## ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный Основан в феврале 1965 года Екатеринбург

№ 5 2022

### СОДЕРЖАНИЕ

### Акустические методы

<b>Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, Д.В. Чернов, А.В. Кожевников, И.В. Мищенко.</b> Повышение вероятности выявления источников акустической эмиссии с помощью искусственных нейронных сетей	3
Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек. Портативный накладной прямой совмещенный электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвукового контроля через диэлектрические слои толщиной до 20 мм на поверхности ферромагнитных металлоизделий	13
<b>Е.Г. Базулин.</b> Применение метода распознавания со сжатием для достижения сверхразрешения эхосигналов	24
Электромагнитные методы	
Шив Сундар Сингх, Акаш Субхаш Авале, Бинаяка Нахак. Оценка параметров поверхности термообработанной стали магнитными методами неразрушающего контроля	37
<b>Д.С. Громыка, К.В. Гоголинский.</b> Методика диагностирования состояния и оценки остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов	51
Тепловые методы	
Ванша Кхер, Равибабу Мулависала. Статистический анализ контроля дефектов в армированных стекловолокном пластиках с использованием визуализации частотно-модулированных тепловых волн	61
Информация	68

УДК 620.179.17:620.179.143

### ПОВЫШЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2022 г. Ю.Г. Матвиенко<sup>1</sup>, И.Е. Васильев<sup>1,\*</sup>, Д.В. Чернов<sup>1</sup>, А.В. Кожевников<sup>2</sup>, И.В. Мищенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), Россия 101990 Москва, Малый Харитоновский пер., 4

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, Красноказарменная, 14

E-mail: \*vie01@rambler.ru

Поступила в редакцию 10.03.2022; после доработки 21.03.2022 Принято к публикации 25.03.2022

Изучены возможности снижения погрешности локации источников акустической эмиссии (АЭ) для случаев, когда источники АЭ расположены вблизи от приемных преобразователей АЭ (ПАЭ). С целью уменьшения погрешности локации и повышения вероятности выявления таких источников при обработке данных диагностики АЭ использованы искусственные нейронные сети (ИНС). Обучение ИНС выполнялось по параметрам локационных импульсов, регистрируемых с применением генератора импульсов на поверхности стальной полосы. Для генерации импульсов использовался широкополосный преобразователь, устанавливаемый на разном расстоянии от приемных ПАЭ. После обучения ИНС была использована для обработки результатов локации источников АЭ, зарегистрированных при испытаниях на разрыв стальной полосы с концентраторами в виде отверстий диаметром 5 мм, расположенными на расстоянии 40 мм от приемных ПАЭ. Вероятность выявления источников АЭ, выполненная с применением ИНС по параметрам локационных импульсов в зонах расположения концентраторов, составляла p=0,72, т.е. практически в 12 раз превышала полученное значение вероятности p=0,061 в случае использования стандартного алгоритма.

*Ключевые слова*: акустическая эмиссия, генератор импульсов, преобразователи акустической эмиссии, стальная полоса, линейная локация, вероятность выявления источника акустических сигналов, искусственные нейронные сети.

**DOI:** 10.31857/S0130308222050013; **EDN:** BLOXAX

### **ВВЕДЕНИЕ**

Точное определение местоположения источников АЭ, генерируемых в процессе образования и развития дефектов, является одной из актуальных задач АЭ диагностики изделий. При этом, как правило, используют стандартную методику координатной локации источников АЭ, основанную на расчетных значениях групповой скорости распространения импульсов ( $V_g$ ) в стенке изделия и регистрируемых значениях разности времен прихода ( $\Delta t$ ) импульсов АЭ на преобразователи антенной решетки [1]. Стандартная методика не учитывает особенностей акустического тракта, в том числе дисперсионных свойств материала, влияющих на параметры сигналов, что приводит к снижению достоверности результатов локации источников АЭ [2—5]. Одним из возможных способов снижения погрешности локации источников АЭ является применение алгоритма « $\Delta t$ -mapping», основанного на построении атласа значений  $\Delta t$  [6—9]. Однако эффективность этой методики заметно снижается по мере увеличения базы локационной решетки (B) свыше 0,5 м вследствие затухания импульсов, регистрируемых удаленными преобразователями [10]. Целью данных исследований является изучение возможности снижения погрешности координатной локации и повышения вероятности выявления источников АЭ с применением ИНС [11].

Одним из основных факторов, влияющих на точность локации источников АЭ в ближней зоне от ПАЭ при пороговом способе регистрации импульсов, является крутизна их переднего фронта. Для установления корреляционных зависимостей между групповой скоростью импульсов и параметрами регистрируемых сигналов по мере удаления источника АЭ от ПАЭ были проведены исследования, рассмотренные в публикациях [12—15]. В качестве основных параметров, характеризующих форму импульса, использовали максимальную амплитуду  $(u_m)$ , время нарастание  $(t_{\phi})$ , число выбросов  $(N_u)$ , длительность импульса АЭ  $(t_u)$ , усредненную частоту выбросов  $(N_u/t_u)$ . Как отмечалось в публикации [15], формы импульса АЭ, в том числе крутизна переднего фронта сигнала в процессе его распространения в диспергирующей среде, заметно изменяются по мере удаления от источника. При этом скорость затухания импульса зависит

не только от уровня его амплитуды, но и парциальной доли энергии высокочастотных составляющих в спектре сигнала. Исходя из анализа рассмотренных в [12—16] зависимостей, влияния мультипликативных и аддитивных составляющих погрешности вычисления скорости распространения волнового пакета при пороговом методе регистрации импульсов, была разработан алгоритм и методика локации источников АЭ с применением ИНС.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На этапе сбора данных, используемых для обучения ИНС, эксперименты проводили на полосе из стали Ст3 с размерами  $500 \times 50 \times 3$  мм. На рис. 1 показана стальная полоса, по поверхности которой между приемными преобразователями  $R15\alpha$ -SMA фирмы Mistras (США) устанавливали излучатель импульсов АЭ — широкополосный преобразователь UT-1000, последовательно удаляя его на 30 мм от ПАЭ № 1 на шагах регистрации параметров локационных импульсов в координатах  $X_i = 30, 60, ..., 330$  мм.



Рис. 1. Стальная полоса с излучателем импульсов и приемными ПАЭ.

В ходе экспериментов источник АЭ (преобразователь UT-1000) подключался к каналу возбуждения генератора MFG-72120MA (КНР). Для имитации широкополосных сигналов АЭ различной амплитуды на возбуждающий канал генератора подавался прямоугольный импульс, максимальная амплитуда которого изменялась в диапазоне 10 мВ — 10 В, что позволяло варьировать амплитуду регистрируемых ПАЭ импульсов в диапазоне  $u_m = 40$ —85 дБ. Перед исследованиями определяли оптимальные настройки измерительной аппаратуры и вычисляли скорость распространения импульсов АЭ ( $V_g$ ) в стальном образце, среднее значение которой составляло  $V_g = 3500$  м/с при максимальном размере антенной решетки B = 360 мм. Порог дискриминации сигналов АЭ выбирали из условия  $u_{th} \ge u_n + 6$  дБ ( $u_n$  — максимальная амплитуда сигналов помех) и составлял  $u_{th} = 40$  дБ при полосе пропускания цифровых фильтров  $\Delta f = 30$ —500 кГц.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАНДАРТНОГО АЛГОРИТМА ЛИНЕЙНОЙ ЛОКАЦИИ

На основании результатов, зарегистрированных в ходе линейной локации источников АЭ на стальной полосе, определяли вероятность (*p*) их выявления [16]. При использовании стандартного алгоритма локации отмечался значительный разброс расчетных значений координат источников АЭ относительно их истинного положения. К тому же максимум регистрируемых событий АЭ мог быть смещен на 5—30 мм относительно фактического положения источника АЭ.

В качестве примера на рис. 2 представлена гистограмма распределения событий АЭ в масштабе  $\Delta B = 5$  мм области локации B = 360 мм при положении источника АЭ в координатах  $X_i = 90$ , 180 и 270 мм.

Как видно из рис. 2, при размещении источника АЭ в координате X=90 мм диапазон разброса расчетных значений событий АЭ достигал  $\Delta X=\pm30$  мм, а максимум их локации был смещен относительно истинного положения излучателя на 15 мм. Подобные отклонения максимумов расчетной локации событий АЭ от фактического положения источника отмечались во всех местах установки преобразователя UT-1000 за исключением центрального положения при X=180 мм, где расчет координаты источника не зависит от скорости распространения импульса АЭ. Следовательно, средний уровень приведенной погрешности зависит от удаления источника АЭ относительно ПАЭ. Так, например, при установке излучателя на расстояниях  $X_i=30$ , 300 мм от приемных ПАЭ уровень погрешности превышал 15 %. Приближение источника АЭ к центру области локации заметно снижает уровень приведенной погрешности, которая при  $X_i=180$  мм составляла менее 2 %.

Как показали результаты выполненных исследований [14, 16], на точность результатов применения стандартного алгоритма линейной локации существенное влияние оказывают

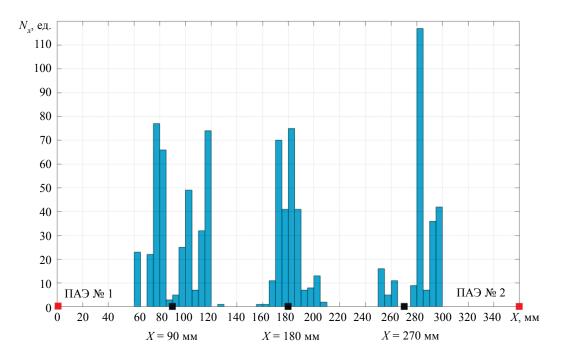


Рис. 2. Гистограмма распределения АЭ событий  $(N_{_{\! 1}})$ , зарегистрированных в интервалах  $\Delta B=5$  мм, при локации источника АЭ в координатах  $X_{_{\! 1}}$ .

параметры регистрируемых импульсов АЭ и удаленность источника акустических сигналов от приемных преобразователей. Разброс локации координат  $X_i$  коррелирует с уровнем флуктуаций групповой скорости импульса  $V_g$  при пороговом методе регистрации импульсов. Численная оценка уровня флуктуаций скорости осуществляется с помощью нормировочного коэффициента  $\gamma = V/V_g$ , где V — фактическое значение скорости распространения импульсов при пороговой регистрации импульсов, а  $V_g$  — значение скорости, рассчитанное по результатам предварительных испытаний, когда источник АЭ находился вне зоны локации. Смещение максимума распределения  $N_{\pi}(X)$  относительно фактического положения источника АЭ зависит от аддитивной составляющей погрешности  $\Delta$  ( $\Delta t$ ), возникающей при пороговом методе регистрации импульсов АЭ [10, 12—15]. На рис. 3 представлена зависимость параметра  $\gamma$  от уровня максимальной амплитуды  $u_m$  регистрируемых импульсов ПАЭ №1.

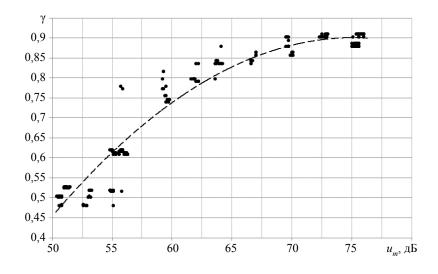


Рис. 3. Зависимость нормировочного коэффициента  $\gamma$  от максимальной амплитуды  $(u_m)$  регистрируемых импульсов.

Маркерами показаны результаты экспериментальных исследований, полученные при генерации импульсов АЭ с применением преобразователя UT-1000. Штриховой линией представлен результат аппроксимации экспериментальных данных полиномом второго порядка  $\gamma(u_m) = -0,0007 \times u_m^2 + 0,1059 \times u_m - 3,0825$ , для которого коэффициент детерминации составил  $R^2 = 0,957$ . Как следует из рис. 3, если амплитуда  $u_m$  не превышала 55 дБ, то значение нормировочного коэффициента снижалось до  $\gamma = 0,47$ , а, следовательно, возрастала погрешность стандартного алгоритма линейной локации. При уровне максимальной амплитуда импульсов  $u_m \ge 75$  дБ нормировочный коэффициент  $\gamma \ge 0,9$  и расчетное значение скорости  $V_g$  приближались к фактическому V. Как уже отмечалось, на результат линейной локации существенное влияние оказывает аддитивная составляющая погрешности ( $\Delta$ ) расчета параметра  $\Delta t$ , возникающая при пороговом методе регистрации импульсов АЭ [12, 15, 16]. На рис. 4 показан результат расчета параметра  $\Delta$  в зависимости от местоположения источника АЭ.

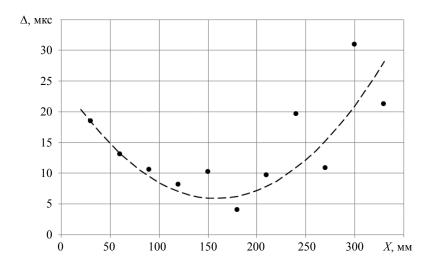


Рис. 4. Зависимость аддитивной составляющей погрешности ( $\Delta$ ) от положения источника АЭ (X).

Как следует из рис. 4, наибольший уровень аддитивной погрешности, достигающий  $\Delta = 31$  мкс, регистрируется, когда источник АЭ находится вблизи от приемных ПАЭ. При приближении источника АЭ к центру локационной области аддитивная составляющая погрешности снижается до  $\Delta = 10$  мкс. Показанный на рис. 4 график корреляционной зависимости может быть описан полиномом второго порядка  $\Delta(X) = 0.0007562 \cdot X^2 - 0.2397 \cdot X + 24.9$ .

Рассмотренные на рис. 3 и рис. 4 зависимости нормировочного коэффициента и аддитивной составляющей погрешности локации источников АЭ от параметров регистрируемых импульсов АЭ были использованы при разработке алгоритма локации по данным диагностики АЭ с применением ИНС.

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДОСТОВЕРНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Методы машинного обучения — отдельный класс алгоритмов интеллектуального анализа данных, которые выполняют решение новой задачи, путем сравнения и выбора используемых оптимальных алгоритмов [11]. Среди методов машинного обучения особую популярность обрели интеллектуальные нейронные сети — широкий класс разнообразных систем, представляющих собой иерархические сетевые структуры, состоящие из множества элементов, называемых нейронами, передающих и анализирующих поступающую информацию. При этом, для эффективной работы ИНС требуется решить задачу оптимизации структурных связей сети (обучения ИНС), рационально используя вычислительные ресурсы компьютера [17—21], т.е. подбора оптимальных значений весовых коэффициентов связей.

Задача разработки ИНС, способной снизить погрешность локации источников АЭ, включает следующие этапы: определение структуры ИНС, ее обучение, оптимизацию выбранной структуры ИНС и оценку вероятной погрешности работы ИНС. Существуют две основные структуры нейронных сетей: ациклические сети (с прямым распространением) и циклические (рекуррентные) сети [20]. Сеть с прямым распространением представляет собой определенную функцию текущих входных данных. Рекуррентная сеть обладает обратной связью, т. е. передает свои выходные данные обратно на входные нейроны.

В данной работе использовали структуру ациклических сетей, поскольку входные данные задачи определения местоположения источника АЭ обрабатывали изолированно из-за неоднородности входных параметров. При обучении ИНС прибегали к таким параметрам локационных импульсов, как разность времени прихода сигналов на ПАЭ локационной группы, максимальную амплитуду, их длительность, время нарастания, количество выбросов, аддитивную погрешность и нормировочный коэффициент  $\gamma$ . Для обучения была использована базовая структура ациклической сети — многослойный персептрон, состоящий из набора связанных между собой искусственных нейронов. Перед началом процесса синтеза нейронной сети, способной корректно определять локацию, необходимо предварительно: сформировать обучающую выборку с данными и локацией X зарегистрированных с имитатора импульсов, нормализовать и разделить ее на k=10 частей, а также отобрать множество различных структур ИНС (с различными количествами слоев, нейронов на них и функциями активации), которые будут участвовать в синтезе эффективной ИНС (рис. 5).

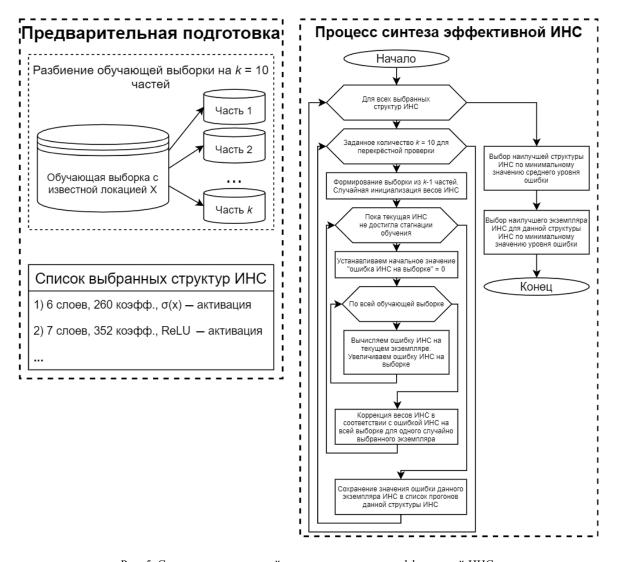


Рис. 5. Схема предварительной подготовки и синтеза эффективной ИНС.

В качестве реализации алгоритмов обучения ИНС применяли нейросетевой пакет TensorFlow [21] — библиотеку с открытым исходным кодом, реализованную на языке Python. Для обучения ИНС (см. рис. 5) был использован алгоритм стохастического градиентного спуска (SGD), направленный на постепенное снижение значения функции ошибки (потерь), а в качестве функции потерь была выбран средний квадрат ошибки (MSE), который вычисляется как  $MSE(Input_i) = (NN(Input_i) - X_i)$ , где  $Input_i$  — входные данные одного зарегистрированного импульса,  $NN(Input_i)$  — выходное значение нейронной сети для этого импульса, а  $X_i$  — его локапия.

Для оценки каждой отдельной структуры ИНС использовалась перекрестная проверка (crossvalidation) — метод оценки аналитической модели и ее поведения на независимых данных [11]. При оценке модели имеющиеся в наличии данные разбиваются на k частей (см. рис. 5). Затем на k-1 частях проводили обучение модели, а оставшуюся часть данных использовали для тестирования. Процедура повторяли k раз, вследствие чего каждую из k частей данных применяемой выборки использовали для тестирования. Это позволяло оценить эффективность выбранной модели при наиболее рациональном использовании имеющихся данных.

### ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Так как комплексное применение параметров регистрируемых импульсов АЭ позволяет с большей точностью определить местоположение развивающихся повреждений по сравнению со стандартным алгоритмом локации, то обучение результирующей ИНС необходимо проводить с большим количеством входных нейронов. С целью оптимизации набора наиболее информативных параметров выполнен многократный эксперимент по обучению ИНС и исключению наименее значимых из них. В качестве информативных параметров при обучении ИНС использовали следующие: разность времен прихода импульсов на преобразователи антенной решетки ( $\Delta t$ ), максимальная амплитуда ( $u_m$ ), длительность ( $t_u$ ), время нарастания ( $t_\phi$ ), число выбросов в импульсах ( $N_u$ ), усредненная их частота ( $N_u/t_u$ ), относительное изменение амплитуды ( $u_m/u_m$ ), отношение времени нарастания ( $t_\phi/t_\phi$ ), нормировочный коэффициент  $\gamma$  и значение аддитивной погрешности ( $\Delta$ ) — задержки регистрации импульсов системой АЭ. Необходимо отметить, что применение комплексных параметров может не только повысить, но и снизить эффективность ИНС при обработке результатов диагностики АЭ. В табл. 1 показаны девять вариантов группировки, которые применяли при обучении ИНС параметров.

Таблица 1 Группы информативных параметров сигналов АЭ, использованных при обучении ИНС

Параметр	Номер группы (n)								
Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta t$	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$u_{_m}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$t_{ m \phi}$		+	+	+	+	+	+	+	+
$t_{_{\mathrm{H}}}$			+	+	+	+	+	+	+
N				+	+	+	+	+	+
$u_{m1} / u_{m2}$					+	+	+	+	+
$N/t_u$						+	+	+	+
$t_{\varphi 1} / t_{\varphi 2}$							+	+	+
γ								+	+
Δ									+

Для каждой из групп параметров было проведено многократное обучение ИНС (900 вариантов) по данным АЭ, зарегистрированным при тестовых испытаниях на стальной полосе. С помощью процедуры кросс-валидации (см. рис. 5) проводился отбор наилучших кандидатов при обучении

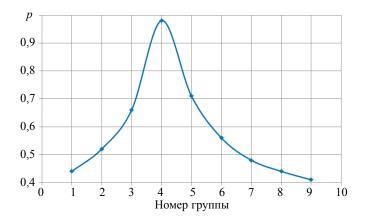


Рис. 6. График вероятности выявления источников АЭ, построенный для различных групп информативных параметров (см. табл. 1).

ИНС, в котором оценивалось среднее значение погрешности для всей обучающей выборке за 10 прогонов. По результатам проведенного отбора было определено оптимальное количество входных нейронов (рис. 6), позволяющих получить максимальную вероятность выявления источников АЭ в ближней зоне от ПАЭ.

По результатам проведенного отбора наилучший результат (p=0.98) при обучении ИНС был зарегистрирован для четвертой группы с параметрами  $\Delta t,\ u_{m},\ t_{\phi},\ t_{\mu},\ N,$  состоящей из семи слоев и 352 весовых коэффициентов.

### АПРОБАЦИЯ ИНС ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБЛАСТИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

Разработанный алгоритм был апробирован на данных, полученных в ходе диагностики АЭ испытания на разрыв стальной полосы с двумя концентраторами напряжений в виде отверстий диаметром 5 мм, расположенных симметрично на расстоянии 140 мм относительно центра. При проведении диагностики АЭ приемные ПАЭ устанавливались на расстоянии 40 мм от концентраторов так, что размер линейной локации составлял B = 360 мм. На рис. 7 показан общий вид испытаний стальной полосы, установленной в захваты нагружающего стенда Instron-5982.



Рис. 7. Общий вид проведения экспериментальных исследований: I — стальной образец; 2 — захваты испытательной установки; 3 — преобразователи акустической эмиссии; 4 — струбцины.

В ходе диагностики АЭ, проводимой с применением системы «Vallen AMSY-6» ( $\Phi$ PГ), в области концентраторов наблюдалось неравномерное накопление повреждений, вследствие чего интенсивность накопления повреждений в зонах верхнего и нижнего отверстия заметно отличалась.

В зонах концентраторов, где происходили наиболее интенсивные локальные разрушения структуры материала, должна регистрироваться и максимальная плотность индикаций источников АЭ. Разрушение стального образца произошло в области верхнего концентратора на расстоянии 35 мм от ПАЭ № 1. Однако однозначное определение максимальной плотности распределения событий АЭ, зарегистрированных с применением стандартного алгоритма линейной локации, не представляется возможным. На рис. 8 представлен результатов применения стандартной методики линейной локации источников АЭ.

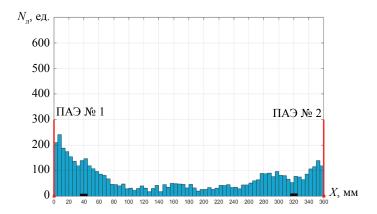


Рис. 8. Результат применения стандартного алгоритма линейной локации источников АЭ.

Как следует из рис. 8, максимум распределения АЭ событий, достигающий значения 230 ед., был зарегистрирован в координате X=5 мм, т. е. на удалении 35 мм от места разрушения стального образца (верхнего отверстия, отмеченного чертой на рисунке слева). При использовании стандартного алгоритма средний уровень плотности индикаций источников АЭ в зоне локации не превышал 72 ед., что составляло 30 % от максимального значения. Статистическая обработка полученных результатов показала, что вероятность выявления дефекта в зоне верхнего концентратора (X=40 мм) не превышала p=0,061.

На рис. 9 показано распределение плотности индикаций источников АЭ, зарегистрированных в области локации стальной полосы по результатам обработки данных диагностики АЭ с применения ИНС.

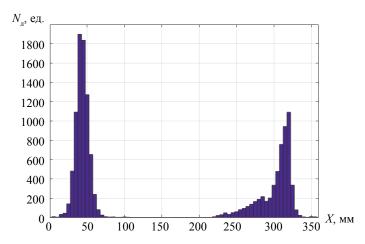


Рис. 9. Результат апробации алгоритма линейной локации источников АЭ по данным диагностики АЭ с применением ИНС.

Как следует из рис. 9, максимальный уровень локации источников АЭ, достигающий  $N_{\rm c} = 1918$  ед., получен в интервале X = 45 - 50 мм на расстоянии 5 - 10 мм от места разрушения полосы, что в 8,34 раза превышало плотность индикаций источников, зарегистрированных в соответствующем интервале с применением стандартного алгоритма (см. рис. 8). При этом вероятность выявления источников АЭ в зоне распространения трещины в стальной полосе достигала p = 0.72, что в 11,8 раз превышало уровень p = 0.061, полученный при использовании стандартного алгоритма.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения рассмотренной в работе задачи проведена серия экспериментальных исследований по оценке погрешности стандартного алгоритма линейной локации источников АЭ. В результате обработки параметров локационных импульсов, зарегистрированных в процессе генерации импульсов АЭ с помощью электронного имитатора, была определена погрешность их локации. Средний уровень вероятности выявления источников АЭ, определенный с помощью стандартного алгоритма в процессе тестовых экспериментов, составлял p=0,26. При этом вероятность выявления концентраторов, расположенных на расстоянии 40 мм от приемных преобразователей, с помощью стандартного алгоритма линейной локации не превышала p =0,061. В процессе обработки экспериментальных данных установлены наиболее информативные параметры импульсов АЭ, коррелирующие со значениями нормировочного коэффициента у и аддитивной составляющей погрешности  $\Delta$  локационного алгоритма. Данные параметров локационных импульсов были использованы в процессе обучения нейронных сетей с целью повышения вероятности выявления источников АЭ.

Апробация ИНС проведена по результатам локации источников АЭ, полученных при испытаниях на разрыв стальной полосы с концентраторами в виде сквозных отверстий диаметром 5 мм, расположенных на расстоянии 40 мм от приемных преобразователей. Применение предварительно обученных ИНС позволило существенно повысить вероятность выявления до p = 0.72, тогда как вероятность их выявления с помощью стандартного алгоритма линейной локации не превышала p = 0.061. При этом существенно снизилась снизить максимальная погрешность локации источников АЭ в зонах концентраторов, составляющая не более чем на 10 мм от центров отверстий.

Дальнейшим шагом развиваемой методики является применение ИНС для снижения погрешности определения координат источников АЭ при планарной локации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00351).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
- 2. Georgiou G.A. Probability of Detection (PoD) Curves Derivation, applications and limitations. Jacobi Consulting Limited, London. 2006.
- 3. Sause M.G.R., Linscheid F.F., Wiehler M. An Experimentally Accessible Probability of Detection Model
- for Acoustic Emission Measurements // J. Nondestruct. Eval. 2018. V. 37. P. 17.

  4. *Diakhate M., Bastidas-Arteaga E., Pitti R.M., Schoefs F.* Probabilistic Improvement of Crack Propagation Monitoring by Using Acoustic Emission / In: Zehnder A. et al. (eds) Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution. 2017. V. 8. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham.
- 5. Gagar D., Irving P., Jennions I., Foote P., Read I., McFeat J. Development of Probability of Detection Data for Structural Health Monitoring Damage Detection Techniques Based on Acoustic Emission / Proceedings of the 8th International Workshop on Structural Heath Monitoring, Stanford, United States of America, 13—15 September, 2011. P. 1391—1398.
- 6. Eaton M. J., Pullin R., Holford K. M. Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. V. 43 No. 6. P. 856—863.
- 7. Baxter M.G., Pullin R., Holford K.M., Evans S.L. Delta T source location for acoustic emission // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. V. 21. No. 3. P. 1512—1520.
- 8. Al-Jumaili S.K., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin R. Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. V. 72—73. P. 513—524.
- 9. Pullin R., Baxter M., Eaton M.J., Holford K.M., Evans S.L. Novel acoustic emission source detection // J. Acoust. Emiss. 2007. V. 25. P. 215—223.

- 10. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Mishchenko I.V. Error reduction in determining the wave-packet speed in composite materials // Instruments and Experimental Techniques. 2020. V. 63. No. 1. P. 106—111.
- 11.  $\it Paccen C.$ ,  $\it Hopвиг П.$  Искусственный интеллект: современный подход / 2-е издание. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 1408 с.
- 12. *Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Bubnov M.A., Chernov D.V.* Influence of dimensions and shape of process cutouts on the accuracy of locating acoustic emission sources // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 2. P. 101—109.
- 13. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Рамазанов И.С., Харламов Б.М. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / Под ред. Л.Н. Степановой, А.Н. Серьезнова. М.: Машиностроение. Полет, 2008. 440 с.
- 14. Agletdinov E., Merson D., Vinogradov A. A new method of low amplitude signal detection and its application in acoustic emission // Applied Sciences (Switzerland). 2020. V. 10. No. 1. P. 73.
- 15. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Elizarov S.V. Problems of locating acoustic emission sources // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 9. P. 769—778.
- 16. Чернов Д.В., Васильев И.Е., Марченков А.Ю., Ковалева Т.Ю., Куликова Е.А., Мищенко И.В., Горячкина М.В. Влияние амплитуды акустических сигналов на вероятность выявления источников акустической эмиссии // Вестник МЭИ. 2022. № 1. С. 130—136.
- 17. LeCun Yann A., Bottou Leon, Orr Genevieve B., Muller Klaus-Robert. Efficient backprop / Neural networks: Tricks of the trade / Grégoire Montavon, Geneviève B. Orr, Klaus-Robert Müller (Eds.). Berlin Heidelberg: Springer, 2012. T. 7700.
- 18. Crivelli Davide, Guagliano Mario, Monici Alberto. Development of an artificial neural network processing technique for the analysis of damage evolution in pultruded composites with acoustic emission // Composites Part B: Engineering. V. 56. 2014. P. 948—959. ISSN 1359—8368. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.005
- 19. Mahil C., Loo Ch., Sasikumar T., Suresh S. Analysis of failure mode and fracture behavior by using acoustic parameter and artificial neural network // Engineering Research Express. 2019. P. 1—15.
- 20. Ech-Choudany Y., Assarar M., Scida D., Morain-Nicolier F., Bellach B. Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates // Applied Acoustics. 2017. V. 123. P. 123—132. ISSN 0003-682X. https://doi.org/10.1016/j. apacoust.2017.03.008
- 21. Abadi Martín, Agarwal Ashish, Barham Paul, Brevdo Eugene, Chen Zhifeng, Citro Craig, Corrado Greg S., Davis Andy, Dean Jeffrey, Devin Matthieu, Ghemawat Sanjay, Goodfellow Ian, Harp Andrew, Irving Geoffrey, Isard Michael, Jia Yangqing, Jozefowicz Rafal, Kaiser Lukasz, Kudlur Manjunath, Levenberg Josh, Mane Dan, Monga Rajat, Moore Sherry, Murray Derek, Olah Chris, Schuster Mike, Shlens Jonathon, Steiner Benoit, Sutskever Ilya, Talwar Kunal, Tucker Paul, Vanhoucke Vincent, Vasudevan Vijay, Viegas Fernanda, Vinyals Oriol, Warden Pete, Wattenberg Martin, Wicke Martin, Yu Yuan, Zheng Xiaoqiang. Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems. 2016. P. 19.

# ПОРТАТИВНЫЙ НАКЛАДНОЙ ПРЯМОЙ СОВМЕЩЕННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЧЕРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЛОИ ТОЛЩИНОЙ ДО 20 ММ НА ПОВЕРХНОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

© 2022 г. Г.М. Сучков<sup>1,\*</sup>, Р.П. Мигущенко<sup>1,\*\*</sup>, О.Ю. Кропачек<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина 610002 Харьков, ул. Кирпичева, 2 e-mail: \*hpi.suchkov@gmail.com; \*\*mrp1@ukr.net; \*\*\*kropachek@ukr.net

Поступила в редакцию 17.01.2022; после доработки 04.02.2022 Принято к публикации 28.03.2022

Разработан портативный прямой совмещенный электромагнитно-акустический преобразователь для толщинометрии ферромагнитных изделий через диэлектрические прослойки толщиной до 20 мм путем совершенствования плоской высокочастотной катушки индуктивности и новой электронной схемы преобразователя. Для проверки возможностей нового преобразователя разработан стенд. Показано, что новая электронная схема управления бесконтактного сенсора позволяет качественно согласовать датчик с генератором зондирующих импульсов и усилителем принятых ультразвуковых пакетных сигналов. В результате обеспечивается контроль более тонких изделий с большей чувствительностью. Экспериментальные исследования показали, что новый электромагнитно-акустический преобразователь дает возможность проводить толщинометрию ферромагнитных изделий при воздушном зазоре или толщине диэлектрических покрытий до 20 мм.

*Ключевые слова*: ультразвуковая толщинометрия, электромагнитно-акустический преобразователь, генератор зондирующих импульсов, предварительный усилитель, донный сигнал, зазор, ферромагнитное изделие.

DOI: 10.31857/S0130308222050025; EDN: BLPCRM

### **ВВЕДЕНИЕ**

Мировая промышленность использует большое число изделий, изготовленных из ферромагнитных материалов, в своем большинстве стальных: листы, трубы, заготовки и др. При эксплуатации такие изделия подвержены абразивному утонению, особенно на гибах труб, и коррозии. Для надежной эксплуатации стальные изделия покрывают краской, пластиком, керамикой и другими покрытиями. Однако в полной мере защитить изделия от повреждений во время эксплуатации невозможно. Кроме того, например, в трубопроводах различного назначения, емкостях для хранения жидкостей и в аналогичных изделиях на внутренних стенках формируются отложения, иногда значительной толщины. Вследствие этого обнаружение коррозионных повреждений металла под такими отложениями существенно осложняется. Практически невозможно измерять остаточную толщину металла.

Как правило, измеряют толщину или обнаруживают поврежденные участки в таких объектах путем применения неразрушающих методов, среди которых основным является ультразвуковой (УЗ) [1]. Традиционные УЗ технологии контроля требуют предварительной зачистки поверхности ввода/приема ультразвука. По данным ОАО «Харьковский котельно-механический завод» затраты на подготовку поверхности стальных изделий примерно равны затратам на проведение УЗ контроля. Аналогичные данные приводятся в статьях [2, 3].

Для решения проблем традиционного ультразвукового контроля довольно успешно выполняются исследования и разработки электромагнитно-акустического (ЭМА) способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов, о чем свидетельствует значительное количество информационных сообщений, опубликованных в последнее время [4—28]. Несмотря на значительные технические и экономические преимущества ЭМА-метода контроля, он имеет существенный недостаток [1, 4, 5, 28] — недостаточную эффективность ЭМА-преобразователей (ЭМАП). Даже в случае толщинометрии для получения необходимого значения амплитуды донных импульсов по отношению к амплитуде шума зазор между ЭМАП и металлом должен быть минимальным [1, 5, 11, 12], что не позволяет проводить УЗ контроль без удаления покрытий или отложений толщиной до 20 мм (рис. 1).

В последнее время прилагаются существенные усилия для увеличения расстояния между ЭМАП и поверхностью металла [7, 10, 13—18]. Так, в работах [13, 28] отмечено, что ЭМА-



Рис. 1. Образец из трубы диаметром 1200 мм, бывшей в эксплуатации, с локальными отложениями на внутренней поверхности толщиной до 20 мм и более.

датчики могут работать с зазорами до 1 мм, преобразователи прибора ОКО ndt GROUP [14] и дефектоскопа ЕМАСОN-01 [15] могут работать при зазорах до 2 мм; ЭМАП, выпускаемые канадской фирмой Innerspec [16], могут работать с зазорами до 1 мм, в приборе NKD-019 «UltraSonic» — при контроле листов и труб через воздушные зазоры до 4 мм [17]. В автоматических ЭМА-установках для зеркально-теневого контроля рельсов, внедренных в 1983— 1985 гг. на ОАО «Кузнецкий металлургический комбинат», ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» и АО МК «Азовсталь» [ТУ 14-2-542-83, ТУ 14-2-584-84, ТУ У 14-2-1199-97] зазор составлял 5 мм (с использованием постоянных электромагнитов массой около 100 кг). На сайте предприятия ОКТАNTA-NDT [18] сообщается о разработке ручного толщиномера с ЭМА преобразователем, который может работать при зазорах до 6 мм. Авторы работы [19] предложили конструкцию ЭМАП для толщиномера, который может позволить выполнять измерения при зазорах или при диэлектрических покрытиях до 10 мм. Однако предложенный преобразователь обладает значительным временем переходных процессов после воздействия зондирующего импульса, что не позволяет измерять толщины ферромагнитных изделий величиной до 20 мм. Определенный успех по увеличению зазора между ЭМАП и металлом до 25 мм достигнут авторами работы [20], но это техническое решение может использоваться только для волн Лэмба.

Прямолинейный подход к проблеме существенного увеличения расстояния между ЭМАП и металлом путем увеличения тока в высокочастотной катушке индуктивности до сотен ампер [7, 8, 10, 21] и величины индукции магнитного поляризующего поля до 1,2 Тл [4, 7, 8, 10, 19, 22] на сегодня практически себя исчерпали.

Необходимы новые подходы к поставленной проблеме. Для этого осуществляются теоретические [5, 6, 22, 23, 28] и экспериментальные [4, 5, 7, 11, 19, 22, 24] исследования. Например, в [27] предложена новая конструкция высокочастотной катушки индуктивности и новая схема питания, что, по мнению автора, может увеличить эффективность возбуждения УЗ импульсов ЭМА-способом.

Анализ данных, приведенных в известных информационных источниках, позволили сформулировать цели работы:

разработать ЭМАП, который позволит выполнять толщинометрию ферромагнитных изделий при зазорах или толщине диэлектрических покрытий и отложений до 10 ... 20 мм;

существенно уменьшить длительность переходных процессов после завершения действия зондирующих импульсов («звон»), что, при прочих равных условиях, позволит измерять толщину относительно тонких участков ферромагнитных металлоизделий.

### РАЗРАБОТКА ЭМАП, МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве базового объекта для разработки авторы использовали ЭМА-преобразователь, описанный в статье [19] (рис. 2).

Мощный постоянный магнит І на основе соединения NeFeB фиксируется в корпусе при помощи ферромагнитной пластины — магнитопровода 2. Магнит 1 отделяется от катушки 3 экранирующей пластиной 4, выполненной, например, из латуни типа ЛС69 толщиной 0,2 мм. Она необходима для исключения появления когерентных помеховых ультразвуковых импульсов в теле магнита 1. Жгут 3 из нескольких изолированных проводников плоской высокочастотной катушки индуктивности (ВКИ) помещается в окантовку 5 из диэлектрика. Окантовка 5 соединяется с протектором 6 из стеклотекстолита, после чего катушка 3 заливается клеем. На протекторе 6 закреплена окантовка 7 из латуни. В отдельном корпусе 8 ЭМАП размещены элементы электронного управляющего устройства проводниками ВКИ 3 (диоды, конденсаторы, резисторы на рис. 2 не показаны).

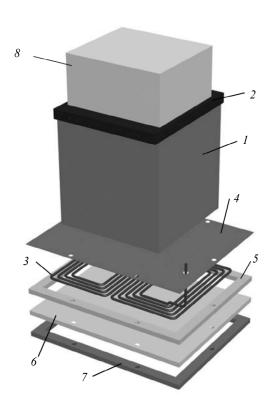


Рис. 2. Конструкция базового ЭМАП.

Размеры разработанного преобразователя: 62×65×130 мм<sup>3</sup>. Масса ЭМАП составила 1,7 кг. Этот преобразователь имеет ряд преимуществ по сравнению с другими:

возбуждает и принимает высокочастотные сдвиговые линейно-поляризованные ультразвуковые импульсы нормально поверхности ферромагнитного изделия (их скорость распространения примерно в 2 раза меньше, чем у продольных волн), что важно при толщинометрии тонких из-

хорошо согласуется с низкоомным выходом питающего генератора импульсов высокочастотного тока и высокоомным входом приемного усилителя за счет применения автоматических электронных переключателей;

обладает высокой чувствительностью в отношении донных импульсов;

отличается пониженной чувствительностью по отношению к электромагнитным помехам за счет выполнения ВКИ в форме «крыльев бабочки».

При своих достоинствах этот ЭМАП имеет существенные недостатки:

при значительных расстояниях между ЭМАП и поверхностью изделия добротность высокочастотной катушки индуктивности возрастает, что приводит к существенному увеличению длительности «звона» в цепях преобразователя после окончания действия питающего импульса тока. В результате невозможно измерять толщину тонких изделий по параметрам первого донного импульса и невозможно принимать импульсы, отраженные от дефектов, расположенных на небольших расстояниях от поверхности ввода УЗ импульсов;

электронная схема переключения проводников жгута ВКИ сложная и громоздкая;

из-за конструктивных особенностей проводники жгута ВКИ имеют разную длину, что приводит к неполному соответствию частот возбуждаемых и принимаемых УЗ импульсов;

различная длина проводников жгута ВКИ приводит к разным величинам токов, проходящих в каждом из проводников. Следовательно, повышается вероятность выхода из строя диодных ключей и всего устройства.

Для устранения отмеченных недостатков авторы предложили для базового ЭМАП изменить конструкцию плоской высокочастотной катушки, схему ее подключения и новую электронную схему управления, которую следует выполнить следующим образом (рис. 3): a — вход схемы для подачи высокочастотных пакетов импульсов тока от генератора зондирующих импульсов (ГЗИ);  $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2, \mathcal{I}_3$  — диодные ключи;  $C_1, C_2$  — конденсаторы; R — резистор; L — жгут параллельно включенных изолированных проводников ВКИ одинаковой длины, 6 витков (рис. 4); Тр — высокочастотный согласующий трансформатор; b — выход ЭМАП.

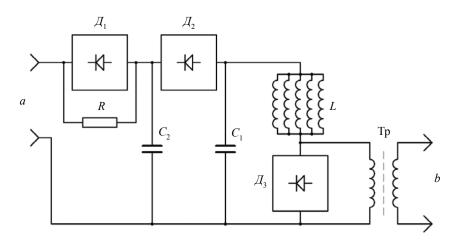


Рис. 3. Электронная схема ЭМАП.

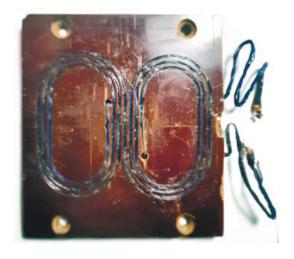


Рис. 4. Высокочастотная катушка индуктивности ЭМАП в диэлектрической оправке.

Работает новая электронная схема следующим образом. На вход а подается пакетный высоковольтный высокочастотный импульс питания. Диодные ключи  $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$  и  $\mathcal{A}_3$  открываются. Образуется резонансный контур из L,  $C_1$  и  $C_2$ , а также выходных параметров ГЗИ. В L образуется мощный высокочастотный ток силой в сотни ампер, необходимый для возбуждения УЗ импульсов. После выключения высоковольтного импульса питания закрываются диодные ключи  $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2$  и  $\mathcal{I}_3$ . В результате образуется контур: выход  $\Gamma$ 3И—R— $C_2$ , что позволяет рассеять существенную часть энергии, накопленную в выходных каскадах ГЗИ, исключая ее влияние на принимаемые донные сигналы. В результате уменьшается длительность «звона» после выключения импульса питания плоской высокочастотной катушки ЭМАП (рис. 5).

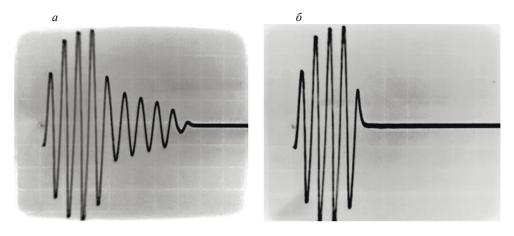


Рис. 5. Амплитуды напряжения на катушке индуктивности ЭМАП: a — использована базовая электронная схема;  $\delta$  — использована новая электронная схема.

Второй образованный отдельный контур, состоящий из  $L-C_1$  и входных параметров усилителя, является приемным. Наведенная в L от принимаемых донных УЗ импульсов ЭДС через согласующий трансформатор Tp с выхода b подается на вход усилителя. Выполнение высокочастотной катушки индуктивности жгутом изолированных проводников одинаковой длины с малым количеством витков (см. рис. 4), включенных параллельно, дает возможность дополнительно уменьшить интенсивность наводок от электромагнитных помех. Перераспределение емкостей  $C_1$  и  $C_2$  позволяет точно установить частоты сигналов как при возбуждении УЗ импульсов, так и при приеме, что повышает чувствительность ЭМАП в отношении к амплитудам донных сигналов.

Исследование новой электронной схемы ЭМАП показали, что длительность зондирующих импульсов напряжения на катушке индуктивности преобразователя, в сравнении с базовым, уменьшилась не менее, чем на 30 %, что подтверждается данными, приведенными на рис. 5. При измерениях зазор между преобразователем и образцом из стали ст. 45 толщиной 36,6 мм составлял 14,8 мм, максимальное напряжение на катушке индуктивности — более 1,2 кВ, длительность пакетного импульса 4 периода частоты заполнения равна 2,2±0,1 МГц. Аналогичные результаты получены для зазоров до 20 мм. Известно, что основным показателем для обеспечения проведения толщинометрии является наличие амплитуды донных импульсов по отношению к помехам величиной не менее 3/1 (без применения средств обработки принятой информации) при зазорах до 20 мм. На рис. 6 приведены развертки на экране дефектоскопа для диэлектрических прокладок толщиной 14,8 мм (a) и 20,1 мм (б). Зачистка поверхности ввода/приема ультразвуковых пакетных импульсов от окалины и ржавчины не проводилась. Анализ данных, приведенных на рис. 6, показывает, что полученные амплитуды донных импульсов достаточны для проведения толщинометрии ферромагнитных стальных изделий даже при зазоре около 20 мм.

Для выполнения исследований возможности применения разработанного ЭМАП с зазором до 20 мм (толщиной диэлектрического покрытия) был разработан лабораторный стенд, блок-схема которого приведена на рис. 7.

Стенд содержит управляющий блок I, соединенный с двухтактным усилителем 2 мощности пакетного высокочастотного зондирующего импульса тока и измерителем 3, в качестве которого

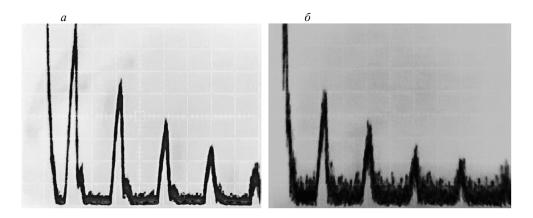


Рис. 6. Временные развертки на экране серийного дефектоскопа УД2-12 с донными импульсами, начиная с первого, при зазоре между протектором (1 мм) ЭМАП и поверхностью металла: 14,8 мм, индукция магнитного поля 0,26 Тл (а) и 20,1 мм, индукция магнитного поля 0,21 Тл (б).

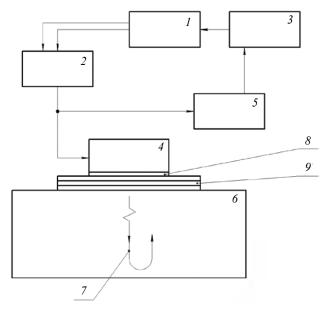


Рис. 7. Стенд для исследований возможностей ЭМАП, предназначенного для проведения ультразвуковой толщинометрии изделий со значительным диэлектрическим промежутком между протектором преобразователя и поверхностью метапла

применен серийный ультразвуковой дефектоскоп УД2-12. Усилитель 2 соединен с прямым совмещенным ЭМАП 4, который также соединен с полосовым усилителем 5 принятого ультразвукового сигнала. Усилитель 5 соединен со стандартным дефектоскопом 3, который предназначен для измерения амплитуд принятых импульсов с помощью аттенюатора и измерения толщины контролируемого участка изделия 6 соответственно. Изображение разработанного ЭМАП показано на рис. 8.

Работает стенд следующим образом. Управляющий блок I формирует исходные сигналы в виде двух меандров, сдвинутых по фазе на 180 град, которые поступают на усилитель 2 мощности пакетного высокочастотного зондирующего импульса тока. Они складываются, усиливаются и подаются на ЭМАП 4. Одновременно управляющий блок I вырабатывает синхронизирующий импульс для дефектоскопа 3. ЭМАП 4 совместно с образцом 6 возбуждают в поверхностном слое металла сдвиговые ультразвуковые пакетные импульсы 7, которые распространяются в объем образца 6 под углом 0 град. Сдвиговые волны обладают примерно вдвое меньшей скоростью распространения, что, при прочих равных условиях, позволяет проводить толщинометрию изделий с примерно



Рис. 8. Изображение разработанного портативного накладного прямого совмещенного электромагнитно-акустического преобразователя для измерений толщины ферромагнитных изделий через диэлектрические прослойки толщиной до 20 мм.

вдвое меньшей толщиной. Отраженные от противоположной стороны образца 6 ультразвуковые (донные) импульсы 7 принимаются ЭМАП 4 (рис. 8), усиливаются блоком 5 и визуализируются дефектоскопом 3.

Управляющий блок I позволяет регулировать частоту заполнения пакета зондирующего импульса в диапазоне 0,2 ... 5 МГц, длительность зондирующего пакета в диапазоне 1 ... 10 периодов частоты заполнения, а также, при необходимости, вырабатывать импульсы управления на другие устройства. Двухтактный усилитель 2 мощности пакетного высокочастотного зондирующего импульса тока описан в статье [21], с практически плоской амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне 0,8 ... 4,5 МГц. Рабочая частота ЭМАП 4 устанавливается с помощью конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  (см. рис. 3). Усилитель 2 мощности пакетного высокочастотного зондирующего импульса позволяет развивать в катушке индуктивности ЭМАП 4 пиковый ток более 600 А при пиковых напряжениях до 1,4 кВ в зависимости от толщины диэлектрического промежутка и свойств материала поверхностного слоя изделия.

Амплитудно-частотная характеристика приемного усилителя по уровню 0,7 охватывает интервал 0,5— 6,5 МГц.

На первом этапе выполнены исследования рабочих параметров разработанного ЭМАП, при которых может быть обеспечена возможность толщинометрии ферромагнитных изделий. Для этого с помощью стенда были исследованы бездефектные листовые образцы из катаной стали 09Г2С и стали ст. 45 различной толщины без зачистки их поверхности от окалины и ржавчины по следующей методике. На образец 6 (см. рис. 7), размещали ЭМАП 4 с зазором 1,3 мм (обеспечивается возможность измерения индукции магнитного поля датчиком Холла) и по экрану дефектоскопа, изменяя частоту заполнения пакетного импульса с помощью управляющего блока I, находили максимальное значение амплитуд донных сигналов. Измеряли полученные значения индукции магнитного поля в зазоре, напряжения на ЕМАП, пикового значения высокочастотного тока в ВКИ преобразователя, а также амплитуду первого донного импульса. Затем между протектором 8 ЭМАП 4 размещали пластины 9 из стеклотекстолита разной толщины и повторяли измерения. Исследования выполнены при длительности зондирующих импульсов с заполнением пакета равным 7 периодам частоты заполнения сигнала.

Данные полученных измерений параметров, определяющих технологию УЗ контроля, при различных толщинах диэлектрических прокладок 9 между протектором 8 преобразователя 4 приведены в табл. 1.

Таблица 1 Результаты измерений определяющих параметров при исследованиях образцов из ферромагнтной стали ст. 45 толщиной 36,6 мм при различных толщинах диэлектрических прокладок

№	Диэлектрическая прокладка толщиной, мм	Пиковый высокочастотный ток в катушке ЭМАП, А	Пиковое напряжение на ЭМАП, кВ	Индукция магнитного поля, Тл	Амплитуда первого донного импульса относительно шума, дБ
1	1,3±0,05	450±20	0,52±0,02	$0,60\pm0,05$	>42 (ограничение сигнала)
2	5,0±0,05	540±50	0,80±0,04	0,47±0,05	38±1
3	9,9±0,05	630±50	0,93±0,05	0,35±0,05	32±1
4	14,8±0,05	635±50	1,2±0,05	0,26±0,05	22±1
5	20,1±0,05	637±50	1,4±0,05	0,21±0,05	12±2

Анализ данных, приведенных в табл. 1 для разработанного ЭМА преобразователя, позволяет сделать следующие выводы.

В диапазоне зазоров между ЭМАП и поверхностью изделия, практически до 20 мм, амплитуда первого донного импульса по отношению к амплитуде шума достигает 12 дБ, что является достаточным [1] для проведения толщинометрии или дефектоскопии зеркально-теневым методом.

Установлено, что при увеличении зазора между ЭМАП и металлом увеличивается сила импульсного высокочастотного пикового тока в плоской высокочастотной катушке индуктивности и пиковое напряжение на преобразователе до 637 А и 1,4 кВ соответственно. Этот эффект обусловлен увеличением добротности ЭМАП, что подтверждается данными, приведенными на рис. 9. Следует отметить, что амплитудно-частотная характеристика преобразователя при зазоре 20,1 мм практически совпадает с амплитудно-частотными характеристиками для зазоров 10 мм и более. При этом индукция постоянного поляризующего поля уменьшается более чем в 2 раза примерно до 0,2 Тл, что, тем не менее, дает возможность проводить УЗ контроль (см. рис. 6).

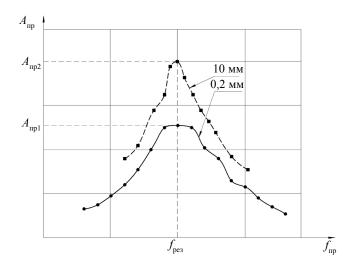


Рис. 9. Экспериментальные приведенные амплитудно-частотные характеристики разработанного ЭМАП при зазорах 0,2 и 10 мм;  $f_{\rm pes}$  — резонансная частота.

Для проверки возможностей ультразвукового контроля ферромагнитных изделий различной толщины разработанным ЭМАП выполнены измерения толщины листовых образцов с помощью глубиномера дефектоскопа в составе стенда (см. рис. 7) путем усреднения десятикратных измерений. При исследованиях использована частота ультразвуковых сдвиговых колебания 2,2±0,1 МГц,

длительность пакетных импульсов — 7 периодов частоты заполнения зондирующего сигнала. Частота следования зондирующих импульсов — 100 Гц. Зачистка поверхности от ржавчины и окалины не производилась. Измеренные значения толщин образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты измерений толщины листовых образцов из стали 09Г2С с использованием амплитуды первого дон-
ного импульса

<b>№</b>	Толщина образца, мм	Измеренная, с применением разработанного ЭМАП, толщина образца при диэлектрических прокладках толщиной, мм					
1111	ооразца, мм	5,0	9,9	14,8	20,1		
1	8,8	8,8±0,1	8,8±0,2	Первый донный импульс перекрыт «звоном»	Первый донный импульс перекрыт «звоном»		
2	12,2	12,4±0,2	12,3±0,2	12,4±0,3	Первый донный импульс перекрыт «звоном»		
3	15,0	15,1±0,2	15,2±0,2	15,4±0,4	15,4±0,6		
4	20,4	20,4±0,1	20,5±0,2	20,4±0,2	20,6±0,4		
5	36,6	36,8±0,2	36,9±0,3	36,9±0,4	36,9±0,5		

Данные табл. 2 показывают, что разработанный ЭМАП позволяет проводить контроль изделий толщинами 15 мм и более с зазорами или диэлектрическими промежутками (отложениями) между преобразователем и поверхностью контролируемого участка металла величиной до 20 мм.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что при увеличении зазора до 15 ... 20 мм между ЭМАП и металлом и толщинах образцов 12 мм и менее первый донный импульс перекрывается «звоном». А учитывая целесообразность контроля методом ЭМА в первую очередь коррозионных повреждений, очевидно, что второго и последующих донных импульсов с достаточной амплитудой может и не быть. Следовательно, для обеспечения толщинометрии образцов толщиной менее 12 мм необходимы дальнейшие шаги по уменьшению длительности «звона» для создания условий УЗ толщинометрии с зазорами 15 ... 20 мм и более при величине амплитуды первого донного импульса, достаточного для проведения контроля.

Измеренные и приведенные в табл. 2 данные толщин образцов практически во всех случаях является завышенными на 1 ... 3,5 %, что является приемлемым, т.к. недопустимое утонение объектов, как правило, превышает 5 % и более от толщины изделия [29]. Дополнительными исследованиями было установлено, что эти завышенные значения толщины обусловлены наличием на поверхности возбуждения/приема ультразвуковых импульсов локальных участков окалины, скрепленной с поверхностью.

### выводы

- 1. Разработан новый портативный накладной прямой совмещенный электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвукового контроля ферромагнитных изделий, который позволяет проводить тощинометрию при воздушных зазорах или диэлектрических покрытиях и осаждениях толщиной до 20 мм.
- 2. Разработано схемотехническое решение по созданию электронной схемы электромагнитноакустического преобразователя при возбуждении ультразвуковых импульсов, которое обеспечивает при зазорах 10 ... 20 мм толщинометрию более тонких изделий по параметрам первого или последующих донных сигналов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Изд-во Машиностроение, 2004. 864 с.
- 2. Судакова К.В., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 3. С. 8—10.

- 3. *Семеренко А.В.* Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок // Территория NDT. 2014. № 1. С. 42—43.
- 4. *Petrov K.V., Murav'eva O.V., Myshkin Y.V.* Modeling Magnetic, Electric, and Acoustic Fields of a Pass-Through Transducer When Testing Cylindrical Objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. P. 102—110/. https://doi.org/10.1134/S1061830919020062
- 5. Плеснецов С.Ю. Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів / Автореф. дис. д.т.н. Харків, 2021. Вид. ФОП Єфименко С.А. 40 с.
- 6. Плеснецов С.Ю., Сучкова Г.М., Корж Д.И., Суворова М.Д. Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно акустического преобразования (Обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. № 2. С. 24—31.
- 7. Сучков  $\Gamma$ .  $\dot{M}$ ., Плеснецов C.  $\dot{H}$ 0., Мещеряков C.  $\dot{H}$ 0., Юданова  $\dot{H}$ 1. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей (обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. № 3.  $\dot{H}$ 2.  $\dot{H}$ 3.  $\dot{H}$ 4.
- 8. *Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю.* Чувствительность контроля электромагнитно-акустическими преобразователями (Обзор, ч. 1) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. № 4. С. 45—50.
- 9. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плеснецов С.Ю. О чувствительности ультразвукового контроля поверхностными волнами, возбуждаемыми и принимаемыми электромагнитно-акустическими преобразователями (Обзор, ч. 2) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2019. № 1. С. 47—52.
- 10. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плеснецов С.Ю. Чувствительность ультразвукового контроля ЭМА способом при выявлении естественных внутренних дефектов металлоизделий. Возможности ЭМА толщинометрии. (Обзор, ч. 3) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2019. № 2. С. 51—57.
- 11. Willems H. Расширенные возможности для проверки коррозии газопроводов с использованием технологии EMAT [электронный ресурс] / H. Willems, B. Jaskolla, T. Sickinger, A. A. Barbian, F. Niese / 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю. 2010. Москва. Режим доступа: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1 11 16.pdf
- 12. Сайт компании АКС [электронный ресурс]. Режим доступа: https://acsys.ru/ (Дата обращения: 19.09.2021).
- 13. Тарабрин В.Ф., Бобров В.Т., Одынец С.А., Бабушкин И.А., Кулешов Р.В., Соловьёв В.Н. Однониточный ЭМА дефектоскоп для контроля рельсов // Матеріали 4-ї Національної науково-технічної конференції і виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика 2003. Київ. 19—23 травня 2003. С. 318—320.
- 14. Сайт компании ОКО ndt GROUP [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ndt.com.ua/ru/products/ema/emacon-01/ (Дата обращения: 19.09.2021).
- 15. Сайт компании ООО «ЗАПАДПРИБОР» [электронный ресурс]. Режим доступа https://zapadpribor.com/emacon-01/ (Дата обращения: 13.01.2022).
- 16. Сайт канадской фирмы Innerspec [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.innerspec.com/portable/emat-sensors (Дата обращения: 19.09.2021).
- 17. Сайт компании Nordinkraft [электорнный ресурс]. Режим доступа: www.nordinkraft.de. (Дата обращения: 23.08.2019).
- 18. Сайт предприятия ОКТАNTA-NDT [электорнный ресурс]. Режим доступа: https://oktanta-ndt.ru/ru/home/ (Дата обращения: 20.09.2021).
- 19. *Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Радев Х.К., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В.* Электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия // Технічна електродинаміка. 2016. № 2. С. 78—82.
- 20. He Jianpeng, Dixon Steve, Hill Samuel, Xu Ke. A New Electromagnetic Acoustic Transducer Design for Generating and Receiving S0 Lamb Waves in Ferromagnetic Steel Plate // Sensors. 2017. V. 17 (5). P. 1023. https://doi.org/10.3390/s17051023
- 21. Suchkov G. M., Mygushchenko R.P., Plesnetsov S. Yu. Powerful Sources for High Frequency Electromagnetic Transducers for Measurement, Monitoring and Diagnostics // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 12. P. 850—855.
- 22. Gobov Yu.L., Mikhailov A.V., Smorodinskii Ya.G. Magnetostriction Electromagnetic-Acoustic Excitation of Ultrasonic Waves without a Bias Field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. P. 697—702.
- 23. Mikhailov A.V., Gobov Yu.L., Smorodinskii Ya.G., Shcherbinin S.V. An Electromagnetic–Acoustic Transducer with Pulsed Biasing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. P. 467—475.
- 24. Aleshin N. P., Gobov Yu.L., Mikhailov A.V. Automatic ultrasonic inspection of large-diameter pipes // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. P. 133—140.
- 25. Gobov Y.L., Mikhailov A.V., Smorodinskii Y.G. A magnetizing system for an EMA scanner-flaw detector // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. P. 659—666.
- 26. Чабанов В.Е., Жуков В.А. Расчет и проектирование электромагнитно-акустических преобразователей для ультразвукового неразрушающего контроля. Приборы и техника физического экс-

перимента // Научно-технические ведомости С.-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2014. № 3. С. 57—73.

- 27. Tolipov K.B. Possibilities for Increasing the Efficiency of Contactless Emitters of Acoustic Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. P. 304—307. https://doi.org/10.1134/ S106183091704009X
- 28. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: Издательство физико-математической литературы, 2004. 136 c.
- 29. РД 24.200.13-90. Трубы стальные бесшовные. Методика входного ультразвукового контроля сплошности. Дата введения 01.07.1991 г.

Дефектоскопия № 5 2022

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ СО СЖАТИЕМ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ЭХОСИГНАЛОВ

© 2022 г. Е.Г. Базулин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>OOO «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино» \*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 28.02.2022; после доработки 14.03.2022 Принята к публикации 14.04.2022

Исследована возможность применения метода Compressive Sensing (CS) для повышения разрешающей способности эхосигналов. Для сравнения с методом CS был также рассмотрен применяемый в ультразвуковом контроле (УЗК) для достижения сверхразрешения метод максимальной энтропии (МЭ). В модельных экспериментах продемонстрирована возможность восстанавливать изображения отражателей со сверхразрешением, что позволяет повысить точность измерения отражателей и уменьшить уровень структурного шума. С целью уменьшения уровня шума для объединения парциальных изображений предложено использовать когерентный фактор (СF).

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК), комбинированный SAFT (C-SAFT), Full Matrix Capture (FMC), Coherence Factor (CF), метод максимальной энтропии (ММЭ), метод Compressive Sensing (CS).

DOI: 10.31857/S0130308222050037; EDN: BLPVYX

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Получение информации о внутренней структуре промышленных объектов является актуальной проблемой и относится к классу обратных задач рассеяния, которая состоит в определении количественных характеристик неизвестных несплошностей на основе наблюдения за рассеянным на них облучающем полем. Один из способов получения информации о рассеивателе заключается в восстановлении его высококачественного изображения, т.е. изображения с поперечной и фронтальной разрешающей способностью порядка четверти длины волны, высоким отношением сигнал/шум, на котором видна вся граница рассеивателя.

В настоящее время широко используется технология ультразвукового контроля (УЗК) с применением пьезоэлектрических антенных решеток (АР), излучающих и принимающих акустические волны в исследуемом объекте. Широкое применение в практике УЗК нашли две технологии восстановления изображения отражателей с использованием АР: фазированные антенные решетки (ФАР) [1] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются, и делается вывод, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей. Режим ЦФА — это технология получения акустических изображений с фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе с помощью АР регистрируются эхосигналы при переборе всех комбинаций излучатель—приемник. Этот режим регистрации называется двойным сканированием (в зарубежных источниках — Full Matrix Capture (FMC) [4]). На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5] восстанавливается изображение отражателей.

Повышение разрешающей способности изображения отражателей позволяет точнее определять размеры отражателя. Для этого разработаны относительно простые методы, например, метод когерентного фактора (CF) [6] или метод Кейпона (Capon), которые повышают лучевую разрешающую способность изображения. Существуют нелинейные методы обработки эхосигналов, позволяющие уменьшить длину импульсов в эхосигнале для достижения сверхразрешения, когда длина импульса становится меньше чем величина  $0.5/\Delta f$ , где  $\Delta f$  — полоса пропускания акусто-электрического тракта дефектоскопа. К таким методам относится алгоритм Гершберга—Папулиса [7], основанный на допущении, что на временной апертуре регистрируется ограниченное число импульсов. Метод построенная авторегрессивной модели (AR-модели) спектра эхосигнала [8] позволяет экстраполировать его за пределы полосы пропускания  $\Delta f = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$ . В статье [9] предложено объединить методы расщепления спектра и построения его AR-модели для уменьшения уровня структурного шума в изображении отражателей. Для достижения сверхразрешения эхосигналов можно использовать метод деконволюции Бернулли—Гаусса (DBG)

[10, 11]. Отметим еще один метод — деконволюция Люси—Ричардсона [12, 13], разработанный для обработки изображений, которая реализована и в так называемом «слепом» варианте, когда отклик системы точно не известен. Деконволюция Люси-Ричардсона изначально была рассчитана на работу с положительными функциями и по этой причине она нашла широкое применение при обработке изображений. Важно отметить, что за счет уменьшения длины импульсов можно уменьшить уровень спеклового шума при УЗК сложноструктурных материалов [14].

Особый класс составляют методы, которые так же относятся к классу нелинейных, позволяющие получать изображения по неполным данным. Это метод максимальной энтропии (МЭ) [15] и метод распознавания со сжатием (в зарубежной литературе Compressive Sensing (СS)) [16—18]. Оба алгоритма позволяют восстановить изображение отражателей со сверхразрешением и с малым уровнем «боковых лепестков» функции рассеивания точки, используя меньше 10 % эхосигналов от полного набора. Отметим, что метод СS при определенных условиях позволяет дополнительно уменьшить объем данных, необходимых для восстановления высококачественного изображения отражателей. В настоящий момент метод СS пытаются активно применять в различных областях: компьютерная томография [20], УЗК [19], магнитно-резонансная томография [20, 21], фотоакустическая томография [22], радиолокация [23] и многих других.

Данная статья посвящена попытке применить метод CS для достижения сверхразрешения эхосигналов, что позволит восстановить изображения отражателей с высокой лучевой разрешающей способностью и низким уровнем спеклового шума.

### 2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭХОСИГНАЛОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ

В этом разделе вкратце рассмотрим два нелинейных метода достижения сверхразрешения эхосигналов: метод МЭ и метод СS.

### 2.1. Метод максимальной энтропии

В 1948 г. К. Шеннон [24] использовал понятие энтропии для оценки объема информации сообщения, состоящего из конечного набора символов алфавита. В текстовом сообщении заключен максимальный объем информации, если за любым знаком в сообщении может появиться с одинаковой вероятностью любой знак алфавита. С комбинаторной точки зрения такое сообщение позволяет ограниченным набором символов алфавита создать максимальное количество разных сочетаний. С точки зрения повышения разрешающей способности, применение в качестве регуляризирующего функционала энтропии позволяет перенести поиск решения на множество эхосигналов, в которых за любым отсчетом может следовать отсчет с любым значением, т.е. ограничение на крутизну фронта решения эхосигнала снимается. Так при обычной деконволюции фронт сигнала практически не меняется, т.е. за буквой «ь» никогда не появится буква «ъ», но после регуляризации крутизна фронта может возрасти — за буквой «ь» может появиться любая буква, в том числе и «ъ».

Связь между измеренным эхосигналом **s** и неискаженным сигналом **є** можно записать в матричном в виде системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\mathbf{s} = \mathbf{G}\mathbf{s}_{0} + \mathbf{n},\tag{1}$$

где матрица G описывает импульсный отклик электро-акустического тракта дефектоскопа, вектор  $\mathbf{n}$  — шум измерений. Матрицу G можно сформировать как циркулянтную, из экспериментально измеренного импульсного отклика  $\mathbf{g}$  дефектоскопа. Так как матрица G плохо обусловлена, то один из способов оценки  $\varepsilon$  из уравнения (1) сводится к задаче безусловной оптимизации, когда в качестве критерия качества восстановленного изображения выбирается квадрат невязки решения

$$\chi^{2}(\hat{\mathbf{\epsilon}}) = \|\mathbf{G}\hat{\mathbf{\epsilon}} - \mathbf{s}\| = (\mathbf{G}\hat{\mathbf{\epsilon}} - \mathbf{s})^{T} (\mathbf{G}\hat{\mathbf{\epsilon}} - \mathbf{s}), \tag{2}$$

где символ T обозначает операцию транспонирования. Оценку  $\hat{\mathbf{\epsilon}}$  можно записать в виде:

$$\hat{\mathbf{\varepsilon}} = \underset{\hat{\mathbf{\varepsilon}} \in \mathbb{R}^N}{\operatorname{argmin}} (\chi^2(\hat{\mathbf{\varepsilon}})), \tag{3}$$

где N — размеры эхосигнала в отсчетах. Дальнейшее развитие метода (3), так называемая регуляризация по Тихонову [25], заключается в добавлении к невязке штрафного функционала, один из вариантов которого имеет вид максимальной энтропии, так называемой кросс-энтропии [26]:

$$H(\hat{\mathbf{\epsilon}}) = -\sum_{i=1}^{N} \hat{\mathbf{\epsilon}}_{i} \ln \left( \frac{\hat{\mathbf{\epsilon}}_{i}}{\mu} \right), \tag{4}$$

где  $\mu$  — оценка среднего значения интенсивности фона изображения. Таким образом, решение задачи сводится к минимизации невязки следующего выражения:

$$\hat{\mathbf{\varepsilon}} = \underset{\hat{\mathbf{\varepsilon}} \in P^N}{\operatorname{argmin}} (\chi^2(\hat{\mathbf{\varepsilon}}) - \alpha H(\hat{\mathbf{\varepsilon}})), \tag{5}$$

где  $\alpha$  — параметр регуляризации. Важное свойство функционала в виде энтропии заключается в том, что, используя формулу (5), можно получить оценку эхосигнала со сверхразрешением. Статья [27] посвящена получению изображения отражателей со сверхразрешением методом МЭ по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой.

### 2.2. Метод распознавания со сжатием (CS)

Идея метода CS заключается в переходе от определенной СЛАУ размерностью  $N \times N$  (согласно (1)) к решению недоопределенной СЛАУ размерностью  $K \times N$ , причем при K << N. Переход к недоопределенной СЛАУ можно осуществить, используя матрицу **A** размерами  $N \times K$  и сводя задачу (1) к уравнению:

$$\mathbf{s}_{CS} = \mathbf{A}\mathbf{S} = \mathbf{A}\mathbf{G}\hat{\mathbf{\varepsilon}} = \mathbf{\Phi}\hat{\mathbf{\varepsilon}}, \quad \text{где } \mathbf{\Phi} = \mathbf{A}\mathbf{G},$$
 (6)

в которой результаты измерений представлены как вектор  $\mathbf{s}_{CS}$  длиной всего K «отсчетов». Такая постановка задачи позволяет уменьшить объем данных для работы в N/K раз. Для однозначного решения задачи (6) нужно, чтобы сигнал  $\mathbf{s}_{CS}$  обладал определенными свойствами, специальным образом определить матрицу  $\mathbf{A}$  при переходе к недоопределенной системе СЛАУ и разработать методы решения задачи (6).

Необходимым условием работы CS-метода, т.е. однозначного решения недоопределенного уравнения (6), является разреженность восстанавливаемого сигнала є. Сигнал называется *S*-разреженным [16], если большинство его элементов равны нулю и

$$\|\mathbf{\varepsilon}\|_0 = S \ll N,\tag{7}$$

где  $\|\mathbf{\epsilon}\|_0$  — норма  $l_0$ , представляющая собой количество ненулевых компонент в векторе  $\epsilon$  и N — длина вектора  $\epsilon$ . Отметим, что условие прореженности предполагает восстановление импульса эхосигнале в виде  $\delta$ -функции, т.е. восстановление формы сигнала со сверхразрешением.

Для разреженного сигнала  $\varepsilon$  можно подобрать специальную матрицу **A** размерами  $K \times N$ , причем K связан с разреженностью S через формулу (11) или (12). Для применимости метода CS, согласно [16], необходимыми и достаточными являются следующие условия.

1) Сигнал  $\epsilon$  должен быть S-разреженным, т.е. в базисе G иметь вид:

$$\mathbf{\varepsilon} = \sum_{i=1}^{N} \varepsilon_i G_i, \tag{8}$$

где среди N отсчетов только S отсчетов  $\varepsilon_i \neq 0$ .

2) Должно выполняется «свойство ограниченной изометрии» (Restricted Isometry Property) [28]

$$\sqrt{1-\delta} \le \frac{\|\mathbf{AG}\boldsymbol{\varepsilon}\|_{2}}{\|\boldsymbol{\varepsilon}\|_{2}} \le \sqrt{1+\delta},\tag{9}$$

где  $\delta \in (0,1)$  и  $\epsilon$  — произвольный ненулевой вектор. Это свойство означает, что после воздействия оператора  $\mathbf{AG}$  на вектор  $\epsilon$   $l_2$ -норма вектора  $\mathbf{s}_{\mathit{CS}}$  не может стать равной нулю или превысить норму вектора  $\epsilon$  в  $\sqrt{2}$  раз.

3) Матрицы **A** и **G** должны удовлетворять свойству некогерентности, т.е. вектора матриц **A** и **G** должны быть практически ортогональны между собой:

$$\mu(\mathbf{A}, \mathbf{G}) = \sqrt{N} \max_{i,j} \frac{|\langle a_i, G_j \rangle|}{\|a_i\|_2}.$$
 (10)

Из работы [18] следует, что с высокой долей вероятности точное восстановление S-разреженных векторов по K измерениям будет достигнуто при выполнении следующего условия:

$$K \ge c\mu(\mathbf{A}, \mathbf{G})^2 S \log N,\tag{11}$$

где c — некоторая положительная константа. Хорошие результаты получаются и для более простого соотношения

$$K = 4 \cdot S \cdot \log(N/S). \tag{12}$$

Матрица **A**, составленная из случайных чисел, с большой вероятностью удовлетворяет второму и третьему из перечисленных выше требований. Существуют различные принципы построения рандомизированных матриц [29]. При расчете матрицы **A** в данной статье использовалось распределение Бернулли [30].

Один из вариантов решения задачи (6), называемой LASSO-задачей [31], которая заключается в минимизации  $\|\mathbf{s}_{CS} - \mathbf{AG}\hat{\boldsymbol{\epsilon}}\|_{2}$  при условии разреженности вектора  $\boldsymbol{\epsilon}$ , можно представить как

$$\|\mathbf{s}_{CS} - \mathbf{A}\mathbf{G}\hat{\mathbf{\epsilon}}\|_{2} \to \min$$
 для таких, что  $\|\hat{\mathbf{\epsilon}}\|_{1} < \tau$ , (13)

где  $\tau$  — параметр, учитывающий разреженность вектора  $\epsilon$ . Оценка  $\hat{\epsilon}$  по формуле (13) проводилась при использовании библиотеки SPGL1 [32]. Изящная геометрическая интерпретация работы метода CS приведена в работе [16]. Так как степень приближения оценки сигнала  $\hat{\epsilon}$  к точному решению  $\epsilon$  зависит от рандомизирующей матрицы  $\mathbf{A}$ , то задача решалась для нескольких вариантов  $\mathbf{A}$ , а оценка сигнала бралась как среднее по всем решениям.

#### 3. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для уменьшения уровня структурного шума, кроме известного приема, связанного с уменьшением длительности импульсов, например, методом МЭ или СS, можно воспользоваться следующим способом [33]. Пусть AP 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 AP при излучении зондирующего импульса элементом номер m. Тогда обычное ЦФА-изображение можно получить, когерентно сложив все изображения по выстрелам:

$$I_{S}(\mathbf{r}_{i};\mathbf{r}_{w}) = \sum_{m=1}^{N_{e}} I_{m}(\mathbf{r}_{i};\mathbf{r}_{w}), \tag{14}$$

где  $N_e$  — число элементов АР. Но объединить парциальные повыстрельные изображения  $I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$  можно иным способом. Можно рассчитать когерентный фактор (СF) для каждой точки  $\mathbf{r}_i$  по формуле:

$$I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = CF_{m-1}^{N_e}(I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)), \tag{15}$$

а в качестве изображения рассматривать функцию

$$I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) \cdot I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w). \tag{16}$$

Важное свойство когерентного фактора *CF* состоит в том, что его значение при отсутствии шума не зависит от амплитуды блика обычного изображения  $I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ . Поэтому амплитуды бликов изображения, полученные по формуле (14) или (16), будут примерно одинаковы.

В режиме тройного сканирования, когда AP сканирует, итоговое изображение можно получить обычным когерентным сложением изображений  $I_{S}(\mathbf{r}_{i}; \mathbf{r}_{w})$  или  $I(\mathbf{r}_{i}; \mathbf{r}_{w})$  по всем  $N_{p}$  положениям AP:

$$I(\mathbf{r}_i) = \sum_{p=1}^{N_p} I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_{w,p}). \tag{17}$$

### 4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В данном разделе представлены результаты восстановления изображений несплошностей в образцах с применением описанных выше алгоритмов. Для регистрации эхосигналов использовали ЦФА-дефектоскоп «АВГУР АРТ», который разрабатывает и изготавливает «Научнопроизводственный центр неразрушающего контроля «ЭХО+» [34].

### 4.1. Два БЦО диметром 3 мм в стальном образце

В образце из стали марки Ст20 толщиной 25 мм на глубинах 5 и 15 мм были просверлены два боковых цилиндрических отверстия (БЦО) диаметром 3 мм. Для регистрации эхосигналов использовались две AP (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента 0,9×10 мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм), установленные на одинаковые рексолитовые призмы с углом наклона 35 град. Одна AP находилась на расстоянии –20 мм с азимутом 0 град (N-сторона), а вторая — на расстоянии 22,5 мм с азимутом 180 град (Р-сторона). Эхосигналы измерялись по NN-, PP- и NP-каналам. NP-канал — это когда AP с N-стороны излучает зондирующие импульсы, а AP с P-стороны регистрирует эхосигналы.

Изображения по NN-каналу и PP-каналу восстанавливались по шести акустическим схемам на поперечной волне: TdT, TdTT, TdTTT, TdTTT, TTdTTT и TTTdTTT. Изображения по NP-каналу восстанавливались по трем акустическим схемам: TdT, TTdTT и TTTdTTT. Схематический ход лучей для разных схем показана в табл. 1. Все 15 парциальных изображений по трем каналам для получения итогового изображения складывались по модулю.

На рис. 1*а* показано итоговое ЦФА-изображение по измеренным эхосигналам при объединении парциальных изображений по формулам (14) и (17). Отметим, что оригинальные изображения отражателей цветные, и в черно-белой палитре соответствие уровня изображения и шкалы серого могут быть искажены. На рис. 1 двумя окружностями черного цвета показаны контуры БЦО. На рис. 1*а* восстановлены блики, позволяющих увидеть практически всю границу двух БЦО, блики поверхности и дна образца. Однако на изображении довольно высокий уровень шума, а из-за невысокой лучевой разрешающей способности и появления ложных бликов, сформированных импульсом Релеея обегания—соскальзывания, границы БЦО достаточно размыты. На рис. 1*б* показано итоговое изображение при использовании СF по формулам (16) и (17). Уровень шума уменьшился более чем на 6 дБ, и из-за возросшей лучевой разрешающей способности изображения удается различить блики обегания.

При преломлении поперечной волны за первым критическим углом и отражении от мягкой границы объекта контроля за третьим критическим углом фаза эхосигнала может существенно

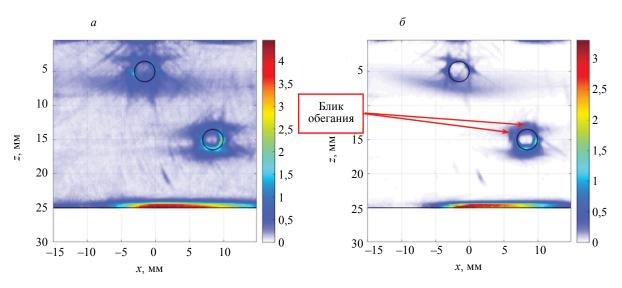


Рис. 1. Изображение двух БЦО, восстановленных по измеренным эхосигналам при объединении парциальных изображений:

a — по формулам (14) и (17);  $\delta$  — по формулам с учетом когерентного фактора (16) и (17).

### Таблица 1

### Список акустических схем

	Акустический канал	Название акустической схемы	Схема лучевой траектории
1.		TdT	
2.		TdTT	
3.	NN-канал	TTdTT	
4.	Z Z	TdTTT	
5.		TTdTTT	
6.		TTTdTTT	
7.		TdT	
8.		TdTT	
9.	РР-канал	TTdTT	Те же схемы, что и NN-канал, но зер- кально отраженные относительно вертикальной линии
10.	PP-4-	TdTTT	вертикальной линии
11.		TTdTTT	
12.		TTTdTTT	
13.		TdT	
14.	NP-сторона	TTdTT	
15.		TTTdTTT	

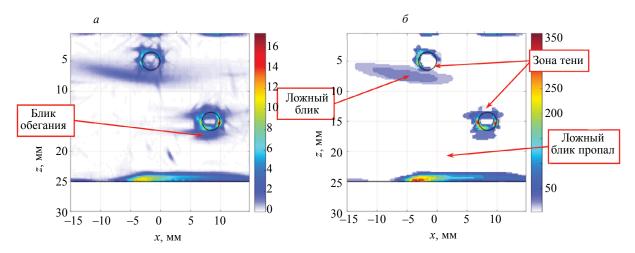


Рис. 2. Изображение двух БЦО, восстановленных по измеренным эхосигналам при объединении парциальных изображений:

a — по формулам с учетом когерентного фактора (16) и (17);  $\delta$  — после применения фильтра AADF.

изменится. Коррекция этой фазы должна повысить фокусировку изображения отражателей [35]. На рис. 2a показано итоговое изображение с компенсацией фазы эхосигналов и с учетом СF по формулам (16) и (17). По сравнению с изображением на рис.  $1\delta$  амплитуда блика границы стала более равномерна.

Для автоматизированного распознавания типа отражателя и определения его размеров изображение нужно выделить области с отражателями и без них. В теории обработки изображений для этих целей разработано множество текстурных фильтров. Один из текстурных фильтров — это адаптивный анизотропный диффузный фильтр (AADF) [35]. Авторам этого алгоритма удалось провести аналогию между текстурной обработкой изображения и процессом диффузии. АADF проводит селекцию бликов по крутизне фронтов и по сути бинаризует изображение отражателей, позволяя сконцентрировать внимание на бликах, за которыми скрываются потенциальные дефекты [37]. На рис. 26 показан результат обработки фильтром AADF изображения на рис. 2a: уровень шума стал нулевым и остался только один ложный блик, который возник по акустической схеме TdT по PN-каналу из-за ошибки в 0,5 мм задания координат призм. Еще один ложный блик на рис. 2a с координатами (2, 21) мм на AADF-изображении исчез, так как он недостаточно сфокусирован и поэтому быстро «растворился».

На рис. 3a показано изображение БЦО с компенсацией фазы эхосигналов и с использованием CF по формулам (16) и (17) после применения метода МЭ по формуле (5) ( $\alpha = 0.01$ ,  $\mu = 10^{-6}$ ).

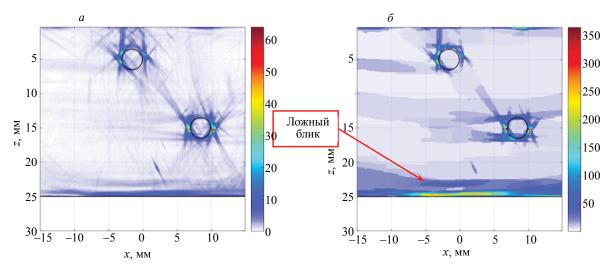


Рис. 3. Изображение двух БЦО, восстановленных по МЭ-эхосигналам при объединении парциальных изображений: a — по формулам с учетом когерентного фактора (16) и (17);  $\delta$  — после применения фильтра AADF.

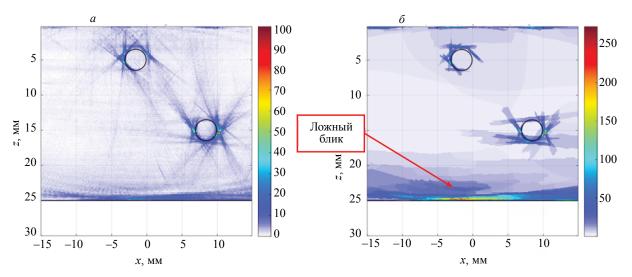


Рис. 4. Изображение двух БЦО, восстановленных по CS-эхосигналам при объединении парциальных изображений: a — по формулам с учетом когерентного фактора (16) и (17);  $\delta$  — после применения фильтра AADF.

Лучевая разрешающая способность изображения возросла примерно в два раза по сравнению с рис. 2a. На рис. 36 показан результат применение фильтра AADF: блики границы БЦО стали более заметны, но в области дна появился слабо локализованный ложный блик, который был практически незаметен на исходном изображении. Природа этого ложного блика такая же, что и на рис. 2.

На рис. 4a показано изображение БЦО с компенсацией фазы эхосигналов и с использованием СF по формулам (16) и (17), после их обработки методом СS по формуле (13) ( $\tau = 5$ ,  $N_A = 10$ ) с матрицей Ф размерами  $K \times N$  (400×1751). Десять парциальных CS-изображений объединялись в итоговое как сумма. На рис. 3b показан результат применения фильтра AADF. Изображения на рис. 4 имеет более высокую разрешающую способности и меньше ложных бликов по сравнению с рис. 3.

### 4.2. Неровность на внутренней поверхности трубы

На рис. 5 приведена схема эксперимента в иммерсионном варианте с цилиндрическим образцом диаметром 84 мм и толщиной стенки 2,8 мм, на внутренней поверхности которого была выполнена неровность высотой 0,3 мм и размерами 3 мм (см. рис. 5). Для регистрации эхосигналов использовалась AP (5 МГц, 64 элемента, размер пьезоэлемента 0,5×10 мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм), установленная на плексигласовую призму с фокусом 22 мм (см. рис. 5 $\delta$ ). В плоскости zz изображение восстанавливается по ЦФА-технологии, а в плоскости yz фокусировка достигается за счет использования линзы.

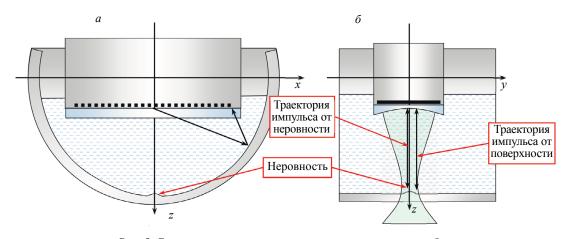


Рис. 5. Схема проведения измерение эхосигналов внутри трубы.

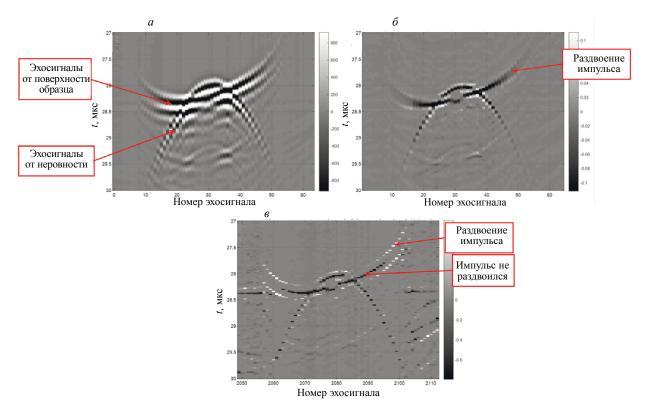


Рис. 6. Эхосигналы 32-го выстрела от поверхности цилиндрического образца: a — исходные;  $\delta$  — после метода МЭ;  $\delta$  — после метода CS.

На рис. 6*а* показаны измеренные эхосигналы 32-го выстрела поверхности образца, на котором хорошо видны эхосигналы, отраженные от поверхности образца и от неровности высотой 0,3 мм. На рис. 6*б* показаны эхосигналы после их обработки методом МЭ. Эхосигналы от поверхности, измеренные крайними элементами АР, раздваиваются. Это объясняется тем, что при удалении от акустической оси 32-го элемента АР форма эхосигнала изменяется. На рис. 5*а* показана акустическая ось 32-го элемента, совпадающая с осью *z*, а стрелками черного цвета схематически показан путь лучей от 32-го элемента до 64-го элемента. Модификация метода МЭ, предложенная в статье [38], позволяет учесть этот эффект. Импульс от неровности поверхности после применения метода МЭ уменьшил свою длительность примерно в три раза. На рис. 6*в* показаны эхосигналы после их обработки методом СЅ. Эхосигналы от поверхности, измеренные крайними элементами решетки, раздваиваются по причине, рассмотренной для метода МЭ. Импульс от неровности поверхности уменьшил свою длительность более чем в пять раз и принял форму близкую к δ-импульсу.

Изображение восстанавливалось с учетом неровной поверхности [38]. На первом этапе определялся профиль поверхности, а на втором этапе с его учетом восстанавливалось изображение отражателей в образце. На рис. 7 показаны ЦФА-изображения, восстановленные по измеренным эхосигналам, по MЭ-эхосигналам ( $\alpha = 10$ ,  $\mu = 10^{-6}$ ) и по CS-эхосигналам. На рисунке линиями черного цвета показаны контуры образца с неровностью поверхности в координатах хz (по сравнению с рис. 5а). У изображении на рис. 7 (по сравнению с рис. 5а) ось z поменяла направление. Лучевая разрешающая способность МЭ-изображения возросла примерно в три раза (см. рис. 76) и неровность поверхности стала видна более отчетливо. Так как центральная частота импульсов возросла, а шаг АР не изменился, то на изображении появился шум грубого шага АР. На рис. 7в показано изображение, восстановленное по CS-эхосигналам ( $\tau = 2, N_A = 10$ ) по формуле (13) с матрицей Ф размерами  $K \times N$  (100×151). Десять парциальных CS-изображений объединялись в итоговое изображение как среднее. Лучевая разрешающая способность СS-изображения по сравнению с МЭ-изображением дополнительно возросла примерно в два раза и блик неровности на поверхности стал заметен. Его появление связано с размерами фокуса вдоль оси у равным примерно 3 мм, что привело к регистрации эхосигнала не только от неровности, но и от поверхности образца (две двухсторонние стрелки черного цвета на рис.  $5\delta$ ). Изогнутая форма блика объясняется тем, что

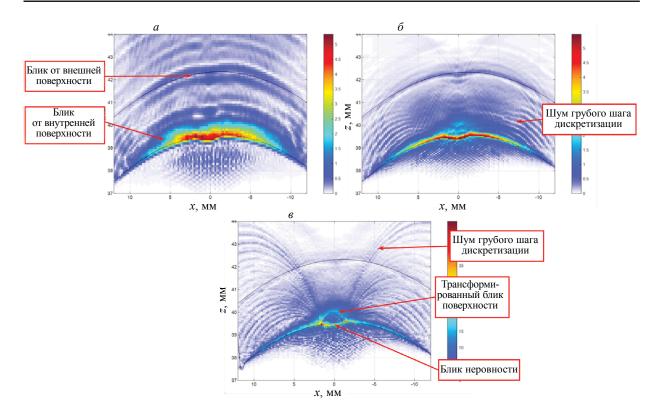


Рис. 7. ЦФА-изображение поверхности цилиндрического образца, восстановленное по исходным эхосигналам (a), по МЭ-эхосигналам ( $\delta$ ) и по CS-эхосигналам ( $\epsilon$ ).

регистрация эхосигналов происходит в воде, а восстановление изображения отражателей — в объекте, скорость в котором значительно больше, чем в воде. На МЭ-изображении блик поверхности не так ярко выражен. На CS-изображении появился шум грубого шага AP, также, как и на МЭ-изображении.

### 4.3. Два БЦО диаметром 6 мм в образце из бронзы

В образце из бронзы марки БрХ0,8 на глубинах 30 и 50 мм было просверлено два БЦО диаметром 6 мм. Для регистрации эхосигналов использовалась AP (2,25 МГц, 20 элементов, размер пьезоэлемента  $1,1\times10$  мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм), установленная на плексигласовую призму с углом наклона 20 град. Эхосигналы измерялись в режиме тройного сканирования, когда AP перемещалась 70 раз с шагом 1 мм по поверхности образца.

Анализ типа анизотропии позволил определить ее как трансверсально-изотропную [39] и оценить коэффициенты ее упругости. Все изображения в этом разделе получены с учетом анизотропии. В данном образце высокий уровень структурного шума, а для его уменьшения можно воспользоваться методом, рассмотренным в разделе 3. На рис. 8а показано ЦФА-изображение, восстановленное на продольной волне (акустическая схема LdL) по измеренным эхосигналам при объединении по формулам (14) и (17). На рис. 8 окружностями черного цвета нанесены контуры БЦО. На изображении можно обнаружить блик части границы БЦО на глубине 30 мм и спекловый шум с характерной структурой, амплитуда которого уменьшается по мере удаления точки  $\mathbf{r}_i$  ОВИ от положения АР. Блик границы БЦО на глубине 50 мм менее заметен на рис. 8а. Объединение парциальных изображений по формулам и уменьшает уровень шума примерно на 8 дБ (рис. 8б). Восстановление изображения отражателей без учета анизотропии привело к смещению бликов примерно на —3 мм по оси x и к увеличению их поперечных размеров примерно в два раза.

На рис. 9 показаны изображение БЦО на глубине 50 мм, на рис. 9a показано изображение, восстановленное по измеренным эхосигналам с объединением парциальных изображений по формулам (14) и (17), а на рис. 9b — с использованием CF по формулам (16) и (17). МЭ-изображение,

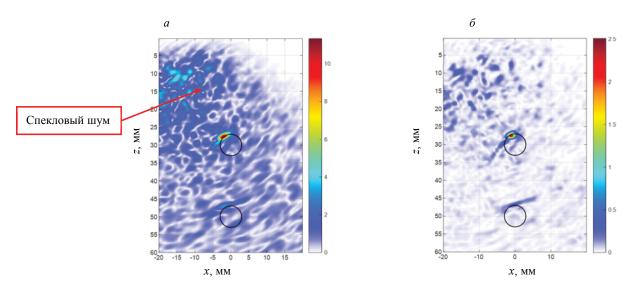


Рис. 8. ЦФА-изображение, восстановленное по измеренным эхосигналам.

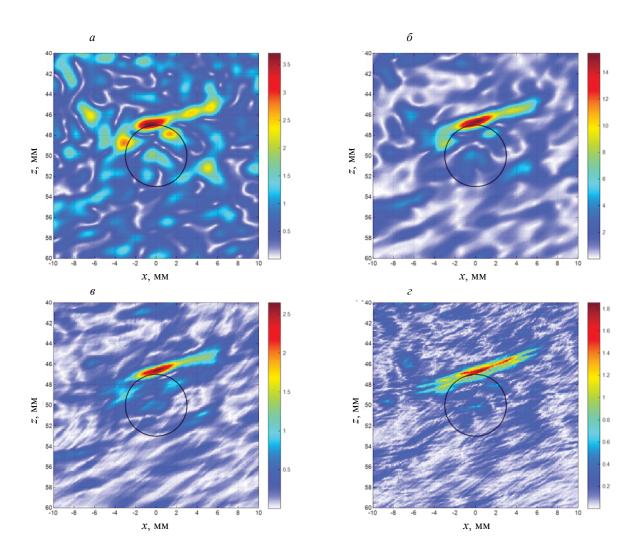


Рис. 9. Изображение БЦО на глубине 50 мм, восстановленное по исходным эхосигналам при сложении по формулам (14) и (17) (a); с использованием СF по формулам (16) и (17) ( $\delta$ ); по МЭ-эхосигналам ( $\epsilon$ ); по СS-эхосигналам ( $\epsilon$ ).

восстановленное по формуле (5) ( $\alpha = 0.01$ ,  $\mu = 10^{-6}$ ) с использованием СF показано на рис. 9 $\epsilon$ . Лучевая разрешающая способность изображения возросла примерно в два раза по сравнению с рис. 96, уровень шума уменьшился примерно на 1,5 дБ. На рис. 9г показано изображение  $(\tau = 5, N_s = 10)$ , восстановленное по CS-эхосигналам по формуле с матрицей  $\Phi$  размерами  $K \times N$ (400×751). Десять парциальных CS-изображений объединялись в итоговое как сумма. Лучевая разрешающая способность СЅ-изображения возросла примерно в два раза по сравнению с МЭ-изображением, а уровень шума уменьшился на 1,5 дБ. Сравнивая СЅ-изображение (см. рис.  $9_2$ ) и обычное ЦФА-изображение (см. рис.  $9_a$ ), можно утверждать, что удалось повысить лучевую разрешающую способность примерно в три раза, а уровень структурного шума уменьшить примерно на 13 дБ.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложено использовать метод СЅ для обработки эхосигналов, измеренных антенной решеткой, с целью достижения сверхразрешения. Такой подход дает возможность повысить разрешающую способность изображения, что позволяет точнее определять размеры отражателей и уменьшить уровень структурного шума. Результаты обработки сравниваются с результатами, полученными методом МЭ. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

- 1) Применение метода CS позволяет повысить разрешающую способность эхосигналов более чем в 3 раза, так как импульсы становятся похожими на б-импульс. Естественно возрастает и лучевая разрешающая способность изображения отражателей.
- 2) Объединение парциальных изображений с учетом СF по формулам (16) и (17) позволяет уменьшить уровень шума, в том числе и структурного шума, изображения отражателей.
- 3) Сравнивая СS-изображение (см. рис. 9в) и обычное ЦФА-изображение (см. рис. 9г), можно утверждать, что удалось повысить лучевую разрешающую способность примерно в три раза, а уровень структурного шума уменьшить примерно на 13 дБ.
- 4) Текстурный фильтр AADF эффективнее работает с изображениями, восстановленными методом ЦФА с коррекцией фазы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. Режим доступа: URL: http://www.olympus-ims.com/en/books/ (дата обращения: 09.12.2018).
- 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. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmitreceive array data for nondestructive evaluation // NDT Int. 2005. V. 38. P. 701—711.
- 5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-ме-
- тод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41. 6. *Camacho J., Parrilla M., Fritsch C.* Phase Coherence Imaging // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. May 2009.V. 56. No. 5. P. 958—974.
- 7. Базулин Е.Г. Двумерная адаптивная экстраполяция спектра многочастотных акустических голограмм // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 1. С. 8—16.
  - 8. Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
- 9. Базулин Е.Г. Повышение отношения сигнал/шум при совместном использовании методов экстраполяции и расщепления спектра // Дефектоскопия. 2006. № 1. С. 68—78.
- 10. Lavielle M. Bayesian deconvolution of Bernoulli-Gaussian processes // Signal Processing, Elsevier. July 1993. V. 33. No. 1. P. 67—79. DOI: https://doi.org/10.1051/smdo:2008014
- 11. Benammar A., Drai R., Kechida A., Guessoum A. Deconvolution of ultrasonic echoes using Bernoulli-Gaussian processes for composite materials inspection // Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim. 2008. V. 2. P. 107—111.
- 12. Richardson W.H. Bayesian-based iterative method of imagerestoration // J. Opt. Soc. Am. 1972. V. 62.
- 13. Dalitz C., Pohle-Fronlich R., Michalk T. Point Spread Functions and Deconvolution of Ultrasonic Images // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. March 2015. V. 62. No. 3. P. 531—544. DOI: 10.1109/TUFFC.2014.006717

- 14. *Ермолов И.Н.* К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1965. № 6. С. 51—61.
- 15. Bazulin E. The maximum entropy method in ultrasonic non-destructive testing increasing the resolution, image noise reduction and echo acquisition rate // Entropy. 2018. V. 20. No. 8. P. 621. DOI: https://doi.org/10.3390/e20080621
- 16. Граничин О.Н. Рандомизация измерений и  $l_1$ -оптимизация // Стохастическая оптимизация в информатике. 2009. № 5. С. 3—23.
  - 17. Donoho D.L. Compressed sensing // IEEE Trans. Inform. Theory. 2006. P. 1289–1306.
- 18. Foucart S., Rauhut H. A mathematical introduction to compressive sensing. Basel, Birkhauser, 2013. 585 p.
- 19. Guarneri G.A., Pipa D.R., Junior F.N., de Arruda L.V.R., Zibetti M.V.W. A sparse reconstruction algorithm for ultrasonic images in nondestructive testing // Sensors. 2015. V. 15. P. 9324—9343.
- 20. *Минаков Е.И.*, *Серегин П.С.* Сравнительный анализ методов параллельной реконструкции изображений магнитно-резонансной томографии // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 3. С. 23—28.
- 21. Valente S.A., Zibetti M.V.W., Pipa D.R., Maia J.M., Schneider F.K. An Assessment of Iter-ative Reconstruction Methods for Sparse Ultrasound Imaging // Sensors. 2017. V. 17. P. 533. DOI: 10.3390/s17030533
- 22. Provost J., Lesage F. The application of compressed sensing for photo-acoustic tomography // IEEE Trans. Med. Imag. 2009. V. 28. № 4. P. 585—594.
- 23. *Knee P.* Sparse representations for radar with MATLAB R examples // Synthesis Lectures on Algorithms and Software in Engineering. 2012. V. 4. № 1. P. 1—85.
- 24. *Shannon C.R.* A mathematical theory of communication // Bell Systems Technical Journal. 1948. V. 27. P 379—423
- 25. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач / Изд. 3-е, исправл. М.: Наука, 1986. 288 с.
  - 26. Kullback S. Information Theory and Statistics. New York, 1968. 416 p.
- 27. *Базулин Е.Г.* О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 235—254.
- 28. Candes E.J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing // Comptes Rendus de l'Acad. des Sci. Serie I. 2008.V. 346. P. 589592.
- 29. *Candes E., Wakin M.* People hearing without listening: An Introduction to Compressive Sampling // IEEE Signal Processing Magazine. 2008. V. 25. № 2. P. 21—30.
- 30. Baraniuk R.G., Davenport M., DeVore R., Wakin M.B. A simple proof of the restricted isometry principle for random matrices (aka the Johnson-Lindenstrauss lemma meets compressed sensing) // Constructive Approximation. 2007.
- 31. *Bradley E., Hastie Trevor*. Johnstone Yain Least angle regression. Stanford University // The Annals of Statistics. 2004. V. 32. № 2. P. 407—499.
- 32. SPGL1: A solver for large-scale sparse reconstruction URL: https://www.cs.ubc.ca/~mpf/spgl1/index. html (дата обращения: 04.12.2018).
- 33. 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.
  - 34. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: http://www.echoplus.ru (дата обращения: 22.01.2022).
- 35. *Базулин Е.Г.* Использование метода инверсного C-SAFT для выравнивания пространственной чувствительности изображения отражателей // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 58—71.
- 36. *Perona P., Malik J.* Scale space and edge detection using anisotropic diffusion // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 1990. V. 12. № 6. P. 629—639.
- 37. *Базулин Е.Г.* Применение адаптивного анизотропного диффузного фильтра для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 3—12.
- 38. *Базулин Е.Г., Вовк А.С.* Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковой дефектоскопии с учетом переменной формы эхосигнала // Научные труды МЭИ. 2018. № 5. С. 111—119.
- 39. *Базулин А.Е.*, *Базулин Е.Г.* Применение антенных решеток и кремнийорганического полимера в качестве иммерсионной среды для проведения ультразвукового контроля объектов с неровной поверхностью // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 3—11.
- 40. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1965. 388 с.

УДК 620.179.14

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРМООБРАБОТАННОЙ СТАЛИ МАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2022 г. Шив Сундар Сингх<sup>1</sup>, Акаш Субхаш Авале<sup>2</sup>, Бинаяка Нахак<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный технологический институт Мотилала Неру, Праяградж-211004, Индия <sup>2</sup>Инженерный колледж Пимпри Чинчвада, Пуна-411044, Индия E-mail: \*binayaka@mnnit.ac.in

> Поступила в редакцию 06.12.2021; после доработки 03.01.2022 Принята к публикации 28.01.2022

В отраслях обрабатывающей промышленности термическая обработка является чрезвычайно важным процессом для достижения желаемых термомеханических свойств конструкционных материалов путем контроля определенного диапазона температур аустенизации. Эти свойства оценивали с помощью нескольких обычных методик, Однако эти методики являются более трудоемкими, дорогостоящими и разрушающими по своей сути. Чтобы преодолеть упомянутые выше недостатки привычных методов использовались магнитные неразрушающие методы, такие как метод шумов Баркгаузена (ШБ) и петля гистерезиса (ПГ), для определения параметров поверхности различных термообработанных сталей AISI 1040 при различных температурах аустенизации, а именно 800, 850 и 900 °C. Поверхностные свойства оценивали по микроструктуре, размеру зерна и микротвердости. Изменение в ШБ и ПГ термообработанных образцов выражалось в виде среднеквадратичного значения (СКО), коэрцитивной силы, огибающей ПГ и ШБ. Результаты экспериментов показали, что наблюдается резкое изменение микроструктуры и микротвердости на самой поверхности и в подповерхностном слое в результате закалки при температуре аустенитизации 900 °С из-за быстрого охлаждения реечного мартенсита, ограничивающего образование перлита. По данным неразрушающего контроля в отожженных образцах были получены более высокие значения ШБ-СКО и более низкие значения коэрцитивной силы. Линейная корреляция между магнитными свойствами (ШБ—СКО и коэрцитивной силой) и свойствами материала (микротвердостью и размером зерна) была получена при различных частотах перемагничивания. Для закаленного образца были получены небольшие огибающие ПГ и ШБ из-за ограниченного выстраивания магнитных доменов по магнитному полю из-за тонкой структуры реечного мартенсита.

*Ключевые слова*: термообработка, сталь AISI 1040, микроструктура, микротвердость, температура аустенизации, магнитные свойства, шум Баркгаузена, петля гистерезиса.

DOI: 10.31857/S0130308222050049; EDN: BLTAQG

# 1. ВВЕДЕНИЕ

В автомобильной отрасли углеродистая сталь широко используется для производства различных деталей благодаря ее превосходным механическим свойствам. Однако этот материал поставляется в отожженном состоянии и не может использоваться в деталях, испытывающих трение при поверхностном контакте и нагрузки, таких как рельсы, валы, шестерни и оси [1]. Следовательно, для достижения желаемых термомеханических свойств необходима термическая обработка. Как правило, термическая обработка заключается в нагревании, выдержке и охлаждении рабочих образцов в течение определенного времени. т. е. нагрев материала до определенной температуры, выдерживание этой температуры в течение определенного времени до полного нагрева материала, затем охлаждение в соответствии с процессами термической обработки, такими как отжиг, нормализация, закалка, отпуск [2, 3]. Кроме того, оценка качества термообработанных образцов является важнейшей задачей, так как от нее существенно зависит срок службы термообработанных изделий. В настоящее время в промышленности и исследовательских организациях для оценки качества продукции используется несколько методов определения параметров поверхности, таких как рентгеновская дифракция, определение твердости и оптическая микроскопия. Данные методики почти наверняка явлются времязатратными, дорогостоящими и направлены на определение параметров объекта контроля лишь в лабораторных условиях [4]. Следовательно, во многих отраслях промышленности выбирают методики, позволяющие контролировать образец прямо в процессе производства.

Метод шумов Баркгаузена (ШБ) относится к магнитным методам неразрушающего контроля. Метод ШБ имеет определенные преимущества: глубокое проникновение магнитного поля в образец, более быстрая оценка термообработанных образцов и портативность оборудования [5]. Работа анализатора ШБ основана на эффекте вихревых токов, а ШБ характеризуют магнитные свойства ферромагнитных материалов.

Когда катушка с переменным полем намагничивает образец, тогда магнитные домены увеличиваются и удлиняются, а когда они выстраиваются по направлению приложенного магнитного поля, тогда те, у которых невыгодная ориентация магнитных доменов, сжимаются. Вращение и движение доменных стенок приводит к удлинению магнитных доменов [6]. На такой магнитный отклик могут повлиять нарушения в кристаллической структуре и наличие кристаллографических дефектов в кристалле, а именно размер зерна, остаточные напряжения, примеси, включения, дислокации и свойства поверхности, которые оказывают воздействие на движение магнитных доменов в процессе намагничивания [7, 8]. На движение магнитных доменов влияют два фактора: немагнитная зона снижает энергию доменной стенки, а на немагнитной области образуются шиповидные домены, изменяющие магнитостатическую энергию домена [9]. Невыгодная ориентация доменов и флуктуации магнитостатической энергии проявляются в ферромагнитном материале с постоянной напряженностью поля, которое создает шум в виде сигнала ШБ. Эти сигналы воспринимаются приемной катушкой и передаются на контроллер для разбиения сигнала и его фильтрации. Обычно указывается, что в процессе фильтрации удаляются некоторые нежелательные частоты или частотные связи из сигнала с использованием фильтра нижних и верхних частот [10]. Метод ШБ был принят в различных областях производства, таких как оценка термических повреждений образцов грунта [11], распределение остаточных напряжений в рельсах [12], анализ усталостных напряжений парогенератора [13], оценка приложенных напряжений в трубопроводах [14].

Большая часть технических характеристик материалов оценивалась с использованием таких магнитных параметров ШБ и ПГ, как пик ШБ, магнитная проницаемость, потери в сердечнике на перемагничивание, ширина сигнала ШБ и остаточная намагниченность в зависимости от индуцированных напряжений и деформации материала во время нескольких операций механической обработки и сварки. Однако взаимосвязь между изменениями магнитных параметров и механических свойств до сих пор не установлена. Кроме того, сочетание методов ШБ и ПГ с термической обработкой может привести к экономии энергии и времени при улучшении механических свойств производимых компонентов. Следовательно, настоящая работа сосредоточена на определении параметров термообработанной стали AISI 1040 с точки зрения изменения микротвердости и микроструктуры при различных температурах аустенизации, а также заключается в нахождении корреляции таких параметров ШБ и ПГ, как среднеквадратичное значение (СКО), коэрцитивная сила, огибающая ПГ и ШБ на разных частотах перемагничивания.

#### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе в процессе термообработки использовались образцы из стали AISI 1040. Были выбраны 9 образцов ( $90 \times 20 \times 10 \text{ мм}^3$ ) для отжига (OT), нормализации (HOP) и закалки (3AK) при различных температурах аустенизации (по 3 образца на каждый метод). Данные образцы нагревались в муфельной печи. Установка для термообработки и методики для исследования поверхности показаны на рис. 1.

Каждый образец нагревался выше верхней критической температуры стали AISI 1040, т.е. до температуры аустенизации 800, 850 и 900 °C. Такая температура поддерживалась в течение одного часа для равномерного прогрева образца. В дальнейшем образцы охлаждаются согласно режиму термообработки. При отжиге образцы охлаждаются в печи в течение десяти часов. При нормализации образцы выдерживаются на спокойном воздухе в течение шести часов. При закалке образцы опускаются в воду на 5 мин.

Химический состав образцов приведен в табл. 1.

Химический состав термообработанной стали AISI 1040 (масс. %)

Таблица 1	
-----------	--

С	Mn	P	Cr	Mo	Si	S	Fe
0,42	0,60	0,07	0,03	0,11	0,21	0,04	98,52

Измерения ШБ проводили с использованием доступного на рынке портативного прибора MAGSTER (производство: TECHNOFOUR, СНПИ Джамшедпура, Индия). Эта система состоит из

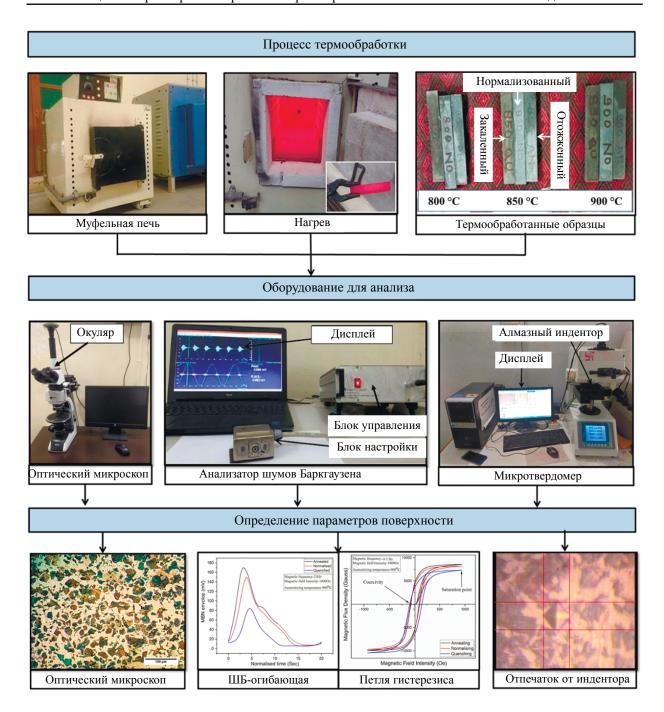


Рис. 1. Установка для термообработки и методики для исследования поверхности.

трех основных блока: измерительный преобразователь, блок управления и дисплей. Измерительный преобразователь имеет U-образное магнитное ярмо с измерительной катушкой в центре. Геометрические характеристики измерительного преобразователя: длина 70 мм, ширина 30 мм. Сечение полюса U-образного магнитного ярма составляет 5×5 мм, расстояние между двумя полюсами 30 мм. Магнитным датчиком является индукционная катушка с магнитным сердечником. Магнитопровод изготовлен из ферритового материала длиной 15 мм и диаметром 2 мм и обмотан эмальпроводом диаметром 0,1 мм. Функция блока управления заключается в формировании синусоидального магнитного поля при различных частотах, что используется для намагничивания и размагничивания магнитного ярма и образца в последствии. Электромагнитные импульсы от образца измеряли с помощью магнитного датчика и отправляли в блок управления. Эти электромагнитные импульсы, известные как сигналы ШБ, являются очень слабыми, поэтому они усили-

ваются в определенном частотном диапазоне. Кроме того, каждый сигнал ШБ фильтровался для удаления нежелательных пиков ШБ. Наконец, на дисплее показывались параметры отклика ШБ и ПГ: такие как ШБ—СКО, коэрцитивная сила, ПГ и огибающая ШБ. Интенсивность параметров ШБ и ПГ быстро снижается по мере увеличения глубины проникновения, что объясняется скинэффектом [15]. Глубину промагничивания образца (δ) можно оценить следующим образом:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu_o \cdot \mu_r}},\tag{1}$$

где f — частота,  $\sigma$  — электропроводность образца,  $\mu_{\scriptscriptstyle 0}$  — магнитная проницаемость вакуума (свободного пространства), а  $\mu_r$  — магнитная проницаемость образца. Глубина промагничивания может регулироваться фильтром высоких и низких частот (100—300 кГц) для качественной оценки глубины термообработки (до 100 мкм) при различной температуре аустенизации. Точно так же Neslusan и др. [16] использовали диапазон частот (50—200 кГц) для контроля зоны термического влияния поверхностно-упрочняемой стали на глубине до 150 мкм под поверхностью с использованием методов ШБ. Термообработанные образцы были подвергнуты контролю с точки зрения многих магнитных параметров, а также была проверена правильность уравнением глубины скин-слоя для выбора оптимальных ШБ и ПГ параметров процесса. Наконец, сигналы ШБ и ПГ были получены в четырех разных местах каждого образца для компенсации погрешности измерения в определенном диапазоне таких магнитных параметров, как частота намагничивания (10-40  $\Gamma$ ц для ШБ и 0.04-0.16  $\Gamma$ ц для ПГ) и напряженность магнитного поля (800-1000 Э). Предыдущие исследования показали, использование анализа ШБ на частота перемагничивания (> 10 Гц) может обнаруживать изменения свойств поверхности, вызванные процессами производства и термообработки [17, 18]. Сигнал СКО был получен с помощью программного обеспечения MAGSTER, а затем обрабатывался программой MATLAB для определения параметров «отсчет» и «событие» [19]. Эти параметры были необходимы для образования огибающей ШБ, используя 5209 отсчетов и соответствующих событий каждого цикла намагничивания. Настройка параметров анализатора ШБ представлена в табл. 2.

ШБ и ПГ параметры процесса

Таблица 2

Параметры ШБ и ПГ	Условия
Диапазон фильтра	100—300 кГц
Усиление ШБ	20 дБ
Число циклов	3
Частота намагничивания для ШБ	10, 20, 30, 40 Гц
Частота намагничивания для ПГ	0,04; 0,08; 0,12; 0,16 Гц
Напряженность магнитного поля	800, 1000 Э

Образцы  $(10\times20\times10~\text{мм}^3)$  были разрезаны по центру для определения микротвердости и микроструктурных параметров на проволочном электроэрозионном станке. Образцы были последовательно подвергнуты горячему формованию и обработаны наждачной бумагой различных марок, таких как 200, 450, 600, 800, 1000 и 1500. Кроме того, зеркальная полировка производилась с помощью глиноземной пастой на станке с вращающимся абразивным диском. Образцы травились в течение примерно 15 с в 2 %-растворе нитала для улучшения видимости микроструктурных фаз в оптический микроскоп (Classical PL, Dewinter Technologies, Италия). Определение микротвердости проводили на термообработанных образцах с приложением нагрузки 100 г с выдержкой 10 с на микротвердомере по методу Виккерса (Micro Mech. Technologies, Индия).

#### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

# 3.1. Влияние термообработки на микроструктуру

На рис. 2 показаны резкие изменения микроструктуры термообработанных образцов. В процессе термической обработки образцы нагревались выше верхней критической температуры, при которой формировалась однородная аустенитная (γ-железо) фаза. Эта фаза железа имеет ГЦК-структуру, которая по своей природе является мягкой. При отжиге (ОТ) в аустенитной матрице зарождались ферритная и перлитная структуры благодаря медленному охлаждению печи.

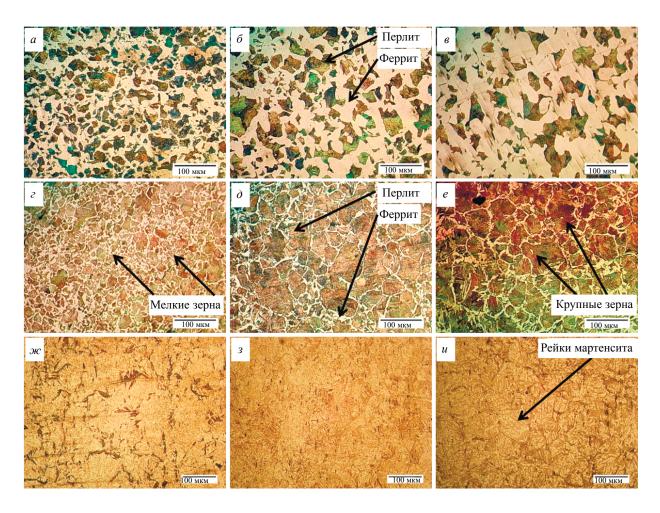


Рис. 2. Изменения микроструктуры в термообработанных образцах при различных температурах аустенизации: ОТ: 800°С (а); ОТ: 850°С (б); ОТ: 900°С (в); НОР: 800°С (г); НОР: 850°С (д); НОР: 900°С (в); ЗАК: 800°С (ж); ЗАК: 850°С (з); ЗАК: 900°С (и).

В отожженых образцах наблюдались большой ферритовый светлый слой и крупная перлитная структура, что было и в нормализованных образцах (как показано на рис. 2). Было обнаружено, что перлитная структура при меньших температурах аустенизации обладает малым размером зерна как при отжиге, так и в процессе нормализации. Если температура аустенизации увеличивается, по всей перлитной структуре наблюдается более крупное зерно благодаря образованию светлой ферритовой матрицы при медленном охлаждении. При нормализации (НОР) формировались более мелкие зерна перлита по сравнению с зерном при отжиге из-за охлаждения на воздухе при комнатной температуре (рис. 2a,  $\epsilon$ ). При нормализации в образце отчетливо наблюдалась большая плотность перлитной фазы и малое количество ферритной фазы, как показано на рис. 2a. При закалке (ЗАК) раскаленные образцы быстро закаливаются

в воду, что приводило к зародышеобразованию пересыщенного твердого раствора мартенсита в аустенитной фазе. Это вызывает перераспределение углерода в аустенитной матрице и формирование отчетливых мартенситных игл по всей поверхности. В таком случае получается, что содержание углерода становится ниже, чем в исходных аустенитных зернах. Образование мартенсита аналогично замораживанию твердого раствора. Иными словами, химически однородная структура кристаллов аустенита допускает возникновение неоднородной мартенситной структуры по составу [20]. В закаленных образцах наблюдалось заметное количество объемно-центрированных тетрагональных игл и реечного мартенсита (рис. 2 m0, поскольку более быстрое охлаждение реечного мартенсита контролирует образование перлита [21].

# 3.2. Влияние термообработки на микротвердость

Вообще говоря, микротвердость напрямую зависит от микроструктурных свойств, таких как различные фазы, фазовое превращение и измельчение зерна. На рис. 3a,  $\delta$  показано изменение микротвердости по глубине в поперечном сечении термообработанных образцов, как функция от различных температур аустенизации. Более низкая микротвердостьо получалась в случае отожженых образцов вследствие большего содержания перлита, образованного при более низкой скорости охлаждения. Кроме того, незначительно большая твердость была обнаружена в нормализованных образцах по сравнению с отожжеными образцами. Это происходит благодаря мелким зернам перлитной и ферритвой фаз при более высокой скорости охлаждения. При закалке закалочная среда сильно влияет на твердость заготовки.

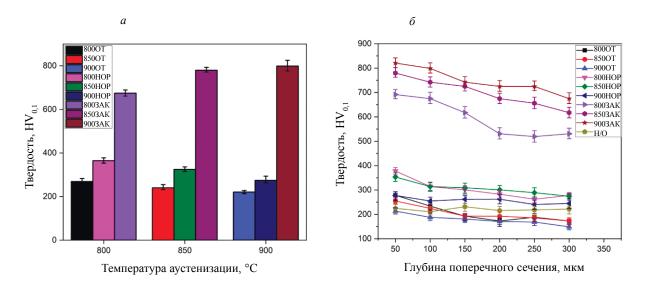


Рис. 3. Изменения твердости при различных температурах аустенизации (a); изменения твердости по глубине в поперечном сечении  $(\delta)$ .

Рис. 3a показывает зависимость твердости термообработанных образцов от температуры аустенизации. Можно заметить, что твердость отожженного и нормализованного образца снижается с повышением температуры аустенитизации. Кроме того, она увеличивается с повышением температуры аустенизации при закалке. Помимо всего обнаружено, что твердость закаленных образцов оказалась почти в три раза выше, чем у остальных образцов. На рис. 3b видно влияние термической обработки на твердость образца по глубине в поперечном сечении. При отжиге и нормализации влияние термической обработки на твердость образцов практически равномерно по сечению. Кроме того, при закалке происходит резкое снижение твердости по глубине в поперечном сечении. Причина состоит в более высокой скорости охлаждения водопроводной водой, что формирует однородную мартенситную структуру на возникающей поверхности и уменьшает глубину в поперечном сечении до 300 мкм.

#### 3.3. Влияние термообработки на размер зерна

В данном исследовании измерение размера зерна необходимо для понимания влияния различных типов термообработки на микроструктуру и механические свойства. Размер зерна отожженного и нормализованного образца измеряли методом секущих. Механизм упрочнения при измельчении зерен обусловлен сопротивлением границ зерен скольжению дислокаций. Упрочнение границ зерен можно описать, используя соотношение Холла—Петча. Оно выражается следующим образом [22]:

$$\sigma_{v} = \sigma_{o} + k_{v} \cdot d^{-1/2}, \tag{2}$$

где  $\sigma_y$  — предел текучести,  $\sigma_o$  — напряжение трения решетки,  $k_y$  — коэффициент Холла—Петча, а твердость может быть выражена средним размером зерна d. Это соотношение можно использовать для прогнозирования значения твердости. Согласно соотношению Холла—Петча, увеличение размера зерна способствует распространению трещин из-за большей длины проскальзывания дислокации. Поэтому для вдавливания при измерении твердости требовалось минимальное напряжение. Другими словами, мелкие зерна обеспечивают более высокую твердость, а крупные — более низкую [23].

На рис. 4 показана зависимость между средним размером зерна, температурой аустенитизации и твердостью. Температура аустенизации и скорость охлаждения зависели от размера зерна и фазового превращения в образце. С другой стороны, размер зерен мартенситной структуры нельзя было измерить с помощью метода картирования. Weidner и др. [24] измеряли размер зерна мартенситной структуры различных высоколегированных сталей. Они наблюдали мартенситные формы внутри пакета исходных аустенитных зерен, а эти пакеты можно было измерить как размер пакета реечного мартенсита. В настоящем исследовании пакеты реечного мартенсита не встречаются. Но на оптической микрофотографии наблюдалась крошечная игольчатая мартенситная структура. Следовательно, размер зерна закаленного образца не может быть измерен. Из рис. 4а ясно видно, что средний размер зерна увеличивается с увеличением температуры аустенизации в обоих процессах термообработки. Это происходит из-за увеличения скорости роста зерна с повышением температуры аустенитизации. Данное наблюдение согласуется с Białobrzeska и др. [25], авторы обнаружили больший средний размер аустенитного зерна (28,5  $\pm$ 12,8 мкм) низколегированной боросодержащей стали, обусловленный выдержкой при температуре аустенитизации 900 °C. На рис. 46 показано уменьшение твердости с увеличением размера зерна в соответствии с соотношением Холла—Петча. Можно сделать вывод, что максимальная твердость (368 HV) была получена на нормализованном образце с малым средним размером зерна 14 мкм при 800 °C. Минимальная твердость (224 HV) была обнаружена у отожженного

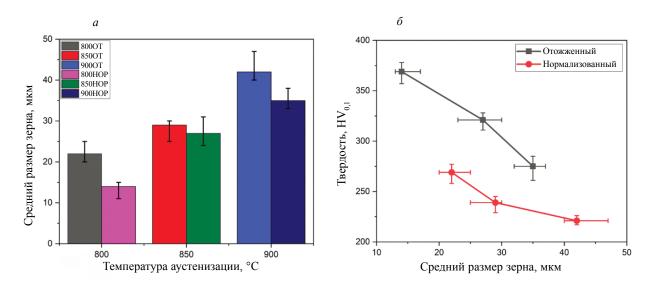


Рис. 4. Влияние температуры аустенизации на средний размер зерна (a); влияние среднего размера зерна на твердость термообработанных образцов  $(\delta)$ .

образца с крупным средним размером зерна 42 мкм при 900 °C. Thorat и Sadaiah [26] также сообщили, что небольшой размер зерна был получен вблизи фотохимически обработанной поверхности сплава Co—Cr L605 из-за серьезной пластической деформации, которая отвечает за повышение твердости материала.

# 3.4. Петля гистерезиса

Характер изменения петли гистерезиса отражает поведение материала во время намагничивания и размагничивания. Когда внешнее магнитное поле было приложено к ферромагнитному материалу, имеющему начальную плотность магнитного потока, равную нулю, большая часть магнитных доменов выстраивается по направлению внешнего магнитного поля, а часть магнитных доменов выстраивается в противоположном направлении. Напряженность магнитного поля следовала по своей собственной траектории от нуля до точки насыщения. Если дальше увеличивать внешнее магнитное поле, то можно достигнуть момент времени, в который плотность магнитного потока в материале перестает увеличиваться. Намагниченный материал не следует по той же кривой во время размагничивания. Как правило, электромагнит создается путем намотки проволоки на железный сердечник и последующим пропусканием по ней электрического тока. Электрическое поле в проволочной катушке создает внутри сердечника магнитное поле [27]. При подаче постоянного тока на катушку электромагнита и оценки петли гистерезиса различных термообработанных образцов он может иметь искаженную и асимметричную форму ПГ из-за намагниченности, смещенной постоянным током. Это приводит к вибрациям, перегреву, потреблению реактивной мощности и кривой насыщения сердечника магнита [28]. Обычно длинную и тонкую петлю гистерезиса можно получить для мягких материалов за счет свободного движения магнитных доменов. Кроме того, короткая и толстая петля гистерезиса может быть получена для материалов с высокой твердостью, поскольку большее количество препятствий уменьшает движение магнитных доменов. На рис. 5 представлены петли гистерезиса различных термообработанных при 900 °C образцов при напряженности магнитного поля 1000 Э и частоте перемагничивания 0,1 Гц. Можно заметить, что во время намагничивания, при приложении одного и того же магнитного поля ко всем соответствующим термообработанным образцам, самая низкая положительная точка насыщения и толстая петля гистерезиса наблюдались для закаленного образца. Положительное значение плотности магнитного потока насыщения было для него минимальным, что свидетельствовало о затруднении намагничивания закаленного образца, а затем отожженного и нормализованного из-за его игольчатой мартенситной микроструктуры, обусловливающей более высокую твердость. Эта мартенситная структура закаленного образца создает больше препятствий для движения магнитных доменов в направлении приложенного магнитного поля и приводит к более низкой намагниченности насыщения и

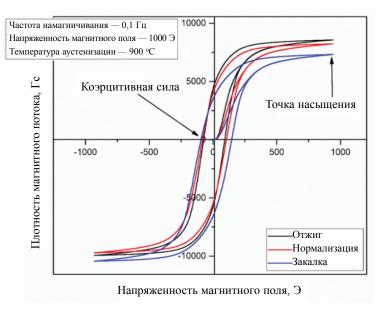


Рис. 5. Петля гистерезиса для термообработанных образцов при 900 °C.

большим удельным потерям энергии на перемагничивание в течение всего цикла. Каһгоbaee и Нејаzi [29] исследовали влияние условий термической обработки, т. е. закалки, на структурные и поверхностные свойства инструментальной стали AISI D2 с использованием оборудования для магнитного неразрушающего контроля. Они сообщили, что с повышением температуры аустенитизации (1000—1130 °C) в закаленном образце наблюдается меньшая намагниченность насыщения и сужение ширины петли гистерезиса, обусловленное образованием мартенситных пластин, остаточного аустенита и нерастворившихся карбидов.

Коэрцитивная сила является одним из важных параметров при анализе петли гистерезиса. Как правило, требуется приложение дополнительной напряженности магнитного поля в противоположном направлении для устранения остаточной намагниченности в материале после снятия внешнего поля [30]. Коэрцитивная сила изменяется в зависимости от свойств материала, таких как твердость, напряжение, фазовое превращение с изменением частоты возбуждения и напряженности намагничивающего поля. На рис. 6 показано изменение коэрцитивной силы при различных частотах возбуждения для термообработанных образцов. Из рис. 6 видно, что при увеличении частоты возбуждающего магнитного поля увеличивается и коэрцитивная сила. Причина в том, что глубина проникновения магнитного поля в обрабатываемый материал обратно пропорциональна частоте намагничивания. Если увеличение частоты намагничивания уменьшает глубину проникновения магнитного поля в объект, это приводит к большему размагничивающему полю, требуемому для насыщения магнитных доменов. Максимальная коэрцитивная сила была получена для закаленного образца при температуре аустенизации 900 °C. В закаленном образце большое количество мелких иголок, подобных рейкам мартенсита, которые создавали препятствие к удлинению, вращению и перемещению магнитного домена в направлении магнитного поля.

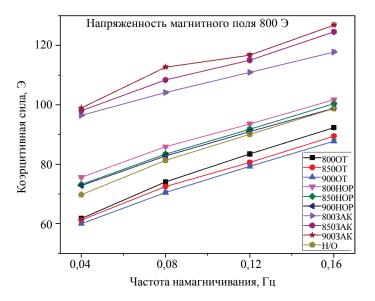


Рис. 6. Изменение коэрцитивной силы при различных частотах перемагничивания.

На рис. 7*а* показана прямая зависимость между коэрцитивной силой и изменением твердости при различных температурах аустенизации. Коэрцитивная сила увеличивается с увеличением твердости термообработанных образцов, поскольку для движения магнитного домена по образцам с высокой твердостью требуется большая плотность магнитного потока. Следовательно, более высокая дополнительная напряженность магнитного поля была прикладывается в обратном направлении, чтобы свести на нет остаточную индукцию. Аналогично рис. 7*б* показывает, что коэрцитивная сила уменьшается с увеличением среднего размера зерна термообработанного образца. Такое поведение можно объяснить увеличением размера зерна, а затем уменьшением количества границ зерен, которые создали минимальное препятствие для движения магнитного домена и уменьшили коэрцитивную силу. Наблюдалась линейная корреляция между коэрцитивной

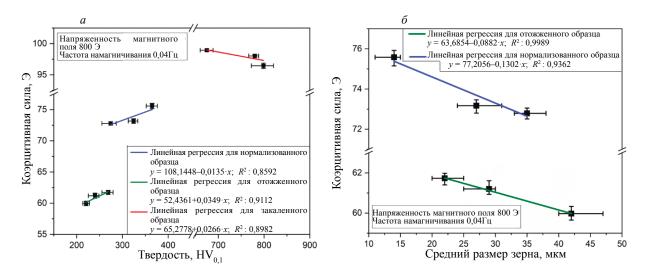


Рис. 7. Корреляция между коэрцитивной силой и твердостью (a); корреляция между коэрцитивной силой и средним размером зерна термообработанных образцов  $(\delta)$ .

силой и твердостью различных термообработанных образцов с коэффициентом корреляции  $0,8592,\,0,9112$  и 0,8982 соответственно. Также была получена линейная зависимость коэрцитивной силы от размера зерна отожженных и нормализованных образцов с коэффициентом корреляции 0,9989 и 0,9362 соответственно. Кроме того, путем сравнения рис.  $7a,\, 6$  делается вывод, что эффект Холла—Петча существенно влияет на магнитные свойства, т.е. на коэрцитивную силу термообработанных образцов, при определении петли гистерезиса.

# 3.5. Оценка шума Баркгаузена

При намагничивании и размагничивании ферромагнитного материала в приложенном магнитном поле образование ШБ регистрируется приемной катушкой в виде импульсов напряжения. Этот импульс напряжения генерировался против нормированного времени как намагниченная и размагниченная петля, т.е. огибающая ШБ. Эти огибающая ШБ также может быть связаны с микроструктурными свойствами различных технических материалов [31]. На рис. 8 показана огибающая ШБ для различных образцов, подвергнутых термообработке при 900 °C. Форма огибающей ШБ сжимается с увеличением твердости и уменьшением размера зерна. Как обсуждалось выше,

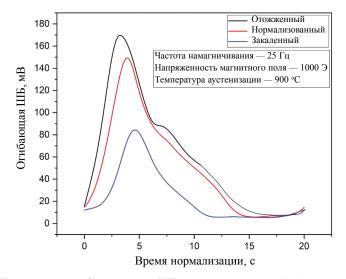


Рис. 8. Изменение в профиле сигнала ШБ различных термообработанных образцов.

отожженный образец имеет более грубую перлитную структуру с меньшей твердостью, чем мелкоперлитная структура нормализованного образца, за которой следует игольчатая мартенситная структура, сформированная в закаленном образце. Следовательно, в закаленном образце образовалась небольшая огибающая ШБ. Кроме того, высота огибающей ШБ отожженного образца почти в два раза больше, чем у закаленного образца из-за более быстрого отклика магнитного домена в условиях крупного зерна. Из рис. 8 видно, что максимальное нормированное время требуется для намагничивания и размагничивания закаленных образцов из-за большого объема границ зерен.

Среднеквадратичное отклонение (СКО) позволяет исследовать зависимость свойств материала с помощью огибающей ШБ. Как правило, непрерывный сигнал импульсов напряжения дает приблизительное значение сигнала шума Баркгаузена, также называемое как значение ШБ—СКО. На рис. 9 видно, что увеличение частоты возбуждения от 10 до 40 Гц при постоянной напряженности приложенного магнитного поля 800 Э вызывает увеличение сигнала ШБ—СКО. ШБ-сигналы также зависят от частоты намагничивания и возрастают с ней при приложенном магнитном поле. В определенной области анализируемого образца при постоянном магнитном поле с увеличением частоты намагничивания количество участвующих магнитных доменов увеличивается за счет динамического зарождения и аннигиляции стенок магнитных доменов. Это приводит к большему взаимодействию между сетевой подвижностью магнитных доменов и местами закрепления, что приводит к увеличению сигналов ШБ—СКО с увеличением частоты намагничивания.

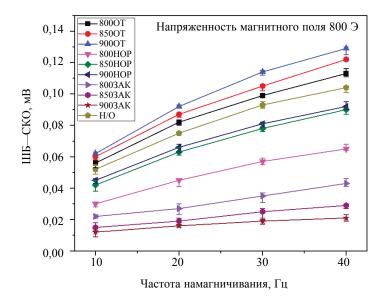


Рис. 9. Изменение ШБ—СКО при различных частотах намагничивания.

На рис. 10*а* показано, что сигнал ШБ—СКО уменьшается с увеличением твердости. Из рис. 10*б* видно, что сигнал ШБ—СКО линейно пропорционален размеру зерна образца, значения ШБ—СКО максимальны для образца, отожженного при 900 °C, вследствие того, что он имеет крупнозернистую структуру перлитно-ферритной матрицы со средним размером зерна 29 мкм. Это привело к меньшему затруднению движения магнитных доменов и привело к большему количеству участвующих доменов, вращающихся в направлении приложенного магнитного поля. Это создает больший сигнал ШБ—СКО в виде импульсов напряжения. Наблюдалась линейная зависимость между ШБ—СКО и твердостью различных термообработанных образцов с коэффициентом корреляции 0,9940, 0,8617 и 0,9766 соответственно. Кроме того, была получена линейная зависимость коэрцитивной силы и размера зерна отожженных и нормализованных образцов с коэффициентом корреляции 0,9755 и 0,9564 соответственно. Помимо этого, сравнивая рис. 10*а* и *б*, делается вывод, что эффект Холла—Петча значительно влияет на ШБ—СКО термообработанных образцов при определении параметров шумов Баркгаузена.

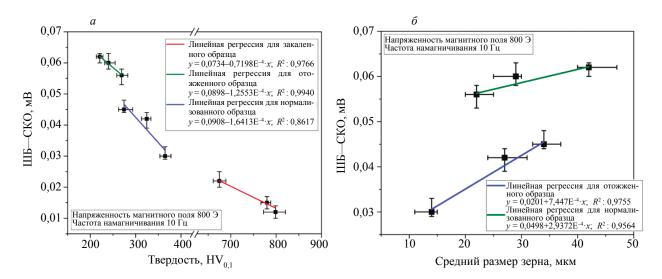


Рис. 10. Результаты: зависимость между ШБ—СКО и твердостью (a); зависимость между ШБ—СКО и средним размером зерна термообработанных образцов ( $\delta$ ).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящей работы показали, что такие методы термической обработки, как отжиг, нормализация и закалка при различных температурах аустенизации, могут играть значительную роль в улучшении свойств поверхности стали AISI 1040. Кроме того, методы, связанные с измерением ШБ и ПГ, являются эффективными средствами неразрушающего контроля для качественной оценки поверхностных свойств термообработанных образцов. В результате работы можно сделать следующие выводы:

- 1. В закаленном образце при температуре аустенитизации 900 °C обнаружено значительное влияние термической обработки в отношении более глубокого упрочненного слоя и большего значения микротвердости (821 HV). Его воздействие наблюдалось в образце до глубины 300 мкм. Действительно, твердость закаленных образцов почти в три раза больше, чем у отожженных и нормализованных образцов, что обусловлено более быстрым охлаждением мартенситной пластины.
- 2. По результатам ШБ-анализа максимум ШБ—СКО (0,13 мВ) наблюдался в отожженном образце при температуре аустенизации 900 °С и частоте перемагничивания 40 Гц, а затем в нормализованных и закаленных образцах. Причина этого образование структуры перлита с более крупны зерном при более высокой температуре аустенизации, при которой во время намагничивания появляется меньше точек захвата дислокаций.
- 3. Согласно ПГ-анализу, максимальная коэрцитивная сила (126 Э) была получена в закаленном образце при температуре аустенизации 900 °C и частоте перемагничивания 0,16 Гц из-за ограничения движения магнитных доменов большим количеством мелких мартенситных реек.
- 4. Установлена линейная корреляция между ШБ—СКО и таким свойством поверхности, как твердость, при различных типах термообработки, таких как отжиг, нормализация, закалка с коэффициентом корреляции 0,9940, 0,8617 и 0,9766 соответственно. Аналогичным образом было обнаружено, что коэрцитивная сила линейно зависит от твердости при различных типах термообработки с коэффициентом корреляции 0,8592, 0,9112 и 0,8982 соответственно.
- 5. Обнаружена толстая петля гистерезиса с более низкой точкой насыщения в случае закаленного образца, по существу так же, как и для тонкой мартенситной рейки. И наоборот, в случае отожженной стали AISI 1040 наблюдалась более высокая амплитуда огибающей ШБ с коротким временем нормализации.

Можно сделать вывод, что термическая обработка в сочетании с магнитными неразрушающими методами может привести к эффективным свойствам поверхности с быстрым определением параметров поверхности стали AISI 1040, что, в свою очередь, сокращает время производственного цикла изделия. Экспериментальные результаты, полученные в ходе настоящего исследования,

могут быть полезны для применения в автомобильной промышленности, если образцы с аналогичными механическими свойствами, химическим составом и удельной температурой аустенизации.

Авторы хотели бы поблагодарить Dr. Meghanshu Vashista и Dr. Mohd Zaheer Khan Yusufzai за обеспечение оборудованием для экспериментов при кафедре машиностроения Индийского института технологий (БИУ), Варанаси. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Stashkov A., Nichipuruk A., Ogneva M., Kuleev V. The effect of plastic strain and the orthogonal bias field on the processes of magnetization of low-carbon steel // Russ. J. Nondestruct. Test. 2012. V. 48. No. 12. P. 686—692.
- 2. Shah A., Ali G., Khan T.M.R., Shah A., Imran M., Nisar S. Evaluation of Heat Treatment Effect on the Tensile Strength of Mild Steel Welded Joints Using Ultrasonic Testing // Russ. J. Nondestruct. Test. 2021. V. 57. No. 6. P. 455—464.
  - 3. *Thelning K.E.* Steel and its heat treatment. Butterworth-heinemann, 2013.
- 4. Lasaosa A., Gurruchaga K., Arizti F., Martinez-De-Guerenu A. Induction hardened layer characterization and grinding burn detection by magnetic Barkhausen noise analysis // J. Nondestruct. Eval. 2017. V. 36. No. 2. P. 27.
- 5. Baldev R., Jayakumar T., Moorthy V., Vaidyanathan S. Characterisation of microstructures, deformation, and fatigue damage in different steels using magnetic Barkhausen emission technique // Russ. J. Nondestruct. Test. 2001. V. 37. No. 11. P. 789—798.
- 6. Shrivastava A.K., Sharma A., Awale A.S., Yusufzai M.Z.K., Vashista M. Assessment of Grinding Burn of AISI D2 Tool Steel Using Barkhausen Noise Technique // J. Inst. Eng. (India): C. 2021. V. 102. No. 4. P 885—896
- 7. Srivastava A., Awale A., Vashista M., Yusufzai M.K. Characterization of Ground Steel Using Nondestructive Magnetic Barkhausen Noise Technique // J. Mater. Eng. Perform. 2020. V. 29. No. 7. P. 4617—4625.
- 8. Noskova N., Shulika V., Lavrent'ev A., Potapov A., Korzunin G. Structure and Barkhausen effect parameters of amorphous alloys after various heat treatments // Russ. J. Nondestruct. Test. 2004. V. 40. No. 9. P. 620—624.
- 9. Devine M.K. The magnetic detection of material properties // J. Nondestr. Eval. 1992. V. 44. No. 10. P. 24—30.
- 10. Sharma A., Chaudhari A., Awale A.S., Yusufzai M.Z.K., Vashista M. Effect of Grinding Environments on Magnetic Response of AISI D2 Tool Steel // Russ. J. Nondestruct. Test. 2021. V. 57. No. 3. P. 212—221.
- 11. Li Y., Chen J., Wang J., Zhao H., Chen L. Study on the residual stress distribution of railway rails // Proc. Inst. Mech. Eng. Part C. 2020. V. 234. No. 23. P. 4682—4694.
- 12. Kishore G., Mariappan K., Kumar A., Shankar V., Sandhya R., Rao B.P., Laha K. Characterization of High Temperature (873 K) Low Cycle Fatigue Damage in Modified 9Cr–1Mo Steel Using Magnetic Barkhausen Emission Technique // Trans. Indian Inst. Met. 2016. V. 69. No. 2. P. 315—318.
- 13. Wu J., Liu C., Li E., Zhu J., Ding S., Wang Y. Motion-Induced Magnetic Barkhausen Noise for Evaluating Applied Stress in Pipelines // J. Nondestruct. Eval. 2020. V. 39. No. 4. P. 1—12.
- 14. Jedamski R., Heinzel J., Rößler M., Epp J., Eckebrecht J., Gentzen J., Putz M., Karpuschewski B. Potential of magnetic Barkhausen noise analysis for in-process monitoring of surface layer properties of steel components in grinding // tm-Technisches Messen. 2020. V. 87. No. 12. P. 787—798.
- 15. Neslusan M., Cizek J., Kolarik K., Minarik P., Cillikova M., Melikhova O. Monitoring of grinding burn via Barkhausen noise emission in case-hardened steel in large-bearing production // J. Mater. Process. Tech. 2017. V. 240. P. 104—117.
- 16. Lindgren M., Lepistö T. Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel // Ndt&E Int. 2003. V. 36. No. 5. P. 279—288.
- 17. Moorthy V., Shaw B., Mountford P., Hopkins P. Magnetic Barkhausen emission technique for evaluation of residual stress alteration by grinding in case-carburised En36 steel // Acta Mater. 2005. V. 53. No. 19. P. 4997—5006.
- 18. Vashista M., Paul S. Novel processing of Barkhausen noise signal for assessment of residual stress in surface ground components exhibiting poor magnetic response // J. Magn. Magn. Mater. 2011. V. 323. No. 21. P. 2579—2584.
- 19. Roitburd A., Kurdjumov G. The nature of martensitic transformations // Mater. Sci. Eng. 1979. V. 39. No. 2. P. 141—167.
- 20. *Grajcar A., Opiela M.* Influence of plastic deformation on CCT-diagrams of low-carbon and medium-carbon TRIP-steels // J. Achiev. Mater. Manuf. Eng. 2008. V. 29. No. 1. P. 71—78.
- 21. *Hall E*. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results // Proc. Phys. Soc. B. 1951. V. 64. No. 9. P. 747.
- 22. Lee S.J., Lee Y.K. Prediction of austenite grain growth during austenitization of low alloy steels // Mater. Des. 2008. V. 29. No. 9. P. 1840—1844.

- 23. Weidner A., Hangen U.D., Biermann H. Nanoindentation measurements on deformation-induced α'-martensite in a metastable austenitic high-alloy CrMnNi steel // Philos. Mag. Lett. 2014. V. 94. No. 8. P. 522-530.
- 24. Białobrzeska B., Konat Ł., Jasiński R. The influence of austenite grain size on the mechanical properties of low-alloy steel with boron // Metals. 2017. V. 7. No. 1. P. 26.
- 25. *Thorat S., Sadaiah M.* The effect of residual stresses, grain size, grain orientation, and hardness on the surface quality of Co–Cr L605 alloy in Photochemical Machining // J. Alloys Compd. 2019. V. 804. P. 84—92. 26. *Wang S., Li L., Zhao X., Xie Y.* Fixed-point time-periodic FEM taking into account hysteresis characteristics of laminated core under DC bias // Int. J. Appl. Electrom. 2017. V. 55. No. 2. P. 289—300.
- 27. Kahrobaee S., Hejazi T.-H. A RSM-based predictive model to characterize heat treating parameters of D2 steel using combined Barkhausen noise and hysteresis loop methods // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 433.
- P. 131—140.

  28. Zagainov A., Ul'yanov A., Chulkina A., Zykina I. The effect of cementite on the formation of the magnetic hysteresis properties of thermally treated carbon steels // Russ. J. Nondestruct. Test. 2012. V. 48. No. 1. P. 35—43.
- 29. Awale A., Shrivastava A. K., Chaudhari A., Yusufzai M.Z.K., Vashista M. Micro-magnetic characterisation of ground AISI D2 tool steel using hysteresis loop technique // Int. J. Mater. Prod. Technol. 2021. V. 62. No. 1—3. P. 180—198.

# МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОРОНОК ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ ЭКСКАВАТОРОВ

© 2022 г. Д.С. Громыка<sup>1,\*</sup>, К.В. Гоголинский<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2 E-mail: \*poloronta@yandex.ru; \*\*nanoscan@yandex.ru

> Поступила в редакцию 28.01.2022; после доработки 08.04.2022 Принята к публикации 22.04.2022

При работе горных машин в экстремальных климатических условиях остро встает вопрос диагностики состояния поверхности контактных частей исполнительного оборудования для их своевременной замены и ремонта. Было проведено диагностирование поверхностной твердости и показателя дефектности поверхности с целью оценки остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов для прогнозирования срока работы коронки и определения необходимости ее замены. В результате была разработана методика оценки остаточного ресурса коронок зубьев, в которой в качестве диагностических параметров были выбраны значения твердости и показания вихретокового дефектоскопа как показателя дефектности поверхности коронки, а также изменения в скорости роста показаний дефектоскопа.

*Ключевые слова*: неразрушающий контроль, диагностирование состояния, остаточный ресурс, динамическое индентирование, вихретоковая дефектоскопия, исполнительное оборудование горных машин.

DOI: 10.31857/S0130308222050050; EDN: BLTRJU

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Работа выемочно-погрузочных горных машин зачастую ведется в экстремальных температурных условиях, примером таких объектов может служить Коркинский разрез, выведенный из эксплуатации вследствие эндогенного горения угля [1, 2], где температура поверхности очагов горения достигает 100—150 °C [3] и увеличивается по мере разработки очага до 300—400 °С [4]. В таких условиях наиболее существенные нагрузки испытывают элементы исполнительного оборудования экскаватора, такие как ковш и зубья ковша, что приводит к ускорению изнашивания зубьев и снижению производительности экскаватора.

Изложенная проблема требует контроля состояния исполнительного оборудования техники для своевременного применения мероприятий по ремонту и техосмотру в рамках технического аудита. Обязательное техническое диагностирование состояния металлоконструкций экскаваторов включено в схемы планово-предупредительного ремонта (ППР) и технического обслуживания и ремонта (ТОиР), регламентированные Положением Минуглепрома СССР [5]. В рамках данных схем основным критерием замены коронок является достижение критического угла затупления [6, 7]. Однако данные методики не позволяют заранее выявить сроки замены коронок, а также сроки мероприятий по техосмотру и ремонту ковшей, что в экстремальных условиях эксплуатации приводит к снижению эффективности и увеличению времени простоя техники. Таким образом, с учетом повышенной интенсивности изнашивания исполнительного оборудования в сложных температурных режимах встает вопрос оценки остаточного ресурса в полевых условиях.

Основными механизмами изнашивания в условиях высокотемпературного горного массива являются ударно-абразивное изнашивание и термическая усталость [8]. Как отмечается в статьях [9—11], циклические термические нагрузки, возникающие при работе с горячим грунтом, приводят к накоплению пластических деформаций в кристаллической решетке металла, что вызывает появление и развитие микротрещин на поверхности металла и сопровождается изменением твердости, пределов прочности и текучести, модуля упругости и др. При ударно-абразивном изнашивании в ходе работы экскаватора, как указано в работах [12, 13], наблюдается увеличение твердости поверхности зубьев вследствие образования наклепа. В то же время влияние высоких температур приводит к умягчению металла, более того, как подчеркивается в работе [14], именно наличие температурного градиента и циклических термических нагрузок приводит к умягчению поверхностного слоя и возникновению трещин.

Задача контроля состояния исполнительного оборудования и оценки его ресурса может быть решена при помощи измерения твердости поверхности [15]. Как сообщается в статье [16], контроль твердости рабочей поверхности зуба позволяет оценить соотношение процессов изнашивания и разрушения по критерию контактной усталости. При работе экскаватора на скальных

грунтах в средней части зуба образуется зона наклепа, имеющая существенно большую твердость, чем твердость острия и задней части зуба, при этом твердость в зоне наклепа уменьшается экспоненциально с глубиной наклепанного слоя [17]. К тому же, в работе [18, 19] авторами удалось рассчитать зависимость между твердостью и параметрами цикличных кривых напряжение—деформация, а авторами [20, 21] была получена корреляция экспериментальных и расчетных результатов анализа усталостного ресурса вкупе с использованием метода твердомерии для быстрого определения зон, находящихся в напряженно-деформированном состоянии, что говорит о возможности использования расчетного значения усталостного ресурса в качестве прогнозного значения остаточного ресурса.

Оценка остаточного ресурса также возможна с помощью контроля процесса трещинообразования, в т.ч. с применением вихретокового контроля, как сообщается в исследованиях [22, 23]. Авторами [24, 25] разработаны модели, учитывающие влияние концентрации напряжений и эксплуатационных температур, что применяется для оценки ресурса элементов конструкций при малоцикловом нагружении.

Величину нагрузок, вызывающих ударно-абразивное изнашивание деталей, можно рассчитать в первом приближении по вызываемому нагрузками наклепу материала деталей, что может быть определено по изменению поверхностной твердости [15—17] и глубины трещин [24] в зоне наклепа зубьев, а также по расчетному значению усталостного ресурса [20, 21]. Как сообщается в [26], применение многопараметрического контроля является одним из ключевых трендов современного развития неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга состояния. Исходя из этого, для разработки методики оценки остаточного ресурса в данной работе был выбран комплекс методов, включающих численный расчет усталостного ресурса, а также инструментальный контроль поверхностной твердости и показателя дефектности поверхности. В связи со сложностью проведения вихретоковой дефектоскопии поверхности в полевых условиях и непосредственной оценки глубины трещин, в качестве интерпретации результатов вихретоковой дефектоскопии и критерия оценки остаточного ресурса были выбраны показания вихретокового дефектоскопа как показателя дефектности поверхности, являющимся интегральным показателем глубины, количества дефектов и изменения магнитных свойств стали на участке поверхности.

#### РАСЧЕТ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА

Для расчета был взят ковш гидравлического экскаватора Komatsu PC400LC-7, оборудованный зубьями с коронками для скальных работ 208-70 14152RC. Общий вид CAD-сборки ковша представлен на рис. 1.

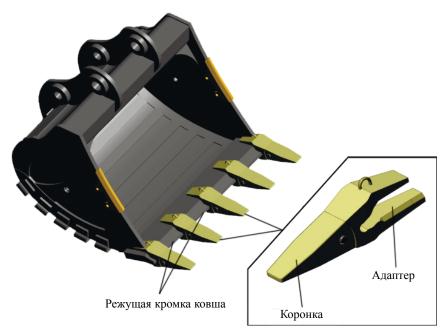


Рис. 1. CAD-сборка ковша Komatsu PC400LC-7.

Согласно исследованию [27], материал коронки изготовлен из стали, близкой по составу к легированной улучшаемой конструкционной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543—71), начальный вес коронки составляет 16 кг, металл коронки имеет, как это свойственно кованым изделиям, зонально неоднородное строение, твердость коронки составляет 41—45 HRC.

Расчет усталостного ресурса был произведен методом конечных элементов в ПО Ansys. Набор начальных и граничных условий, а также характеристики угля для расчета были рассмотрены авторами ранее в работе [9], усталостные параметры для стали 30ХГСА были взяты из работы [28], а механические характеристики — из [29].

Для расчета усталостного ресурса была выбрана модель малоцикловой усталости Coffin-Manson-Basquin [30]:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma_f'}{F} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c, \tag{1}$$

где  $\varepsilon_{a,e}$  — амплитуда упругой деформации;  $\varepsilon_{a,p}$  — амплитуда пластичной деформации;  $\varepsilon_{a,t}$  — амплитуда полной деформации;  $\sigma_f'$  — коэффициент предела выносливости, Па; E — модуль упругости, Па;  $N_f$  — число циклов до разрушения; b — экспонента предела выносливости;  $\varepsilon_f'$  — коэффициент предела текучести; c — экспонента предела текучести

При рассчитанной нагрузке и температурном градиенте усталостный ресурс коронки составляет примерно 500 000 циклов, что при времени цикла 20 с соответствует 2800 ч или 177 сут (25 недель) работы при двухсменном рабочем режиме. Основная нагрузка, по результатам КЭ-анализа, приходится на острие коронки, что соответствует экспериментальным данным и результатам анализа литературных источников.

# ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОРОНОК ЗУБЬЕВ ЭКСКАВАТОРОВ

Исследование состояния поверхности коронок зубьев ковшей экскаваторов с разным сроком их эксплуатации проводили с использованием портативного твердомера и вихретокового дефектоскопа на трех гидравлических экскаваторах Komatsu PC400LC-7, работающих на Коркинском разрезе.

Для измерения твердости был выбран портативный твердомер Константа КТ с ударным преобразователем по методу Либа тип D [31], который оказался наиболее предпочтителен по сравнению с другими преобразователями, поскольку на результат измерений в меньшей степени влияет шероховатость поверхности [32, 33].

Измерение твердости проводилось по равномерной сетке в режиме трех точечных измерений в каждом узле сетки (рис. 2). Замеры проводились на коронках со сроком эксплуатации

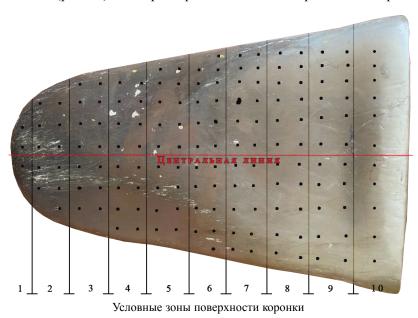


Рис. 2. Верхняя сторона изношенной коронки с размеченной сеткой измерений, а также указанием условных зон с 1 (острие) по 10 (задняя часть), по которым проводился расчет.

в диапазоне от одной-двух недель до четырех месяцев, а также на полностью изношенной коронке со сроком эксплуатации более четырех месяцев. Данная коронка была снята с эксплуатации вследствие критического затупления острия, таким образом можно считать, что для подобных условий максимальный срок эксплуатации коронки составляет четыре месяца.

Вихретоковая дефектоскопия коронок зубьев проводилась по аналогичной схеме. Для исследования был выбран вихретоковый дефектоскоп Константа ВД-1 [34] с преобразователем ПФ-ОН-14-Fe для ферромагнитных сталей, с диаметром ферритового сердечника преобразователя 2,2 мм, частотой тока возбуждения 100 кГц и диаметром зоны контроля 14 мм для поверхностей с большой шероховатостью. В дефектоскопе применен фазовый метод вихретокового контроля с реализацией отстройки от зазора. Для заводской градуировки дефектоскопа используется контрольный образец с искусственными поверхностными дефектами типа прорези известной глубины. Показания прибора при контроле выводятся в мкм — единицах измерения глубины прорезей. Необходимо учесть, что на показания прибора при исследованиях образцов коронок зубьев оказывают влияние глубина поверхностных дефектов и их количество в зоне контроля, а также величина относительной магнитной проницаемости материала, которые изменяются в процессе эксплуатации, в том числе при образовании наклепа. При этом следует учитывать, что отстройка от влияния зазора является важным технологическим решением при проведении контроля в реальных условиях эксплуатации экскаваторов.

При использовании дефектоскопа необходимо руководствоваться ГОСТ Р ИСО 15549—2009 [35]. Перед проведением контроля производится установка нуля дефектоскопа на обратной стороне коронки, так как магнитные характеристики материала в этой области практически совпадают с магнитными характеристиками неизношенной поверхности верхней стороны коронки и не изменяются на протяжении всего срока службы, поскольку зуб в этой зоне не подвержен значительным механическим нагрузкам. Показания дефектоскопа являются одним из диагностических параметров изнашивания поверхности коронки зуба в области наклепа.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ

Результаты измерений твердости вдоль центральной линии поверхности коронок зубьев со сроком службы от 1-2 недель до 4 месяцев представлены на рис. 3. Значения твердости, измеренные динамическим твердомером Либа по шкале D, представлены в единицах НВ (твердость по Бринеллю). Преобразование исходной шкалы HLD в шкалу НВ осуществлялось с помощью калибровки для аустенитных сталей. Средний размах показаний в каждой точке составлял около 10 НВ.

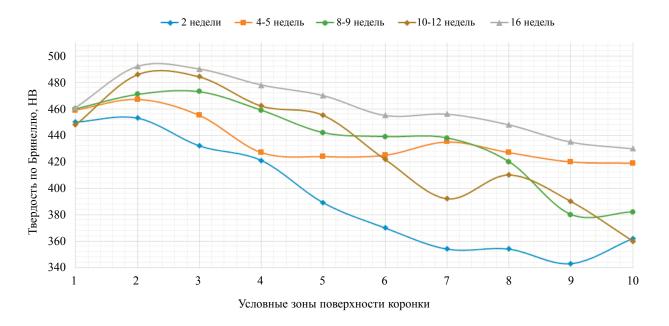


Рис. 3. Графики изменения твердости поверхности коронок зубьев разного срока эксплуатации (в неделях) от острия (зона 1) до задней части (зона 10) по центральной линии.

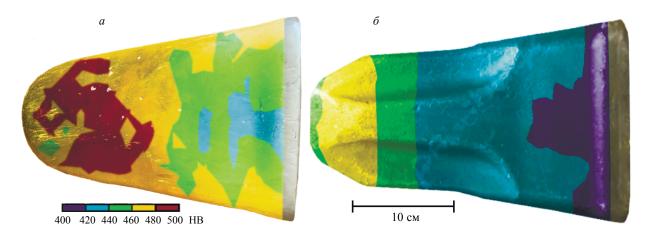


Рис. 4. Карта значений твердости по Бринеллю (HB) поверхности изношенной коронки зуба ковша со сроком эксплуатации четыре месяца (a) и новой коронки зуба ковша со сроком эксплуатации 1-2 недели ( $\hat{o}$ ).

Результаты измерений твердости в виде двумерных карт распределения значений твердости по Бринеллю (НВ) поверхности изношенной коронки представлены на рис. 4a, а новой коронки — на рис.  $4\delta$ . На этих картах каждому цвету соответствуют определенный диапазон значений НВ. Из представленных результатов следует, что твердость повышается по всей поверхности коронки в процессе эксплуатации.

В процессе эксплуатации новая коронка, имеющая равномерную твердость поверхности от острия к средней части (см. рис. 46), подвергается ударно-абразивному изнашиванию, что приводит к образованию участков наклепа и увеличению твердости всей поверхности коронки. Однако острие коронки сохраняет свою первоначальную твердость в течение четырех месяцев эксплуатации с небольшим увеличением в пределах случайной погрешности измерения (с 450 до 460 НВ) (см. рис. 3), что может быть вызвано размягчением металла в результате эксплуатации коронки в области высоких температур, а также ускоренным абразивным изнашиванием материала.

Результаты вихретоковой дефектоскопии представлены в виде двумерной карты распределения показаний вихретокового дефектоскопа по поверхности коронки (рис. 5).

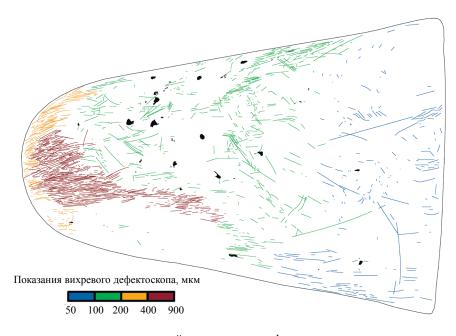


Рис. 5. Двумерная карта распределения показаний вихретокового дефектоскопа по поверхности изношенной коронки со сроком эксплуатации четыре месяца. На рисунке трещины обозначены прямыми линиями, цветом маркируется показания дефектоскопа.

Наибольшие значения показаний дефектоскопа наблюдаются на передней стороне поверхности коронки зуба (красные трещины на рис. 5) в зоне наиболее интенсивного наклепа, тогда как значения показаний на поверхности острия коронки зуба не превышает 350—400 мкм. Высокая плотность трещин и их продольная ориентация наблюдаются в передней части коронки зуба (см. зоны 1—4 на рис. 2). В средней части коронки, а также у задней части, где металл более мягкий, трещины встречаются реже и значения показаний дефектоскопа не превышают 200 мкм в средней зоне и 50 мкм в задней части коронки, однако встречается как продольная, так и поперечная пространственная ориентация трещин.

Для выявления зависимости твердости и показаний дефектоскопа от срока эксплуатации были проведены замеры в разных зонах на коронках разного срока эксплуатации. Результаты исследования приведены на рис. 6.

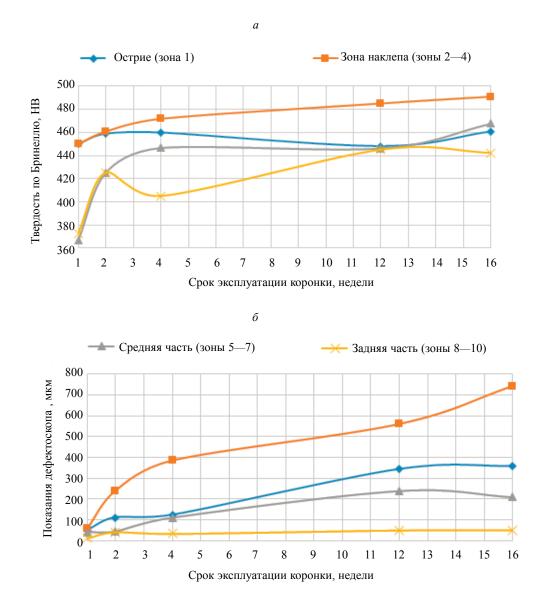


Рис. 6. Результаты замеров твердости (a) и показаний вихретокового дефектоскопа  $(\delta)$  поверхности коронки в зависимости от срока эксплуатации.

С увеличением срока службы показания вихретокового дефектоскопа увеличиваются во всех зонах коронок, кроме задней части, где сохраняется в пределах 50—60 мкм. В зоне максимального наклепа (см. зоны 2—4 на рис. 2) показания дефектоскопа резко увеличиваются с 50 до 400 мкм за месяц эксплуатации коронки, после чего плавно увеличиваются до 550 мкм в течение следующих

двух месяцев. В дальнейшем наблюдается увеличение скорости роста показаний, и к моменту замены коронки к концу четвертого месяца эксплуатации их значения достигают 700—900 мкм. Показания вихретокового дефектоскопа в зоне острия и в средней части коронки увеличиваются соответственно с 30—50 до 250—350 мкм к третьему месяцу эксплуатации, после чего их рост становится незначителен или прекращается вовсе.

Как видно по графикам, отображенным на рис. 6, в ходе эксплуатации зубьев поверхностная твердость и показания вихретокового дефектоскопа в наибольшей степени изменяются в зоне наклепа (см. зоны 2—4 на рис. 2) коронок, в других же зонах (острие, средняя и задняя части) изменение данных параметров не настолько показательно. Таким образом, для оценки остаточного ресурса, а также для определения критерия наступления состояния, близкого к предельному, целесообразно проводить диагностику непосредственно зоны наклепа коронок. Для определения критериев диагностирования состояния и оценки ресурса были сопоставлены графики изменения твердости и показаний вихретокового дефектоскопа в зоне максимального наклепа (рис. 7).

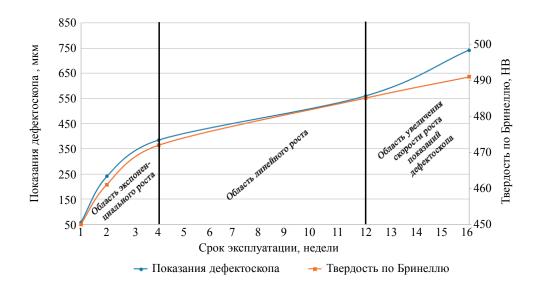


Рис. 7. Сравнение роста твердости и показаний вихретокового дефектоскопа в зоне наклепа коронок с разным сроком эксплуатации.

Как видно из рис. 7, зависимости роста твердости и показаний вихретокового дефектоскопа хорошо коррелируют друг с другом до 12-й недели, и только затем наблюдается расхождение графиков, связанное с увеличением скорости роста показаний дефектоскопа. Можно выделить три характерных области роста твердости и показаний дефектоскопа: 1) область быстрого роста, продолжительностью в 4 недели; 2) область линейного роста с 4-й по 12-ю неделю эксплуатации коронок; 3) область увеличения скорости роста показаний, которая начинается с 12-й недели, при этом скорость роста значений твердости поверхности не меняется.

Таким образом, в качестве диагностических параметров состояния коронки зуба можно установить твердость и показания вихретокового дефектоскопа как показателя дефектности поверхности в зоне максимального наклепа. Поскольку эти два параметра взаимосвязаны, можно утверждать, что ускоренный рост показаний вихретокового дефектоскопа и, соответственно, изнашивания начинается при увеличении твердости на 40 НВ (~10 %) до значений выше 485 НВ и показаний дефектоскопа — до значений выше 550 мкм. После достижения этих значений необходимо планировать замену коронок. Фактические сроки замены зависят от условий и интенсивности эксплуатации и для рассматриваемого случая составляют 16 недель. Кроме того, можно количественно оценить степень изнашивания и, соответственно, остаточный ресурс коронок, если за предельное состояние (100 % износ) принять твердость 495 НВ и показания вихретокового дефектоскопа 750 мкм. Диагностические критерии для определения степени изнашивания в процентах от предельного состояния указаны в табл. 1.

Таким образом, методика определения остаточного ресурса коронок для конкретных условий эксплуатации включает в себя следующие операции:

Степень изнашивания, %

Диапазон роста значений твердости по Бринеллю, НВ

Диапазон роста показаний вихретокового дефектоскопа, мкм

0—25

450—470

50—400

25—75

470—480

400—550

75—100

480—495

550—750

Таблица 1 Диагностические критерии для определения остаточного ресурса коронок в условиях Коркинского разреза

- 1) проведение еженедельного измерения диагностических параметров твердости и показаний дефектоскопа в зоне наклепа поверхности коронок (зоны 2—4 на рис. 2) с построением зависимости, представленной на рис. 7;
- 2) анализ тенденций изменения диагностических параметров, выявление характерных областей, определение диагностических критериев значений твердости и показаний дефектоскопа, соответствующих границам зон с разными скоростями изнашивания (см. табл. 1);
- 3) определение значения твердости, показаний дефектоскопа и срока эксплуатации, соответствующие предельному состоянию коронки (100 % износ).

Процедура диагностирования состояния и оценки остаточного ресурса заключается в измерении значений твердости и снятия показаний вихретокового дефектоскопа, сравнении их с диагностическими критериями и определении степени изнашивания.

Полученные критерии можно использовать для определения остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов для условий эксплуатации, в которых были получены графики роста твердости и показаний вихретокового дефектоскопа в зоне наклепа в течении срока эксплуатации коронок. Таким образом, предложенная методика может быть применима для любых условий эксплуатации в широком диапазоне механических воздействий и температур при условии получения статистически достоверных данных о состоянии контролируемых деталей.

# ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный конечно-элементный анализ усталостного ресурса коронки ковша экскаватора, проведенный по модели малоцикловой усталости Coffin-Manson-Basquin, позволил оценить срок начала разрушения материала коронки зуба в 25 недель. При этом фактическое изнашивание коронки, сопровождаемое ростом трещин, начинается уже спустя 1-2 недели эксплуатации, а замена коронок производится через 16 недель. Разница может быть объяснена существенно более высокими нагрузками на поверхностный слой коронки зуба. Данная неточность в модели может быть исправлена путем корректировки граничных условий с учетом полученных результатов диагностики, и таким образом предложенный метод конечно-элементного анализа на основе модели Coffin-Manson-Basquin позволит дать адекватную предварительную оценку срока службы коронок.

Проведенные измерения твердости поверхности коронок продемонстрировали увеличение твердости со временем эксплуатации по всей поверхности коронок, которое объясняется образованием наклепа. По истечению 16 недель эксплуатации в зоне поверхности вблизи острия наблюдается максимальное увеличение твердости — порядка 40 НВ. Непосредственно на острие коронки наблюдается незначительное увеличение твердости.

Вихретоковая дефектоскопия поверхности коронок продемонстрировала появление и рост трещин по всей поверхности в процессе эксплуатации, при этом наибольшие значения показаний дефектоскопа наблюдаются в зоне максимального наклепа, близкой к острию коронки. После 16 недель эксплуатации показания вихретокового дефектоскопа в этой зоне составили более 750 мкм. Авторы предполагают, что меньшие значения твердости и показаний дефектоскопа непосредственно на поверхности зоны острия связаны с наиболее интенсивным изнашиванием и, как следствие, абразивным удалением дефектного материала в этой области.

В качестве критериев оценки состояния и ресурса коронок было предложено использовать следующие величины и параметры, измеряемые в области максимального наклепа, близкой к острию коронки:

приращение значений твердости относительно исходных значений на поверхности в зоне максимального наклепа;

показания вихретокового дефектоскопа;

увеличение скорости роста показаний вихретокового дефектоскопа, являющееся маркером ускорения изнашивания коронки и близости наступления предельного состояния.

Для условий Коркинского разреза наступление предельного состояния коронки зуба ковша экскаватора Коmatsu PC400LC-7 соответствует увеличению твердости с 450 до 490 НВ и показаний вихретокового дефектоскопа до 750 мкм. При этом 75 % износ соответствует увеличению скорости роста показаний дефектоскопа и расхождению графиков роста твердости и показаний дефектоскопа.

На основе полученных результатов измерений, проведенных в условиях Коркинского разреза, была предложена обобщенная методика оценки остаточного ресурса коронок. Данная методика применима при любых условиях эксплуатации экскаваторов, однако получение численных значений диагностических критериев требует проведения предварительного исследования роста твердости и показаний дефектоскопа при диагностировании поверхности коронок.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработанная методика позволяет оценить остаточный ресурс коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в широком температурном диапазоне с помощью диагностики состояния поверхности зоны наклепа коронок, образующейся в ходе ударно-абразивного изнашивания при контакте с массивом угля. Основными критериями оценки состояния и остаточного ресурса коронок являются значения твердости и показания вихретокового дефектоскопа, а также изменения в скорости роста показаний дефектоскопа.

Полученные результаты демонстрируют возможность разработки методики технического диагностирования и оценки ресурса исполнительного оборудования горных машин с применением твердомерии и вихретокового вида неразрушающего контроля

Авторы благодарят Павла Валентиновича Соломенчука, ведущего специалиста ООО «Константа», за полезные консультации в области вихретоковой дефектоскопии.

Статья подготовлена при участии финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-38-90131.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Sokolovskiy A.V., Lapaev V.N., Temnikova M.S., Gordeev A.I. Assessment of the possibility of the Korkinsky open-pit mine liquidation by filling with thickened tailings of enrichment // Ugol'. 2018. V. 3. No. 1104. P. 91 95.[Соколовский А.В., Лапаев В.Н., Темникова М.С., Гордеев А.И. Технологические особенности ликвидации разреза «Коркинский» // Уголь. 2018. № 3 (1104). С. 91—95.]
- 2. Pashkevich M.A., Danilov A.S., Matveeva V.A. Remote sensing of chemical anomalies in the atmosphere in influence zone of Korkino open pit coal mine // Eurasian Mining. 2021. V. 1. No. 35. P. 79.
- 3. *Портола В.А.*, *Лабукин С.Н*. Обнаружение очагов самовозгорания угля на ранней стадии развития // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 4. С. 34—37.
- 4. Wang H., Chen C. Experimental Study on Greenhouse Gas Emissions Caused by Spontaneous Coal Combustion // Energy Fuels. 2015. V. 29. No. 8. P. 5213—5221.
- 5. Положение о планово-предупредительном ремонте оборудования открытых горных работ на предприятиях угольной промышленности СССР. М.: Минуглепром СССР, 1983. 46 с.
- 6. *Kurganov V.M.*, *Gryaznov M.V.*, *Kolobanov S.V.* Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes // Journal of Mining Institute. 2020. V. 241. P. 10—21. [К*урганов В.М.*, *Грязнов М.В.*, *Колобанов С.В.* Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. 2020. № 241. С. 10—21.]
- 7. *Ivanov S.L.*, *Ivanova P.V.*, *Kuvshinkin S.Yu*. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions // Journal of Mining Institute. 2020. V. 242. P. 228—233. [*Иванов С.Л.*, *Иванова П.В.*, *Кувшинкин С.Ю*. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки горного института. 2020. № 242. C. 228—233.]
- 8. Grzesik W. Chapter 12 Tool Wear and Damage, In Advanced machining processes of metallic materials: Theory, modelling and applications. Amsterdam: Elsevier, 2017. P. 215—239.
- 9. *Gogolinskiy K.*, *Gromyka D.*, *Kremcheev E.* A modelling of cyclic thermal and impact loads on excavator bucket // International Review of Mechanical Engineering. 2021. V. 4. No. 1. P. 20699.
- 10. Artem'ev A.A., Antonov A.A., Sokolov G.N., Lysak V.I. Test procedure of cladded alloys for resistance against high temperature abrasive wear // Journal of Friction and Wear. 2017. V. 38. No. 3. P. 225—230.
- 11. *Сахабудинов Р.В.*, *Чукарин А.В.* Применение метода вихревых токов для контроля напряженно-деформированного состояния элементов конструкций машиностроения при диагностике // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 2 (79). С. 25—30.
- ЮФУ. Технические науки. 2008. № 2 (79). С. 25—30.
  12. Bolobov V.I., Chupin S.A., Bochkov V.S., Akhmerov E.V., Plaschinskiy V.A. The effect of finely divided martensite of austenitic high manganese steel on the wear resistance of the excavator buckets teeth // Key Engineering Materials. 2020. V. 854. P. 3—9.

- 13. Maksarov V.V., Efimov A.E., Keksin A.I. Influence of the microstructure on the damping properties of stress-strain tool systems in the processing of welded structures from dissimilar steels // Materials Science Forum. 2021. V. 1022. P. 7—16.
- 14. Lu Y., Ripplinger K., Huang X., Mao Y., Detwiler D., Luo A.A. A new fatigue life model for thermally-induced cracking in H13 steel dies for die casting // Journal of material processing tech. 2019. V. 271. P. 444 454.
- 15. *Кашапова И.А.*, *Федоров А.В.*, *Егоров Р.А.*, *Ильинский А.В.* Разработка метода оценки твердости покрытий при динамическом индентировании // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 10 (268). С. 65—71.
- 16. Звонарев И.Е., Иванов С.Л., Шишлянников Д.И., Фокин А.С. Исследования поверхностной твердости металла в областях повышенного износа и разрушения деталей горных машин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2014. № 11. С. 67—76.
- 17. Попов Д.А., Патюков С.С. Особенности условий эксплуатации рабочих органов строительно-дорожных машин и факторы, влияющие на их ресурс // Воронежский научно-технический вестник. 2015. № 1 (11). С. 85—94.
- 18. Bandara C.S., Siriwardane S.C., Dissanayake U.I., Dissanayake R. Full range S-N curves for fatigue life evaluation of steels using hardness measurements // International Journal of Fatigue. 2015. V. 82. No. 2. P. 325—321.
- 19. *Gerasimenko A.A.*, *Samigullin G.K.* Evaluation of steel vertical tank residual life by a metal low-cycle fatigue criterion under biaxial loading conditions // Chemical and petroleum engineering. 2015. V. 52. No. 1. P. 53—58.
- 20. Guo C., Yu D., Sun X., Yu W., Chen X. Fatigue failure mechanism and life prediction of a cast duplex stainless steel after thermal aging // International Journal of Fatigue. 2021. V. 146. P. 106161.
- 21. Zhang P., Wang D., Guo Y., Cheng P., Shao C., Lang N., Liu X., Huang J. Fatigue failure analysis and finite element assessment of the twins torsion spring // Engineering Failure Analysis. 2021. V. 122. P. 105187.
- 22. Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V., Anosov M.S. Ultrasonic and Eddy-Current Fatigue Monitoring of Austenitic Steel Welded Joints // Russ. J. Nondestruct. Test. 2021. V. 57. No. 7. P. 570—578. [Гончар А.В., Клюшников В.А., Мишаков В.В., Аносов М.С. Ультразвуковой и вихретоковый контроль процесса усталостного разрушения сварных соединений из аустенитной стали // Дефектоскопия. 2021. № 7. С. 28—36.]
- 23. *Potapov A.I., Kondratev A.V.* Non-destructive testing of multilayer medium by the method of velocity of elastic waves hodograph // Journal of Mining Institute. 2020. V. 243. P. 348—356. [Потапов А.И., Кондратьев А.В. Неразрушающий контроль многослойных сред методом годографа скорости упругих волн // Записки горного института. 2020. № 243. C. 348—356.]
- 24. Добровольский В.И., Добровольский С.В. Корреляция долговечностей по трещинообразованию и разрушению элементов конструкций при малоцикловой усталости // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2009. № 1 (41). С. 33—36.
- 25. Olenev L.A., Zakieva R.R., Smirnova N.N., Shichiyakh R.A., Ershov K.A., Geetha N. Accurate composition dependent thermo mechanical lifetime estimation of hour glass type solder joint in electronic assemblies // Soldering & Surface mount Technology. 2020. V. 34. No. 1. P. 8—15.
- 26. Gogolinskiy K.V., Syasko V.A. Prospects and challenges of the fourth industrial revolution for instrument engineering and metrology in the field of non-destructive testing and condition monitoring // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2019. V. 61. No. 8. P. 434 439.
- 27. Лебедев Д.И., Федоров М.В., Голиков Н.И., Тихонов Р.П., Винокуров Г.Г. Натурные испытания служебных характеристик наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A // Наука и образование. 2016. № 2. С. 81—87.
- 28. *Dębski D., Gołoś K., Dębski M., Misztela A.* Multiaxial Fatigue Behavior of 30HGSA Steel Under Cyclic Tension-Compression and Reversed Torsion / In: Niepokolczycki A., Komorowski J. (eds) ICAF 2019. Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing. ICAF 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, 2020. P. 452 460.
- 29. *Boroński D*. The effect of the method of determination of young's modulus on the estimation of fatigue life of structural elements // Journal of theoretical and applied mechanics. 2004. V. 42. No. 2. P. 269 283.
- 30. Niesłony A., el Dsoki C., Kaufmann H., Krug P. New method for evaluation of the Manson-Coffin-Basquin and Ramberg-Osgood equations with respect to compatibility // International Journal of Fatigue. 2008. V. 30. P. 1967—1977.
- 31. Твердомер портативный многофункциональный. [Электронный ресурс] // Константа. URL: constanta.ru/catalog/tverdomery/konstanta kt (Дата обращения: 24.12.2021).
- 32. Gogolinskii K.V., Syasko V.A., Ūmanskii A.S., Nikazov A.A., Bobkova T.I. Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects // Journal of Physics Conference Series. 2019. V. 1384. P. 012012.
- 33. Егоров Р.А., Ильинский А.В., Кузьмичев М.В., Федоров А.В. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования // Дефектоскопия. 2020. № 6. С. 61—69.
- 34. Вихретоковый дефектоскоп. [Электронный ресурс] // Константа URL: constanta.ru/catalog/vikhretokovye\_defektoskopy\_preobrazovateli\_kontrolnye\_obraztsy (Дата обращения: 24.12.2021).
- 35. ГОСТ Р ИСО 15549—2009 Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения.

УДК 620.179.13

# СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ В АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНОМ ПЛАСТИКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН

© 2022 г. Ванша Кхер <sup>1,\*</sup>, Равибабу Мулависала <sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Инженерный колледж «Новый горизонт», Бангалор, Индия
<sup>2</sup>Центр датчиков, приборов и проектирования киберфизических систем, Индийский технологический институт, Дели, Индия

E-mail: \*vanshakhernhce@gmail.com; \*\*mulaveesala@sense.iitd.ac.in

Поступила в редакцию 01.02.2022; после доработки 18.02.2022 Принята к публикации 18.02.2022

Активная инфракрасная термография (АИКТ) оказалась широко используемым методом неразрушающего контроля (НК) и визуализации для определения характеристик материалов без влияния на их будущую пригодность использования. Предлагаемая работа демонстрирует оценку испытательного образца композита из армированного стекловолокном пластика (АСВП), изготовленного с отверстиями с плоским дном в качестве дефектов на различной глубине, с использованием визуализации частотно-модулированных тепловых волн (ВЧМТВ) в качестве нового метода нестационарной визуализации тепловых волн (НСВТВ). Особенности оптимальной ВЧМТВ при сжатии импульсов особенно важны для сжатия общей наведенной тепловой энергии в узкий импульс для повышения разрешения по глубине, а также чувствительности контроля. Анализ надежности метода оптимальной ВЧМТВ при сжатии импульсов выполняется с помощью статистического параметра, известного как вероятность обнаружения (ВО). В данной работе рассматривается модель отклика непрерывного сигнала путем вычисления площади под основным центральным лепестком восстановленных профилей, полученных в процессе взаимной корреляции на всех глубинах образца из АСВП. Для статистической оценки в качестве параметров качества использовались пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ) и критерий Танимото. Кроме того, была предложена схема, основанная на оценке вероятности обнаружения, с учетом площади зоны основного лепестка (ПЗОЛ) для явной видимости и разрешения дефектов. Результаты утверждают, что при применении ПЗОЛ в качестве статистического признака оценки надежности дефекты, имеющие более высокое соотношение сторон, обнаруживаются с вероятностью более 90%.

*Ключевые слова*: инфракрасная визуализация, вероятность обнаружения, пластики со стекловолокном, визуализация частотно-модулированных тепловых волн, полиномиальная аппроксимация, разрешение.

**DOI:** 10.31857/S0130308222050062; **EDN:** BMFSYK

#### І. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы сильно расширилось использование методов активной термографии в области НК при контроле дефектов без нарушения целостности и функциональности контролируемого объекта [1, 5]. Наиболее известными методами оптически стимулированной термографии являются: импульсная термография (ИТ), импульсная фазовая термография (ИФТ) и модулированная термография (синхронная термография(СТ)) [2, 3].

Наиболее простой в проведении процедуры АИКТ является ИТ, при которой тепловой поток в форме узкого импульса наводится в контролируемом объекте и измеряется температурный градиент в процессе охлаждения [4]. Потребность в источниках пиковой мощности, а также непостоянство температурного отклика в результате непостоянного нагрева, а также проблемы, связанные с излучательной способностью на поверхности образца, затрудняют его применение в полевых условиях. ИФТ работает по схожему с ИТ принципу с точки зрения потребности в узком импульсе высокой мощности, за тем исключением, что для выделения информации о фазе отраженного теплового отклика применяются схемы постобработки данных в виде преобразования Фурье. СТ обходит недостатки ИТ и ИФТ, поскольку он основан на применении периодического одночастотного теплового возбуждения относительно низкой пиковой мощности для получения информации о величине, а также фазе отраженных тепловых волн. Следовательно, чтобы свести к нулю такие ограничения, как требование источников высокой мощности и ограниченная глубина проникновения, применялся метод нестационарной визуализации частотно-модулированных тепловых волн (ВЧМТВ).

Основная идея линейной ВЧМТВ базируется на индуцировании тепла в образце, используя механизмы с низкой пиковой мощности путем охвата его полосой частот в зависимости от толщины (геометрии) и тепловых свойств в одном эксперименте. Как результат диффузии тепловых волн в образце, наблюдается смещение теплового градиента даже при наличии поверхностных анома-

лий. Поэтому тепловые отклики, захваченные инфракрасной камерой, в дальнейшем обрабатываются для статистической качественной оценки метода оптимальной ВЧМТВ при сжатии импульсов [10, 11]. Это может быть достигнуто по ВО-схеме, основанной на критерии площади зоны основного лепестка (ПЗОЛ), генерируемого из рассчитываемых профилей корреляции, соответствующих каждому плоскодонному отражателю (ПДО) в объекте контроля из АСВП.

ВО является общепринятой мерой для статистического обеспечения надежности контроля по методике активной инфракрасной томографииАИКТ [12—15]. Оценка вероятностей достигается двумя основными подходами: (а) либо путем использования двоичных данных (0 или 1), обозначающих наличие или отсутствие дефектов в объекте контроля; (б) либо путем получения количественного непрерывного набора экспериментальных откликов и аппроксимации их случайных распределений. В настоящей работе основное внимание уделяется оценке надежности контроля методом визуализации частотно-модулированных тепловых волн импульсного сжатия путем анализа временных профилей температуры и взаимной корреляции и, следовательно, рассмотрения пикового отношения сигнал/шум и критерия Танимото в качестве показателей надежности.

# **ІІ. ОБРАЗЦЫ И ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА**

При ВЧМТВ в объекте контроля находится тепловой поток, смодулированный соответствующей полосой частот с равной энергией, который необходим для контроля подповерхностных несплошностей с лучшим разрешением. Профиль распределения тепла во времени возникает как результат образования тепловых осциляций на поверхности образца из армированного стекловолокном пластика. Согласно теории, тепловая осцилляция с угловой частотой ω, длиной

волны  $\lambda$ , где  $\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$ , распространяется со скоростью  $\sqrt{2\alpha\omega}$  в материале с теплопроводно-

стью а. С увеличением глубины дефекта наблюдается экспоненциальное затухание рассеянной тепловой волны. Поскольку глубина проникновения зависит от частоты падающего излучения, следовательно, чем ниже частота, тем больше глубина проникновения, что приводит к более низкой скорости ее распространения [3].

Длина термодиффузии определяется как расстояние от поверхности, на котором энергия волны уменьшается в раз. Увеличение разрешения по глубине и облегчение одновременного зондирования различных глубин в методе визуализации частотно-модулированных тепловых волн обусловлено зависимостью длины термодиффузии от частоты развертки, а также от полосы пропускания сигнала возбуждения. В радарах используется принцип сжатия импульсов с преобладанием нестационарных сигналов для увеличения вероятности обнаружения и разрешения целевого объекта. Он фокусирует и концентрирует всю энергию падающего сигнала в одной точке. Это увеличивает пиковое отношение сигнал/шум за счет получения псевдоимпульсного отклика от входного сигнала большой длительности. В данной работе отклики теплового распределения получены в ходе проведения визуализации частотно-модулированных тепловых волн, а также реализован подход к сжатию импульсов/согласованной фильтрации на основе преобразования Гильберта. В результате будут получены коэффициенты перекрестной корреляции, а также информация о временной задержке, соответствующая распределению температуры в различных пикселях подповерхностных глубин по отношению к выбранному опорному пикселю (в основном, пикселю нефункциональной / фоновой области). Таким образом, импульсное сжатие при визуализации частотно-модулированных тепловых волн обеспечивает более глубокое зондирование подповерхностных дефектов, расположенных на различной глубине, с лучшим контрастом.

Эксперименты проводили для подтверждения работоспособности данного метода для контроля подповерхностных дефектов в композитном образце из армированного стекловолокном пластика с 13-ю ПДО, имитирующих дефекты, как показано на рис. 1а. Тепловизионная система с разрешением 320 256 пикселей используется для определения изменения температуры поверхности образца во времени. Фронтальный вид образца из армированного стекловолокном пластика и его термограмма показаны на рис. 16, в. Соотношения сторон с возрастающей глубиной находятся в порядке 1,8; 2; 2,1; 2,4; 2,6; 3; 3,4; 4; 4,8; 6; 8; 12 и 24. На поверхность объекта контроля воздействуют наложенным частотно-модулированным тепловым потоком от двух галогеновых ламп по 1 кВт каждая, расположенные на расстоянии примерно одного метра от образца, как показано на рис. 1г. Временная температурная характеристика образца получена с помощью инфракрасной камеры в процессе его охлаждения с фиксированной частотой кадров 25 Гц в течение 100 с.

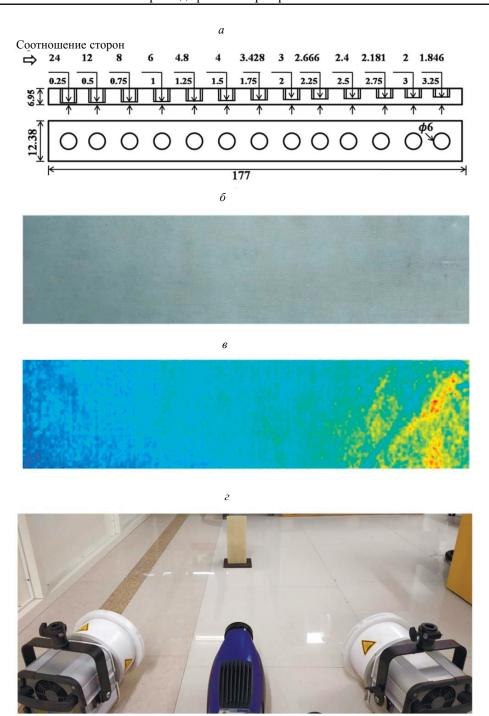


Рис. 1. Геометрическая схема объекта контроля из армированного стекловолокном пластика с искусственными ПДО (а); фронтальный вид образца (б); термограмма для фронтального вида образца из армированного стекловолокном пластика (в); внешний вид экспериментальной установки для ВЧМТВ [12] (г).

# ІІІ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Временные профили распределения температуры для каждой глубины образца из АСВП получаются с помощью инфракрасной камеры. Временное повышение температуры, полученное для частотно-модулированного потока для конкретной глубины 0,25 мм, показано на рис. 2а. Сначала среднее повышение температуры во времени для каждого теплового профиля пикселя удаляется с помощью полиномиальной аппроксимации первого порядка. Линейный аппроксимированный временной профиль температуры для соответствующего дефекта глубиной 0,25 мм показан на рис. 26.

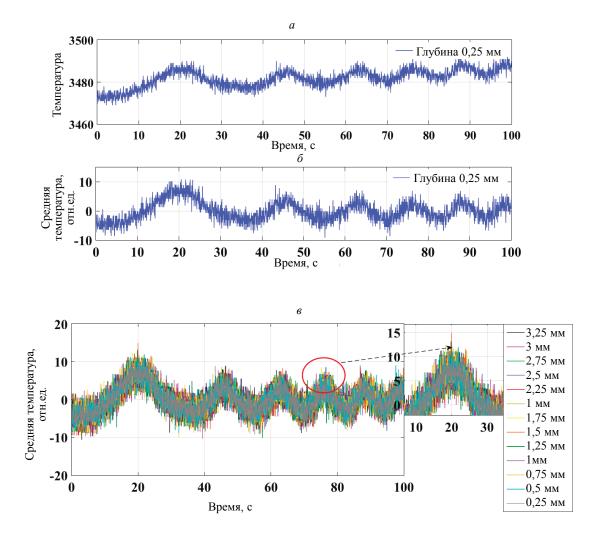


Рис. 2. Временной профиль температуры для образца из армированного стекловолокном пластика на определенной глубине 0,25 мм для теплового потока ВЧМТВ (а); его аналог (б); профили распределения среднего сигнала, полученные на испытуемом образце из армированного стекловолокном пластика в различных местах расположения дефектов (в).

Типичный средний временной температурный профиль для всех дефектов ПДО образца из АСВП показан на рис. 2в. Процесс согласованной фильтрации применяется по мере того, как временной температурный сигнал, соответствующий каждой глубине, свертывается с выбранным эталонным пикселем без дефектов/фона. Кросс-корреляционные изображения получают из амплитудного спектра результирующего свернутого сигнала. Восстановленные последовательности, полученные из профилей сжатия импульсов средних временных температурных сигналов для глубины от 0,25 до 3,25 мм для образца из АСВП, показаны на рис. 3.

Исследования по вероятности обнаружения (ВО) могут проводиться с помощью различных моделей. В текущей работе для цели оценки надежности контроля методом ВЧМТВ сжатия рассмотрены статистические модели характеристик непрерывных сигналов [14]. Оценка ВО производится при рассмотрении площади зоны основного лепестка в качестве статистического параметра для всех глубин образца из АСВ, как показано на рис. 3.

Учитывая распределение набора количественных характеристик (ПЗОЛ в данном случае), для оценки ВО выбирается и используется аппроксимирующая модель зависимости ПЗЛО от логарифма r. Далее была предложена линейная корреляция ВО на различных глубинах как функция соотношения сторон дефекта (диаметр/глубина|r). Следовательно, логлинейная аппроксимирующая модель предполагает, что существует линейная корреляция между сигналом |ПЗОЛ| и соотношением сторон:

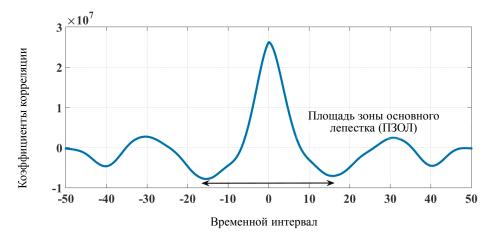


Рис. 3. Площадь зоны основного лепестка, рассчитанная из восстановленного корреляционного профиля, сгенерированного для всех глубин (см. рис. 1a—e) объекта контроля из армированного стекловолокном пластика.

$$|\Pi 3O\Pi| = \beta' + \alpha' \log(r) + \varepsilon', \quad |\Pi 3O\Pi| \ge |\Pi 3O\Pi'|_{th}, \tag{1}$$

где  $\alpha'$  u  $\beta'$  представляют собой коэффициент наклона прямой и точки пересечения модели линейного приближения соответственно, а  $\epsilon'$  — погрешность, стандартная погрешность по Гауссу в основном, с нулевой средней и постоянным среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{\epsilon}$ . Условие обнаружения дефекта с соотношением сторон r:  $|\Pi 3O\Pi|$  для такого отдельного дефекта должен быть больше, чем величина порога принятия решения, т.е.  $|\Pi 3O\Pi'|_{th}$ , тогда только дефект будет «обнаружен».

Математически BO(r) может быть выражен, как

$$BO(r) = \varnothing \left(\frac{\log(|r|) - \mu}{\sigma_{\varepsilon}}\right), \tag{2}$$

где

$$\mu'' = \frac{\left|\Pi 3 O \Pi'\right|_{th} - \beta'}{\alpha'},\tag{3}$$

$$\sigma'' = \frac{\sigma_{\varepsilon}}{\alpha'}.\tag{4}$$

Здесь  $\varnothing$  представляет собой кумулятивную функцию распределения. Символами  $\mu''$  и  $\sigma''$  обозначаются среднее и стандартное отклонение соответственно, чтобы достигнуть наилучшей аппроксимации на данном наборе статистических параметров, используя оценку максимального правдоподобия (ОМП), а  $\sigma_{\epsilon}$  представляет стандартное отклонение погрешности  $\epsilon$ . Значения BO, соответствующие различным соотношениям сторон, перечислены в табл. 1. Оценка BO с применением ПЗОЛ в качестве критерия продемонстрирована графически на рис. 4.

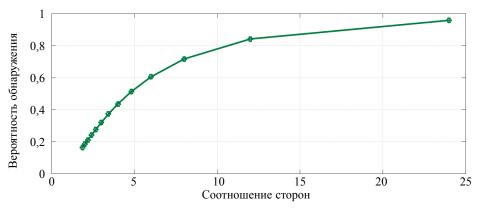


Рис. 4. Зависимость оценки вероятности обнаружения с оценкой максимального правдоподобия в качестве статистического критерия наличия дефектов в образце из армированного стекловолокном пластика от соотношения сторон.

Таблица 1 Вероятности обнаружения дефектов в сравнении с соотношением сторон для профиля глубины в образце из армированного стекловолокном пластика, используя площадь зоны основного лепестка в качестве статистического критерия

Глубины, мм	Соотношение сторон	Вероятность обнаружения
3,25	1,8	0,16
3	2	0,18
2,75	2,1	0,20
2,5	2,4	0,24
2,25	2,6	0,27
2	3	0,32
1,75	3,4	0,37
1,5	4	0,43
1,25	4,8	0,51
1	6	0,60
0,75	8	0,71
0,5	12	0,84
0,25	24	0,95

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании была разработана система оценки вероятности обнаружения, основанная на минимальном пороговом значении площади зоны основного лепестка, необходимом для максимального контраста, чтобы оценивать и улучшать эффективность обнаружения метода импульсного сжатия ВЧМТВ. Пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ) и критерий Танимото были использованы в качестве показателей для статистической оценки дефектов в армированном стекловолокном пластике. Полученные результаты ВП показали, что если сжатие импульсов с помощью согласованной фильтрации обеспечивает лучшее разрешение по глубине для более глубоких дефектов, то рассмотрение ПЗОЛ как спектра полной сосредоточенной мощности в качестве критерия помогает достичь лучшей видимости и обнаруживаемости для дефектов с большим соотношением сторон. Было замечено, что дефект с наибольшим соотношением сторон (самый глубокий дефект) обнаруживается с вероятностью более 90 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Hellier C. Handbook of Nondestructive Evaluation Second Edition. McGraw-Hill Professional Publishing, USA, 2001.
- 2. Bergmann R., Huke P. Advanced Methods for optical Nondestructive Testing. Optical Imaging and Metrology / Advanced Technologies, Wiley, New Jersey. 2012. P. 393—412.
- 3. *Maldague X*. Theory and Practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing. Wiley, New York, 2001.
- 4. Sakagami T., Kubo S. Applications of pulse heating thermography and lock- in thermography to quantitative non-destructive evaluations // Infrared Physics and Technology. 2002. V. 43. No. 3—5. P. 211—218.
- 5. Shepard S.M. Introduction to active thermography for non-destructive evaluation // Anti-Corrosion Methods and Materials. 1997. V. 44. No. 4. P. 236—239.
- 6. Busse G., Wu D., Karpen W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography // Journal of Applied Physics. 1992. V. 71. No. 8. P. 3962—3965.
- 7. Wu D., Busse G. Lock-in thermography for Nondestructive evaluation of materials // Revue Generale de Thermique. 1998. V. 37. No. 8. P. 693—703.

- 8. Almond D.P., Peng W. Thermal imaging of composites // Journal of Microscopy. 2001. V. 201. No. 2. P. 163—170.
- 9. Ghali V.S., Mulaveesala R., Takei M. Frequency-modulated thermal wave imaging for non-destructive testing of carbon fiber-reinforced plastic materials // Measurement Science and Technology. 2011. V. 22. No. 10. Art. No. 104018.
- 10. *Mulaveesala R., Tuli S.* Implementation of frequency-modulated thermal wave imaging for non-destructive sub-surface defect detection // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2005. V. 47. No. 4. P. 206—208.
- 11. *Mulaveesala R., Tuli S.* Theory of frequency modulated thermal wave imaging for non-destructive subsurface defect detection // Applied Physics Letters. 2006. V. 89. No. 19. Art. No. 191913.
- 12. Kher V., Mulaveesala R., Rani A., Arora V. Investigations on probability of defect detection using differential filtering for pulse compression favorable frequency modulated thermal wave imaging for inspection of glass fiber reinforced polymers // IOP SciNotes. 2020. V. 1. No. 2. P. 024407.
  - 13. Meeker W.Q., Escobar L.A. Statistical methods for reliability data. John Wiley & Sons, New-York.
- 14. *Kher V., Mulaveesala R.* Probability of defect detection in glass fibre reinforced polymers using pulse compression favorable frequency modulated thermal wave imaging // Infrared Physics and Technology. 2021. V. 113. P. 103616.
- 15. Arora V., Mulaveesala R., Rani A., Kher V. et al. Infrared Image Correlation for Non-destructive Testing and Evaluation of Materials // J. Non-destruct Eval. 2021. V. 40. P. 75.

# ОТЧЕТ О ПРОВЕДЕНИИ

# XXXIII Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»

г. Екатеринбург, ИФМ УрО РАН, 19-20 апреля 2022 г.

XXXIII Уральская конференция с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» была успешно проведена 19—20 апреля 2022 г. Во второй день конференции 20 апреля была организована молодежная секция, участниками которой стали студенты профильных кафедр, аспиранты, молодые специалисты и ученые (возраст участников — до 35 лет включительно).

Организаторами и партнерами Уральской конференции выступили Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН (ИФМ УрО РАН), Институт машиноведения Уральского отделения РАН (ИМАШ УрО РАН), Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД), Уральское отделение РАН и Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. Информационную поддержку обеспечили журналы «Дефектоскопия/Russian Journal of Nondestructive Testing», «Сварка и диагностика», «Территория NDТ». Председателем оргкомитета конференции являлся профессор Я.Г. Смородинский (ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург), сопредседателями — президент РОНКТД, профессор В.А. Сясько (Санкт-Петербургский горный университет, г. С.-Петербург) и профессор Х.-М.В. Крёнинг, представитель Саарского университета (г. Саарбрюкен, Германия) и университета г. Сан-Паулу (Бразилия).

Научная программа конференции включала следующие разделы:

- 1. Физические основы неразрушающего контроля и диагностики.
- 2. Методы и средства измерения физических полей. Новые средства и системы контроля.
- 3. Контроль труб и диагностика трубопроводов.
- 4. Контроль сварных соединений.
- 5. Методы и средства контроля напряженно-деформированного состояния изделий и объектов.
- 6. Опыт практического применения физических методов и средств контроля.
- 7. Стандартизация и метрологическое обеспечение средств НК.
- 8. Квалификация и подготовка персонала в области НК.

В конференции приняли участие ведущие специалисты в области неразрушающего контроля, технической диагностики и метрологии из 16 городов России, Белоруссии и ЛНР: Екатеринбурга, Москвы, Томска, Санкт-Петербурга, Уфы, Ижевска, Новосибирска, Нижнего Новгорода, Ульяновска, Челябинска, Снежинска, Омска, Минска, Могилева, Луганска и Алчевска.

Заседание проходило в смешанном формате (очном и дистанционном online на платформе ZOOM). Максимальное количество участников, принимавших участие в конференции, составило 75 человек. К сайту журнала «Дефектоскопия», на котором проходила стендовая сессия и были размещены тезисы докладов всех участников, зарегистрировано более 1000 обращений.

В пленарном заседании первого дня конференции с приглашенными докладами выступили:

Владимир Платонович Вавилов (д.т.н., Томский политехнический университет, г. Томск), «Инфракрасная термография и тепловой неразрушающий контроль» (запись доклада доступна по ссылке: https://youtu.be/zpP4JNv6mo4?t=2425);

Александр Петрович Владимиров (д.т.н., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург), «Спекл-диагностика необратимых деформаций живой и неживой материи» (видео доклада доступно по ссылке: https://youtu.be/zpP4JNv6mo4?t=4294).

После выступлений приглашенных докладчиков были заслушаны 19 устных докладов. Открывал секцию специалист из Башкирского госуниверситета (г. Уфа) Р.Ф. Альмухаметов. Он рассказал о влиянии режима работы рентгеновской трубки на юстировку дифрактометра. Следом поделился опытом эффективного применения бетатронов при проведении неразрушающего контроля толстостенных изделий представитель Томского политехнического университета (г. Томск) А.М. Штейн. Далее выступили научные сотрудники Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН и Института машиноведения УрО РАН (г. Екатеринбург) А.В. Никитин, А.Н. Сташков и А.Н. Мушников. В своих докладах они сообщили об определение формы поверхностных дефек-

тов ферромагнетика по полям рассеяния в тангенциальном намагничивающем поле, об особенностях изменений магнитных свойств 3D и литой стали 09Г2С при малоцикловых испытаниях, а также о разработке двухосной испытательной машины для исследований физико-механических характеристик материалов в условиях упругопластического деформирования. Представитель Объединенного института машиностроения НАН Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь) С.Г. Сандомирский рассказал об опыте использования связей между физико-механическими свойствами сталей для их неразрушающего контроля. М.С. Аносов (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Н. Новгород) доложил об оценке структурных изменений в стали 09Г2С, полученной аддитивным электродуговым выращиванием, при малоцикловой усталости, С.А. Бехер (Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск) об исследовании литых конструкций с технологическими дефектами методами неразрушающего контроля и тензометрией, а М.Ю. Федотов (Российская инженерная академия, г. Москва) — о контроле деформации и температуры полимерных композитов с помощью волоконно-оптических датчиков. Далее сотрудник Томского государственного университета систем управления (г. Томск) В.А. Суторихин представил новый принцип определения дефектов металла с помощью ультразвука и радара Доплера. О способах повышении чувствительности метода лазерной интерферометрии рассказал представитель РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (г. Москва) А.А. Антонов. А.А. Хлыбов из Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (г. Н. Новгород) представил тезисы о разработке методики неразрушающего контроля изделий из силицированного графита. Выступила В.А. Барат (НИУ «МЭИ», г. Москва) с докладом, посвященным исследованию акустической эмиссии трещин в рельсовых сталях, а также Д.С. Тихонов (ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва) с презентацией возможностей дефектоскопа ультразвукового многоканального АВГУР-АРТ и его применении в различных отраслях промышленности. Представители г. Ижевск А.В. Платунов (ИжГТУ имени М.Т.Калашникова) и С.Э. Бабкин (Физико-технический институт УрО РАН) сообщили об исследовании акустического тракта при контроле поверхности катания колеса рэлеевскими волнами, а также контроле наводороживания ферромагнитной стенки. Представитель Белорусско-Российского университета (г. Могилев, Республика Беларусь) А.В. Шилов сообщил о текущем состоянии и перспективах применения пленки, визуализирующей магнитные поля. Завершили первый день конференции доклады специалистов Омского государственного университета путей сообщения (г. Омск) Р.А. Ахмеджанова и РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (г. Москва) В.А. Захарова. Они рассказали о совершенствовании технологии магнитопорошкового контроля бандажа колес локомотива, а таже о применении вихретокового контроля для анализа технологических и эксплуатационных свойств оборудования из криогенных сталей.

Во второй день конференции 20 апреля прошла молодежная секция, которая началась с двух приглашенных докладов:

Владимир Александрович Сясько (профессор, д.т.н, президент РОНКТД, г. Санкт-Петербург), «Миссия и направления деятельности Российского общества по неразрушающему контрою и технической диагностике» (запись доклада доступна по ссылке: https://youtu.be/woh6KZz0 70?t=390);

Денис Йгоревич Галкин (к.т.н., директор ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр», г. Москва), «О подходе к оценке информативности радиографического контроля» (видео доклада доступно по ссылке: https://youtu.be/woh6KZz0 70?t=2020).

Далее были заслушаны 18 устных докладов аспирантов, молодых специалистов и ученых. Первыми выступили представители Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН Е.А. Щапова и Уральского федерального университета К.В. Наумов (г. Екатеринбург). В их докладах поднимались вопросы характеризации напряженно-деформированного состояния эвтектоидной стали с различной морфологией перлита с помощью неразрушающих методов, а также исследовались поля пластических деформаций на стадии зарождения усталостной трещины. Доклады представителей Национального исследовательского Томского политехнического института (г. Томск) В.Ю. Шпильного и Д.А. Дерусовой были посвящены дефектометрии и синтезу данных лазерной виброметрии и теплового контроля, а также исследованию особенностей неразрушающего контроля полимерных композитов при лазерной виброметрии и акустической стимуляции с использованием газоразрядного излучателя. Следом выступила большая группа исследователей из Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург). А.А. Тарасова рассказала о неразрушающем контроле механических свойств материалов полиэтиленовых трубопроводов методом динамического инструментального индентирования, З.А. Велеулов представил способы обеспечения достоверности измерения остаточной толщины обшивки борта судна под защитными покрытиями вне дока, Д.С. Громыка описал методику оценки остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов, М.С. Степанова в своем докладе подняла вопрос о достоверности электроискрового допускового контроля толщины диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях, К.И. Доронин осветил тему контроля физико-механических характеристик изделий аддитивного производства с использованием метода инструментального индентирования, С.Р. Насырова представила исследования влияния параметров оптической системы фотометрического блескомера на результат измерения, Г.А. Иванов представил данные новых исследований по обнаружению дефектов в подошве рельсов магнитным (MFL) методом. Далее представители Университета ИТМО (г. Санкт-Петербург) В.В. Малый и Е. Алтай поделись опытом разработки технологии неразрушающего контроля качества паяных соединений теплообменных аппаратов, а также методом помехоустойчивой обработки для повышения точности измерения сигналов акустической эмиссии. Специалисты ООО «Константа» А.Ю. Васильев и ВНИИМ им. Д.И. Менделеева А.С. Мусихин рассказали об особенности проектирования магнитно-индукционного преобразователя толщиномера, предназначенного для использования без внешнего позиционирующего корпуса, и о комплексном контроле сплошности и толщины диэлектрических покрытий электроискровым методом. В завершении второго дня конференции выступили представители ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» (г. Ижевск) Н.В. Ушков, Е.А. Гуляев и П.А. Никитина. Их доклады были посвящены оценке коэффициента прохождения и основной частоты спектра акустической волны сквозь заготовку из терморасширенного графита, а также зеркально-теневому контролю осей колесных пар с циллиндрической поверхности ЭМА-методом.

На протяжении двух дней работы конференции, одновременно с устными докладами, проходила стендовая сессия. Стендовые доклады были представлены в виде видеопрезентаций (предварительно записанных докладов), размещенных на сайте журнала «Дефектоскопия». Общее количество представленных стендовых докладов составило 26. Участники конференции имели возможность задать докладчикам вопросы и получить на них ответы в письменной форме. В докладах прозвучали результаты исследований по акустическому, магнитному и электрическому видам неразрушающего контроля.

Наряду с ведущими специалистами в области неразрушающего контроля в конференции принимали участие аспиранты российских ВУЗов и молодые специалисты из академических институтов. Слушателями конференции были также и представители машиностроительных заводов России.

На заключительном заседании участники конференции и члены оргкомитета отметили, что все представленные доклады были посвящены проблемам и вызовам сегодняшнего дня в области неразрушающего контроля и технической диагностики. Докладчики и слушатели, в свою очередь, подчеркнули высокий уровень организации и проведения конференции.

Ознакомиться подробнее с научной программой, тезисами и докладами XXXIII Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» можно на сайте журнала «Дефектоскопия»:

http://defectoskopiya.ru/pages/view/XXXIIIUralConf-abstracts