–8ч	1437	d	160°C–8ч	1385	d
160°C–C	505	e	110°C–2ч	3811	d	210°C–5ч	2030	c	160°C–2ч	1682	e	210°C–5ч	1398	d
Sig. a:1, b:0.06, c:0.05, d:0.109, e:0.07			a: 0.12, b: 0.13, c: 0.07, d:0.06			a: 0.08, b: 0.06, c: 0.09			a: 0.11, b: 0.09, c: 0.07, d:0.06, e:1			a: 0.07, b: 0.06, c: 0.06, d:0.05		
Группы	V_{LT}	ГГД	Группы	V_{RT}	ГГД	Группы	V_{LR45°	ГГД	Группы	V_{LT45°	ГГД	Группы	V_{RT45°	ГГД
210°C–C	1209	a	110°C–8ч	605	a	210°C–C	1320	a	210°C–C	1070	a	210°C–C	705	a
110°C–2ч	1230	ab	210°C–8ч	606	a	160°C–8ч	1343	ab	110°C–C	1096	ab	110°C–8ч	737	ab
110°C–8ч	1230	ab	110°C–5ч	609	a	160°C–C	1367	ab	110°C–5ч	1101	abc	210°C–2ч	746	ab
110°C–5ч	1232	ab	110°C–C	635	ab	160°C–5ч	1375	ab	210°C–2ч	1105	abcd	210°C–8ч	759	abc
110°C–C	1238	abc	160°C–C	642	abc	210°C–8ч	1377	ab	110°C–8ч	1111	abcd	110°C–C	760	abc
160°C–2ч	1246	abc	210°C–5ч	693	abc	160°C–2ч	1384	ab	210°C–8ч	1113	abcd	110°C–2ч	762	abc
160°C–5ч	1260	bcd	110°C–2ч	694	abc	110°C–8ч	1385	ab	160°C–5ч	1124	abcd	110°C–5ч	765	abcd
210°C–2ч	1261	bcd	160°C–5ч	714	abc	110°C–5ч	1403	abc	160°C–8ч	1126	abcd	210°C–5ч	765	abcd
210°C–8ч	1268	bcd	210°C–2ч	726	abc	210°C–2ч	1416	bc	110°C–2ч	1129	bcd	160°C–5ч	784	bcd
160°C–C	1272	bcd	210°C–C	730	abc	110°C–2ч	1421	bc	210°C–5ч	1154	cd	160°C–8ч	787	bcd
160°C–8ч	1279	cd	160°C–2ч	744	bc	110°C–C	1432	bc	160°C–C	1159	d	160°C–C	816	cd
210°C–5ч	1301	d	160°C–8ч	761	c	210°C–5ч	1484	c	160°C–2ч	1215	e	160°C–2ч	831	d
Sig. a: 0.1, b: 0.07, c: 0.07, d:0.06			a: 0.05, b: 0.09, c: 0.06			a:0.07, b:0.05,c:0.06			a: 0.05, b: 0.26, c: 0.07, d:0.06, e:1			a: 0.09, b: 0.16, c: 0.11, d:0.06		

Таблица 7

Группы гомогенности Дункана для модулей

Группы	E_L	ГД	Группы	E_R	ГД	Группы	E_T	ГД
210°C–8ч	4165	a	210°C–8ч	956	a	210°C–8ч	512	a
160°C–8ч	4504	ab	210°C–C	1114	ab	210°C–C	531	a
160°C–5ч	4768	abc	160°C–8ч	1140	ab	110°C–C	540	a
160°C–2ч	4912	bcd	160°C–2ч	1201	bc	110°C–8ч	542	a
210°C–5ч	5398	cde	160°C–5ч	1217	bc	110°C–5ч	557	a
110°C–8ч	5432	cde	110°C–8ч	1222	bc	210°C–2ч	565	a
210°C–C	5500	cde	110°C–2ч	1266	bc	160°C–5ч	577	a
160°C–C	5520	cde	210°C–2ч	1271	bc	110°C–2ч	583	a
210°C–2ч	5639	def	210°C–5ч	1310	bc	210°C–5ч	584	a
110°C–5ч	5780	ef	110°C–5ч	1331	bc	160°C–8ч	631	ab
110°C–2ч	6122	ef	160°C–C	1339	bc	160°C–C	721	b
110°C–C	6356	f	110°C–C	1415	c	160°C–2ч	858	c
Sig. a:0.1, b:0.26, c:0.05, d:0.06, e:0.07, f:0.06			a:0.11, b:0.08, c:0.1			a:0.07, b:0.11, c:1		
Группы	G_{TR}	ГД	Группы	G_{TL}	ГД	Группы	G_{LR}	ГД
210°C–8ч	156	a	210°C–8ч	649	a	210°C–8ч	728	a
110°C–8ч	175	a	160°C–5ч	715	ab	110°C–8ч	808	ab
110°C–5ч	181	a	110°C–8ч	719	ab	110°C–2ч	819	abc
110°C–C	203	ab	110°C–5ч	729	b	110°C–C	824	abcd
160°C–C	219	ab	110°C–2ч	733	b	160°C–5ч	833	bcd
210°C–5ч	236	ab	210°C–C	740	bc	110°C–5ч	837	bcde
160°C–5ч	237	ab	160°C–8ч	744	bc	210°C–C	867	bcde
110°C–2ч	239	ab	110°C–C	752	bc	160°C–2ч	869	bcde
210°C–2ч	264	b	160°C–2ч	754	bc	160°C–8ч	871	bcde
160°C–8ч	269	b	210°C–2ч	785	bc	210°C–5ч	915	cde
210°C–C	272	b	210°C–5ч	787	bc	160°C–C	926	de
160°C–2ч	275	b	160°C–C	818	c	210°C–2ч	940	e
Sig. a:0.05, b:0.1			a:0.06, b:0.09, c:0.05			a:0.06, b:0.25, c:0.08, d:0.06, e:0.05		

Взаимозависимости между тремя параметрами из представленных (условия обработки, плотность, СУЗ, упругие модули, коэффициент Пуассона) показаны в виде трехмерного графика на рис. 2–4.

Из-за множества факторов, таких как различные используемые средства, отсутствие стандартов и т.д., полученные упругие константы могут сильно различаться. Сложности, возникающие при измерениях и расчетах, также могут играть решающую роль. Также, позиционирование (распространение и поляризация, особенно для поперечных волн) и приложенное давление на преобразователи [30] могут вызвать дифракцию при использовании без зажимного инструмента для достижения стандартизированных приложений. Однако двумя основными факторами, влияющими на свойства древесины, являются МСВ и температура. Более того, МСВ древесины значительно снижается при термической обработке, что может оказать значительное влияние на измерения распространения ультразвуковых волн [31], а распространение волн становится сложным явлением из-за полярной ортотропной структуры [32]. Действительно, динамически определенные значения имеют значительные различия между механически определенными. И можно предположить, что при интерпретации динамических результатов следует учитывать совместное влияние температурной обработки, зависящей от продолжительности, и свойств распространения.

Как сообщили Ramage et al. [33], анатомические и химические свойства древесины изменяются под воздействием термической модификации. К химическим изменениям относятся образова-

Группы гомогенности Дункана для коэффициента Пуассона

Группы	νRL	ГД	Группы	νTL	ГД	Группы	νLR	ГД
210°C–8ч	0,07	a	110°C–8ч	0,04	a	210°C–8ч	0,3	a
210°C–5ч	0,08	ab	110°C–C	0,04	a	210°C–5ч	0,3	ab
110°C–2ч	0,09	abc	110°C–5ч	0,04	a	160°C–2ч	0,4	abc
160°C–2ч	0,09	abc	110°C–2ч	0,05	ab	210°C–2ч	0,4	abc
210°C–2ч	0,09	abc	160°C–C	0,05	abc	110°C–2ч	0,4	abc
210°C–C	0,11	abc	210°C–C	0,05	abc	110°C–C	0,5	abc
110°C–C	0,11	abc	210°C–5ч	0,05	abc	160°C–8ч	0,5	bc
110°C–5ч	0,12	bc	160°C–5ч	0,05	abc	210°C–C	0,5	c
110°C–8ч	0,13	bc	210°C–2ч	0,06	abc	160°C–C	0,5	c
160°C–C	0,13	bc	160°C–8ч	0,08	bc	110°C–5ч	0,5	c
160°C–8ч	0,13	c	210°C–8ч	0,08	c	160°C–5ч	0,5	c
160°C–5ч	0,14	c	160°C–2ч	0,11	d	110°C–8ч	0,6	c
Sig. a:0.13, b:0.08, c:0.05			a:0.19, b:0.05, c:0.08, d:1			a:0.07, b:0.05, c:0.06		
Группы	νTR	ГД	Группы	νLT	ГД	Группы	νRT	ГД
110°C–C	0,22	a	110°C–8ч	0,37	a	160°C–C	0,5	a
110°C–5ч	0,24	ab	160°C–C	0,41	ab	110°C–5ч	0,6	ab
160°C–C	0,27	abc	110°C–5ч	0,42	ab	110°C–C	0,6	abc
160°C–5ч	0,29	abc	160°C–5ч	0,45	ab	210°C–8ч	0,6	abc
210°C–2ч	0,3	abc	110°C–C	0,45	ab	160°C–2ч	0,6	abc
110°C–2ч	0,3	abc	210°C–5ч	0,49	ab	160°C–8ч	0,6	abc
210°C–8ч	0,3	abc	110°C–2ч	0,51	ab	160°C–5ч	0,6	abc
110°C–8ч	0,31	abc	210°C–C	0,54	ab	110°C–2ч	0,6	abc
210°C–C	0,32	bc	160°C–8ч	0,55	ab	210°C–C	0,7	abc
210°C–5ч	0,32	bc	210°C–2ч	0,58	ab	210°C–2ч	0,7	bc
160°C–8ч	0,33	c	160°C–2ч	0,6	b	110°C–8ч	0,7	bc
160°C–2ч	0,42	d	210°C–8ч	0,62	b	210°C–5ч	0,7	c
Sig. a:0.07, b:0.07, c:0.2, d:1			a:0.07, b:0.06			a:0.06, b:0.14, c:0.05		

ние уксусной кислоты, деградация гемицеллюлозы, образование новых связей лигнина и повышение кристалличности целлюлозы. Деградация гемицеллюлозы приводит к низкой гигроскопичности, устойчивости к грибкам и высокой стабильности размеров. Кроме того, новые связи лигнина также вызывают высокую стабильность размеров. Все это отвечает за долговечность древесины. К анатомическим изменениям относятся появление радиальных трещин и увеличение пористости. Однако угол наклона фибрилл не изменяется. Если рассматривать механические свойства термообработанной древесины, то деградация гемицеллюлозы и радиальные трещины являются причиной низких пределов прочности при изгибе и растяжении. Напротив, новые связи лигнина, увеличение кристалличности целлюлозы и неизменный угол наклона фибрилл ответственны за увеличение ПС и жесткости в продольном направлении. Также, исчерпывающие данные об изменениях в древесине при термообработке были представлены Esteves и Pereira [29], и авторы заявили, что вещество становится менее эластичным, а микрофибриллы целлюлозы теряют свои способности к расширению при укрупнении молекул. Эти изменения в структуре древесины обуславливают стабильность размеров.

Стабильность является одним из основных требований при обработке древесины, а термическая обработка при соответствующей температуре и продолжительности обеспечивает стабильность древесного материала без каких-либо потерь в механических и химических свойствах [5]. Green [2] заявил, что длительное воздействие высоких температур может привести к невозможности восстановления механических свойств. Согласно результатам данного исследования,

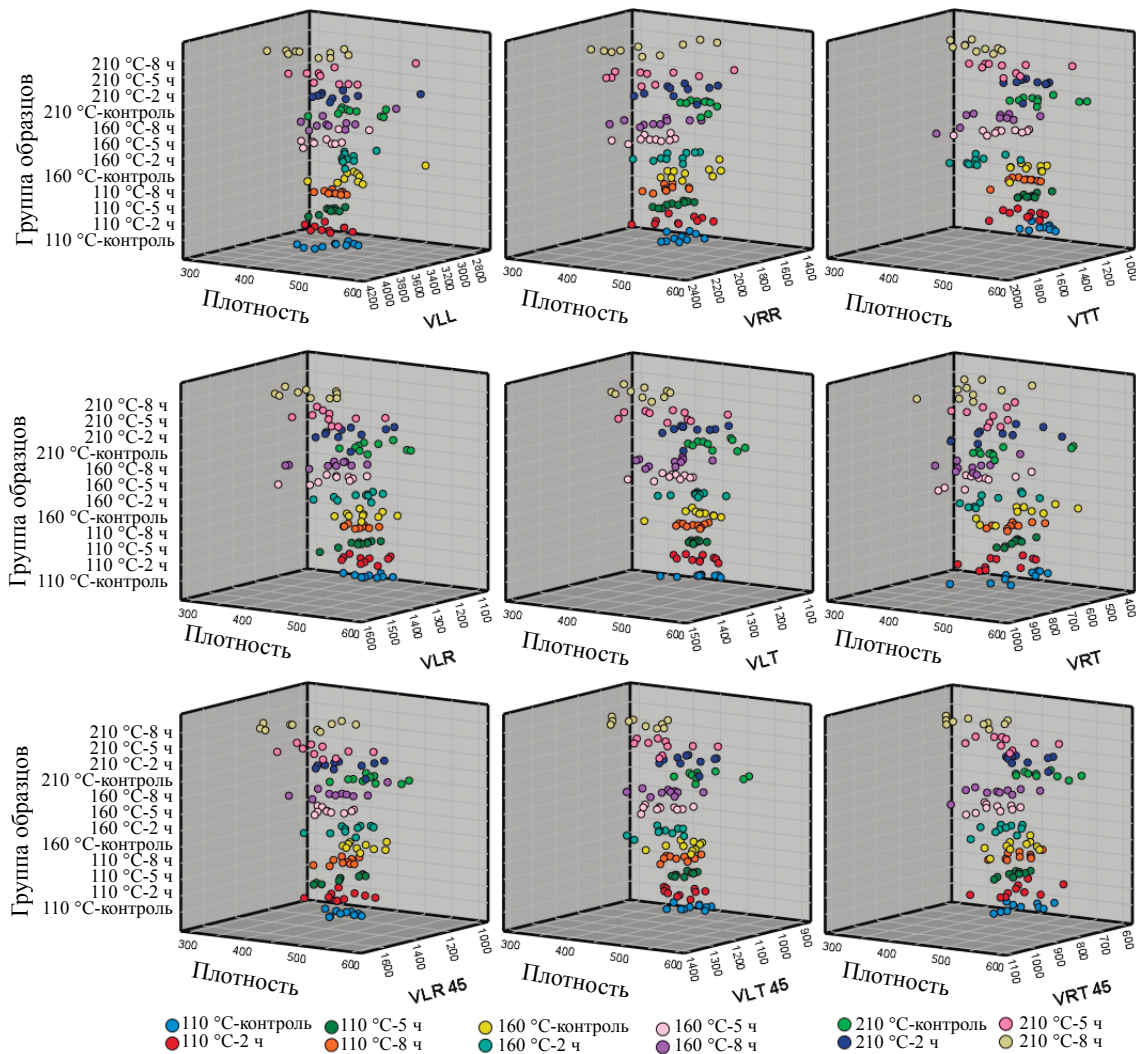


Рис. 2. 3D-точечный график для температуры в зависимости от плотности и СУЗ.

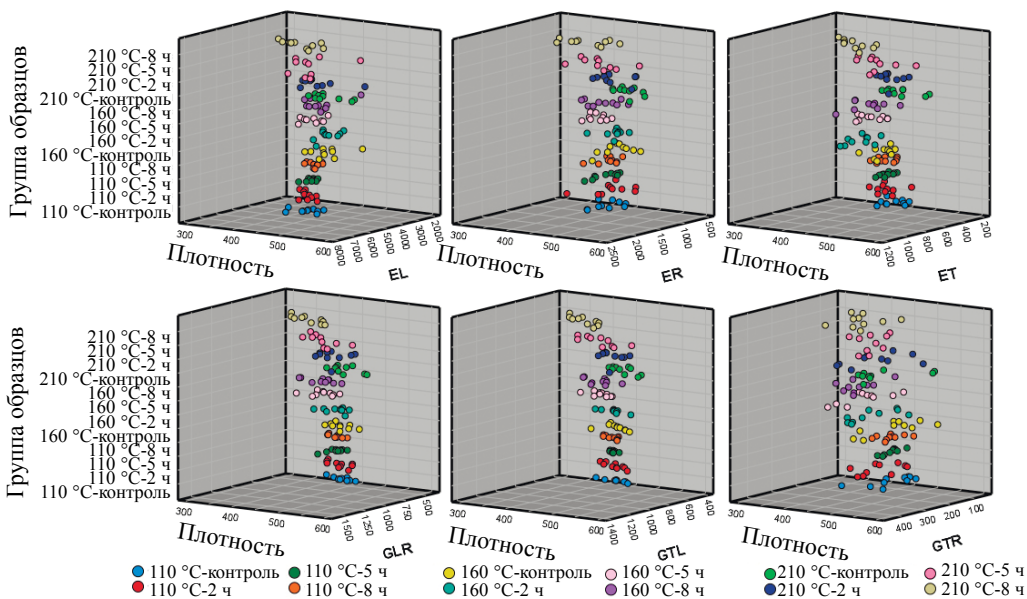


Рис. 3. 3D-точечный график для температуры в зависимости от плотности и упругих модулей.

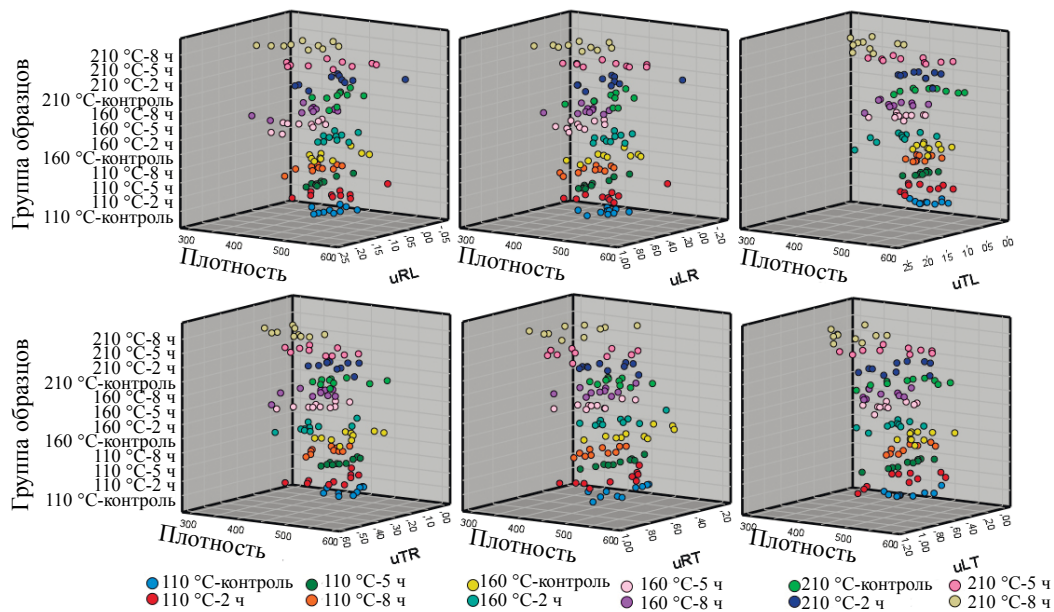


Рис. 4. 3D-точечный график для температуры в зависимости от плотности и коэффициентов Пуассона.

двухчасовая обработка при температуре 210 °С обеспечила некоторое увеличение всех модулей Юнга, но не самого высокого. Такая низкая продолжительность обработки при высоких температурах также обеспечила значительное увеличение модулей сдвига и коэффициента Пуассона, но не для всех из них. Тем не менее, 8 из 12 упругих констант (3 из 3 модулей Юнга, 2 из 3 модулей сдвига и 3 из 6 коэффициентов Пуассона) были несколько улучшены в условиях обработки 210 °С—2 ч. Но когда учитываются коэффициенты Пуассона, то 5 из 6 были несколько улучшены при 160 °С—5 ч обработки. Поэтому трудно сказать, что определенные условия обработки обеспечивают лучшие упруго-технические параметры в целом. Напротив, как уже упоминалось, длительное применение при более высоких температурах не подходит для обеспечения улучшения упругих констант.

Даже обеспечивая некоторые заметные различия в результатах, ультразвуковые испытания и оценка являются применимым методом для определения всех упругих констант немодифицированной или модифицированной древесины. Поскольку проводятся испытания на отдельных образцах нестандартной формы, то недорогой (инструменты или оборудование) и простой в эксплуатации метод [34] имеет выдающиеся характеристики для неразрушающего контроля и оценки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взаимодействие с окружающей средой — одна из сложных областей исследований в науке и технологии древесины, и древесина как конструкционный материал должна быть защищена от разрушительного воздействия факторов окружающей среды. Термообработка является одним из инновационных методов защиты древесины путем улучшения некоторых ее свойств. В данном исследовании влияние термообработки на полные упругие константы турецкой красной сосны было определено с помощью распространения ультразвука. Результаты показали, что термообработка оказывает значительное влияние на средние значения, однако в целом наблюдались колебания с увеличением продолжительности обработки, за некоторыми исключениями, такими как последовательное снижение E_L при 110 и 160 °С, G_{TL} при 110 °С, а также R_L и L_R при 210 °С. Напротив, не наблюдалось последовательного увеличения с увеличением продолжительности обработки.

В представленных значениях для турецкой красной сосны, значительное увеличение было получено при увеличении продолжительности воздействия при низких температурах, таких как 120 и 150 °С. В данном исследовании при низких температурах E_L , E_R , G_{TL} и частично G_{LR} не увеличивались, а уменьшались. Примечательно, что небольшое увеличение E_L было получено только при обработке 210 °С—2 ч. Более того, почти такое же поведение наблюдалось и для E_R . Однако трудно объяснить причины такого противоположного поведения.

В данном исследовании для получения всех членов матрицы жесткости использовали измерения на образцах, которые проводили как по оси, так и со смещением оси на 45°. Дальнейшее исследование, например, проведение измерений над многогранным образцом для получения всех членов матрицы жесткости с помощью только одного образца, должно предоставить ценные данные для проведения сравнения для оценки этих колебаний и изменений.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Это исследование не получило какого-либо специального гранта от финансирующих агентств в государственном, коммерческом или некоммерческом секторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boydak M., Caliskan S.* Effects of heat shock on seed germination of Turkish red pine (*Pinus brutia*) // *Bosque (Valdivia)*. 2016. V. 37. No. 37. P. 327—33. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002016000200011>
2. *Green, D.W.* Wood: Strength and stiffness // *Encycl. Mater. Sci. Technol.* 2001. P. 9732—6. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/01766-6>
3. *Güntekin E., Aydın T.Y., Üner B.* Physical, mechanical and bonding performance of Calabrian Pine (*Pinus brutia* Ten.) as influenced by heat treatment // *Drv. Ind.* 2017. V. 68. No. 2. P. 99—108. <https://doi.org/10.5552/drind.2017.1533>
4. *Yılmaz Aydın T., Aydın M.* Young Modulus determination of Turkish red pine wood by destructive and nondestructive test methods / *Proc. 20th Int. Nondestruct. Test. Eval. Wood Symp. Madison*, 2017.
5. *Ates S., Akyildiz M.H., Ozdemir H.* Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood // *BioResources*. 2009. V. 4. No. 3. P. 1032—43. <https://doi.org/10.15376/biores.4.3.1032-1043>
6. *Akyildiz M., Ates S.* Effect of heat treatment on equilibrium moisture content (EMC) of some wood species in Turkey // *Agric. Biol. Sci.* 2008. V. 4. N. 6. P. 660—5.
7. *Abuamoud M.M.M., Ateş S., Durmaz E.* Comparison of some anatomical, chemical and fibrous characteristics of Turkish Pine (*Pinus Brutia* Ten.) sampled from different regions // *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Derg.* 2018. V. 18. No. 1. P. 75—82. <https://doi.org/10.17475/kastorman.364592>
8. *Aydın İ.* Resin production and turpentine analysis by acid paste and borehole methods in red pine (*Pinus brutia* Ten.) and maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Turkey. Karadeniz Technical University, 2017.
9. *Baysal E., Yalinkilic M.K., Çolak M., Göktaş O.* Combustion properties of Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood treated with vegetable tanning extracts and boron compounds // *Turkish J. Agric For.* 2003. V. 27. No.4. P. 245—52. <https://doi.org/10.3906/tar-0302-4>
10. *Bektas I., Hakkı Alma M., As N., Gundogan R.* Relationship between site index and several mechanical properties of Turkish calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) // *For Prod. J.* 2003. V. 53. No. 2. P. 27—31.
11. *Göker Y., As N., Akbulut T., Dündar T.* Effects of the spiral grain on some physical properties of calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood // *Turkish J. Agric For.* 2000. V. 24. No. 1. P. 51—6. <https://doi.org/10.3906/tar-98156>
12. *Göker Y., As N., Akbulut T., Dündar T.* The effects of spiral grain on some mechanical properties of calabrian pine (*Pinus Brutia* Ten.) wood // *Turkish J. Agric For.* 2000. V. 24. No. 1. P. 45—50. <https://doi.org/10.3906/tar-98144>
13. *Guntekin E., Emiroglu Z.G., Yılmaz T.* Prediction of bending properties for turkish red pine (*Pinus brutia* ten.) Lumber using stress wave method // *BioResources*. 2013. V. 8. No. 1. P. 231—7. <https://doi.org/10.15376/biores.8.1.231-237>
14. *Güntekin E., Cengiz Y., Aydoğan T., Yılmaz Aydın T., Özdamar İ.* Prediction of elasticity for Turkish red pine (*Pinus Brutia* Ten.) lumber using linear modeling and artificial neural networks (ANN) // *Suleyman Demirel Univ. J. Nat. Appl. Sci.* 2014. V. 18. No. 2. P. 64—8.
15. *Güntekin E., Yılmaz Aydın T., Aydın M.* Elastic constants of Calabrian pine and cedar // *Proc. Int. For. Symp. Kastamonu Üniversitesi*. 2016. P. 645—9.
16. *Aydın M., Ciritcioglu H.* Shear moduli prediction of Calabria pine (*Pinus brutia* Ten.) using ultrasonic wave propagation // *Düzce Univ. J. Sci. Technol.* 2018. V. 6. No.1. P.176—87.
17. *Günay E., Sönmez M.* Mechanical behavior of wood under torsional and tensile loadings // *Gazi. Uni. J. Sci.* 2003. V. 16. No. 4. P. 733—49.
18. *Shukla S.R., Kamdem D.P.* Physical and mechanical properties of red pine (*Pinus resinosa* AIT.) from three provenances // *Wood Fiber Sci.* 2008. V. 40. No. 1. P. 103—10.
19. Forest Products Laboratory / *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. USDA — Gen Tech Rep. 2010. <https://doi.org/General Technical Report FPL-GTR-190>
20. *Gao S., Wang X., Wang L.* Modeling temperature effect on dynamic modulus of elasticity of red pine (*Pinus resinosa*) in frozen and non-frozen states // *Holzforschung*. 2015. V. 69. No. 2. P. 233—40. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0048>
21. *Newton P.F.* Predictive relationships between acoustic velocity and wood quality attributes for red pine logs // *For Sci.* 2017. V. 63. No. 5. P. 504—17. <https://doi.org/10.5849/FS-2016-049>

22. Özşahin Ş., Singer H., Temiz A., Yıldırım İ. Selection of softwood species for structural and non-structural timber construction by using the analytic hierarchy process (AHP) and the multiobjective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) // *Balt. For.* 2019. V. 25. No. 2. P. 281—8. <https://doi.org/10.46490/vol25iss2pp281>
23. Baradit E., Fuentealba C., Yáñez M. Elastic constants of Chilean pinus radiata using ultrasound // *Maderas Cienc y Tecnol.* 2021. V. 23. P. 1—10. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2021000100427>
24. TS 2472. Wood — Determination of Density for Physical and Mechanical Tests. Ankara, 2005.
25. Yılmaz Aydın T., Küçükköse A. Ultrasonic testing and evaluation of moisture dependent elastic properties of fir wood // *Mater. Test.* 2020. V. 62. No. 10. P. 1059—64.
26. Ozyhar T., Hering S., Sanabria S.J., Niemz P. Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves // *Wood Sci. Technol.* 2013. V. 47. No. 2. P. 329—41. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0499-2>
27. Gonçalves R., Trinca A.J., Pellis B.P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens // *Wood Sci. Technol.* 2014. V. 48. No. 2. P. 269—87. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0598-8>
28. Vázquez C., Gonçalves R., Bertoldo C., Baño V., Vega A., Crespo J. et al. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods // *Wood Sci. Technol.* 2015. V. 49. No. 3. P. 607—22. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0719-7>
29. Esteves B.M., Pereira H.M. Wood modification by heat treatment / A review. *Bioresources.* 2009. V. 4. No. 1. P. 370—404.
30. Aydın M., Yılmaz Aydın T. Moisture dependent elastic properties of naturally aged black pine wood // *Constr. Build. Mater.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120752>
31. Aydın T.Y. Ultrasonic evaluation of time and temperature-dependent orthotropic compression properties of oak wood // *J. Mater. Res. Technol.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.006>
32. Tallavo F., Pandey M.D., Cascante G. Probabilistic characterization of ultrasonic wave propagation in wood poles // *Can. J. Civ. Eng.* 2012. V. 39. No. 4. P. 484—93. <https://doi.org/10.1139/l2012-019>
33. Ramage M.H., Burrige H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D.U. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction // *Renew Sustain Energy Rev.* 2017. V. 68. P. 333—59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
34. Pagnotta L. Recent progress in identification methods for the elastic characterization of materials // *Int. J. Mech.* 2008. V. 2. No. 4. P. 129—40.
-

ЗАВИСИМОСТЬ СИГНАЛА С ДАТЧИКА ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ГИБРИДНОМ АДДИТИВНОМ ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПРОВОЛОЧНОЙ НАПЛАВКИ

© 2022 г. Е. Л. Кротова^{1,*}, С.В. Варушкин^{1,**}, С. С. Стариков^{1,***}, Н.А. Мусихин^{1,****},
К.А. Рожков^{1,*****}, Д. Н. Трушников^{1,*****}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

E-mail: *lenkakrotova@yandex.ru, **stepan.varushkin@mail.ru, ***StarikovSS@pnppk.ru;
****musikhin.nikolay@yandex.ru; *****k-rozhkov@mail.ru; *****trdimitr@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.04.2022; после доработки 16.05.2022

Принята к публикации 20.05.2022

Актуальной проблемой процесса электронно-лучевой наплавки проволочным материалом является задача позиционирования присадочной проволоки относительно электронного пучка. Точность позиционирования пучка относительно проволоки значительным образом влияет на характер тепловложения, на процессы переноса расплавленного металла с проволоки на основу и, как следствие, на характер формирования валика. Для построения полноценной системы управления процессом необходима адекватная математическая модель, описывающая формирование сигнала в зависимости от смещения пучка относительно проволоки и от других технологических параметров. В статье получена модель в виде аппроксимации интегрального выражения зависимости сигнала с датчика рентгеновского излучения от значений технологических параметров.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, осцилляция, численные методы, математическое моделирование, цифровой двойник.

DOI: 10.31857/S013030822207003X, EDN: BOBMIQ

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии как способ производства изделий сложной геометрической формы широко используются в таких отраслях промышленности, как авиастроительная и ракетостроительная. При этом требования к механическим характеристикам материалов, получаемых в процессе послойного синтеза достаточно высоки.

Общей проблемой аддитивных технологий является сложность обеспечения надлежащей микроструктуры синтезированного материала, химического состава наплавляемого материала, устранения несплавлений и пористости.

Наиболее перспективными являются технологии гибридного изготовления изделий, позволяющие объединить лучшие характеристики аддитивного формирования заготовки и последующего механического удаления материала в процессе создания металлических изделий.

Выбор способа наплавки обуславливается материалом изделия, требованиями к геометрии и точности наплавляемых слоев, требованиями к механическим свойствам наплавленного материала. Использование порошковых материалов позволяет получать слои с минимальными отклонениями по высоте. При этом, метод «direct deposition» может обеспечивать производительность процесса до 3 кг наплавленного металла в час с отклонениями по высоте слоя в пределах до 0,1 мм. Использование проволочных материалов позволяет повысить производительность до 10 кг наплавленного материала в час. Точность геометрических параметров наплавленных слоев зависит от источника тепловой энергии для плавления проволоки. Применение электронного пучка позволяет получать валики с точностью, близкой методу «bed deposition» с использованием порошковых материалов. Высокая точность дозирования вводимой мощности, позиционирования теплового источника и вакуумная защита в процессе электронно-лучевой наплавки обуславливают высокие механические свойства и высокую плотность наплавленного материала.

Актуальной проблемой процесса электронно-лучевой наплавки проволочным материалом является проблема взаимного позиционирования присадочной проволоки и электронного пучка. Точность позиционирования пучка относительно проволоки значительным образом влияет на характер тепловложения, на процессы переноса расплавленного металла с проволоки на основу и как следствие на характер формирования валика.

Для избежания нежелательных последствий применяют оперативное управление положением присадочной проволоки по сигналам обратной связи. Контроль и управление процессом может быть осуществлен посредством периодического сканирования технологической зоны и построением двумерного изображения в отраженных электронах [1—5]. Данный способ отлично подходит для визуализации наплавляемого валика в процессе наплавки, но при использовании для контроля положения присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки имеет несколько недостатков:

- периодическое прерывание процесса для отклонения электронного пучка, что может негативно сказываться на стабильности процесса и качестве наплавляемого валика;
- низкое быстродействие системы;
- относительная сложность и высокая стоимость применяемого оборудования.

При бомбардировке поверхности мишени (наплавляемого материала) электронами достаточно большой энергии одновременно возникает сопутствующее рентгеновское излучение двух видов — тормозное и характеристическое, имеющих различный механизм возникновения. При этом, интенсивности этих двух составляющих сложным образом распределены между собой и линейно зависят от интенсивности падающего электронного пучка, которая эквивалентна току электронов пучка. Применяемый в работе метод измеряет возникающее рентгеновское излучение интегрально, без возможности разделения на отдельные составляющие, в связи с этим будем в дальнейшем применять термин «сопутствующее рентгеновское излучение».

В работе [6] предложено использовать для автоматического управления процессом сигнал сопутствующего рентгеновского излучения из зоны взаимодействия электронного пучка с металлической проволокой и наплавляемой основой. При этом, так как зависимость интенсивности рентгеновского излучения от смещения пучка относительно проволоки имеет экстремум, применяют сканирование электронного луча поперек оси проволоки и обработку сигнала методом синхронного детектирования. Для регулирования применяют величину первой гармоники b_m , которая в некоторой области линейно зависит от смещения пучка относительно проволоки.

В статье [7] разработана и верифицирована модель формирования сигнала рентгеновского излучения при взаимодействии электронного пучка с наплавляемой проволокой и представлена модель датчика положения наплавляемой проволоки относительно оси электронного пучка. Модель датчика устанавливает закономерность изменения сигнала рентгеновского излучения от технологических параметров, таких как: параметры осцилляции пучка, ускоряющее напряжение, ток электронов пучка и диаметр пучка в пятне взаимодействия, диаметр проволоки, материалы подложки и присадочной проволоки, смещение проволоки от центра осцилляции пучка.

Наличие математической модели является обязательным шагом для построения системы автоматического управления с использованием ПИД-регулирования. В тоже время модель [7] выражается интегралом от кусочно-заданной функции, решение которого напрямую реализуется только численными методами, что делает использование результата на практике затруднительным. Необходим поиск упрощенных решений. В предлагаемой работе представлена математическая модель в виде аналитической аппроксимации выражения интегрального выражения [7] для дальнейшего использования при построении системы управления по обратной связи с использованием сигнала с датчика. Модель датчика устанавливает зависимость первой гармоники сигнала сопутствующего рентгеновского излучения от смещения проволоки от центра осцилляции электронного пучка, а также от параметров осцилляции пучка, ускоряющего напряжения, тока электронов пучка и диаметра пучка в пятне взаимодействия, диаметра проволоки, от материалов подложки и присадочной проволоки.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ СИГНАЛА ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СМЕЩЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ОТ ЦЕНТРА ОСЦИЛЛЯЦИИ ПУЧКА

При падении электронов пучка перпендикулярно поверхности обрабатываемого материала поток энергии тормозного рентгеновского излучения определяется выражением:

$$\Phi_e = k_0 I Z U_0^2, \quad (1)$$

где U_0 — ускоряющее напряжение; Z — атомный номер обрабатываемого материала; k_0 — коэффициент пропорциональности; I — ток электронов пучка [8, 9].

Наличие составляющей характеристического излучения в спектре сопутствующего рентгеновского излучения может учитываться экспериментальной калибровкой коэффициента пропорциональности.

В работе [10] авторы описали распределение интенсивности рентгеновского излучения в пространстве для разных углов падения электронного пучка на обрабатываемый материал (рис. 1) [10]. Из диаграммы видно, что при падении электронного пучка перпендикулярно поверхности обрабатываемого материала излучение распространяется равномерно в пределах $\pm 60^\circ$ от нормали. При падении электронного пучка под углом 45° на поверхность наблюдается небольшое искажение распространения рентгеновского излучения в пространстве.

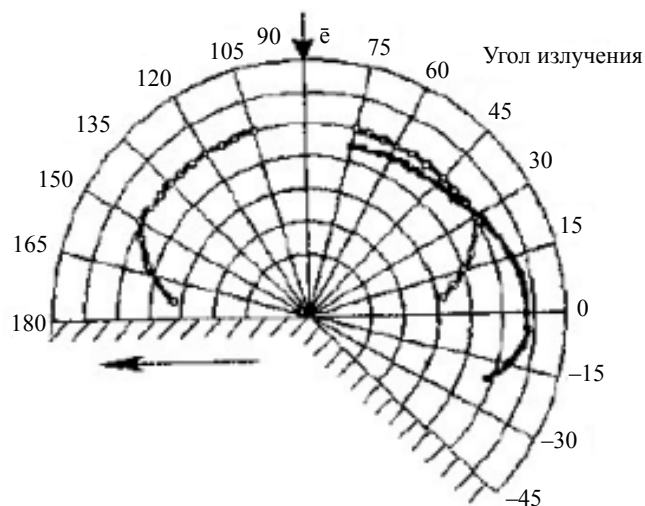


Рис. 1. Диаграмма распределения интенсивности рентгеновского излучения в пространстве. Угол падения электронного пучка:
○ — 90° , ● — 45° [10].

В работе [11] авторы экспериментально определили влияние угла φ между направлением падения электронов пучка и нормалью к поверхности мишени на значение относительного потока энергии рентгеновского излучения. Указанная зависимость представлена на рис. 2 [11].

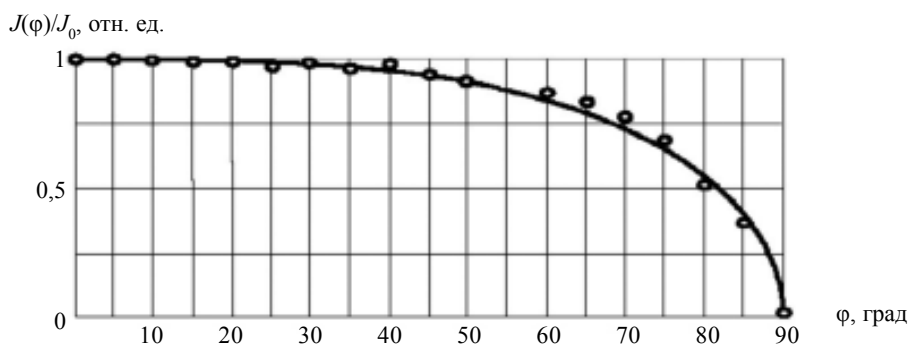


Рис. 2. Изменение потока энергии рентгеновского излучения от угла между направлением электронного пучка и нормалью к поверхности [11].

Относительное значение рентгеновского излучения было определено делением, соответствующих текущему углу φ , интенсивностей излучения на максимальную интенсивность, измеряемую при $\varphi = 0^\circ$. Полученная зависимость была аппроксимирована авторами [12, 13] выражением (2)

при изменении угла φ от 0 до 90° . Данная зависимость может быть аппроксимирована функцией $\cos^{1/3}(\varphi)$:

$$\Phi_\varphi(\varphi) = \frac{\Phi(\varphi)}{\Phi_e} = \left[1 - \left(\frac{\varphi}{90} \right)^3 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $\Phi(\varphi)$ — интенсивность рентгеновского излучения при падении электронного пучка под углом φ , Φ_e — интенсивность рентгеновского излучения при падении пучка перпендикулярно поверхности.

В работе [13] авторы описали интегральное решение задачи формирования сопутствующего рентгеновского излучения при взаимодействии электронного пучка, осциллирующего поперек проволоки круглого сечения, в момент времени t в зависимости от смещения проволоки относительно центра осцилляции электронного пучка.

Электронный пучок с распределением плотности тока $j(x, y)$ взаимодействует и с подложкой, и с проволокой. Проволока расположена параллельно плоскости подложки. На рис. 3 угол φ соответствует углу между падающим на поверхность электронным пучком и нормалью к этой поверхности.

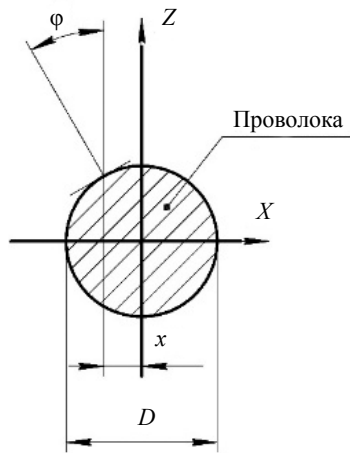


Рис. 3. Схема расчета угла φ относительно центра сечения присадочной проволоки.

Рассмотрим элементарную площадку на поверхности проволоки dS . Рассмотрим ситуацию, когда излучение от элемента dS — сферическое. Величина потока энергии рентгеновского излучения от элемента dS определяется выражением:

$$d\Phi(x, y) = k_0 I Z U_0^2 \left[1 - \left(\frac{2x}{D_{\text{пр}}} \right)^2 \right]^{1/6} j(x, y) dx dy. \quad (3)$$

При смещении пучка относительно проволоки на ΔX :

$$\Phi(\Delta X) = \begin{cases} k_0 I Z U_0^2 \iint \left[1 - \left(\frac{2x}{D} \right)^2 \right]^{2/3} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \Delta X)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) dx dy, & -\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2} \\ k_0 I Z U_0^2 \iint \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \Delta X)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) dx dy, & x \leq -\frac{D}{2}, x \geq \frac{D}{2} \end{cases}. \quad (4)$$

При измерении интенсивности излучения с помощью датчика сигнал уменьшается по мере увеличения расстояния l от области взаимодействия пучка с проволокой и подложкой до прием-

ника. Для точечного источника в отсутствие ослабления излучения средней интенсивность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника:

$$J(\Delta X) = \begin{cases} \frac{k_0 I Z U_0^2}{l^2} \iint \left[1 - \left(\frac{2x}{D} \right)^2 \right]^{2/3} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \Delta X)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) dx dy, & -\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2} \\ \frac{k_0 I Z U_0^2}{l^2} \iint \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \Delta X)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) dx dy, & x \leq -\frac{D}{2}, x \geq \frac{D}{2} \end{cases}, \quad (5)$$

где $D_{\text{пр}}$ — диаметр проволоки; ΔX — отклонение по оси X присадочной проволоки от оси электронного пучка; x — координата по оси X ; y — координата по оси Y ;

$J(x + \Delta X, y) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \Delta X)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right)$ — распределения плотности тока электронного

пучка в поперечном сечении при смещении присадочной проволоки относительно электронного луча на ΔX .

Выражение (5) является статической моделью датчика положения проволоки относительно электронного пучка по сигналу сопутствующего рентгеновского излучения. Исследования этого выражения показывают наличие экстремума сигнала при совмещении оси электронного пучка с осью проволоки. При построении систем управления в этом случае использовать экстремальные регуляторы того или иного типа. Воспользуемся методом, предложенным в работе [13]. При введении осцилляции электронного пучка поперек проволоки в спектре сигнала появляются периодические составляющие на частотах, кратных частоте осцилляции:

$$x(t) = A \cdot \sin(2\pi\omega t), \quad (6)$$

где A — амплитуда колебаний; ω — частота колебаний; t — время. Введем обозначение $\alpha = \omega t$. Пусть $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$. Тогда выражение (5) примет вид:

$$J(\Delta X, \alpha) = \begin{cases} \frac{k_0 I Z U_0^2}{l^2} \iint \left[1 - \left(\frac{2x}{D} \right)^2 \right]^{2/3} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \Delta X - A\sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2} \right) dx dy, & -\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2} \\ \frac{k_0 I Z U_0^2}{l^2} \iint \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \Delta X - A\sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2} \right) dx dy, & x \leq -\frac{D}{2}, x \geq \frac{D}{2} \end{cases}. \quad (7)$$

Изменение сигнала сопутствующего рентгеновского излучения во времени (7) можно представить в виде кратного ряда Фурье в тригонометрической форме:

$$J(\Delta X, \alpha) = \frac{d_0}{2} + 4 \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_m \cos(m\alpha) + b_m \sin(m\alpha), \quad (8)$$

где коэффициенты ряда определяются выражениями:

$$d_0(\Delta X) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta X, \alpha) d\alpha; \quad (9)$$

$$d_m(\Delta X) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta X, \alpha) \cos(m\alpha) d\alpha; \quad (10)$$

$$b_m(\Delta X) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta X, \alpha) \sin(m\alpha) d\alpha. \quad (11)$$

Соотношения (7) и (8) представляют математическую модель сигнала сопутствующего рентгеновского излучения как элемента, обладающего частотным спектром выходного сигнала при наличии периодических колебаниях электронного пучка поперек проволоки. Математическая модель позволяет выявить величину гармонических составляющих сигнала датчика с частотами $m\alpha$, где m — целое число.

Величина амплитуды гармонических составляющих b_m сигнала сопутствующего рентгеновского излучения может быть рассчитана:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_0 I Z U_0^2 S_{\text{д}}}{4\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{D_{\text{пр}}}{2}}^{\frac{D_{\text{пр}}}{2}} \sin(2\pi m\alpha) \left[1 - \left(\frac{2x}{D_{\text{пр}}} \right)^2 \right]^{1/6} \exp\left(\frac{-(x - \Delta x - A \cdot \sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2} \right) dx dy d\alpha, \quad -\frac{D_{\text{пр}}}{2} < x < \frac{D_{\text{пр}}}{2} \\ \frac{k_0 I Z U_0^2 S_{\text{д}}}{4\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{D_{\text{пр}}}{2}}^{\frac{D_{\text{пр}}}{2}} \sin(2\pi m\alpha) \frac{\exp\left(\frac{-(x - \Delta x - A \cdot \sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2} \right)}{2\pi\sigma^2} dx dy d\alpha, \quad x \leq -\frac{D_{\text{пр}}}{2}, \frac{D_{\text{пр}}}{2} \leq x \end{array} \right. \cdot (12)$$

Вычислим интеграл, выражающий b_m по области $\left(-\frac{D_{\text{пр}}}{2} + \varepsilon; \frac{D_{\text{пр}}}{2} - \varepsilon \right)$:

$$b_m = \text{const} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{D_{\text{пр}}}{2} + \varepsilon}^{\frac{D_{\text{пр}}}{2} - \varepsilon} \sin(2\pi m\alpha) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{D_{\text{пр}}} \right)^2} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-(x - \Delta x - A \sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2} \right) dx dy d\alpha. \quad (13)$$

Заметим, что $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma^2} \right) dy = 1$ как интеграл от плотности $y \in N(0; \sigma)$ по носителю распределения.

Для приближенного вычисления используем два стандартных ряда Маклорена и упростим подынтегральное выражение:

$$(1 - \alpha)^n = 1 - n\alpha + O(\alpha^2); \quad (14)$$

$$\left[1 - \left(\frac{2x}{D_{\text{пр}}} \right)^2 \right]^{1/6} = 1 - \frac{2x^2}{3D_{\text{пр}}^2} + O(x^4) \approx \frac{3D_{\text{пр}}^2 - 2x^2}{3D_{\text{пр}}^2}; \quad (15)$$

$$\exp(x) = 1 + \frac{x^1}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots = 1 + x + O(x^2); \quad (16)$$

$$\exp \frac{1}{2\sigma^2} (2\sigma^2 - x^2 - \Delta x^2 - A^2 \sin^2(\alpha) + 2x\Delta x + 2xA \sin(\alpha) - 2\Delta x A \sin(\alpha)). \quad (17)$$

Таким образом, наш интеграл для b_m выглядит так:

$$b_m = \text{const} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi m \alpha) \int_{\frac{-D_{\text{np}}+\varepsilon}{2}}^{\frac{D_{\text{np}}-\varepsilon}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \frac{(3D_{\text{np}}^2 - 2x^2)}{3D_{\text{np}}^2} \times$$

$$\times \frac{1}{2\sigma^2} (2\sigma^2 - x^2 - \Delta x^2 - A^2 \sin^2(\alpha) + 2x\Delta x + 2xA \sin(\alpha)) dx d\alpha. \quad (18)$$

Можно заметить, что только третий множитель подынтегральной функции может зависеть от переменной α . Представим его в виде суммы трех слагаемых, соответствующих степеням синуса α , которую можно записать в следующем виде:

$$E_1 \sin^0(\alpha) + E_2 \sin(\alpha) + E_3 \sin^2(\alpha). \quad (19)$$

Найдем интеграл по переменной α для каждого из этих слагаемых:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi m \alpha) d\alpha = \frac{-1}{2\pi m \alpha} \cos(2\pi m \alpha) \Big|_{-\pi}^{\pi} = 0;$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi m \alpha) \sin \alpha d\alpha = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(2\pi m \alpha - \alpha) - \cos(2\pi m \alpha + \alpha) d\alpha =$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{(2\pi m - 1)} \sin(2\pi m - 1)\alpha \Big|_{-\pi}^{\pi} - \frac{1}{(2\pi m + 1)} \sin(2\pi m + 1)\alpha \Big|_{-\pi}^{\pi} \right) = \frac{\sin(2\pi^2 m - \pi)}{2\pi m - 1} - \frac{\sin(2\pi^2 m + \pi)}{2\pi m + 1} =$$

$$= \sin 2\pi^2 m \left(\frac{1}{2\pi m + 1} - \frac{1}{2\pi m - 1} \right) = \sin 2\pi^2 m \left(\frac{-2}{4\pi^2 m^2 - 1} \right) = 2 \sin \frac{2\pi^2 m}{1 - 4\pi^2 m^2};$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi m \alpha) \cdot \sin^2(\alpha) d\alpha = \int_{-\pi}^{\pi};$$

$$\frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} (\cos(2\pi m \alpha - \alpha) - (\cos(2\pi m \alpha + \alpha))) \sin(\alpha) d\alpha =$$

$$= \frac{1}{4} \int_{-\pi}^{\pi} (\sin(2\pi m \alpha) + \sin(2\alpha - 2\pi m \alpha) - \sin(2\alpha + 2\pi m \alpha) + \sin(2\pi m \alpha)) d\alpha = \frac{1}{4}.$$

Таким образом, ненулевой вклад в значение коэффициента b_m вносят только те слагаемые подынтегральной функции, которые содержат $\sin(\alpha)$, а остальные слагаемые можно отбросить, получаем:

$$b_m = \frac{\text{const}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi m \alpha) \int_{\frac{-D_{\text{np}}+\varepsilon}{2}}^{\frac{D_{\text{np}}-\varepsilon}{2}} \left(\frac{1}{2\sigma^2} 2xA \sin(\alpha) - \frac{4x^3}{3D_{\text{np}}^2} A \sin(\alpha) - 2xA \sin(\alpha) + \frac{4x^2 \Delta x A \sin(\alpha)}{3D_{\text{np}}^2} \right) dx d\alpha. \quad (20)$$

Однако в виду симметричности относительно 0 области интегрирования по абсциссе интегралы от произведений, содержащих множителем нечетную степень x дадут 0.

Теперь, для вычисления нашего коэффициента разложения в ряд Фурье осталось проделать следующее:

$$\begin{aligned}
b_m &= \frac{\text{const}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi m\alpha) \int_{\frac{D_{\text{пр}}}{2} - \varepsilon}^{\frac{D_{\text{пр}}}{2} + \varepsilon} \left(-2xA \sin(\alpha) + \frac{4x^2 \Delta x A \sin(\alpha)}{3D_{\text{пр}}^2} \right) dx d\alpha = \\
&= \frac{\text{const}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi m\alpha) \left(-2A \sin(\alpha) \left(\left(\frac{D_{\text{пр}}}{2} - \varepsilon \right)^2 - \left(\frac{D_{\text{пр}}}{2} + \varepsilon \right)^2 \right) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{4}{9D_{\text{пр}}^2} \Delta x A \sin(\alpha) \left(\left(\frac{D_{\text{пр}}}{2} - \varepsilon \right)^3 - \left(\frac{D_{\text{пр}}}{2} + \varepsilon \right)^3 \right) \right) d\alpha = \\
&= \frac{\text{const}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi m\alpha) \left(\frac{4\Delta x A \sin(\alpha)}{9D_{\text{пр}}^2} (D_{\text{пр}} - 2\varepsilon) \left(\frac{D_{\text{пр}}}{2} - \varepsilon \right)^2 \right) d\alpha = \\
&= \frac{\text{const}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \frac{4\Delta x A}{9D_{\text{пр}}^2} (D_{\text{пр}} - 2\varepsilon) \left(\frac{D_{\text{пр}}}{2} - \varepsilon \right)^2 \cdot \frac{\text{const}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi m\alpha) \sin(\alpha) d\alpha = \\
&= \frac{\text{const}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \frac{4\Delta x A}{9D_{\text{пр}}^2} (D_{\text{пр}} - 2\varepsilon) \left(\frac{D_{\text{пр}}}{2} - \varepsilon \right)^2 \cdot 2 \sin \frac{2\pi^2 m}{(1 - 4\pi^2 m^2)}.
\end{aligned} \tag{21}$$

Окончательный вид коэффициента b_m представлен выражением (22):

$$b_m = \frac{-k_0 I Z U_0^2 S_{\text{д}}}{\sigma \sqrt{2\pi} 4\pi l^2} \cdot 16 \sin \frac{(2\pi^2 m) \Delta x A}{9D_{\text{пр}}^2 (1 - 4\pi^2 m^2)} \cdot \left(\frac{D_{\text{пр}}}{2} - \varepsilon \right)^3. \tag{22}$$

Выражение (22) представляет собой аналитическую аппроксимацию интегрального выражения (12), позволяющую провести численный расчет гармоник b_m , и является математической моделью зависимости гармоник сигнала сопутствующего рентгеновского излучения от смещения электронного пучка и более чем 7 параметров, характеризующих параметры пучка и его осцилляции, материала, расположения и характеристик датчика и других. Измерение величины первой гармоники b_1 на практике может быть осуществлено посредством синхронного детектирования путем перемножения сигналов тока отклоняющих катушек и сигнала датчика тормозного рентгеновского излу-

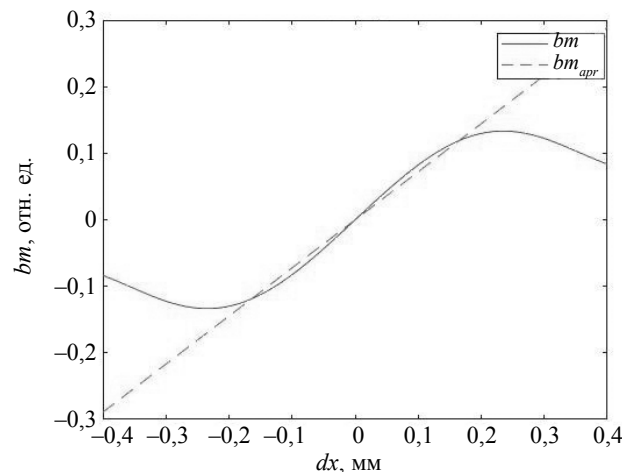


Рис. 4. Величина первой гармоники сигнала сопутствующего рентгеновского излучения в зависимости от координаты пучка относительно проволоки.

чения с последующей низкочастотной фильтрацией. Наличие математической модели в виде (22) дает возможность в дальнейшем разработать систему автоматического управления по обратной связи величиной отклонения электронного пучка относительно наплавляемой проволоки.

На рис. 4 приведены результаты сравнения модели с данными численного решения. Сравнение подтверждает корректность реализованного приближения на линейном участке в окрестности ноля. Корреляция между интегральным решением и аппроксимацией определялась нахождением критерия Колмогорова—Смирнова, который получился равным $D_n = 0,205$.

Значения получены при следующих значениях постоянных: $k_0 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ В}^{-1}$, $U_0 = 60 \text{ кВ}$, $D_{\text{пр}} = 1,2 \text{ мм}$, $Z_{\text{пр}} = 26$, $A = 1 \text{ мм}$, $l = 1$, $m = 1$, $\sigma = D_{\text{л}}/6$; $S_{\text{д}} = 1$.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель в виде аналитической аппроксимации интегрального решения нахождения амплитуды гармонических составляющих в сигнале сопутствующего рентгеновского излучения при осцилляции электронного пучка поперек присадочной проволоки. Модель датчика устанавливает зависимость первой гармоники сигнала сопутствующего рентгеновского излучения от смещения проволоки от центра осцилляции пучка, а также от параметров осцилляции пучка, ускоряющего напряжения, тока электронов пучка и диаметра пучка в пятне взаимодействия, диаметра проволоки, от материалов подложки и присадочной проволоки. Сравнение показало хорошее соответствие полученных данных с результатами численного решения. Полученные результаты могут использоваться в системах оперативного управления положением присадочной проволоки по сигналу сопутствующего рентгеновского излучения из технологической зоны.

Работа по моделированию сигнала выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках проекта международной исследовательской группы «Моделирование послыонного синтеза наплавкой проволочных материалов в реальном времени. Разработка прототипа ПО» Соглашение № С-26/512, разработка датчика реализована при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» при выполнении государственного задания «Разработка научно-технологических основ формирования системы материал-конструкция со специальными свойствами на основе гибридных аддитивных технологий» — FSNM-2021-0011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morozov M.Y., Braverman V.Y., Mednikov D.M.* Electron beam welding and beam positioning // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 2. № 11. С. 1020—1021.
2. *Norman L.J., Fred G.L.* Statistics and Experimental Design in Engineering and Physical Sciences / 2nd ed. V. I. John Wiley: New York, NY, USA, 1997. P. 70—74.
3. *Permyakov G., Trushnikov D., Varushkin S.* Numerical Simulation of Electron Beam Welding of Dissimilar Materials Taking into Account Thermoelectric Phenomena / The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation, in conjunction with Symposium on the Research Activities of Joint Usage, Osaka, Japan, Osaka Univ, Japan Welding Soc. 17—18 October, 2016. P. 197—198.
4. *Panten M., Eichhom F., Spies B.* Diagnosis of high energy density electron beam on electron beam welding machines with a new compact measuring equipment / 4eme Collog. int. coudage etfision faisceau electrons et laser, Cannes, 26—30 Sept. 1988. V. 1. Saclay, 1988. P. 53—60.
5. *Трушников Д.Н., Варушкин С.В.* Способ электронно-лучевой наплавки с контролем положения присадочной проволоки относительно электронного луча / Патент на изобретение RU 2704682 С1. 30.10.2019.
6. *Trushnikov D.N.* Wire position sensor for controlling the process of electron beam layer-by-layer deposition: Modeling and Verification // IEEE. 2020. P. 3134—3142.
7. Рентгеновские лучи / Пер. с нем. и англ. Под ред. М. А. Блохина. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
8. *Хараджа Ф.Н.* Общий курс рентгенотехники. М.: Энергия, 1966. 368 с.
9. *Sasaki S., Murakami H., Iwami T., Yasunaga S.* Automatic Weld line sensing and work positioning for electron beam welding / IW DOC 4-368-84. 1984.
10. *Браверман В.Я., Белозерцев В.С., Успенский А.Н.* Экспериментальные исследования рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке // Вестник Сибирского аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2005. № 2. С. 196—200.
11. *Браверман В.Я.* Тормозное рентгеновское излучение при электронно-лучевой сварке и его взаимосвязь с параметрами процесса // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2008. № 3 (20). С. 117—121.

12. *Варушкин С.В.* Управление электронно-лучевой наплавкой проволочным материалом по параметрам тормозного рентгеновского излучения / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пермь. 2019. 133 с.

13. *Браверман В.Я., Вейсвер Т.Г., Белозерцев В.С.* Слежение за стыком при электронно-лучевой сварке в атмосфере // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2014. № 1 (53). С. 142—147.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

© 2022 г. В.Ю. Жвырбля^{1,*}, С.П. Осипов^{1,**}, Д.А. Седнев^{1,***}

¹Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: * vzhrb3001@gmail.com; ** osip1809@rambler.ru; *** sednev@tpu.ru

Поступила в редакцию 16.05.2022; после доработки 30.05.2022
Принята к публикации 03.06.2022

Разработана математическая модель формирования высокоэнергетических цифровых радиографических изображений в условиях низких уровней цифровых сигналов. Модель предназначена для повышения эффективности анализируемых систем применительно к контролю крупногабаритных объектов за счет цифрового суммирования изображений. На базе модели разработан алгоритм и программа на MathCad, предназначенные для симуляции цифровых изображений испытываемых объектов. На основе анализа результатов вычислительных и натуральных экспериментов проиллюстрирована принципиальная возможность повышения эффективности систем высокоэнергетической цифровой радиографии на основе учета редких событий.

Ключевые слова: тормозное излучение, цифровая радиография, проникающая способность, разрядность АЦП, максимальная энергия тормозного излучения, редкие события, имитационное моделирование.

DOI: 10.31857/S0130308222070041, **EDN:** BOEQU

ВВЕДЕНИЕ

Расширяющиеся потребности промышленности и науки в высококачественном контроле и исследовании крупногабаритных объектов обуславливают необходимость совершенствования методов и средств неразрушающих испытаний [1—5]. Применение систем цифровой радиографии (ЦР) и рентгеновской компьютерной томографии (КТ) ограничивается двумя основными факторами. Первый фактор имеет исключительно физическую природу и обусловлен малой прозрачностью исследуемого объекта для тормозного излучения [6, 7]. Отмеченный вид прозрачности объекта контроля (ОК) называется радиационной (радиоскопической) прозрачностью [8, 9]. Второй фактор связан с малым уровнем сигналов на выходе детекторов [10, 11], формирующих изображения в ЦР или проекций в КТ. Существует ряд причин, приводящих к малому уровню сигналов. Эти причины связаны с параметрами ОК, схемы сканирования, характеристиками источника и детектора излучения. Основными параметрами источника излучения применительно к обсуждаемому вопросу являются: для счетного режима регистрации фотонов — поток частиц; для спектрометрического режима — распределение потока фотонов по энергии; для интегрального режима — интенсивность излучения. Объект контроля характеризуется толщиной, плотностью и эффективным атомным номером, впрочем, эти три параметра сводятся к двум — массовой толщине и эффективному атомному номеру материала или к одному — толщине ОК в длинах свободного пробега (д.с.п.) для заданной максимальной энергии тормозного излучения. Под массовой толщиной понимается произведение толщины на плотность. Толщина ОК в д.с.п. является наиболее удобным параметром для оценки предельных возможностей систем ЦР и КТ применительно к контролю крупногабаритных объектов. В счетном и спектрометрическом режиме пересчитываются фотоны, проваимодействовавшие с чувствительным объемом детектора, только в первом случае — гипотетически для всего диапазона изменения энергии зарегистрированного фотона, а во втором — фотоны распределяются по энергетическим окнам. Интегральный режим регистрации характеризуется разрядностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и реальным максимальным значением цифрового сигнала (ЦС). Для всех режимов регистрации малые значения сигналов связаны, прежде всего, с малым числом фотонов, проваимодействовавших с чувствительным элементом детектора. В связи с изложенным выше, отмеченную ситуацию называют «фотонным голоданием» («photon starvation») [12, 13]. Для интегрального режима регистрации помимо «фотонного голодания» к малым значениям ЦС приводят недостаточная разрядность АЦП и неполное использование диапазона изменения ЦС [11, 14—16]. Причем степень отмеченной недостаточности разрядности существенно зависит от вида решаемой задачи испытаний, исследуемого объекта, заданного качества контроля (производительность, точность измерений, разрешение по эффективному атомному номеру в досмо-

тровом контроле и т.п.). В работах [11, 14, 17] подчеркивается необходимость согласования диапазонов изменения аналоговых сигналов (АС) и ЦС и отмечается, что лучшего согласования можно достичь в случае использования в детекторах, работающих в интегральном режиме регистрации, логарифмических усилителей, предшествующих АЦП. Причем для логарифмических усилителей требуются АЦП с существенно меньшей разрядностью. Отметим, что «фотонное голодание» устраняется или существенно снижается, если нет сопутствующих технических ограничений, тремя основными способами: увеличением максимальной энергии тормозного излучения; повышением мощности источника фотонов; увеличением времени измерения. Для интегрального режима регистрации фотонов изменение параметров систем ЦР и КТ принесет заметный эффект исключительно в случае изначального существенного несоответствия диапазонов изменения АС и ЦС. Для интегрального режима регистрации необходимо согласовывать диапазоны изменения АС и ЦС особенно в случае возможности существенного уменьшения эффекта «фотонного голодания».

Если замена источника излучения на более интенсивный невозможна, а повышение энергии тормозного излучения ограничено фиксированным уровнем, то актуален вопрос о применении других подходов к повышению качества формируемых цифровых радиографических изображений или проекций. Для интегрального режима регистрации искомый подход может быть связан с представлением оцифрованного АС случайной величиной и анализом ее для описанного выше случая. Для проверки обоснованности отмеченного подхода необходима разработка математической модели формирования радиографических изображений (проекций) применительно к испытанию крупногабаритных ОК с учетом редких событий. Редкие события возникают в случае отличия ЦС от нуля при условии, что средние значения соответствующих АС могут быть близки к аналоговому эквиваленту цифровой единицы, но меньше ее. Если не учитывать этот фактор, то информативность полученных цифровых радиографических изображений будет нулевой. Представляют интерес и условия наступления редких событий, которые обуславливают практическую применимость математической модели.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

При разработке математической модели формирования ЦС для систем ЦР с импульсными источниками тормозного излучения возьмем за основу [18] с учетом особенностей, отмеченных во введении.

1.1. Параметры математической модели

Система высокоэнергетической цифровой радиографии характеризуется параметрами, связанными с ОК, источником и детектором тормозного излучения.

К параметрам математической модели относятся:

максимальная энергия тормозного излучения E_{\max} , МэВ;

числовой энергетический спектр источника тормозного излучения $f(E, E_{\max})$;

частота следования импульсов ν , Гц;

среднее количество фотонов, испускаемых источником и попадающих на фронтальную поверхность чувствительного объема сцинтиллятора, N_1 ;

количество импульсов для формирования цифрового сигнала n ;

химическая формула вещества чувствительного элемента детектора Chd , которая в обобщенном виде представляется выражением:

$$Chd = \bigcup_{i=1}^{n_d} (A_{di}, p_{di}), \quad (1)$$

где n_d — количество химических элементов, образующих вещество сцинтиллятора; A_{di} , p_{di} — обозначение химического элемента, его количество атомов в молекуле;

толщина чувствительного объема детектора h_d , см;

плотность материала чувствительного объема детектора ρ_d , г/см³;

разрядность АЦП k_{ADC} , бит;

степень заполнения диапазона изменения цифрового сигнала C_{ADC} ;

максимальная толщина ОК в длинах свободного пробега $P(E_{\max})$, д.с.п.;

минимальный уровень цифрового сигнала M .

Параметрами материала чувствительного объема детектора являются векторы молярных масс $\mathbf{M}_d = (M_{d1}, M_{d2}, \dots, M_{dn})$ и атомных номеров элементов $\mathbf{Z}_d = (Z_{d1}, Z_{d2}, \dots, Z_{dn})$, которые однозначно соответствуют вектору $\mathbf{A}_d = (A_{d1}, A_{d2}, \dots, A_{dn})$ [19].

1.2. Основные формулы

Выражение, связывающее параметры математической модели и величину цифрового сигнала D , имеет вид:

$$D(P) = \sum_{i=1}^n \left[C_E \left(\sum_{j=1}^{N_i(P)} E_j(P) + E_{bi} \right) / \Delta_1 \right], \quad (2)$$

где $[arg]$ — целая часть arg ; C_E — коэффициент преобразования энергии фотонов, поглощенной в чувствительном объеме, в электрическую энергию; $N_i(P)$, $i = 1 \dots n$ — независимые случайные величины (СВ), распределенные по Пуассону, равные числу фотонов одного импульса, прошедших без ослабления ОК толщиной P в д.с.п.; E_j , $j = 1 \dots N_i(P)$ — независимые одинаково распределенные СВ, представляющие собой энергии, оставленные в чувствительном слое детектора j -ми фотонами; E_{bi} , $i = 1 \dots n$ — независимые одинаково распределенные СВ, являющиеся энергетическими эквивалентами собственных сигналов детектора; Δ_1 — энергетический эквивалент цифровой единицы.

Формула для оценки Δ_1 выглядит следующим образом:

$$\Delta_1 = C_{ADC} C_E \left(\overline{N_1(0)E(0)} + \overline{E_b} \right) / (2^{k_{ADC}} - 1), \quad (3)$$

где $\overline{N_1(0)}$ — среднее количество фотонов, падающих на фронтальную поверхность чувствительного объема детектора за один импульс без ОК и зарегистрированных в нем; $\overline{E(0)}$ — средняя энергия зарегистрированных фотонов без ОК; $\overline{E_b}$ — среднее значение энергетического эквивалента собственных шумов детектора.

Будем исходить из постоянства коэффициента C_E на всем диапазоне изменения аналоговых сигналов. В результате этого допущения и совместного анализа (2) и (3) коэффициент C_E может быть исключен из дальнейшего рассмотрения.

Приведем формулы, уточняющие выражения (2), (3). Для этого используем результаты [18], приведенные в соответствие с понятием эффективной энергии E_{eff} [20, 21] применительно к рассматриваемой задаче.

Случайная величина $N(P)$ распределена по Пуассону с параметрами [18]:

$$\begin{aligned} \overline{N(P)} = \sigma^2 N(P) &= \left[N_1 \int_0^{E_{max}} f(E, E_{max}) \exp(-P(E)) \varepsilon(E, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d) dE \right] = \\ &= \left[N_1 \exp(-P(E_{eff})) \varepsilon(E_{eff}, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где $P(E)$ — толщина ОК в д.с.п. для фотонов с энергией E ; $\varepsilon(E, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d)$ — эффективность регистрации детектором с чувствительным элементом с параметрами $\mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d$. Формула для оценки эффективности регистрации имеет вид:

$$\varepsilon(E, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d) = 1 - \exp(-m(E, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d) \rho_d h_d), \quad (5)$$

здесь $m(E, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d)$ — массовый коэффициент ослабления (МКО) фотонов с энергией E :

$$m(E, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d) = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} p_{di} M_{di} m(E, Z_{di})}{\sum_{i=1}^{n_d} p_{di} M_{di}}. \quad (6)$$

Случайная величина $E(P)$ характеризуется первым начальным моментом (средним значением $\overline{E(P)}$) и вторым начальным моментом $\overline{E^2(P)}$ [18]. Для полного описания СВ используют плотность распределения вероятностей. Для $E(P)$ плотность распределения $g(E(P))$ является многопараметрической, то есть зависит от набора параметров $(E_{\max}, P, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d)$ и описывается выражением:

$$g(E(P), E_{\max}, P, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d) = \frac{f(E, E_{\max}) \exp(-P(E)) \varepsilon(E, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d)}{\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \exp(-P(E)) \varepsilon(E, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d) dE}. \quad (7)$$

Формулы для оценки k -го начального момента $E(P)$ выглядят следующим образом:

$$\overline{E^k(P)} = \int_0^{E_{\max}} E_{ab}^k(E) g(E(P), E_{\max}, P, \mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d) dE, \quad (8)$$

где $E_{ab}(E)$ — поглощенная энергия зарегистрированного фотона. Эта энергия сложным образом зависит от материала чувствительного элемента детектора и его размеров [22], поэтому в первом приближении можно считать, что $E_{ab}(E) \approx E$.

Выражения (1)—(8) являются основой для построения имитационной модели формирования цифровых радиографических изображений для условий ограниченного «квантового голодания» с целью оценки эффективности подхода, связанного с анализом редких событий. Эти выражения необходимо дополнить блоком зашумления сигналов в условиях «квантового голодания».

1.3. Моделирование зашумленных сигналов в условиях «квантового голодания»

Из анализа выражения (2), предназначенного для оценки моделирования цифровых сигналов, можно сделать вывод о применимости прямого моделирования ЦС, разыгрывая для каждого зарегистрированного фотона его поглощенную энергию.

Для моделирования ЦС на первом этапе определяется параметр распределения Пуассона $N(P)$. Распределение Пуассона является дискретным и розыгрыш соответствующей СВ сопряжен с определенными сложностями [23]. Эти сложности легко устранимы, так как в любых языках программирования есть встроенные функции для моделирования СВ для наиболее популярных распределений, в том числе и для распределения Пуассона. Предполагается, что разрабатываемая математическая модель будет трансформирована в соответствующую имитационную модель с последующей ее реализацией в системе для математических вычислений MathCad. Широкое применение системы MathCad для имитационного моделирования в физике и приложениях обусловлено близостью языка MathCad к языку математики [11, 18, 24—26]. Для моделирования $N(P)$ необходимо знать число фотонов от одного импульса N_1 [18, 27], попадающих на фронтальную поверхность чувствительного элемента детектора. С достаточной степенью подробности этот подход изложен в [18]. Точная оценка ожидаемого среднего числа фотонов N_1 может быть определена на основе обработки результатов натурального эксперимента для конкретной модели системы ЦР, исходя из вычисленной относительной погрешности ЦС для фрагмента откалиброванного радиографического изображения свободного от тени ОК.

Для моделирования СВ $E(P)$ вводится плотность распределения (7), после чего эта плотность преобразуется в функцию распределения и табулируется. Обратная функция к полученной числовой зависимости аппроксимируется сплайнами. Данные операции необходимы для розыгрыша рассматриваемой СВ $E(P)$ с высокой производительностью. Такой способ основан на моделировании СВ методом обратных функций [28].

Такой подход позволяет моделировать общую СВ — цифровой сигнал $D(P)$.

В процессе моделирования необходимо помнить, что значение параметра Пуассона $\overline{N(P)}$ не должно быть меньше единицы. Минимальное же значение цифрового сигнала M [18] устанавливается в процессе вычислительного эксперимента.

В силу отмеченной близости математического языка и языка MathCad приведем алгоритм имитационного моделирования для условий поставленной задачи максимально близко к тексту MathCad программы. Такой подход позволит избежать недопониманий при изучении текста работы, и тем более при необходимости повторения результатов вычислительных экспериментов.

2. АЛГОРИТМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ «КВАНТОВОГО ГОЛОДАНИЯ»

За основу алгоритма имитационного моделирования имитационного моделирования цифровых радиографических изображений в условиях «квантового голодания» были взят ряд результатов и рекомендаций из [11, 18]. Алгоритм состоит из подготовительного этапа, блока задания базовых функций, блока описания структуры объекта контроля, подпрограммы формирования цифрового радиографического изображения с суммированием изображений, подпрограммы визуализации цифровых радиографических изображений. Здесь будем исследовать позитивные радиографические изображения, в которых большей яркости изображения соответствует большая радиационная прозрачность ОК.

2.1. Подготовительный этап

2.1.1. Формирование таблиц МКО гамма-излучения

Подготовительный этап включает в себя формирование таблиц, содержащих МКО гамма-излучения для энергий в диапазоне от 1 кэВ до 10 МэВ для элементов от водорода ($H, Z=1$) до урана ($U, Z=92$). Указанный диапазон энергий обусловлен тем, что в промышленных приложениях высокоэнергетической цифровой радиографии в качестве источников тормозного излучения применяются бетатроны и линейные ускорители электронов с максимальной энергией E_{\max} до 10 МэВ [29]. При необходимости диапазон энергий гамма-квантов для таблиц МКО может быть расширен.

Для формирования таблиц МКО использовалась база данных по ослаблению гамма-излучения [9]. Данная база данных находится в открытом доступе и обладает удобным интерфейсом, позволяющим пользователю сформировать свой вариант набора данных, учитывающий диапазон энергий гамма-излучения, атомные номера (символы) интересующих химических элементов, объем информации по видам взаимодействий гамма-излучения с веществом, варианты выходных единиц ($\text{см}^2/\text{г}$, барн/атом).

Наиболее корректно база данных [19] работает с браузером Firefox, который позволяет сохранять таблицы МКО в текстовом формате (*.txt). Документы MathCad органично взаимодействуют с файлами с расширением *.txt. Для хранения таблиц МКО рекомендуется создать специальную папку, например, *X-Ray_Data*. Для простоты сопоставления заголовков файла соотносится с атомным номером химического элемента Z , например, файл *1.txt* соответствует водороду, а файл *92.txt* — урану. Каждый текстовый файл состоит из заголовка файла и собственно таблицы (двух или трехмерной матрицы), первый столбец которой — энергии E_z в МэВ, а второй — МКО в $\text{см}^2/\text{г}$; третий столбец — массовый коэффициент поглощения в $\text{см}^2/\text{г}$. Следует отметить, что число строк в упомянутых матрицах зависит от Z и увеличивается с его ростом, что связано с увеличением количества характеристических линий в рассматриваемом энергетическом диапазоне.

2.1.2. Ввод и первичная трансформация файлов с МКО

Для удобства использования индексов в MathCad имеется параметр ORIGIN для задания начального значения индексов, например, $\text{ORIGIN}=1$, означают, что индексы, нумеруются с единицы. Здесь «:=» — символ присваивания.

Пусть в папке *X-Ray_Data* содержатся файлы *1.txt, 2.txt, ..., 83.txt* и файл *ZZM.txt*, состоящий из двух столбцов: первый — атомный номер химического элемента Z ; второй — ZM , отношение атомного номера Z к молярной массе M соответствующего химического элемента. Данный файл необходим для расчета МКО сложных химических веществ. В MathCad имеются средства для работы со строковыми переменными, что облегчает формирование списков Ввода/Вывода в соответствующих программах. Строковые переменные в MathCad заключаются в кавычки — "Строковая переменная". Применительно к рассматриваемому случаю процесс ввода всех необходимых файлов описывается следующей конструкцией:

$$\begin{aligned}
 Z &:= n..m \\
 file_z &:= \text{concat}("X - Ray_Data / ", \text{num2str}(Z), ".txt") \\
 C_z &:= \text{READPRN}(file_z) \\
 ZM &:= \text{READPRN}("X - Ray_Data / ZZM.txt")
 \end{aligned} \tag{9}$$

здесь $file_z$ — имя файла для вещества с атомным номером Z ; « $n..m$ » — изменение переменной в диапазоне от n до m ; $concat$ — функция объединения строковых переменных, перечисленных через запятую; $num2str(Z)$ — преобразование числа Z в строковую переменную.

Системы ЦР и РКТ используются в разных энергетических диапазонах — от десятков кэВ до 10 МэВ, поэтому шкала энергий E_z переводится в кэВ. Первичная трансформация сводится дополнительно к введению МКО, атомных номеров элементов Ze и молярных масс Mz :

$$E_z := 1000(C_z)^{\langle 1 \rangle} \quad m_z := (C_z)^{\langle 2 \rangle} \quad Ze := (ZM)^{\langle 1 \rangle} \quad Mz := (ZM)^{\langle 2 \rangle}, \quad (10)$$

здесь $\langle j \rangle$ — j -й столбец матрицы.

В ряде случаев необходимо расположить энергии по возрастанию, а в таблицах [19] присутствуют дублированные характеристические линии E_{x^-} для которых $m(E_{x^-}) \neq m(E_{x^+})$, поэтому необходима корректировка вектора E_z в упорядоченный вектор Ec_z :

$$Ec_z := \begin{cases} \gamma \leftarrow 0.00001 \\ i0 \leftarrow rows(E_z) \\ \text{for } i \in 2..i0 \\ (E_z)_i \leftarrow (E_z)_i \cdot (1 + \gamma) \text{ if } (E_z)_i = (E_z)_{i-1} \\ E_z \end{cases}, \quad (11)$$

здесь γ — параметр, меньший относительной погрешности оценки энергии характеристического излучения; $|$ — символ подпрограммы; \leftarrow — символ присваивания в подпрограммах; $rows$ — количество строк в матрице; for — оператор цикла; $i \in 2..i0$ — диапазон изменения переменной i от 2 до $i0$.

2.1.3. Интерполяция зависимостей МКО гамма-излучения от энергии

Система MathCad обладает широкими возможностями для интерполяции, но в рассматриваемом случае достаточно линейной интерполяции (встроенная функция $linterp$). Формула для интерполяции МКО от энергии гамма-кванта x для элемента с атомным номером Z имеет вид:

$$mas(x, Z) := linterp(E_z, m_z, x). \quad (12)$$

Выражение (12) может быть использовано для интерполяции МКО для чувствительного объема детектора $masd$ от энергии x . В соответствии с (6) интерполяция $masd(x)$ применительно к системе MathCad запишется следующим образом:

$$masd(x) := \sum_{i=1}^{nd} pd_i Md_i m(x, Zd_i) / \sum_{i=1}^{nd} pd_i Md_i. \quad (13)$$

Векторы Md , Zd , pd в (13) совпадают с соответствующими векторами из (6) $\mathbf{M}_d, \mathbf{Z}_d, \mathbf{p}_d$.

Для сцинтиллятора CsI — $Md := \begin{pmatrix} M_{53} \\ M_{55} \end{pmatrix}$, $Zd := \begin{pmatrix} Ze_{53} \\ Ze_{55} \end{pmatrix}$, $pd := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

2.2. Блок задания базовых функций

2.2.1. Эффективность регистрации

Функция для вычисления зависимости эффективности регистрации ε от энергии x , реализующая (5) в программе MathCad, имеет вид:

$$\varepsilon(x) := 1 - \exp(-masd(x) \rho_d h_d). \quad (14)$$

2.2.2. Числовой энергетический спектр

Для высокоэнергетического тормозного излучения распределение интенсивности I по энергии фотонов x — dI/dx близко к прямой линии [30, 31]:

$$Shiff(E_m, x) := 2(E_m - x)/E_m^2, \quad (15)$$

здесь E_m — максимальная энергия тормозного излучения; x — энергия фотонов.

Для последующего моделирования необходим числовой энергетический спектр $f(E_m, x)$. Так как $dI(x)/dx = x \cdot dN(x)/dx = Shiff(E_m, x)$, то соответствующая функция имеет вид:

$$f(E_m, x) := \frac{Shiff(E_m, x)}{x \int_{E_0}^{E_m} \frac{Shiff(E_m, x)}{x} dx}, \quad (16)$$

здесь $E_0=1$ кэВ — минимальное значение энергии фотонов в таблицах МКО из [19].

2.2.3. Зависимость потока частиц и интенсивности от параметров ОК

На практике низкий уровень радиационной прозрачности проявляется при измерениях проникающей способности $Hlim$. Эти измерения проводят на стальных тестовых образцах с плотностью $\rho_{st}=7,56$ г/см³, поэтому примем:

$$mst(x) := mas(x, 26), \rho_{st} := 7,56. \quad (17)$$

Ожидаемое число фотонов N_0 на фронтальной поверхности детектора при отсутствии ОК вычисляется с учетом апертуры детектора $ad \times bd$ мм², количества интегрируемых аналоговым образом импульсов $kimp$, числа фотонов NN_0 , падающих на 1 см² поверхности детектора. Детекторы ИДК ТПУ [31] характеризуются параметрами:

$$ad := 6, bd := 5, kimp := 1, NN_0 := 2,4 \cdot 10^5. \quad (18)$$

С учетом сказанного выражение для оценки N_0 выглядит следующим образом:

$$N_0 := NN_0 \cdot ad \cdot bd \cdot kimp \cdot 0,01. \quad (19)$$

Поток фотонов $N(E_m, Hst, hd)$ вычисляется по формуле:

$$N(E_m, Hst, hd) := floor \left(N_0 \cdot \int_{E_0}^{E_m} f(E_m, x) \cdot e^{-mst(x) \cdot \rho_{st} \cdot Hst} \cdot \varepsilon(x, hd) dx \right), \quad (20)$$

где $floor(q)$ — функция MathCad, целая часть числа q .

Средняя энергия $E_{mean}(E_m, Hst, hd)$ зарегистрированного фотона оценивается следующим образом:

$$E_{mean}(E_m, Hst, hd) := \frac{\int_{E_0}^{E_m} x \cdot f(E_m, x) \cdot e^{-moc(x) \cdot \rho_{st} \cdot Hst} \cdot \varepsilon(x, hd) dx}{\int_{E_0}^{E_m} f(E_m, x) \cdot e^{-moc(x) \cdot \rho_{st} \cdot Hst} \cdot \varepsilon(x, hd) dx}. \quad (21)$$

В свою очередь интенсивность энергии $I(E_m, Hst, hd)$ оценивается по формуле:

$$I(E_m, Hst, hd) := E_{mean}(E_m, Hst, hd) \cdot N(E_m, Hst, hd). \quad (22)$$

В соответствии с (5) выражение для расчета аналога цифровой единицы имеет вид:

$$\Delta(E_m, hd, kadc) := I(E_m, 0, hd) / \left(Cadc \cdot (2^{kadc} - 1) \right), \quad (23)$$

здесь $kadc$, $Cadc$ — разрядность АЦП и коэффициент заполнения диапазона изменения ЦС.

2.3. Описание объектов контроля

2.3.1. Общие положения

При описании ОК воспользуемся подходом, предлагаемым в работах [11, 32]. Данный подход основан на представлении ОК в качестве объединения непересекающихся фрагментов, причем в ряде случаев эти фрагменты имеют правильную форму и ориентацию. Отмеченный факт характерен для некоторых тестовых объектов (ТО) (эталонов), предназначенных оценки параметров систем ЦР. К таким ТО относятся [11, 32], например, эталоны для оценки проникающей способности, эталоны чувствительности, канавочные эталоны для оценки пространственного разрешения, ступенчатые эталоны и т.п. Все эти эталоны изготавливают, как правило, из стали. Для подобных ТО ограниченность количества фрагментов в сочетании с их формой (прямоугольные параллелепипеды) приводит и к ограниченному набору толщин по стали.

Эффект «квантового голодания» проявляется для ОК значительной толщины, поэтому в качестве примера можно ограничиться ступенчатым объектом. Такой объект может быть сформирован стальными пластинами из эталона для оценки проникающей способности. Пусть толщина пластин Hr кратна 6 мм, пластины имеют поперечные размеры $Ar \times Ar = 600 \times 600$ мм². Ступенчатый объект формируется параллельным смещением пластин друг относительно друга. Для описания конструкции ОК введем систему координат XOY , где координату x свяжем с направлением сканирования, а координату y с линейкой детекторов. Пусть границы пластин параллельны осям координат, а центры пластин расположены по линии $y = y_0$ со смещением Δx .

2.3.2. Функции и подпрограммы

Для удобства применения подхода к описанию ОК [32] введем логическую функцию $W(x, y, x_0, y_0)$ принадлежности точки (x, y) пластине с центром в точке (x_0, y_0) :

$$W(x, y, x_0, y_0) := (|x - x_0| \leq Ar/2) \wedge (|y - y_0| \leq Ar/2). \quad (24)$$

Подпрограмма для оценки толщины ОК с учетом окружающего воздуха над плоскостью формируемого изображения $HST(x, y, x_0, y_0)$ имеет следующий вид:

$$H(x, y, x_0, y_0) := \left. \begin{array}{l} kr_0 \leftarrow rows(x_0) \\ \text{for } kr \in 1..kr_0 \\ \left. \begin{array}{l} Hrr_{kr} \leftarrow Hr \text{ if } W(x, y, x_{0_{kr}}, y_0) \\ Hrr_{kr} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right\} \\ \sum_{kr=1}^{kr_0} Hrr_{kr} \end{array} \right\}, \quad (25)$$

здесь *otherwise* — оператор MathCad «в противном случае» дополняет пространство событий в операторе *if*.

Воспользуемся ограниченностью количества уровней толщин и введем соответствующую функцию $LevelH(x, y, x_0, y_0)$:

$$LevelH(x, y, x_0, y_0) := \left. \begin{array}{l} L \leftarrow 1 \\ \text{for } kr \in 1..kr_0 \\ \left. \begin{array}{l} L \leftarrow kr + 1 \text{ if } W(x, y, x_{0_{kr}}, y_0) \\ L \end{array} \right\} \end{array} \right\}. \quad (26)$$

Конструкция (26) является исключительно простой, но при вычислительном моделировании цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов она обеспечивает ускорение процесса вычислений в сотни раз.

Каждому уровню толщины LH соответствует свои уровни числа фотонов LN , среднего значения энергии LE и аналогового сигнала LI . Отметим, что общее количество уровней на единицу больше количества ступеней $kL0$:

$$\begin{aligned}
 LH_{kl} &:= (kL - 1)Hr, \quad LN_{kl} := N(Em, LH_{kl}, hd), \\
 LE_{kl} &:= Emean(Em, LH_{kl}, hd), \quad LI_{kl} := LN_{kl} \cdot LE_{kl}.
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Введенных выше функций, подпрограмм и векторов достаточно для перехода к подпрограмме формирования цифровых радиографических изображений.

2.3. Подпрограмма формирования цифрового радиографического изображения

Входными параметрами подпрограммы *XrayImage* являются поперечные размеры ОК $Xoc \times Yoc$, поперечные размеры детектора $ad \times bd$, количество суммируемых изображений n . Заранее должны быть определены среднее значение mb и среднеквадратическое отклонение σb темнового сигнала детектора.

Подпрограмму приведем в упрощенной версии без розыгрыша энергий зарегистрированных фотонов. На момент вызова все параметры подпрограммы *XrayImage* должны быть определены.

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{array}{l} NX \\ NY \end{array} \right) \leftarrow \left(\begin{array}{l} \text{floor} \left(\frac{Xoc}{ad} \right) \\ \text{floor} \left(\frac{Yoc}{bd} \right) \end{array} \right) \\
 & \text{for } ix \in 1..NX + 1 \\
 & \quad \text{for } iy \in 1..NY + 1 \\
 & \quad \quad \left(\begin{array}{l} X_{ix} \\ Y_{iy} \end{array} \right) \leftarrow \left(\begin{array}{l} -\frac{Xoc}{2} + (ix - 1) \cdot ad \\ -\frac{Yoc}{2} + (iy - 1) \cdot bd \end{array} \right) \\
 & \quad \quad lh \leftarrow LevelH(x, y, x0, y0) \\
 & \quad \quad Noc \leftarrow LN_{lh} \\
 & \quad \quad Eoc \leftarrow LE_{lh} \\
 & \quad \quad r \leftarrow \begin{cases} rpois(n, Noc) & \text{if } Noc \geq 1 \\ null(n) & \text{otherwise} \end{cases}, \\
 & \quad \quad black \leftarrow rnorm(n, mb, \sigma b) \\
 & \quad \quad ID_{iy,ix} \leftarrow \sum_{i=1}^n \text{floor} \left(\frac{Eoc \cdot r_i}{\Delta l} + black_i - mb \right) \\
 & \quad \text{for } iy \in 1..NY + 1 \\
 & \quad \quad MD_{iy} \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^{iw} ID_{iy,ix}}{iw} \\
 & \quad \text{for } ix \in 1..NX + 1 \\
 & \quad \quad \text{for } iy \in 1..NY + 1 \\
 & \quad \quad \quad DH_{iy,ix} \leftarrow -\ln \left(\frac{\max(0.5, ID_{iy,ix})}{MD_{iy}} \right) \\
 & ID
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

здесь $rpois(n, Noc)$, $rnorm(n, mb, \sigma b)$ — программы розыгрыша векторов СВ, распределенных по Пуассону и Гауссу, в данном случае векторы имеют размерность n ; $null(n)$ — нулевой вектор размерности n .

2.4. Подпрограмма формирования полутоновых изображений

На вход подпрограммы визуализации $VizD$ поступают: цифровое радиографическое изображение $D := XrayImage(Xoc, Yoc, ad, bd, n)$; минимальный и максимальный уровни тона Pmi , Pma , удобные для восприятия; вектор pp — цифровых координат в системе RGB для раскраски фоновой части изображения; вектор pr — цифровых координат в системе RGB для раскраски части изображения с низким уровнем ЦС. В качестве векторов pp , pr могут быть использованы

$pp := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $pr := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$. В результате фон будет изображен в оттенках серого, а пиксели с низким

уровнем ЦС будут выделены красным цветом.

$$\begin{array}{l}
 \begin{pmatrix} Nx \\ Ny \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} cols(D) \\ rows(D) \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} Dmi \\ Dma \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} \min(D) \\ \max(D) \end{pmatrix} \\
 \text{for } ix \in 1..NX \\
 \quad \text{for } iy \in 1..NY \\
 \quad \quad P_{iy,ix} \leftarrow Pma - \text{floor} \left((Pma - Pmi) \frac{D_{iy,ix} - Dmi}{Dma - Dmi} \right), \quad (29) \\
 \quad \quad \begin{pmatrix} r_{iy,ix} \\ g_{iy,ix} \\ b_{iy,ix} \end{pmatrix} \leftarrow pp \cdot P_{iy,ix} \text{ if } Cadc \cdot (2^{kadc} - 1) \cdot e^{-D_{iy,ix}} > 1 \\
 \quad \quad \begin{pmatrix} r_{iy,ix} \\ g_{iy,ix} \\ b_{iy,ix} \end{pmatrix} \leftarrow pr \cdot 255 \text{ otherwise} \\
 \text{augment}(r, g, b)
 \end{array}$$

здесь $\min(D)$, $\max(D)$ — минимальное и максимальное значения массива D , которые находятся с помощью встроенных функций MathCad; $augment$ — функция объединения матриц (векторов) в общую матрицу.

2.5. Вывод и визуализация полутоновых изображений

В системе MathCad для ввода/вывода изображений в оттенках серого используются функции READBMP/WRITEBMP, а в оттенках цветного — READRGB/WRITEBMP. Для рассматриваемой задачи более предпочтительной является вторая группа функций.

На выходе подпрограммы $VizD$ формируется не само изображение, а матрица VI , ассоциируемая с ним $VI := VizD(D, sh, Pmi, Pma, pp, pr)$. Для превращения матрицы VI в цветное изображение вначале необходимо сформировать текстовую переменную $fileI$, содержащую информацию о месте записи файла (изображения), его формате, количестве суммируемых цифровых изображений, а затем выполнить соответствующую операцию ввода. Упомянутый комплекс действий описывается двумя командами:

$$\begin{aligned} fileI &:= \text{concat}("BMP / ", " Sum ", \text{nim2str}(n), " digital image", ".bmp") \\ WRITERGB(fileI) &:= VI \end{aligned} \quad (30)$$

Папка BMP предназначена для хранения изображений и создается заранее.

Приведенный алгоритм (1)—(30) легко трансформируется в программу в системе MathCad с уточнением входных данных.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Исходные данные

Часть данных уже демонстрировалась выше в некоторых блоках и этапах разработанного алгоритма. Перечислим полный набор исходных данных.

Источник высокоэнергетического тормозного излучения — малогабаритный бетатрон ИДК ТПУ [31] с максимальной энергией $E_{\max} = 9$ МэВ. Оценочное и подтвержденное экспериментально количество фотонов на 1 см^2 на расстоянии 4,2 м от источника, приведенное к одному импульсу, $N_1 = 240000$ (30 сГр/мин).

Линейка детекторов: материал сцинтилляторов CdWO_4 ; поперечные размеры детекторов $a_d \times b_d = 6 \times 5 \text{ мм}^2$; толщина детекторов $h_d = 35 \text{ мм}$; разрядность АЦП $k_{ADC} = 16$ бит; коэффициент сужения диапазона цифровых сигналов $C_{ADC} = 0,8$. Коэффициент геометрического увеличения равен 3.

Базовый объект контроля: стальной ступенчатый объект, набранный из пластин размером $600 \times 600 \text{ мм}^2$; ширина объекта по оси y 600 мм; высота ступени 24 мм; количество ступеней 13; ширина ступени 30 мм. Число ступеней базового ОК было выбрано из условия, что число фотонов, регистрируемых детектором, не должно быть меньше 1. Это ограничение связано с рассматриваемой концепцией моделирования. Для условий моделирования максимальная толщина объекта по стали 312 мм.

Выше отмечено, что существенное несоответствие диапазонов изменения АС и ЦС может привести к эффекту, аналогичному эффекту «квантового голодания», несмотря на сравнительно высокий уровень числа регистрируемых фотонов. Этот эффект напоминает по признакам «квантовое голодание», назовем его эффектом «псевдо-квантового голодания». Отмеченный эффект характеризуется упомянутым выше параметром C_{ADC} . В соответствии со сказанным выше уменьшив высоту ступени в базовом ОК до 18 мм, что приведет к уменьшению максимальной массовой толщины ОК до 234 мм по стали.

3.2. Результаты моделирования цифровых радиографических изображений

3.2.1. Базовый ступенчатый объект, условия ограниченного «квантового голодания»

На рис. 1 приведены цифровые радиографические изображения испытываемого ступенчатого объекта с вариацией числа исходных изображений от 1 до 1024.

Сравнение изображений, приведенных на рис. 1, подтверждает эффективность цифрового суммирования радиографических изображений в условиях ограниченного «квантового голодания».

3.2.2. Базовый ступенчатый объект, условия «псевдоквантового голодания»

Для исследования эффекта «псевдоквантового голодания» выберем ступенчатый объект, описанный выше, с существенно меньшим значением параметра C_{ADC} .

На рис. 2 приведены цифровые радиографические изображения исследуемого ОК с максимальной толщиной 234 мм по стали для $n = 1; 4; 16$ и значения параметра $C_{ADC} = 0,1$.

В результате сравнения изображений, представленных на рис. 1 и 2, можно подтвердить схожесть эффектов «квантового голодания» и «псевдоквантового голодания». Отмечается повышение качества изображений с увеличением параметра n .

Следует отметить, что эффект «псевдоквантового голодания» обуславливается также недостатком высокой разрядностью АЦП (см. (3)).

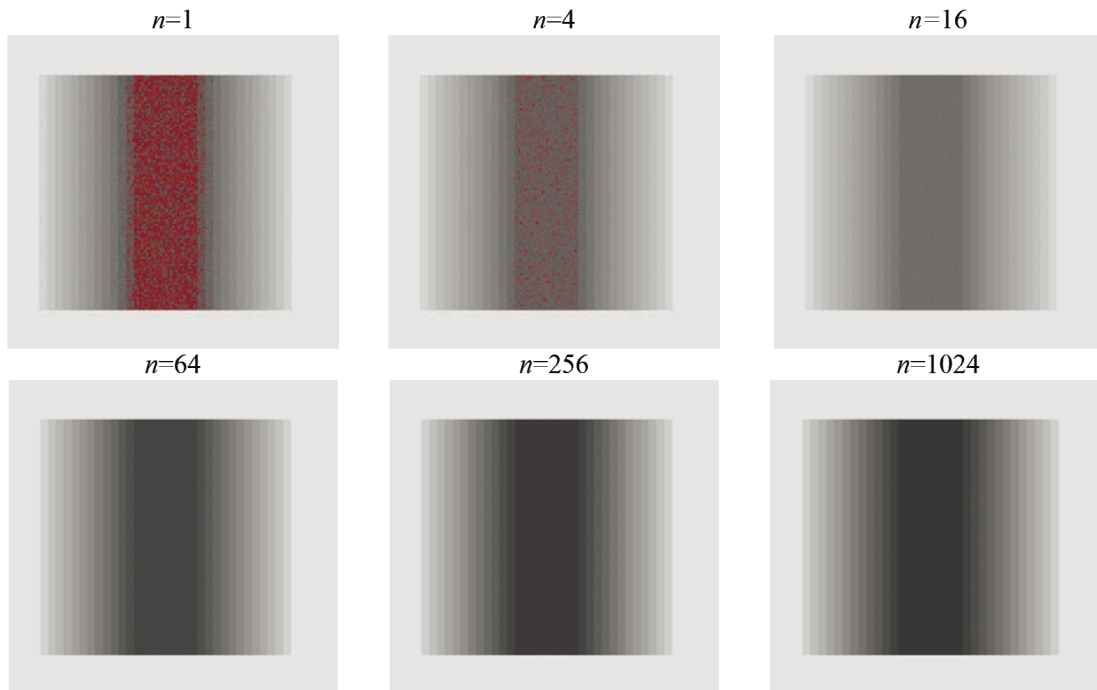


Рис. 1. Цифровые радиографические изображения ступенчатого объекта с вариацией числа суммируемых изображений n . Эффект «квантового голодания».

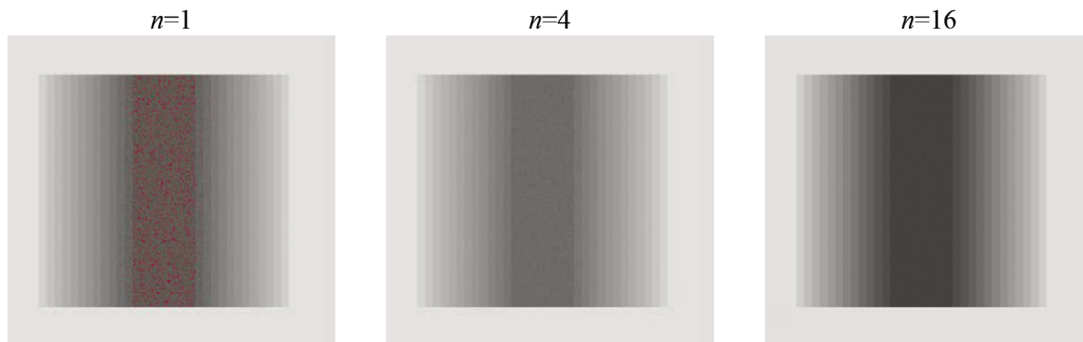


Рис. 2. Цифровые радиографические изображения ступенчатого объекта с вариацией числа суммируемых изображений n . Эффект «псевдоквантового голодания».

3.2.3. Эталон проникающей способности

При формировании изображений эталонов для оценки проникающей способности систем ЦР целенаправленно создается эффект «квантового голодания» [33].

При моделировании изображений эталонов для оценки проникающей способности были использованы формулы из [34] для корректировки пространственного описания ОК.

На рис. 3 приведены изображения набора прямоугольных стальных пластин толщиной $H_{st} = 324$ мм с «наконечником стрелы» из стали толщиной $H_a = 84$ мм для двух положений наконечника, $H_{lim} = H_{st} + H_a = 408$ мм.

Анализ данных, приведенных на рис. 3, подтверждает вывод об эффективности цифрового суммирования изображений в условиях «квантового голодания». Наблюдается улучшение четкости границ «стрелы наконечника» с ростом параметра n .

В работе [27] отмечена возможность достижения проникающей способности $H_{lim} = 450$ мм по стали для тормозного излучения с $E_{max} = 9$ МэВ при условии попадания не менее 5 фотонов на пиксель размером 10×10 мм² на расстоянии 7,5 м. Из сопоставления параметров систем ЦР из [27] и [31] следует, что значение параметра N_1 для упомянутой в условии системы [27] примерно в 26 раз больше, чем для

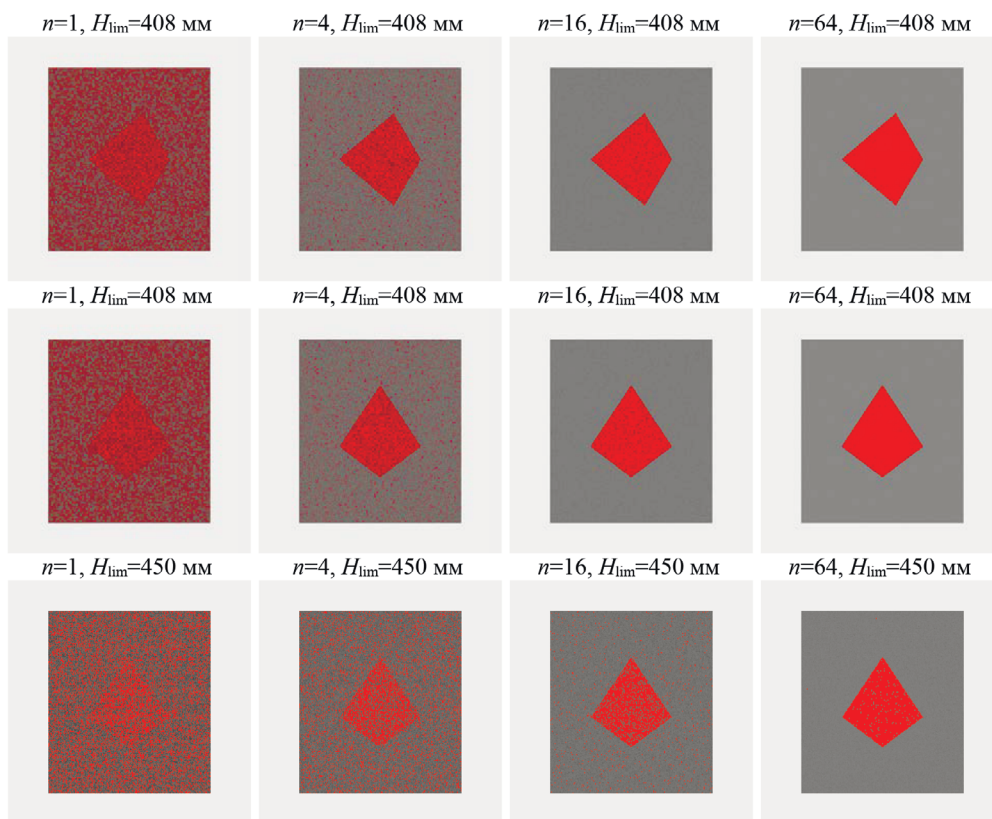


Рис. 3. Цифровые радиографические изображения эталона проникающей способности с вариацией числа суммируемых изображений n . Эффекты «квантового голодания» — $H_{\text{lim}} = 408$ мм и «псевдоквантового голодания» для условий [27] — $H_{\text{lim}} = 450$ мм.

той, что использовалась в модельном примере. Для такого уровня N_1 был сформированы изображения, приведенные на рис. 3. Отмеченное в [27] условие позволяет объяснить наблюдаемый эффект «псевдоквантовым голоданием» — не полным соответствием диапазонов изменения АС и ЦС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель формирования высокоэнергетических цифровых радиографических изображений в условиях низких уровней цифровых сигналов. Модель предназначена для повышения эффективности анализируемых систем применительно к контролю крупногабаритных объектов за счет цифрового суммирования изображений. На основе модели разработан алгоритм и программа на MathCad, предназначенные для симуляции цифровых изображений испытываемых объектов. На основе анализа результатов вычислительных и натурных экспериментов проиллюстрирована принципиальная возможность повышения эффективности систем высокоэнергетической цифровой радиографии на основе учета редких событий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Наука», проект № FSWW-2020-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Du Plessis A., MacDonald E., Waller J.M., Berto F. Non-destructive testing of parts produced by laser powder bed fusion // *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*. Elsevier, 2021. P. 277—300. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824090-8.00016-0>
2. Bossema F.G., Domínguez-Delmás M., Palenstijn W.J., Kostenko A., Dorscheid J., Coban S.B., Hermens E., Batenburg K.J. A novel method for dendrochronology of large historical wooden objects using line trajectory X-ray tomography // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. No. 1. P. 1—12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90135-4>

3. Nyberg J.V.E., MacGregor D., Azaiez F. 5. Complementary methods: γ -beam techniques, X-ray fluorescence (XRF) and nuclear magnetic resonance (NMR) // Nuclear physics for cultural heritage. EDP Sciences. 2021. P. 37—53.
4. Karikh V.P., Pevchenko B.V., Kurbatov A.V., Okhotnikov A.A., Skokov A.A. Three-dimensional X-ray tomography of industrial objects with limited sizes of the recording screen // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 9. P. 787—795. <https://doi.org/10.1134/S1061830921090059> [Карих В.П., Певченко Б.В., Курбатов А.В., Охотников А.А., Скоков А.А. Трехмерная рентгеновская томография промышленных объектов при ограниченных размерах регистрирующего экрана // Дефектоскопия. 2021. № 9. С. 54—62.]
5. Ewert U. Current developments in digital radiography and computed tomography from nm to macro scale / Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018), Gothenburg, Sweden. 2018. P. 11—15. <https://www.ndt.net/article/ecndt2018/papers/ecndt-0364-2018.pdf> (Доступ 19.04.2022).
6. Movafeghi A., Mohammadzadeh N., Yahaghi E., Nekouei J., Rostami P., Moradi G. Defect detection of industrial radiography images of ammonia pipes by a sparse coding model // Journal of Nondestructive Evaluation. 2018. V. 37. No. 1. P. 1—7. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0458-9>
7. Kaczmarek L., Kozłowska A., Maksimczuk M., Wejrzanowski T. The use of X-ray computed microtomography for graptolite detection in rock based on core internal structure visualization // Acta Geologica Polonica. 2017. V. 67. No. 2. P. 299—306. <https://doi.org/10.1515/agp-2017-0010>
8. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. Estimating the influence of quantum noises on the quality of material identification by the dual-energy method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 8. P. 585—600. <https://doi.org/10.1134/S1061830918080077> [Удод В.А., Осипов С.П., Ван Я. Оценка влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов методом дуальных энергий // Дефектоскопия. 2018. № 8. С. 50—65.]
9. Li L., Li R., Zhang S., Zhao T., Chen Z. A dynamic material discrimination algorithm for dual MV energy X-ray digital radiography // Applied Radiation and Isotopes. 2016. V. 114. P. 188—195. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.05.018>
10. Hall C. Large-scale imaging on the Australian Synchrotron imaging and medical beamline (IMBL) // Synchrotron Radiation News. 2015. V. 28. No. 5. P. 24—29. <https://doi.org/10.1080/08940886.2015.1080066>
11. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Kairalapov D.U., Sirot'yan E.V. Numerical modeling of radiographic images as the basis for correctly designing digital radiography systems of large-sized objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 2. P. 136—149. <https://doi.org/10.1134/S1061830919020050> [Осипов С.П., Чахлов С.В., Кайралапов Д.У., Сиrot'ян Е.В. Численное моделирование радиографических изображений — основа корректного проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 43—55.]
12. Busi M., Kehl C., Frisvad J.R., Olsen U.L. Metal artifact reduction in spectral X-ray CT using spectral deep learning // Journal of Imaging. 2022. V. 8. No. 3. No. article 77. <https://doi.org/10.3390/jimaging8030077>
13. Zeng G.L. Photon Starvation Artifact Reduction by Shift-Variant Processing // IEEE Access. 2022. V. 10. P. 13633—13649. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142775>
14. Morin R.L., Seibert J.A. Considerations for selecting a digital radiography system // Journal of the American College of Radiology. 2005. V. 2. No. 3. P. 287—290. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2004.10.015>
15. Zolkin A.L., Munister V.D., Bogaevskaya O.Y., Yumashev A.V., Kornetov A.N. Promising directions of information technologies applications for improving of control and measuring devices in medical industry // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021. V. 2094. No. 3. No. article 032001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/3/032001>
16. Andriole K.P. Medical imaging modalities and digital images / Practical Imaging Informatics. Springer, New York, NY, 2021. P. 25—39. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1756-4_3
17. Beckmann M., Bhandari A., Kraemer F. The Modulo Radon Transform: Theory, Algorithms, and Applications // SIAM Journal on Imaging Sciences. 2022. V. 15. No. 2. P. 455—490. <https://doi.org/10.1137/21M1424615>
18. Osipov S.P., Usachev E.J., Chakhlov S.V., Schetinkin S.A., Osipov O.S. Inspection of bulk cargoes and liquids by the dual energy method // Radiation Physics and Chemistry. 2020. V. 177. No. article 109133. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109133>
19. Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., Olsen K. XCOM: Photon cross sections database, NIST standard reference database 8 (XGAM). <https://doi.org/10.18434/T48G6X>
20. Petrushanskii M.G., Kornev E.A. On determination of the effective energy of a mixed X-ray beam // Biomedical Engineering. 2006. V. 40. No. 2. P. 102—105. <https://doi.org/10.1007/s10527-006-0054-2> [Петрушанский М.Г., Корнев Е.А. К определению эффективной энергии смешанного пучка рентгеновского излучения // Медицинская техника. 2006. № 2. С. 46—49.]
21. Zhang D., Lai W., Wu J., Du H., Zhao R., Fan S. Establishment of ISO 4037-1 X-ray narrow-spectrum series // The Journal of Engineering. 2019. V. 2019. No. 23. P. 8858—8861. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.9126>

22. *Zav'yalkin F.M., Osipov S.P.* Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions // *Soviet Atomic Energy*. 1985. V. 59. No. 4. P. 842—846. <https://doi.org/10.1007/BF01123317>
23. *Barbiero A., Ferrari P.A.* Simulation of correlated Poisson variables // *Applied Stochastic Models in Business and Industry*. 2015. V. 31. No. 5. P. 669—680. <https://doi.org/10.1002/asmb.2072>
24. *Zhao N., Chen X.* Exploring the integration of MathCad-assisted mathematics experiments into higher mathematics teaching // *Computer-Aided Design and Applications*. 2022. 19(S1). P. 117—127. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2022.S1.117-127>
25. *Sarantites D.G., Sobotka L.G.* Computational templates for introductory nuclear science using Mathcad // *American Journal of Physics*. 2013. V. 81. No. 1. P. 44—49. <https://doi.org/10.1119/1.4764079>
26. *Chang J., Soldatov A., Sorokin P., Kostina M., Soldatov A., Xu S., Chiriev A.* Gaussian filtered small-angle ultrasonic computed tomography using linear arrays / *Progress in Material Science and Engineering*. Springer, Cham, 2021. P. 29—38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68103-6_3
27. *Kutsaev S., Agustsson R., Arodzero A., Boucher S., Hartzell J., Murokh A., O'Shea F., Smirnov A.Y.* Electron accelerators for novel cargo inspection methods // *Physics Procedia*. 2017. V. 90. P. 115—125. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.09.036>
28. *Graham C., Talay D.* Strong law of large numbers and Monte Carlo methods / *Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. P. 13—35. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39363-1_2
29. *Kutsaev S.V.* Advanced technologies for applied particle accelerators and examples of their use // *Technical Physics*. 2021. V. 66. No. 2. P. 161—195. <https://doi.org/10.1134/S1063784221020158> [Куцаев С.В. Перспективные технологии для прикладных резонансных ускорителей заряженных частиц и примеры их использования (Обзор) // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91. № 2. С. 173—206.]
30. *Schiff L.I.* Nonlinear meson theory of nuclear forces. II. Nonlinearity in the meson-nucleon coupling // *Physical Review*. 1951. V. 84. No. 1. P. 252—253. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.84.10>
31. *Khasanov S., Suleymanov R., Safarov A., Safarov A., Tedila H.M., Muratov R.* Calculation of exposure and absorbed dose at irradiation samples by electron bremsstrahlung // *Radiation Physics and Chemistry*. 2021. V. 188. No. article 109651. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109651>
32. Scientific educational cargo vehicle inspection system. URL: <https://portal.tpu.ru/departments/laboratory/rknl/eng/products/iDK> (Обращение 27.04.2022).
33. ANSI N42.46. American national standard for determination of the imaging performance of X-ray and gamma-ray systems for cargo and vehicle security screening, 2008.
34. *Osipov S.P., Yadrenkin I.G., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Y.* Simulation modeling in digital radiography with allowance for spatial outlines of test objects // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 8. P. 647—660. <https://doi.org/10.1134/S1061830920080082> [Осипов С.П., Ядренкин И.Г., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачев Е.Ю. Имитационное моделирование в цифровой радиографии с учетом пространственных форм объектов контроля // *Дефектоскопия*. 2020. № 8. С. 35—48.]

ВЛИЯНИЕ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2022 г. А.А. Абуеллаиль^{1,*}, Ц. Чан^{2,**}, А.И. Солдатов^{3,4,***}, А.А. Солдатов^{3,4,****}, М.А. Костина^{3,4,*****}, С.И. Борталевич^{4,*****}, Д.А. Солдатов^{3,*****}

¹Сфинкс университет, Региональная зона обслуживания, Новый Асьют 71515, Египет

²Институт перспективных исследований Шеньженского университета, Китай 3688 пр. Нанхай, Шеньжень

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

⁴Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 40,

⁵Институт проблем рынка РАН, Россия 117418 Москва, Нахимовский пр-т, 47

E-mail: *ahmed.abouellail@sphinx.edu.eg; **jiangleichang@foxmail.com; **asoldatof@tpu.ru; ****soldatov.88@bk.ru; *****mariyakostina91@mail.ru; *****680097@inbox.ru; *****dimasoldatov@sibmail.com

Приведены результаты исследования влияния переходного сопротивления контактов на результат контроля при дифференциальном термоэлектрическом методе. Показан принцип дифференциального метода контроля с двумя горячими электродами с одной системой нагрева, а также конструкция такого датчика. Приведено обоснование образования многоточечного контакта и эквивалентная схема датчика, соответствующая многоточечному контакту. Исследовано влияние контактного сопротивления на результат контроля как на модели, так и экспериментально.

Ключевые слова: термоэлектрический метод, переходное сопротивление контактов, контроль контактного сопротивления, многоточечный контакт, дифференциальный метод, термopара, эквивалентная схема датчика.

DOI: 10.31857/S0130308222070053, EDN: BOICYK

ВВЕДЕНИЕ

Термоэлектрический метод относится к области неразрушающего контроля металлов и сплавов [1, 2]. Он позволяет наиболее просто решить некоторые специфические производственные задачи: входной контроль на соответствие сертификату поставляемой продукции, определение наличия обезуглероженного слоя и его глубины, определение толщины слоя цементации стали, сортировка готовой продукции по маркам сталей и сплавов, контроль качества термической обработки, контроль качества электронно-лучевой сварки, контроль пластической деформации и измерения температуры [3—21].

Одним из несомненных преимуществ термоэлектрического метода является возможность проведения экспресс-контроля [22, 23]. Другим достоинством следует указать простоту технической реализации этого метода и, отсюда, компактность и автономность приборов термоэлектрического контроля, простота подготовки образцов и интуитивная понятность методики контроля, которая не требует специальной подготовки персонала [24—32]. Именно поэтому в последнее время наблюдается увеличивающийся интерес к таким приборам контроля.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Недостатки термоэлектрического метода связаны с низкой повторяемостью результатов контроля, что обусловлено изменением температуры горячего электрода и контролируемого изделия в процессе контроля за счет теплообмена, неоднородностью контролируемого образца по химическому и фазовому составу, разной шероховатостью поверхности и т.д. Факторы, влияющие на результаты измерений, упоминаются в работах [33, 34]. Для того, чтобы учесть эти факторы, необходимо исследовать степень их влияния на результат контроля и выработать меры, уменьшающие их влияние.

Для уменьшения влияния изменения температуры горячего электрода и контролируемого изделия в процессе контроля за счет теплообмена применяют дифференциальный метод, чувствительность и повторяемость результатов которого выше прямого метода за счет сохранения температурного режима в контактных точках одинаковым как для эталона, так и для образца.

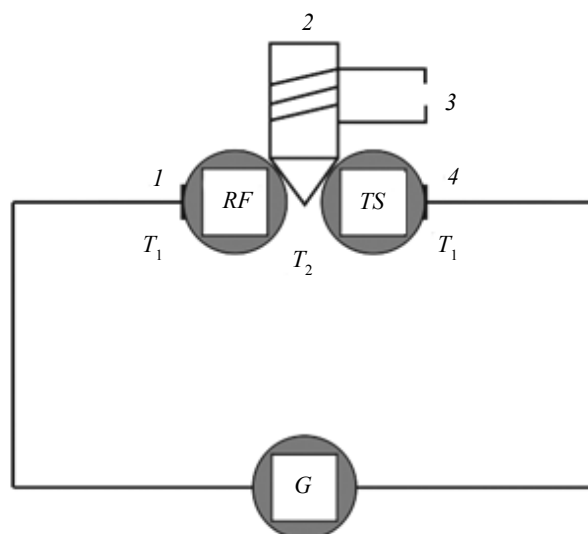


Рис. 1. Принцип измерения дифференциальной термоэлектродвижущей силы.

Принцип измерения дифференциальной термоЭДС показан на рис. 1 [35]. Цепь, состоящая из эталона RF , испытуемого образца TS , гальванометра G , горячего электрода 2, холодных электродов 1 и 4, замыкается горячим электродом 2, нагретым до температуры T_2 нагревателем 3. В случае одинаковых химических составов и состояний эталона и испытуемого образца, ЭДС контактов эталон RF — горячий электрод и горячий электрод — испытуемый образец TS будет равна по величине, но противоположна по направлению, следовательно, гальванометр не регистрирует наличие в цепи термоЭДС.

В случае различного химического состава либо структурного состояния поверхности эталона и испытуемого образца величина термоЭДС контактов эталон RF — горячий электрод — испытуемый образец TS будет различна по абсолютной величине и определяться температурой T_2 горячего и T_1 холодных электродов. В этом случае гальванометр G регистрирует наличие в цепи ЭДС, величина которой равна алгебраической сумме термоЭДС контактов эталон RF — горячий электрод и горячий электрод — испытуемый образец TS (т.е. дифференциальная термоЭДС), что свидетельствует о различном химическом составе либо структурном состоянии поверхности эталона и испытуемого образца. Размеры эталона и испытуемого образца не оказывают влияния на величину дифференциальной термоЭДС. При контроле изделий необходимо обеспечить тепловой контакт горячего электрода с испытуемым изделием, при этом происходит уменьшение температуры горячего электрода за счет передачи части теплоты контролируемому изделию. Изменение температуры приводит к изменению показаний прибора при длительном контроле изделий, так как постоянная времени процесса нагрева и охлаждения горячего электрода является неизменной величиной, в результате температура горячего электрода флуктуирует в небольшом диапазоне. Для повышения стабильности показаний прибора авторы предлагают использовать дифференциальный датчик для измерения термоЭДС с общей системой нагрева обоих горячих электродов, оригинальная конструкция которого разработана авторами и приведена на рис. 2.

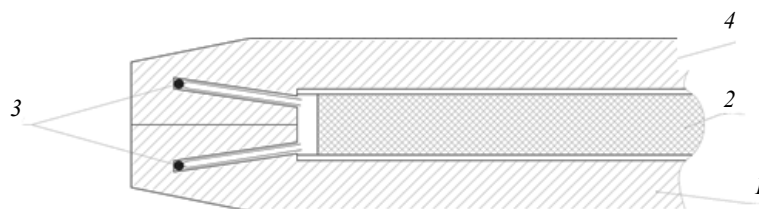


Рис. 2. Конструкция датчика:

1 — первый горячий электрод; 2 — нагревательный элемент; 3 — термопары; 4 — второй горячий электрод.

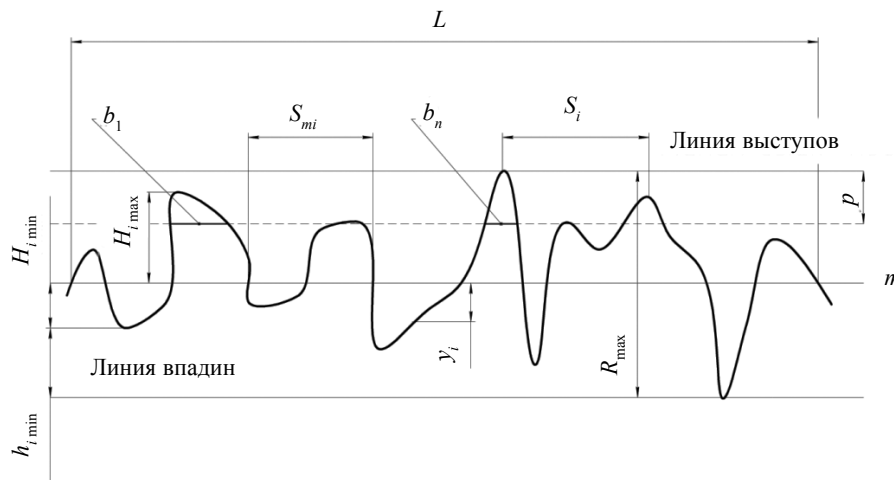


Рис. 3. График зависимости шероховатости поверхности от длины профиля и параметры шероховатости поверхности.

Для уменьшения влияния неоднородности по химическому и фазовому составу на результат контроля используют электроды не с точечным контактом, а с линейным или плоскостным. При этом получится многоточечный контакт из-за наличия шероховатости поверхности, как электрода, так и контролируемого изделия (рис. 3). Исходная шероховатость является следствием технологической обработки поверхности материала. На рис. 3 показан профиль поверхности и параметры шероховатости [36].

На рис. 3 приняты следующие обозначения: L — длина профиля неровностей; m — средняя линия неровностей профиля; p — уровень сечения профиля; S_{mi} — средний шаг неровностей профиля; S_i — средний шаг местных выступов профиля; $H_{i\max}$ — отклонение пяти наибольших неровностей профиля; $H_{i\min}$ — отклонение пяти наибольших неровностей профиля; $h_{i\max}$ — расстояние от высших точек наибольших неровностей до линии параллельной средней и не пересекающей профиль; $h_{i\min}$ — расстояние от низших точек наибольших неровностей до линии параллельной средней и не пересекающей профиль; b_1, b_n — длины отрезков, отсекаемых на уровне p ; R_{\max} — наибольшая высота неровностей профиля; y_i — отклонения профиля от средней линии.

Каждая точка контакта будет представлять отдельный источник термоЭДС (рис. 4).

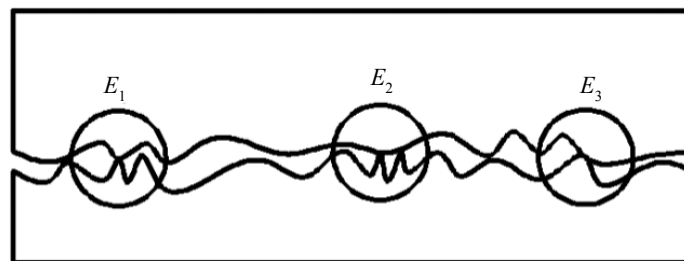


Рис. 4. Схема многоточечного контакта.

При этом измеряется эквивалентная термоЭДС (рис. 5), механизм расчета которой довольно сложен. Это связано с тем, что различные типы источников термоЭДС могут иметь разные термоэлектрические характеристики: величину ЭДС, внутреннее сопротивление, мощность и, кроме того, переходное сопротивление контакта. Одним из подходов к изучению этого механизма является представление зоны контакта горячего электрода с тестируемым образцом и эталонным набором термопар (из-за шероховатости поверхностей зона контакта будет представлять множество точечных контактов, в каждом из которых образуется термопара) с различными характеристиками,

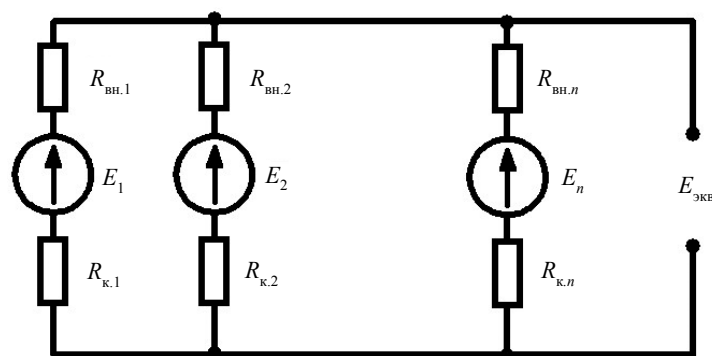


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема при контроле с многоточечным контактом, где $R_{вн.1}, R_{вн.2}, \dots, R_{вн.n}$ — внутренние сопротивления; E_1, E_2, \dots, E_n — источники ЭДС; $R_{к.1}, R_{к.2}, \dots, R_{к.n}$ — контактные сопротивления; $E_{экр}$ — эквивалентный источник ЭДС.

которые соединены параллельно [37, 38]. Этот подход увеличивает повторяемость результатов контроля, но не позволяет полностью избавиться от нестабильности показаний, что, по мнению авторов, является следствием влияния переходного сопротивления контактов.

Влияние контактного сопротивления на результат контроля

Для практического использования схема измерения дифференциальной термоЭДС, приведенная на рис. 1, неудобна, т.к. необходимо обеспечить по два контакта с каждым образцом: эталоном и контролируемым изделием. Поэтому авторы используют модернизированную схему, которая показана на рис. 6а. В ней используется конструкция датчика с двумя горячими электродами, приведенная на рис. 2. Эта схема более удобна. Оператор работает только с датчиком. Эквивалентная схема может быть представлена суммой контактных ЭДС E_1, E_2 и E_3 (рис. 6б); E_1 — контактная ЭДС горячего электрода с эталонным образцом; E_2 — контактная ЭДС эталонного образца с контрольным; E_3 — контактная ЭДС горячего электрода с контрольным образцом; R_1 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с эталонным образцом; R_2 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС эталонного образца с контрольным; R_3 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с контрольным образцом.

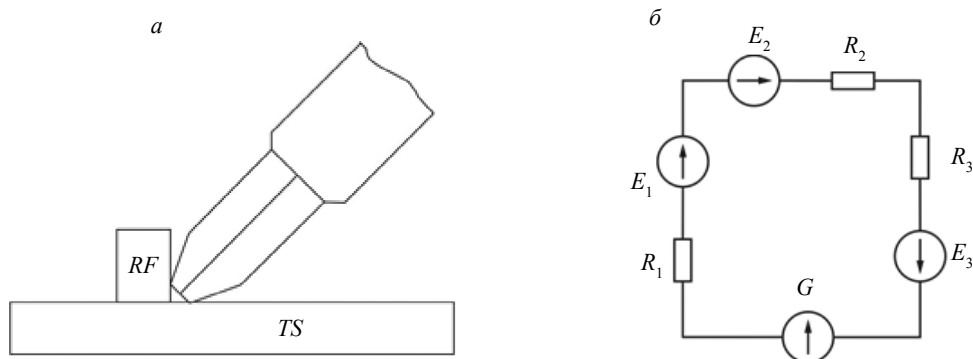


Рис. 6. Практическая схема измерения дифференциальной термоЭДС (а); идеальная эквивалентная электрическая схема при дифференциальном методе контроля (б), где E_1 — контактная ЭДС первого горячего электрода с эталонным образцом; E_2 — контактная ЭДС эталонного образца с контрольным; E_3 — контактная ЭДС второго горячего электрода с контрольным образцом; R_1 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС первого горячего электрода с эталонным образцом; R_2 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС эталонного образца с контрольным; R_3 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС второго горячего электрода с контрольным образцом.

Ток в цепи (см. рис. 6б) будет определяться внутренним сопротивлением гальванометра G и внутренними сопротивлениями источников термоЭДС E_1, E_2 и E_3 :

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

В этой схеме не учтено сопротивление контактов электродов с контрольным и эталонным образцами и сопротивление контакта эталонного образца и испытуемого. В частности, при наличии масляной пленки на поверхности электродов, контрольного образца или испытуемого изделия сопротивление контактов может возрасти до 100 Ом [39]. В этом случае эквивалентная схема примет вид, показанный на рис. 7.

В этом случае ток в цепи будет зависеть и от сопротивления контактов:

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4},$$

где R_4 — переходное сопротивление контактов.

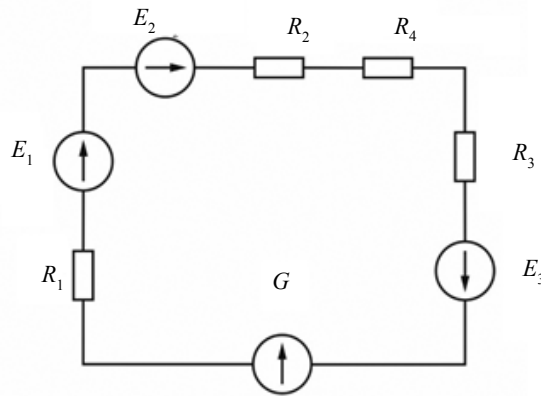


Рис. 7. Эквивалентная электрическая схема при дифференциальном методе контроля с учетом контактного сопротивления: E_1 — контактная ЭДС первого горячего электрода с эталонным образцом; E_2 — контактная ЭДС эталонного образца с контрольным; E_3 — контактная ЭДС второго горячего электрода с контрольным образцом; R_1 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС первого горячего электрода с эталонным образцом; R_2 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС эталонного образца с контрольным; R_3 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС второго горячего электрода с контрольным образцом; R_4 — переходное сопротивление контактов.

На рис. 8 показана зависимость изменения тока в цепи датчика при изменении суммарного сопротивления контакта от 0,1 до 10 Ом. Представленная модель справедлива для электродов с точечным контактом. Если используются электроды с плоскостным контактом, то за счет шероховатости поверхности электродов и испытуемого образца с эталоном контакт будет многоточечным

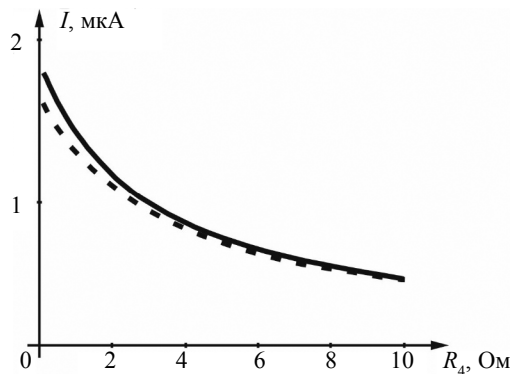


Рис. 8. Зависимость тока в цепи датчика от изменения суммарного сопротивления контакта при разных внутренних сопротивлениях гальванометра, сплошная линия — 0,1 Ом, штриховая линия — 0,5 Ом.

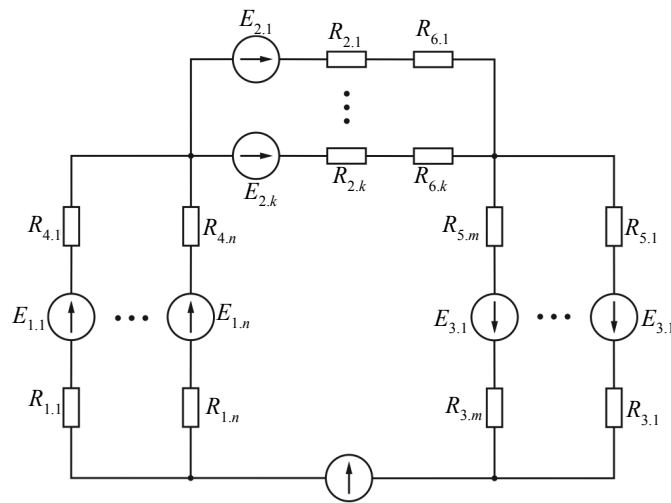


Рис. 9. Эквивалентная электрическая схема при дифференциальном методе контроля с многоточечным контактом.

и эквивалентная схема будет содержать несколько источников термоЭДС со своим внутренним сопротивлением и своим сопротивлением контактов (рис. 9).

На рис. 9 приняты следующие условные обозначения: $E_{1,1} \dots E_{1,n}$ — контактная ЭДС горячего электрода с эталонным образцом; $E_{2,1} \dots E_{2,k}$ — контактная ЭДС эталонного образца с контрольным; $E_{3,1} \dots E_{3,m}$ — контактная ЭДС горячего электрода с контрольным образцом; $R_{1,1} \dots R_{1,n}$ — внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с эталонным образцом; $R_{2,1} \dots R_{2,k}$ — внутреннее сопротивление контактной ЭДС эталонного образца с контрольным; $R_{3,1} \dots R_{3,m}$ — внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с контрольным образцом; $R_{4,1} \dots R_{4,n}$ — контактное сопротивление горячего электрода с эталонным образцом; $R_{5,1} \dots R_{5,m}$ — контактное сопротивление горячего электрода с испытуемым образцом; $R_{6,1} \dots R_{6,k}$ — контактное сопротивление испытуемого образца с эталонным.

В зависимости от усилия прижатия и равномерности распределения нагрузки по площади электродов будет иметь место и соответствующее контактное сопротивление в цепи каждого источника термоЭДС. В начальный момент контроля, когда контактное сопротивление изменяется, наблюдается переходной процесс. Ток в цепи гальванометра будет сложной функцией, зависящей от изменения контактного сопротивления во времени, изменения количества контактных термоЭДС ($n(t)$, $k(t)$ и $m(t)$) от времени (без учета неоднородности химического состава поверхности электродов, контрольного и испытуемого образцов):

$$I(t) = \frac{\sum_1^{n(t)} E_1}{\sum_1^{n(t)} [R_1 + R_4(t)]} + \frac{\sum_1^{k(t)} E_2}{\sum_1^{k(t)} [R_1 + R_6(t)]} + \frac{\sum_1^{m(t)} E_3}{\sum_1^{n(t)} [R_1 + R_5(t)]}.$$

Поэтому при ручном контроле в начальный момент времени наблюдается переходный процесс, длительность которого будет определяться квалификацией персонала. Для оценки длительности переходного процесса были проведены расчеты изменения тока в цепи датчика от времени. При моделировании были использованы следующие данные: $R_1 = R_2 = R_3 = 0,1$ Ом; $E_1 = 10$ мкВ; $E_2 = 0$ мкВ; $E_3 = 4$ мкВ; $R_{4i}(t) = R_{5i}(t) = R_{6i}(t)$ и изменяются от 1 до 0,01 Ом по экспоненциальному закону (как показано на рис. 10), на котором представлены два варианта изменения переходного сопротивления контактов. Штриховой линией показан вариант изменения переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ом за 0,2 с. Сплошной линией показан вариант изменения переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ом за 0,6 с. Количество источников термоЭДС при расчетах было одинаково в точках соприкосновения первого горячего электрода с эталоном, эталона с контролируемым образцом и контролируемого образца со вторым горячим электродом: $n(t) = k(t) = m(t)$ и изменялось от 90 до 100 шт. Результаты расчета зависимости тока в цепи датчика от времени показаны на рис. 11. Штриховой линией показан термоток в цепи датчика при изменении переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ом за 0,2 с и изменении количества

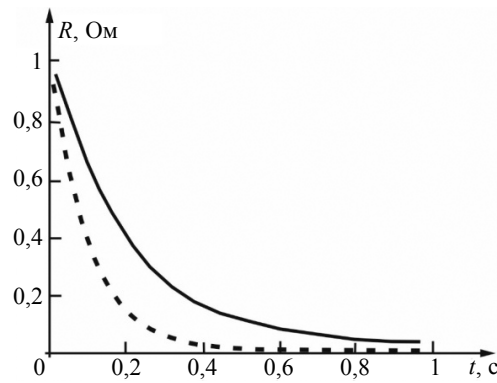


Рис. 10. Динамика изменения переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ома: штриховая линия — за 0,2 с, сплошная линия — за 0,6 с.

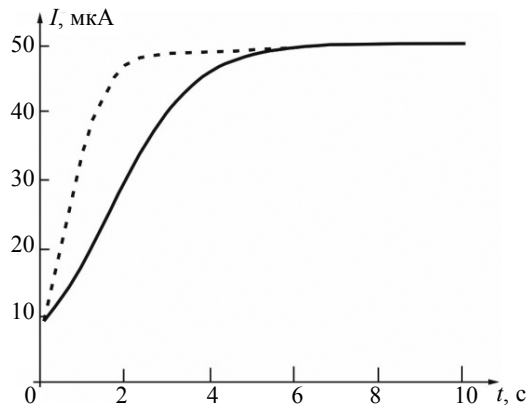


Рис. 11. Результаты расчета относительного изменения термотока в начальный момент времени при изменении количества источников термоЭДС от 90 до 100 шт.: штриховая линия — за 2 с, сплошная линия — за 5 с.

источников термоЭДС от 90 до 100 шт. в течении 2 с. Сплошной линией показан термоток в цепи датчика при изменении переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ом за 0,6 с и изменении количества источников термоЭДС от 90 до 100 шт. в течении 5 с.

Количество источников термоЭДС при моделировании было выбрано из следующих условий: для широкого класса изделий, получаемых после первичной обработки точением, сверлением, зенкованием, фрезерованием, строганием, литьем в кокиль или под давлением, получается шероховатость Rz 100 (высота неровностей профиля по 10 точкам), а горизонтальный шаг неровностей составляет порядка 100 мкм [30], соответственно количество выступов на длине 10 мм составит около 100 шт. в двумерной модели. Эти точки будут являться источниками термоЭДС при контроле.

Для проведения экспериментальных исследований прибор термоэлектрического контроля (рис. 12) подключили к персональному компьютеру и разработали программу для визуализации поступающих данных. Прибор оснастили системой мониторинга переходного сопротивления контактов.

Поступающие данные отображаются на экране монитора в виде графиков, каждый в своем окне. Пример программного интерфейса приведен на рис. 13.

В графическом окне отображаются две зависимости: красной линией показано контактное сопротивление, зеленой линией — значение термоЭДС. На оси абсцисс (ось x) отображается количество отсчетов во времени, а каждый отсчет производился через 10 мс. По оси ординат (ось y) отображается термоЭДС (мкВ) и сопротивление (Ом).

В интервале времени 0—2200 мс (отсчеты 0—220) измерения нет, термоЭДС равна нулю, контактное сопротивление около 45 (это означает, что величина переходного сопротивления контактов превышает верхний предел измерения).

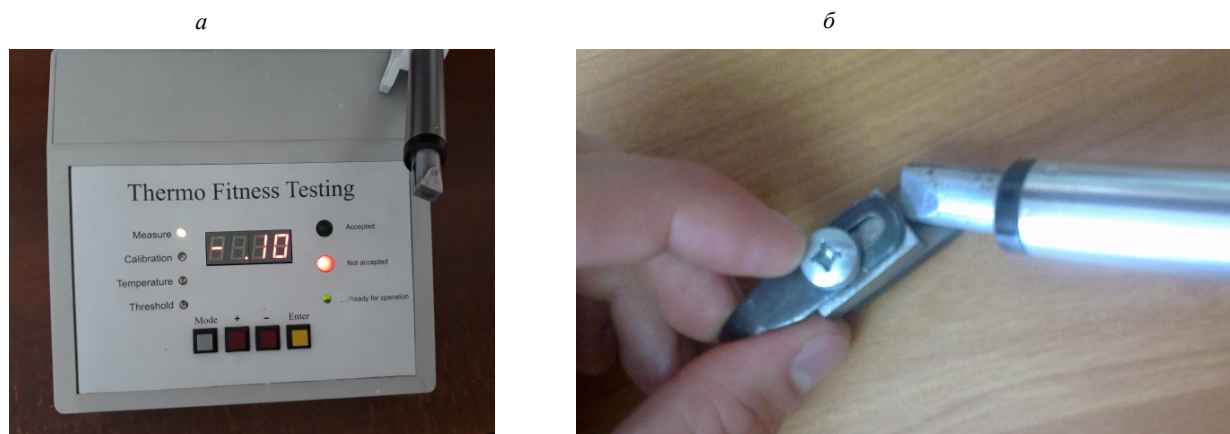


Рис. 12. Прибор TEMF:
 а — блок электроники; б — дифференциальный датчик с эталоном и тестируемым образцом.

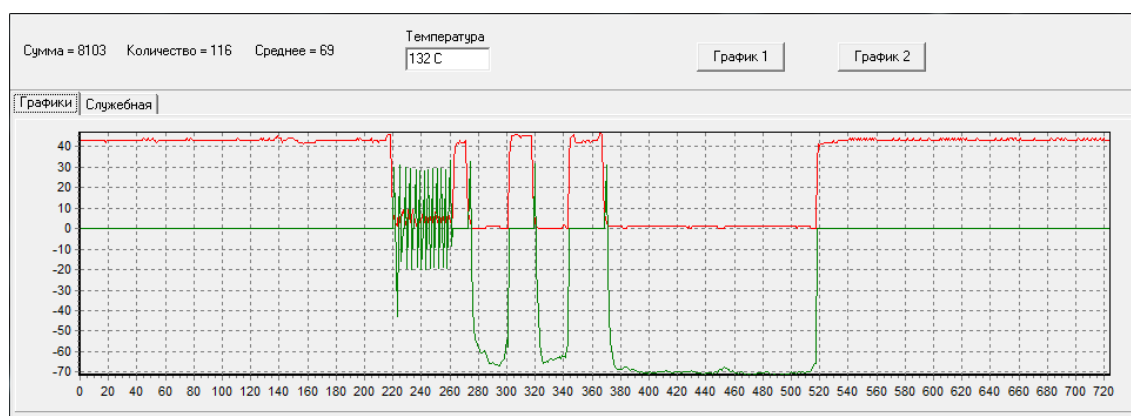


Рис. 13. Программный интерфейс.

Для имитации большого переходного сопротивления контактов между одним из горячих электродов и тестируемым образцом поместили листок бумаги. При быстром изменении усилия прижатия датчика к тестируемому образцу в интервале времени от 2200—2260 мс (отсчеты от 220 до 260) происходит вариация переходного сопротивления контактов в диапазоне (0—10) Ом при этом происходит вариация термоЭДС в диапазоне от +30 до –20 мкВ. При плавном изменении усилия прижатия в интервале времени 2700—3450 мс (отсчеты (270—345) происходит вариация переходного сопротивления контактов в диапазоне от 0 Ом до величины превышающей 45 Ом, при этом происходит вариация термоЭДС в диапазоне от +30 до –65 мкВ.

В интервале времени 3750—5150 мс (отсчеты 375—515) переходное сопротивление контактов равно нулю, переходный процесс завершился и величина термоЭДС составила –70 мкВ. В интервале времени 5150—7200 мс (отсчеты 515—720) процесс измерения завершен, сопротивление контактов увеличивается и термоЭДС становится равной нулю. Процесс измерения проводился в течении 1,4 с (отсчеты с 370 по 515 и каждый отсчет производится через 10 мс) (см. рис. 13). На графике можно увидеть переходной процесс, занимающий около 50 мс (отсчеты с 370 по 375), после этого значение термоЭДС не изменяется, наблюдаются только небольшие флуктуации, которые объясняются несовершенством ручного контроля, при котором невозможно зафиксировать положение датчика относительно образца в одном положении, поэтому небольшие угловые колебания датчика приводят к флуктуации контактного сопротивления, к изменению числа источников термоЭДС с различными величинами термоЭДС за счет неоднородной структуры материала эталона и испытуемого образца. Результаты экспериментальных исследований имеют коэффициент вариации $w = 6,2\%$, $\Delta x = \pm 3$ с уровнем доверия 95 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили определить влияние переходного сопротивления контактов на результат контроля, разработать модель многоточечного контакта электродов с испытуемым образцом с учетом переходного сопротивления контактов. Проведенные исследования показали, что достоверные показания можно получить только после завершения переходного процесса, который может длиться от нескольких десятков миллисекунд до нескольких секунд. Но даже после завершения переходного процесса происходит флуктуация данных, вызванная влиянием человеческого фактора. Проблема решается за счет применения системы автоматического мониторинга контактного сопротивления, при этом выборка данных должна осуществляться только при условии низкого переходного сопротивления контактов (менее 0,1 Ом).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carreon H.* Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing // *Journal of Applied Physics*. 2000. V. 88. Is. 11. P. 6495. DOI: 10.1063/1.1322591
2. *Carreon H.* Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2002. V. 14. Is. 2. P. 59. DOI: 10.1080/09349840209409705
3. *Nagy P.B.* Non-destructive methods for materials' state awareness monitoring // *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010. V. 52. Is. 2. P. 61. DOI: 10.1784/insi.2010.52.2.61
4. *Soldatov A.A., Seleznev A.I., Fiks I.I., Soldatov A.I., Kröning Kh.M.* Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012. V. 48. Is. 3. P. 184—186. DOI: 10.1134/S1061830912030060
5. *Li J.F., Liu W.S., Zhao L.D., Zhou M.* High-performance nanostructured thermoelectric materials // *Npg Asia Mater*. 2010. V. 2. Is. 4. P. 152. DOI: 10.1038/asiamat.2010.138
6. *Kikuchi M.* Dental alloy sorting by the thermoelectric method // *European Journal of Dentistry*. 2010. V. 4. No. 1. P. 66—70.
7. *Cooper R.F.* Sorting mixed metals by the thermoelectric effect // *Physics Education*. 1976. V. 11. Is. 4. P. 290—292. doi.org/10.1088/0031-9120/11/4/004
8. *Stuart C.M.* The Seebeck effect as used for the nondestructive evaluation of metals // *Int. Adv. Nondestruct. Test*. 1983. V. 9.
9. *Stuart C.* Thermoelectric Differences Used for Metal Sorting // *Journal of Testing and Evaluation*. 1987. V. 15. No. 4. P. 224—230. doi.org/10.1520/JTE11013J. ISSN 0090-3973
10. *Dragunov V.K., Goncharov A.L.* New approaches to the rational manufacturing of combined constructions by EBW // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 681. 012010. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012010
11. *Goncharov A., Sliva A., Kharitonov I., Chulkova A., Terentyev E.* Research of thermoelectric effects and their influence on electron beam in the process of welding of dissimilar steels // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. February 2020. V. 759 (1). 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/759/1/012008
12. *Kharitonov I.A., Rodyakina R.V., Goncharov A.L.* Investigation of magnetic properties of various structural classes steels in weak magnetic fields characteristic for generation of thermoelectric currents in electron beam welding // *Solid State Phenomena*. 2020. V. 299. P. 1201—1207.
13. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Kozhemyak O.A.* Experimental studies of thermoelectric characteristics of plastically deformed steels ST3, 08KP and 12H18N10T // *Key Engineering Materials*. 2016. V. 685. P. 310—314.
14. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Obach I.I., Bortalevich V.Y., Shinyakov Y.A., Sukhorukov M.P.* An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples / *SIBCON 2017 — Proceedings*, 2017. 79985342017.
15. *Fulton J.P., Wincheski B., Namkung M.* Automated weld characterization using the thermoelectric method // *Materials Science*. August 1993. ID: 262902.
16. *Carreon H., Medina A.* Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti–6Al–4V samples // *Materials Science, Nondestructive Testing and Evaluation*. 2007. Corpus ID: 136854526. DOI: 10.1080/10589750701546960
17. *Carreon H.* Detection of fretting damage in aerospace materials by thermoelectric means // *Smart Structures, Engineering, Physics*. 16 April 2013. Corpus ID: 123131770. DOI: 10.1117/12.2009448
18. *Lakshminarayan B., Carreon H., Nagy P.* Monitoring of the Level of Residual Stress in Surface Treated Specimens by a Noncontacting Thermoelectric Technique // *Materials Science*. 9 April 2003. Corpus ID: 135856050. DOI: 10.1063/1.1570311
19. *Carreon H.* Evaluation of Thermoelectric Methods for the Detection of Fretting Damage in 7075-T6 and Ti–6Al–4V Alloys // *Materials Science*. 2015. V. 2. Corpus ID: 137547354. DOI: 10.1007/978-3-319-48191-3_53

20. *Carreon H., Barriuso S., Barrera G., González-Carrasco J.L., Caballero F.* Assessment of blasting induced effects on medical 316 LVM stainless steel by contacting and non-contacting thermoelectric power techniques // *Materials Science*. 2012. V. 2. Corpus ID: 43997318. DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2011.12.026
21. *Hu J., Nagy P.B.* On the Thermoelectric Effect of Interface Imperfections // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 1999. V. 188. P. 1487—1494. doi.org/10.1007/978-1-4615-4791-4_191
22. *Goncharov A.L.* Investigation of the thermal electromotive force of steels and alloys of different structural grades in electron beam welding // *Welding International*. 2011. V. 25. Is. 9. P. 703—709.
23. *Goncharov A.L., Chulkova A.V., Rodyakina R.V., Dragunov V.K., Chulkov I.S.* Investigation of thermo-EMF temperature dependences for construction materials of various structural classes // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 681. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012017
24. *Li J.F., Liu W.S., Zhao L.D., Zhou M.* High-performance nanostructured thermoelectric materials // *Npg. Asia Materials*. 2010. V. 2. P. 152—158.
25. *Ritzer T.M., Lau P.G., Bogard A.D.* A critical evaluation of today's thermoelectric modules // *Thermoelectrics*. 1997. P. 619—623. DOI: 10.1109/ICT.1997.667606
26. *Buist R.J.* A new method for testing thermoelectric materials and devices / 11-th International Conference on Thermoelectrics. 7-9 October 1992.
27. *Ciyilan Bünyamin, Yılmaz Sezayi.* Design of a thermoelectric module test system using a novel test method // *International Journal of Thermal Sciences*. 2007. V. 46. Is. 7. P. 717—725. doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.10.008
28. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Loginov E.L., Abouellail A.A., Kozhemyak O.A., Bortalevich S.I.* Control system for device «thermotest» / 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2016. P. 7491869. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491869
29. *Soldatov A.A., Dement'ev A.A., Soldatov A.I., Vasil'ev I.M.* Control of Quality of Applying Heat-Conducting Compound // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 3. P. 284—290.
30. *Carreon Héctor.* Thermoelectric Detection of Fretting Damage in Aerospace Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. V. 50. No. 11. P. 684—692.
31. *Абоуеллаиль А.А., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Солдатов А.И., Хан В.* Исследование характеристик термоэлектрических источников ЭДС // *Дефектоскопия*. 2018. № 7. С. 54—60.
32. *Xuan X.C., Ng K.C., Yap C., Chua H.T.* A general model for studying effects of interface layers on thermoelectric devices performance // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002. V. 45. Is. 26. P. 5159—5170. doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00217-X
33. *Hu J., Nagy P.B.* On the role of interface imperfections in thermoelectric nondestructive materials characterization // *Applied Physics Letters*. 1998. V. 7. Is. 4. P. 467. DOI: 10.1063/1.121902
34. *Sungtaek Ju Y.* Study of interface effects in thermoelectric microrefrigerators // *Journal of Applied Physics*. 2000. V. 88. No. 7. P. 4135—4139. DOI: 10.1063/1.1289776
35. *Denisov V.V., Soldatov A.I., Tsekhanovsky S.A.* The principle of measuring differential thermo EMF in the device «thermotest» / *Tomsk MTT 2005 — Proceedings*, 2005. Art. No. 4493166. P. 33—34.
36. *Whitehouse David.* Surfaces and their Measurement. Boston: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0080972015.
37. *Abouellail A.A., Obach I.I., Soldatov A.A., Soldatov A.I.* Surface inspection problems in thermoelectric testing / *MATEC Web of Conferences*. 2017. V. 102. P. 01001. DOI: 10.1051/mateconf/201710201001
38. *Paul E.M.* Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide, Second Edition. John Wiley & Sons, 2005.
39. *Плотников А.Л.* Способ измерения величины термоЭДС естественной термопары инструмент—деталь / Патент РФ 2117557. 20.08.1998.

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2022 г. А.А. Антонов^{1,*}, А.А. Бондаренко¹, И.В. Стрельников², И.Ю. Уткин¹

¹ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Россия 119991 Москва, Ленинский пр-т, 65

² АО «НПО Лавочкина», Россия 141402 Московская обл., г. Химки, Ленинградская ул., 24

*E-mail: trp91@rambler.ru

Поступила в редакцию 04.03.2022; после доработки 20.04.2022

Принята к публикации 29.04.2022

Определение и знание напряженно-деформированного состояния ответственных конструкций и деталей машин позволяет принимать предупреждающие действия. Предложен новый подход в использовании метода лазерной интерферометрии, предназначенного для оценки остаточных сварочных напряжений в металлических конструкциях. Отличие этого подхода — применение одновременно двух лазеров с разными длинами волн, что позволяет повысить точность получаемой информации. Результат заключается в снижении погрешности измерений, обусловленной дискретностью измерения остаточных напряжений при подсчете интерференционных полос. Повышение точности измерения особенно важно для случаев, когда уровень остаточных напряжений имеет относительно небольшие значения: например, послесварочные напряжения «легких» сплавов, дробеструйная обработка, лазерная поверхностная закалка.

Ключевые слова: метод оценки остаточных напряжений, лазерная интерферометрия, метод отверстия, остаточные сварочные напряжения, точность измерения, длина волны.

DOI: 10.31857/S0130308222070065, EDN: BOJNTE

ВВЕДЕНИЕ

Остаточные напряжения возникают после различных термических или деформационных воздействий, приводящих к остаточным пластическим деформациям и остаточным напряжениям: закалка, наклеп, механическая обработка, сварка, наплавка, лазерная поверхностная обработка. Например, причиной возникновения остаточных напряжений при сварке плавлением являются пластические деформации, возникшие при быстром неравномерном расширении околошовной зоны при нагреве. Значительный объем прилегающих холодных областей основного металла препятствует увеличению зоны пластических деформаций. При остывании металла пластически деформированные элементы материала не возвращаются в первоначальное положение. В результате появляются деформации, приводящие к возникновению в равновесном состоянии сжимающих и растягивающих остаточных напряжений. Наличие высокого уровня остаточных напряжений влияет на работоспособность и долговечность сварной конструкции: могут приводить к усталостному разрушению, к коррозионному растрескиванию под напряжением, к нестабильности размеров всей конструкции. Поэтому информация о полях остаточных напряжений (как в количественном, так и в качественном представлении) может существенно помочь в разработке технологических мероприятий, направленных на их снижение или перераспределения [1—4].

Расчетные методы, позволяющие получать информацию о распределении остаточных напряжений в сварной конструкции, в настоящее время применяют все более часто. Это объясняется все более точным цифровым описанием процессов, происходящих в металле в процессе и после сварки. Однако полностью отказаться от экспериментальных методов получения информации о величине, направлении и знаке трех главных компонент тензора напряженного состояния пока не представляется возможным [5—9].

Среди экспериментальных методов оценки напряженного состояния в зоне сварного шва методы оптической интерферометрии имеют ряд преимуществ: быстрота выполнения и широкая пространственность, незначительный объем повреждения исследуемых конструкций, измерение абсолютных значений остаточных напряжений. Метод состоит в изучении созданной при помощи лазера интерференционной картины поля деформаций при упругой разгрузке, возникающей после сверления зондирующего отверстия. Интерференционная картина представляет собой чередующиеся дугообразные темные и светлые интерференционные полосы, отходящие от кромок отверстия или отпечатка. Все точки, лежащие на одной интерференционной полосе, имеют одинаковое по величине перемещение. Оси симметрии интерференционной картины перемещений являются и осями главных напряжений. Путем подсчета интерференционных полос по осям симметрии,

зная геометрию отверстия и модуль упругости материала, вычисляются остаточные напряжения [10—16]. В прошлой статье [17] было показано, как можно повысить чувствительность метода лазерной интерферометрии, основанного на применении интерферометра, построенного по оптической схеме Лейта—Упатниекса. Схема Лейта—Упатниекса позволяет за одну экспозицию определить направление главных напряжений и их величину. Иные используемые в настоящее время оптические схемы позволяют определить величину перемещения точек на кромке зондирующего отверстия только по одному главному направлению [18], т.е. за одну экспозицию, применяя иные оптические схемы, можно получить на 50 % меньше информации — только о величине напряжений только по одному главному направлению. Однако чувствительность иных оптических схем оказалась выше. За счет изменения угла наклона оптической плоскости интерферометра и перехода к применению лазера с меньшей длиной волны удалось повысить чувствительность метода, основанного на оптической схеме Лейта—Упатниекса, примерно в 2,5 раза и сравняться по чувствительности с альтернативными схемами [17].

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Интерферограмма (рис. 1) представляет собой картину, на которой видно зондирующее отверстие и отходящие от него черные полосы. Каждая черная полоса представляет собой набор точек поверхности, претерпевших одинаковое по величине и направлению перемещение после создания зондирующего отверстия. Соседняя черная полоса состоит из точек, которые претерпели перемещение относительно предыдущей полосы на величину, равную половине длины волны, излученной лазером ($\lambda/2$). Расшифровка интерферограммы состоит в определении направления главных перемещений (осей главных напряжений по X и Y соответственно) и величине перемещений точек на кромке отверстия по этим осям (далее легко пересчитать эти перемещения в напряжения в МПа в соответствии с математической зависимостью, полученной на основе закона Гука). Величина перемещений точек на кромке отверстия определяется через визуальный подсчет числа интерференционных полос, пересекающих условные оси симметрии картины на интерферограмме, соответствующие направлению осей главных напряжений. Если геометрические параметры всех или большинства отверстий, которые будут выполнены на данной поверхности, будут неизменными, то достаточно просто изначально

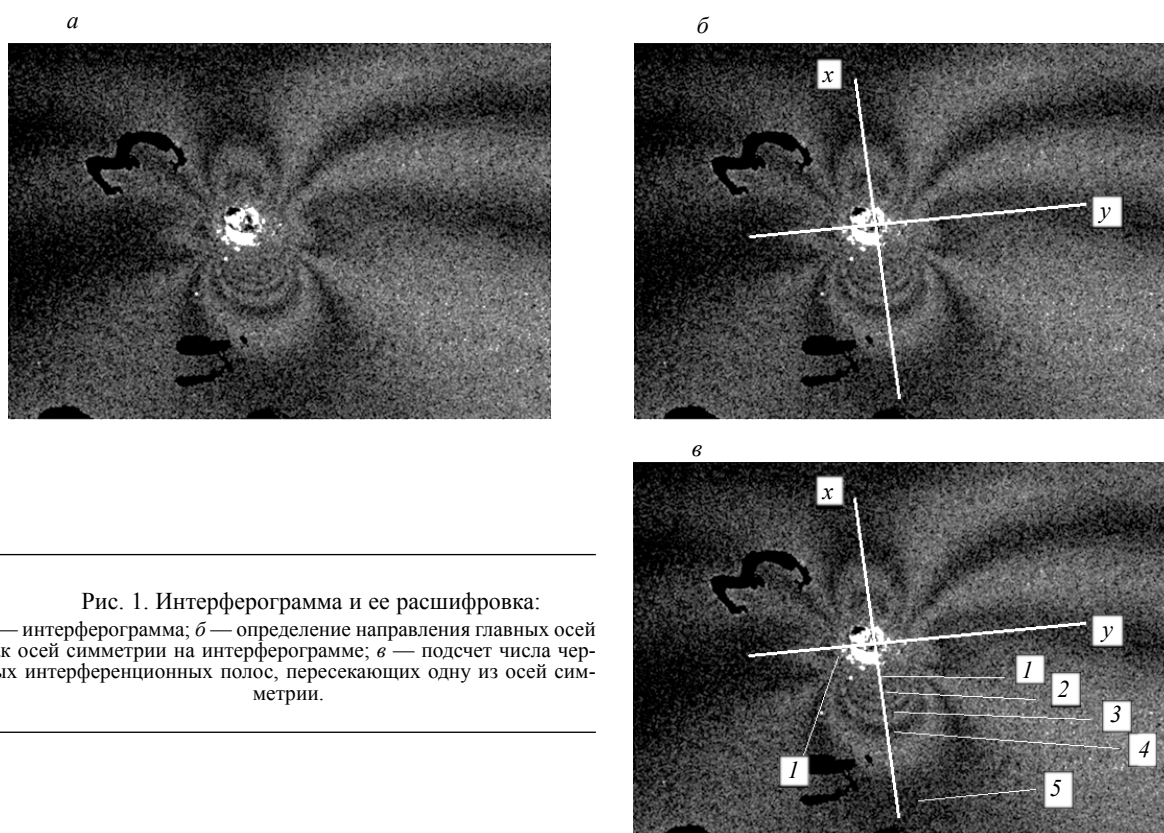


Рис. 1. Интерферограмма и ее расшифровка:
 а — интерферограмма; б — определение направления главных осей как осей симметрии на интерферограмме; в — подсчет числа черных интерференционных полос, пересекающих одну из осей симметрии.

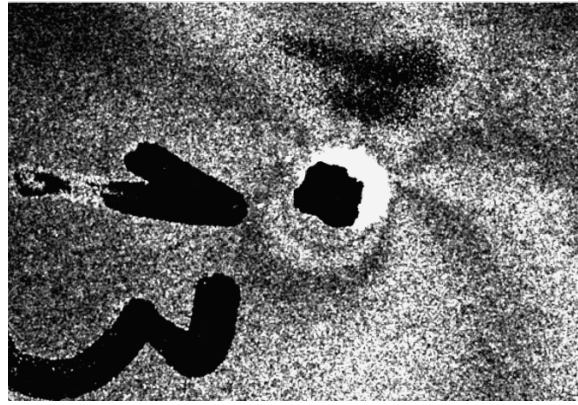


Рис. 2. Интерферограмма с двумя интерференционными полосами.

рассчитать цену одной интерференционной полосы в МПа для каждого спектра излучения отдельно.

В ряде случаев, когда величина остаточных напряжений в исследуемой точке значительно меньше предела текучести, даже повышенной чувствительности метода лазерной интерферометрии оказывается недостаточно, чтобы относительно достоверно оценить напряженное состояние. Например, когда на интерферограмме наблюдается малое число полос, это говорит о невысоком уровне остаточных напряжений (рис. 2).

Каждая интерференционная полоса добавляет к значению перемещений точки на кромке отверстия величину, равную $\lambda/2$. Точность определения на кромке не зависит от числа полос и составляет диапазон, равный еще одной интерференционной полосе, т.е.

$$W = \left(N \frac{\lambda}{2} \right)_{-0}^{+\frac{\lambda}{2}},$$

где W — величина перемещения точки, лежащей на главной оси на кромке зондирующего отверстия; N — число интерференционных полос; λ — длина волны излучения лазера.

Таким образом, максимальная погрешность, независимо от числа подсчитанных полос, равна одной неучтенной (незамеченной на интерферограмме) интерференционной полосе. Реальное значение числа интерференционных полос $N_{\text{реал}}$, соответствующее перемещению точки на кромке зондирующего отверстия по одному из направлений главных напряжений, лежит в диапазоне между подсчитанным числом полос N и значением $N+1$, т.е. $N_{\text{реал}}$ может быть не целым числом.

Для дальнейшего повышения чувствительности предложено установить в интерферометре два лазера с разными длинами волн излучения и записывать интерферограммы для каждой волны излучения раздельно. В этом случае, после анализа двух интерферограмм мы имеем два диапазона, внутри которых находится истинное значение перемещения точки на кромке отверстия. Каждый из диапазонов получен для лазера с одной из выбранных длин волн $[N_x; N_x+1]$ и $[N_y; N_y+1]$. Выбираем между двумя значениями нижней границы диапазона N_x и N_y максимальное, а между двумя значениями верхней границы диапазона N_x+1 и N_y+1 — минимальное. Таким образом, окончательный диапазон, внутри которого находится реальное значение числа интерференционных полос, — $[N_y; N_x+1]$.

В эксперименте, результаты которого представлены ниже, были использованы лазерные диоды с длинами волн 650 нм (красный спектр излучения) и 532 нм (зеленый спектр излучения). Конструктивно лазерный интерферометр состоит из блока лазерных диодов, делительного элемента, объектива и цифровой камеры. Блок лазерных диодов состоит из двух лазерных диодов с разными длинами излучаемых волн и жидкокристаллического элемента, поочередно перекрывающего излучение одного из лазеров (рис. 3).

Последовательность работы с комбинированным интерферометром следующая. После установки интерферометра на исследуемую поверхность последовательно записываются две интерферограммы в красном и зеленом спектрах. Затем, без демонтажа интерферометра создается зондирующее отверстие. Далее, после завершения сверления последовательно получаем еще две интер-

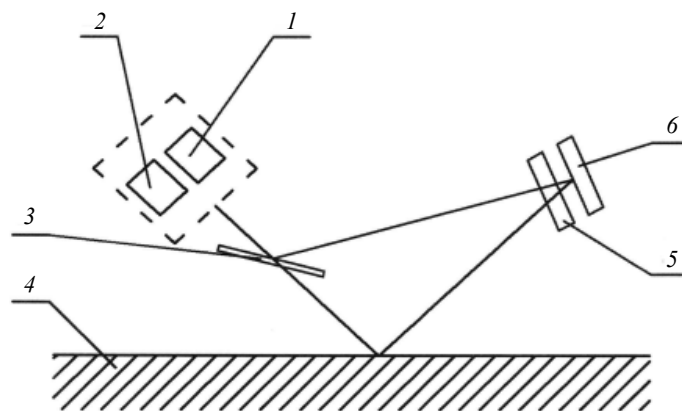


Рис. 3. Оптическая схема интерферометра:

1 — лазерный диод с длиной волны 650 нм; 2 — лазерный диод с длиной волны 532 нм; 3 — делительный элемент; 4 — исследуемая поверхность; 5 — объектив; 6 — цифровая видеокамера.

ферограммы в красном и зеленом спектрах. После получения всех интерферограмм с помощью соответствующего программного обеспечения математически производится вычитание друг из друга интерферограмм, полученных с помощью красного лазера, и интерферограмм, полученных с помощью зеленого лазера.

В одном из экспериментов при изучении пластины из алюминиевого сплава АМг-6 толщиной 5 мм, имеющий стыковой сварной шов, были получены следующие интерферограммы, представленные на рис. 4 и 5. Зондирующее отверстие диаметром 3,0 мм и глубиной 1,5 мм было создано в области основного металла на расстоянии 4 мм от линии сплавления.

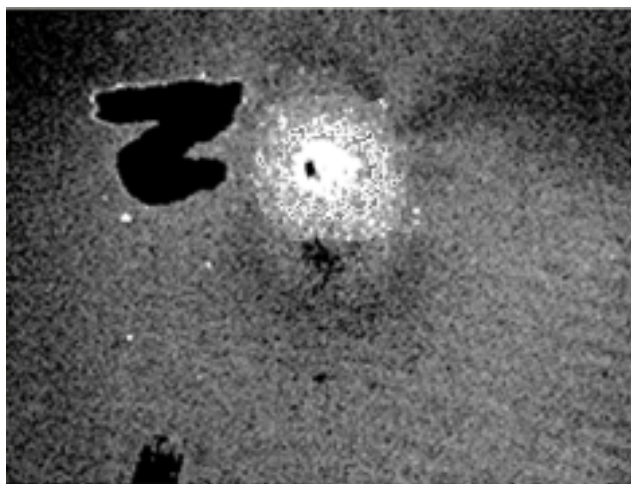


Рис. 4. Интерферограмма, полученная при работе красного лазерного диода с длиной волны 650 нм.

На рис. 6 показана методика повышения точности путем уменьшения диапазона, внутри которого находится искомое значение $N_{\text{реал}}$.

В результате анализа интерферограммы, полученной с помощью красного лазера (см. рис. 4), зафиксировано 2 интерференционные полосы. Следовательно, реальное число полос лежит в диапазоне от 2 до 3. На интерферограмме, полученной с помощью зеленого лазера (см. рис. 5), зафиксировано 3 интерференционных полосы. Следовательно, реальное значение величины N лежит в диапазоне от 3 до 4.

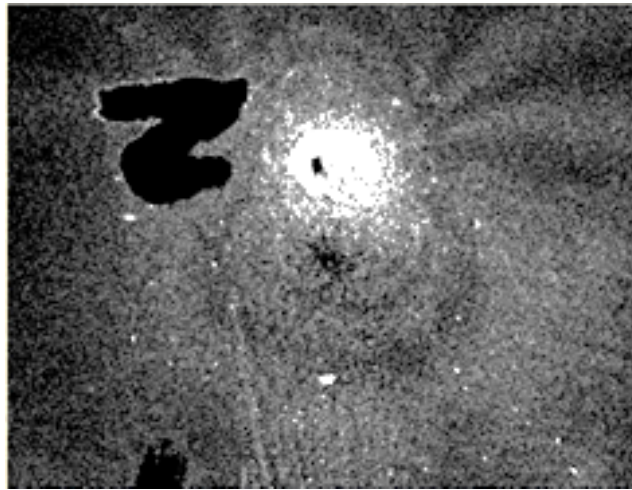


Рис. 5. Интерферограмма, полученная при работе зеленого лазерного диода с длиной волны 532 нм.

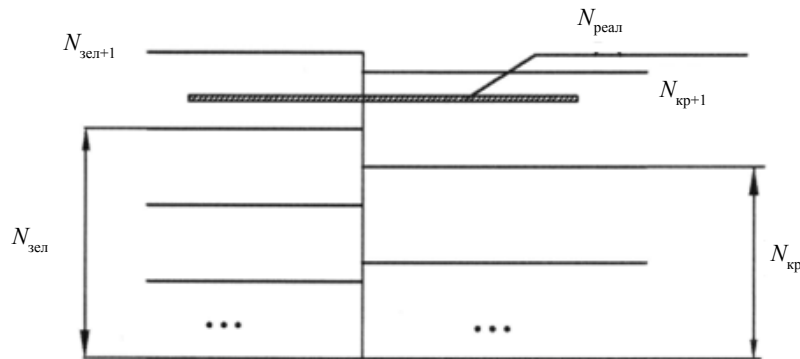


Рис. 6. Схема повышения точности определения реального значения количества интерференционных полос, соответствующей величине перемещений точки на кромке зондирующего отверстия, за счет применения двух лазеров с разными длинами волн.

Таблица 1

Результаты расчета величины напряженного состояния

№ п/п	Длина волны излучения лазерного диода, нм	Диаметр отверстия, мм	Глубина отверстия, мм	Цена одной интерференционной полосы, МПа	Число зафиксированных интерференционных полос	Диапазон значений напряженного состояния, внутри которого находится реальное значение остаточного напряжения, для данной точки поверхности, МПа
1	650	3,0	1,5	12,13	2	24,26—36,39
2	532	3,0	1,5	9,93	3	29,79—39,72
3	Одновременное применение красного и зеленого лазера для одного зондирующего отверстия					29,79—36,39

Для соответствующих геометрических параметров отверстия при применении красного (длина волны 650 нм) и зеленого (длина волны 532 нм) лазеров расчетная цена одной интерференционной полосы будет составлять 12,13 и 9,93 МПа. В табл. 1 приведены результаты расчета напряженного состояния по вертикальной оси интерферограмм.

Таким образом, в данном случае нам удалось повысить точность определения значения напряженного состояния с разброса значения в 50 % от расчетной величины для красного спектра излучения и 33 % для зеленого спектра излучения до величины до 22 % при комплексном применении двух лазеров с разными длинами волн.

Таким образом, применение усовершенствований в методе лазерной спекл-интерферометрии позволяет производить более точное измерение остаточных напряжений. Данное обстоятельство играет существенную роль при выполнении поисковых сравнительных работ для оптимизации технологий, а также при малых величинах напряжений.

Необходимо отметить, что выполнение работ с использованием лазерного интерферометра не требует значительных усилий на подготовку поверхности. Основная задача таких работ — удалить с поверхности загрязнения, которые могут деформироваться иначе, нежели сама поверхность в зоне зондирующего отверстия, т.е. тонкий слой лакокрасочного покрытия допустим. Уровень шероховатости поверхности не оказывает какого-либо влияния на качество и достоверность полученных интерферограмм. Важно соблюдение заданного угла между оптической плоскостью интерферометра и касательной к исследуемой поверхности, проведенной в точке, где планируется создать зондирующее отверстие.

Черные цифры на рис. 1, 2, 5 и 6 обозначают номер отверстия и наносятся на поверхность до выполнения первой экспозиции. Задача их нанесения — идентифицировать интерферограмму, однозначно привязать ее к конкретному отверстию. Для того, чтобы они не мешали восприятию интерферограмм, расстояние между кромкой отверстия и ближайшей к ней точке символа цифры должна быть не менее двух диаметров зондирующего отверстия. Однако на рис. 2 приведена интерферограмма, где это расстояние уменьшено. Но это нарушение не приводит к невозможности расшифровать данную интерферограмму.

ВЫВОДЫ

1. Формирование двух спекл-интерферограмм от лазеров с разными длинами волн излучения позволяет снизить погрешность измерения, обусловленную дискретностью измерения остаточных напряжений при подсчете интерференционных полос.

2. Конструктивно конструкция лазерного интерферометра и его оптическая схема практически не изменяется. Вместо одного лазера в интерферометр монтируются два лазера с разными длинами волн излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков С.С., Коновалов А.В., Куркин А.С. Разработка технологии снижения остаточных напряжений и деформаций в зоне сварного соединения ультразвуковыми колебаниями // Сварочное производство. 2018. № 4. С. 32—38.
2. Hosford William F. Residual Stresses / In: Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press, 2005. P. 308—321. ISBN 978-0-521-84670-7.
3. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
4. Сагалевиц В.М., Савельев В.М. Стабильность сварных соединений и конструкций. М.: Машиностроение, 1986. 264 с.
5. Прилуцкий М.А. Методы определения напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций. Обзор // Сварка и диагностика. 2007. № 1. С. 17—21.
6. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components // Materials and Design, 2012. № 35. P. 572—588.
7. Алёшин Н.П. Возможности методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния нагруженных металлоконструкций // Сварка и диагностика. 2011. № 6. С. 44—47.
8. Withers P.J., Bhadeshia H.K. Residual stress. Part 1 — Measurement techniques (Overview) // Materials Science and Technology. 2001. № 17. P. 355—365.
9. Пироговский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений / Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 248 с.
10. Sarga P., Menda F. Comparison of ring-core method and hole-drilling method used for determining residual stresses // American journal of mechanical engineering. 2013. No. 1. P. 335—338.
11. Barsanti M., Beghini M., Santus C., Benincasa A., Bertelli L. Integral method coefficients and regularization procedure for the ring-core residual stress measurement technique // Advanced materials research. 2014. № 996. P. 331—336.

12. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. 2002. № 10. С. 1—10.
 13. Антонов А.А. Разработка научных основ метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях с применением голографической интерференции / Дисс. ... докт. техн. наук. М., 1984. С. 470.
 14. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. Оперативное определение остаточных напряжений с использованием электронной спекл-интерферометрии // В мире неразрушающего контроля. 2005. Т. 27. № 1. С. 10—13.
 15. Антонов А.А. Оперативная оценка и исследование напряженно-деформированного состояния сварных соединений объектов нефтегазового комплекса // Сварочное производство. 2010. № 5. С. 23—27.
 16. Пономарев К.Е., Стрельников И.В. К вопросу выбора экспериментального метода оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварка и Диагностика. 2018. № 2. С. 29—34.
 17. Антонов А.А., Капустин О.Е., Уткин И.Ю. Развитие метода лазерной интерферометрии, предназначенного для оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях // Дефектоскопия. 2020. № 5. С. 45—51. [Antonov A.A., Kapustin O.E., Utkin I.Yu. Development of a Laser Interferometry Method for Assessing Residual Stresses in Welded Structures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 5. P. 445—451.]
 18. Махутов Н.А., Разумовский И.А., Косов В.С., Апальков А.А., Одинцев И.Н. Исследование остаточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии в натуральных условиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. № 5. Т. 74. С. 47—51.
 19. Антонов А.А., Стрельников И.В. Способ определения внутренних остаточных напряжений и устройство для его осуществления / Патент на изобретение RU 2712929 C1.
-