

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
 Основан в феврале 1965 года
 Екатеринбург

№ 8
2022

СОДЕРЖАНИЕ**Акустические методы**

Н.П. Алешин, Л.Ю. Могильнер, Н.В. Крысько, О.А. Придеин, М.Т. Идрисов, А.Г. Кусый. Возможности контроля сварных соединений стенки стальных резервуаров с применением ультразвукового и вихретокового методов 3

Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова, О.А. Ермоленко. Моделирование работы бесконтактного ультразвукового преобразователя в системах активного волнового мониторинга тонкостенных конструкций 12

Г.Я. Дымкин, А.В. Кириков, К.А. Бондарчук. Иммерсионный контроль объектов криволинейного профиля поверхностными ультразвуковыми волнами 25

О.В. Муравьева, А.Ф. Брестер, В.В. Муравьев. Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневоего метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката 36

Электромагнитные методы

Р.А. Саврай, Л.Х. Коган. Влияние упрочняющей фрикционной обработки на особенности вихретокового контроля усталостной деградации метастабильной аустенитной стали при гигацикловом контактно-усталостном нагружении 52

Механические методы контроля

М.М. Матлин, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин. Контроль состава цементно-песчаной смеси путем индентирования 62

Радиационные методы

А.И. Сюрдо, А.М. Волошин, Р.М. Абашев, В.С. Красноперов, И.И. Мильман, Е.В. Моисейкин. Разработка люминесцентных кожных дозиметров для автоматической системы индивидуального дозиметрического контроля 70

Информация 78

ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТЕНКИ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО И ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДОВ

© 2022 г. Н.П. Алешин^{1,2}, Л.Ю. Могильнер^{3,*}, Н.В. Крысько^{1,2,**}, О.А. Придвин³,
М.Т. Идрисов³, А.Г. Кусый^{1,2}

¹Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль»
при МГТУ им. Н. Э. Баумана» (ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана»),
Россия 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет)»,
Россия 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

³ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта»
(ООО«НИИ Транснефть»), Россия 117186 Москва, Севастопольский пр-т, 47а
E-mail: *mogilnerLY@niitnn.transneft.ru; **kryskonv@gmail.com

Поступила в редакцию 23.05.2022; после доработки 10.06.2022
Принята к публикации 01.07.2022

На примере контроля качества стыковых сварных швов рассмотрена возможность повышения выявляемости дефектов в сварных соединениях малых (для ультразвукового контроля) толщин, дополняя ультразвуковую дефектоскопию использованием вихретокового контроля. Показана возможность сочетания методов для выявления внутренних и поверхностных дефектов при периодическом диагностировании стенки стальных резервуаров (РВС). Исследования проведены на вертикальных и горизонтальных стыковых сварных швах, выполненных ручной дуговой и полуавтоматической сваркой под флюсом, в том числе на наиболее ответственных участках перекрестий этих швов. Приведены примеры выявления трещин эксплуатационного происхождения. Выполнено сравнение с результатами радиографического и магнитопорошкового контроля. Показано, что при ультразвуковом контроле сварных стыковых швов и их перекрестий на стенке РВС эксплуатационные трещины в сечении швов достаточно уверенно выявляются эхометодом по совмещенной схеме, в том числе с применением фазированных решеток. На линейных участках сварных швов без пересечений также можно применять дифракционно-временной метод. Отмечено, что выявляемость поверхностных и подповерхностных дефектов этими методами значительно ниже, и для выявления таких дефектов предложено использовать оперативный вихретоковый контроль. Показано, что при этом, несмотря на помехи, создаваемые валиками усиления швов, трещины, выходящие на поверхность валиков, могут быть выявлены.

Ключевые слова: резервуары вертикальные стальные, сварной шов, валик усиления шва, трещина, ультразвуковой контроль, вихретоковый контроль.

DOI: 10.31857/S0130308222080012, EDN: BPWDAM

ВВЕДЕНИЕ

Некоторые вопросы, отражающие специфику применения ультразвукового контроля на объектах трубопроводной отрасли, описаны, например, в работах [1—3]. Отмечено, что при диагностировании вертикальных стальных резервуаров (РВС) и других металлоконструкций на объектах магистральных нефтепроводов объем применения ультразвукового контроля (УЗК) в сочетании с ультразвуковой толщинометрией составляет до 80 % от общего объема применения физических методов контроля (без учета ВИК — визуального и измерительного контроля). При этом фиксируется изображение различных сечений изделия и имеется возможность измерять (условные) размеры дефектов. В определенных случаях контроль можно проводить без удаления антикоррозионного лакокрасочного покрытия.

Как известно, достоинством ультразвукового контроля сварных швов является возможность выявлять внутренние и поверхностные несплошности при одностороннем доступе к основному металлу и сварным швам [4]. Также известно, что при расположении трещин вблизи поверхностей сварных швов сигналы от валиков усиления экранируют сигналы от дефектов, и при УЗК может возникать недобраковка опасных дефектов эксплуатационного происхождения — выходящих на поверхность и приповерхностных трещин в сварных швах [1, 5]. Поэтому актуальным является повышение выявляемости таких трещин при диагностировании резервуаров.

Поверхностные трещины могут уверенно выявляться вихретоковым контролем (ВК) [6—8], и крайне важно было бы объединить достоинства ультразвукового и вихретокового контроля. Однако

считается, что этому препятствует шероховатость поверхностей стального проката и чешуйчатость валиков усиления, которые создают при ВК слишком большие помехи.

В настоящей статье на примере контроля сварных стыковых швов стенки РВС приведены некоторые сравнительные результаты, полученные при исследовании выявляемости трещин в сварных швах с применением УЗК и ВК. Ниже будет показано, что эти методы могут эффективно дополнять друг друга в условиях диагностирования действующих объектов.

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ОБЪЕМЕ СВАРНЫХ ШВОВ

На объектах трубопроводного транспорта чаще всего встречаются сварные соединения толщиной от 3—4 мм до 20—25 мм. В классификации для ультразвукового контроля их часто относят к соединениям малых толщин [4, 5]. Возможности ультразвукового контроля таких сварных швов достаточно хорошо изучены. Однако для полноты рассмотрения вопроса о комплексном применении УЗК и ВК остановимся на некоторых важных особенностях выявления внутренних дефектов в объеме стыковых сварных швов при диагностировании РВС.

Рентгенограмма участка такого шва толщиной 9 мм с трещиной протяженностью около 50 мм приведена на рис. 1а. Данная трещина расположена в одном из наиболее ответственных узлов — перекрестье вертикального и горизонтального швов стенки РВС. Она возникла, по всей вероятности, в период эксплуатации объекта из небольшого непровара в центральной части (корне) сварного шва и была обнаружена при очередном техническом диагностировании. Поскольку эта трещина не выходит на поверхность металла, то она не выявляется при визуальном и измерительном (ВИК) и магнитопорошковом (МПД) контроле.

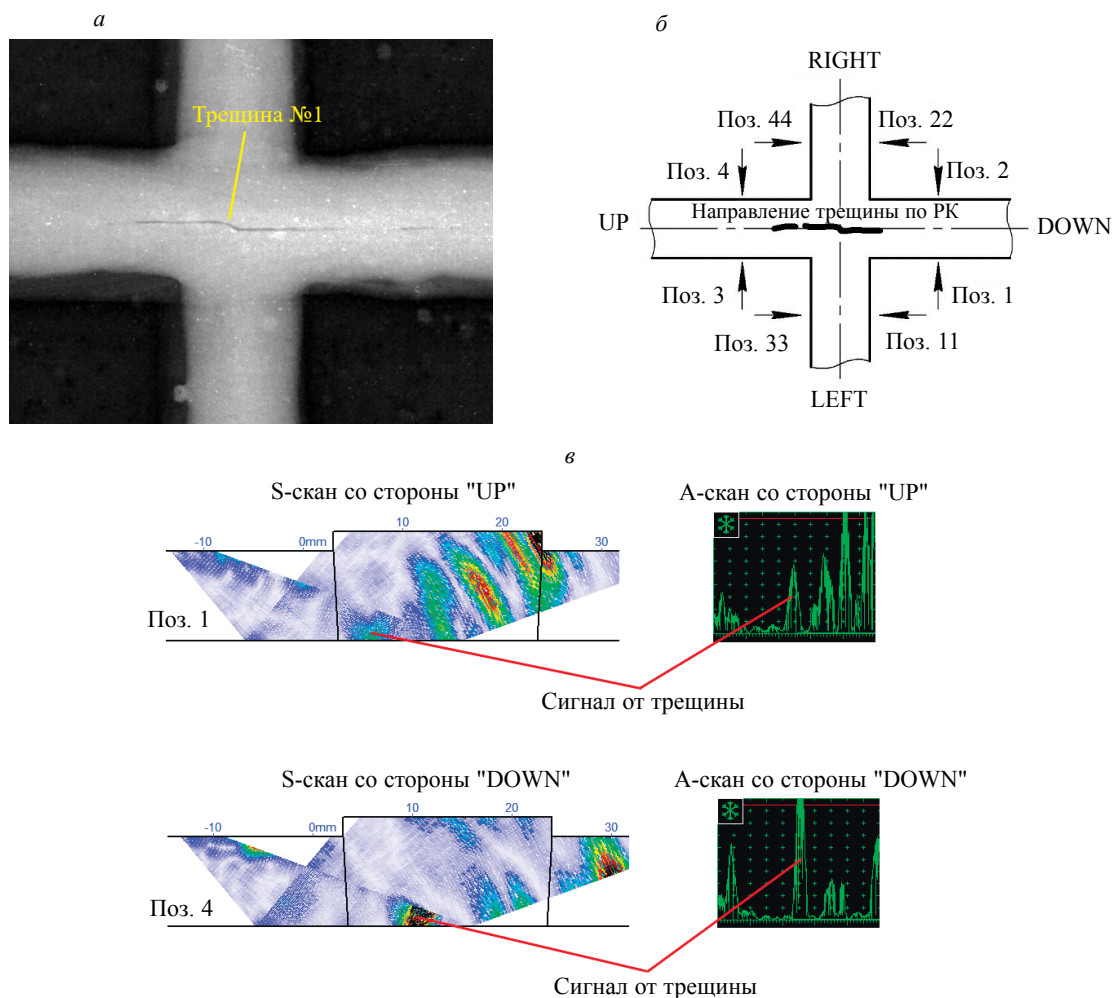


Рис. 1. Выявление трещины № 1 в перекрестье сварных швов: рентгенограмма (а); схема сварного шва (б); выявление трещины наклонным ПЭП (в).

Данная трещина № 1 максимально удалена от поверхностей металла, и, следовательно, для ее выявления можно рассмотреть использование как минимум двух методов УЗК: эхометода и дифракционно-временного (TOFD) [4, 9 — 11].

Ориентация трещины № 1 и возможные направления прозвучивания схематично показаны на рис. 1б. Очевидно, что при контроле вводить ультразвук необходимо в направлениях 1-2 и 3-4, а также выполнять сканирование с вращением пьезопреобразователя (ПЭП) между этими сечениями.

Ширина валиков на этом перекрестье составляла примерно 14—15 мм. Поэтому очевидно, что зона перемещения ПЭП при контроле перекрестья ограничена. Однако трещина уверенно выявлена эхометодом наклонным совмещенным ПЭП с фазированной решеткой. На рис. 1в приведены примеры S-сканов при прозвучивании прямым лучом в нескольких направлениях. Использовалась 16-элементная фазированная решетка, частота 4 МГц, шаг 0,5 мм. Секторное сканирование выполнено в диапазоне углов ввода 40—70° с шагом 0,5°. Браковочная чувствительность установлена по зарубке 4×2,5 мм на угле ввода 60°.

Трещина выявлялась практически из всех направлений, указанных на рис. 1б, а также при вращении ПЭП между этими направлениями. Амплитуда отраженного сигнала изменялась от уровня -3 дБ до +9 дБ (поз. 1 и поз. 4 на рис. 1в) от уровня, по которому выполнена настройка чувствительности. Таким образом, несмотря на относительно малую толщину металла и наличие валиков усиления, трещина № 1 уверенно выявляется эхометодом. Для этого необходимо озвучивать перекрестье со всех возможных направлений, в том числе ориентировать ПЭП в направлении вертикальной оси перекрестья, вращая ПЭП настолько, насколько это возможно с учетом габаритов шва.

Использовать можно и TOFD. Однако в этом случае валики сварных швов существенно сокращают возможности метода. Если учесть габаритные размеры ПЭП и оснастки для TOFD, а также невозможность плотного прижатия датчиков к искривленной поверхности металла, то очевидно, что этим методом на перекрестье можно выявить лишь ограниченные участки трещины с двух сторон от краев валиков. Пример соответствующей дефектограммы для сканирования в направлении UP—DOWN приведен на рис. 2. Использовались ПЭП для TOFD с параметрами: частота 10 МГц,

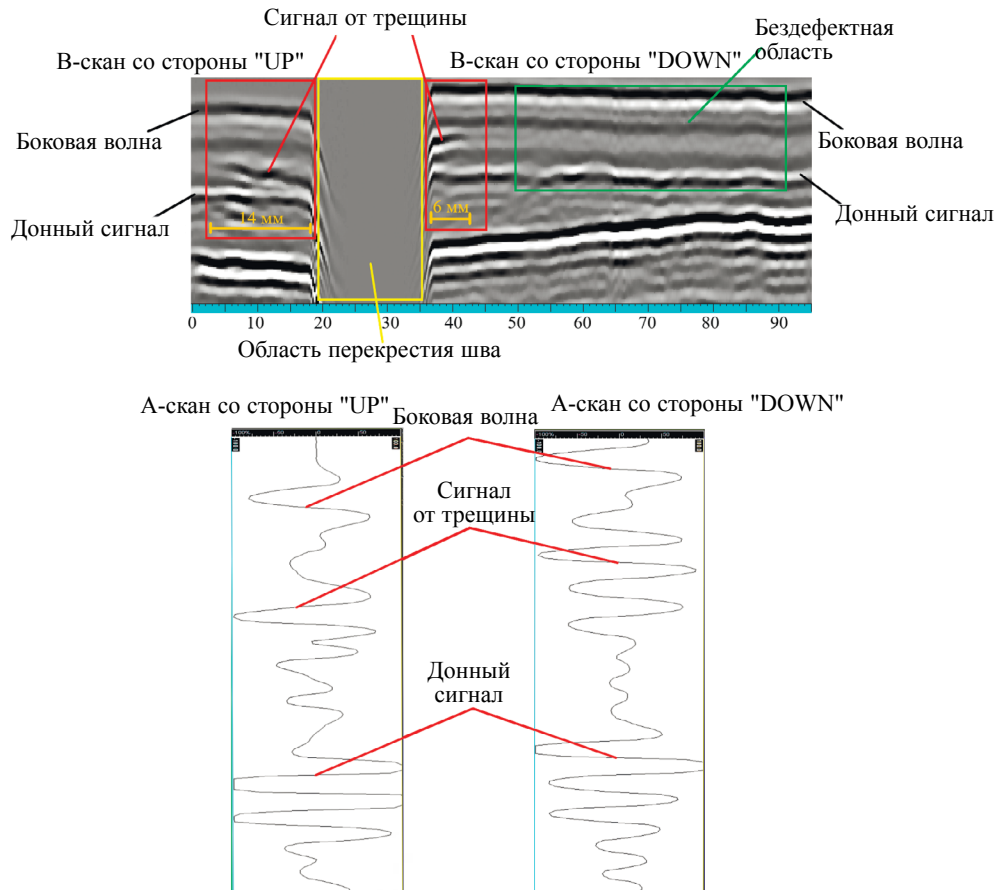


Рис. 2. Выявление трещины № 1 в перекрестье сварных швов методом TOFD.

диаметр пьезопластины 3 мм, расстояние между точками выхода лучей 41 мм, угол ввода продольной волны в сталь 70° . В данном случае сигналы от трещины можно идентифицировать только за пределами пересечения швов на участках протяженностью около 10 мм.

Примечание: здесь и ниже масштаб изображений одного и того же дефекта, полученных разными методами, может не совпадать.

Если пересечения сварных швов не препятствуют проведению контроля, то, как показывает опыт, метод TOFD на стенке РВС также может применяться достаточно эффективно. Для иллюстрации этого на рис. 3 показан пример выявления внутренних дефектов в шве толщиной 13 мм:

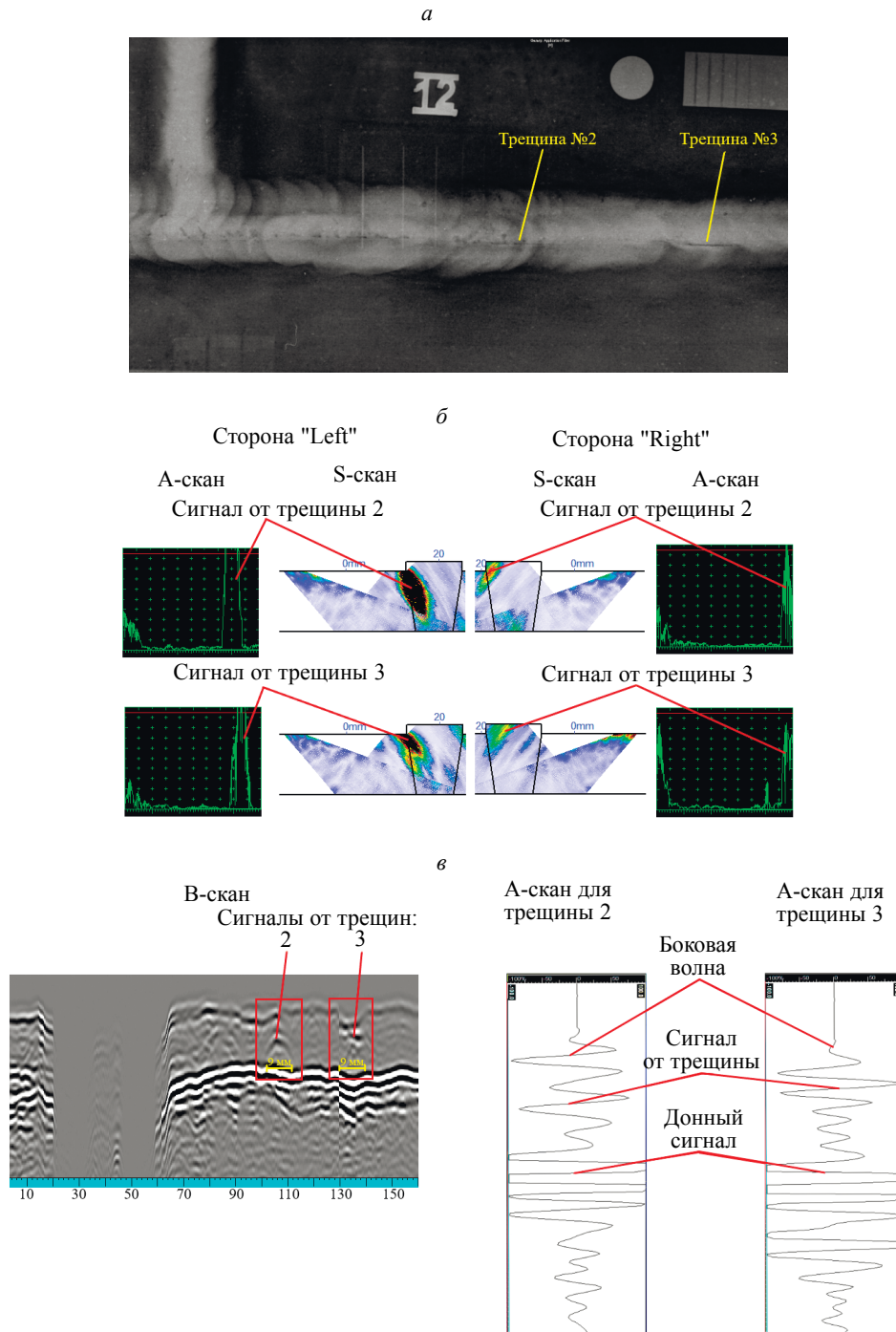


Рис. 3. Выявление дефектов № 2 и № 3 в объеме сварного шва при радиографии (а), эхометодом с фазированной решеткой (б) и методом TOFD (в).

цепочки шлаковых включений, переходящих в непровар и трещину (дефект № 2), и несплавления, переходящего в трещину (дефект № 3). По данным радиографии (РК) протяженность этих дефектов составляла 12 и 8 мм соответственно. По результатам ВИК и МПД данные дефекты не выявлены, т.е. они находятся в объеме металла и не выходят на его поверхность.

Оба дефекта № 2 и № 3 выявлены как эхометодом на прямом и отраженном лучах, так и методом TOFD. При эхометодом дефекты выявлялись с обеих сторон шва (рис. 3б). Амплитуда сигналов от обоих дефектов № 2 и № 3 на отраженном луче превысила установленный браковочный уровень (рис. 2в, слева), измеренная глубина залегания дефекта № 2 составила 5 мм, условная протяженность — 17 мм. Аналогично для дефекта № 3: глубина залегания 2 мм, условная протяженность 7 мм.

При TOFD (рис. 3в) выполнялось сканирование вдоль оси шва с симметричным расположением ПЭП, частота 10 МГц, диаметр пьезопластин 3 мм, расстояние между точками ввода 47 мм, угол ввода продольной волны в сталь 70°. Измеренная глубина залегания дефекта № 2 составила 7 мм, дефекта № 3 — 6 мм.

Расхождение в измеренной глубине залегания дефекта № 2 для эхометода и TOFD составляет 2 мм и находится в пределах погрешности, а некоторое расхождение этой величины для дефекта № 3 в данном случае можно считать несущественным, т.к. сварные швы с таким дефектом забракованы обоими ультразвуковыми методами.

ПРИМЕРЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ КОМПЛЕКСОМ УЗК И ВК

Известен опыт сравнения результатов и комплексного применения ультразвукового и вихревого контроля различных изделий, например, [7, 12]. Рассмотрим здесь несколько примеров, иллюстрирующих принципиальную возможность выявления поверхностных дефектов в сварных швах при сочетании ультразвукового и вихревого контроля, и остановимся на выявлении поперечных трещин, которые наиболее сложно обнаруживать при ультразвуковом контроле.

Отметим, что при полном техническом диагностировании РВС в системе магистральных нефтепроводов принято выполнять РК перекрестий вертикальных и горизонтальных сварных швов стенки, как минимум — ее нижних поясов. При таком контроле в одном из швов номинальной толщиной 10 мм обнаружена стянутая трещина № 4 протяженностью около 3,5 мм (рис. 4а). Магнитопорошковый контроль (МК) подтвердил, что эта трещина — поверхностная или подповерхностная (рис. 4б). Однако при ВИК она не выявлена, возможно потому, что ее устье было «затерто» продуктами коррозии (рис. 4в).

Очевидно, что дефект № 4 возник в междиагностический период, и по существующим требованиям продолжение эксплуатации РВС с такой трещиной недопустимо. Однако при частичном диагностировании к сварному шву есть только односторонний доступ с внешней стороны

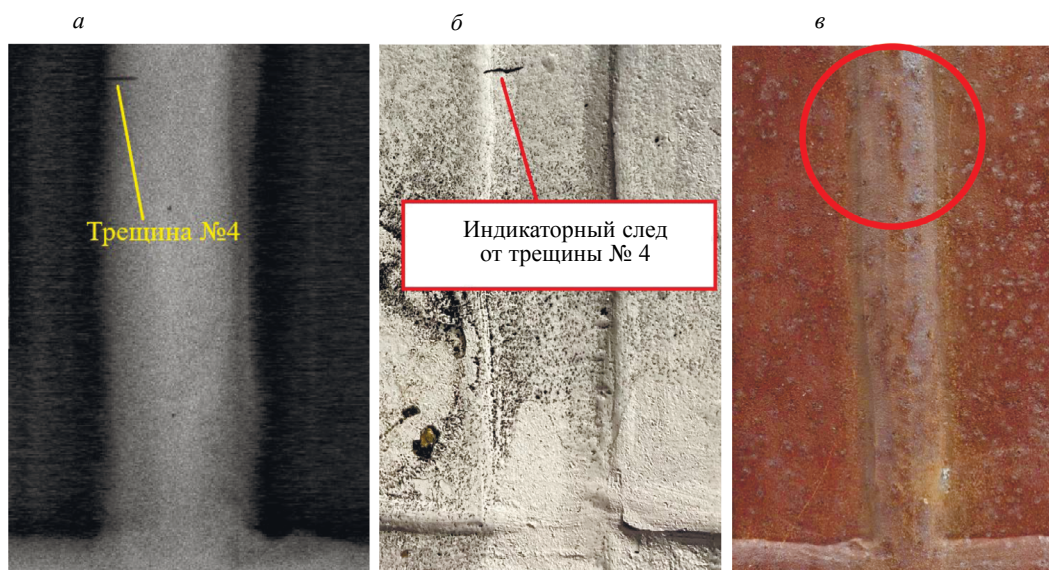


Рис. 4. Трещина № 4 в вертикальном сварном шве стенки РВС: радиографический снимок (а); результат магнитопорошкового контроля (б); внешний вид сварного шва (в).

резервуара, и РК использовать невозможно. Возможности УЗК в данном случае ограничены. Для TOFD небольшая поперечная трещина № 4 находится в мертвой зоне. При УЗК эхометодом эта трещина выявлялась на прямом луче при прозвучивании шва под углом к его оси как компактный дефект с глубиной залегания 9,6 мм. Однако амплитуда эхосигнала составила –4 дБ от браковочного уровня, т.е. при диагностировании такая трещина была бы зафиксирована как допустимый дефект. Контроль проводился поперечной волной с применением фазированной решетки с параметрами, указанными при описании трещины № 1, настройка браковочной чувствительности — по зарубке $4 \times 2,5$ мм на угле ввода 60° .

Рассмотрим теперь результаты выявления этого дефекта с использованием вихретокового контроля одноэлементным накладным преобразователем марки WLD-5-63-TF на частоте 300 кГц в соответствии с требованиями к оборудованию согласно [13]. Предварительно отметим, что при ВК помимо амплитуды важнейшей характеристикой сигнала является его фаза (см., например, [8, 14]). В нашем случае настройка ВК проводилась по пазам глубиной 0,5 и 1 мм в настроечном образце таким образом, чтобы сигналы от пазов были ориентированы в первом квадранте комплексной плоскости, и уровень сигнала от паза 1 мм составлял 80 % от высоты экрана, согласно стандарту [14]. Фазовый угол между сигналом от паза и помехой при отрыве датчика от металла (кривой отрыва) составлял, ориентировочно, 90° . Рамка (строб), в которой следует ожидать появления сигналов от трещины, показанная на рис. 5, установлена в соответствии с требованиями к оборудованию [13]. Параметры индикации пазов приведены в табл. 1.

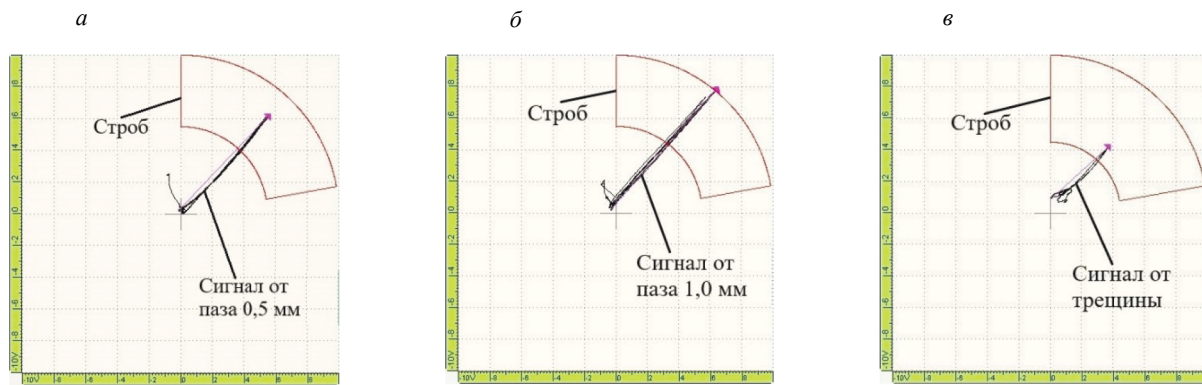


Рис. 5. К настройке вихретокового контроля по пазам: сигналы от пазов глубиной 0,5 (а) и 1,0 мм (б); сигнал от трещины № 4 (в).

Таблица 1

Параметры сигналов от пазов и трещин при ВК одноэлементным датчиком

№	Паз/дефект	Амплитуда, В	Фаза, град
1	1,0 мм	10,4	41
2	0,5 мм	8,4	44
3	Трещина № 4	5,8	48
4	Трещина № 5	4,9	48
5	Трещина № 6	12,2	39
6	Трещина № 7	7,3	47
	Минимальное значение	4,9	39
	Максимальное значение	12,2	48
	Среднее арифметическое	8,2	44,5

На рис. 5в показан сигнал от трещины № 4. Параметры этой индикации также приведены в табл. 1. Видно, что, несмотря на наличие валика усиления, при вихретоковом контроле сварного

шва на стенке РВС достаточно уверенно выявилась поверхностная трещина, не обнаруженная при ВИК и обнаруженная при УЗК эхометодом лишь на пределе чувствительности. Отметим, что на рис. 5 присутствуют также небольшие всплески в районе начала отсчета в комплексной плоскости. Они требуют тщательного изучения и будут рассмотрены в дальнейшем. Здесь лишь отметим, что в данном случае амплитуда этих шумов меньше амплитуды сигналов от пазов и трещины № 4. Но, что более важно, всплески от шумов направлены во второй, а иногда — в третий и четвертый квадранты комплексной плоскости, в отличие от сигнала от трещины, который при выбранной настройке всегда ориентирован в первый квадрант.

Примечание: на рис. 5в при выявлении трещины центральная точка комплексной плоскости на дисплее дефектоскопа несколько смещена вправо и вверх по сравнению с аналогичным центром для настроечного образца. Это связано с различием локальных электромагнитных характеристик реального сварного шва и металла образца. Поскольку при автоматизированном или механизированном сканировании проводить корректировку настройки центра комплексной плоскости для каждой точки сварного шва не представляется возможным, то анализ результатов контроля следует проводить с учетом возможно смещения центральной точки.

На рис. 6 показаны полученные при МПД изображения еще трех поперечных поверхностных трещин в сварных швах. По результатам РК протяженность этих трещин определена как 2,5 мм (трещина № 5), 12 мм (трещина № 6) и 16 мм (трещина № 7). Все эти трещины также выявлены ВК на фоне валиков усиления сварного шва. Изображения сигналов от них на комплексной плоскости, полученные ранее указанным одноэлементным датчиком, приведены на рис. 7. При этом настройка датчика оставалась как при выявлении трещины № 4. Важно отметить, что эксплуатационные трещины № 5 и № 6 возникли в полуавтоматических сварных швах со сравнительно гладкими валиками усиления, а трещина № 7 — в ручном дуговом шве с явно выраженными наплывами и чешуйчатостью. Также отметим, что эти трещины, как и трещина № 4, могут быть не обнаружены при внешнем осмотре сварных швов при больших объемах поточного диагностирования РВС. Это возможно, например, если поверхности недостаточно тщательно подготовлены к контролю, когда протяженность контролируемых сварных швов может составлять более 1,5 км на одном РВС, или если при диагностировании не удаляются антикоррозионные лакокрасочные покрытия [3].

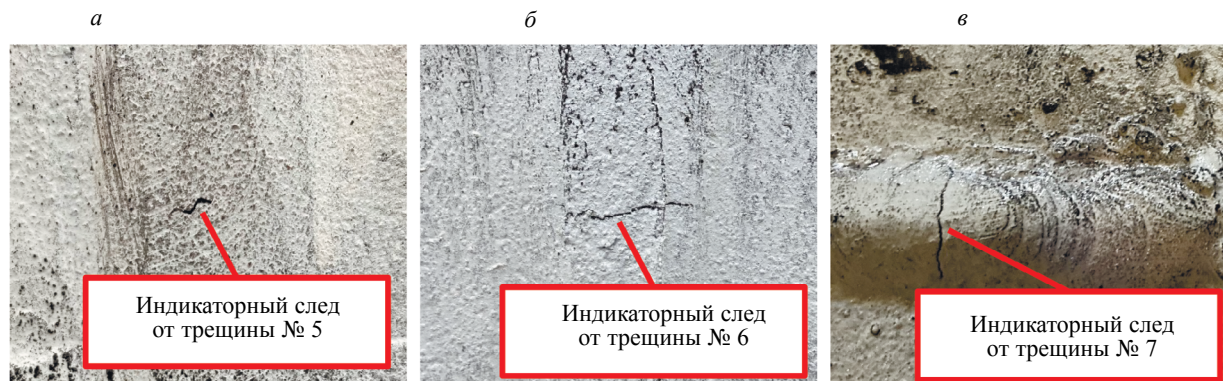


Рис. 6. Примеры МПД-изображений поперечных эксплуатационных поверхностных трещин: № 5 (а); № 6 (б); № 7 (в).

Амплитуда сигнала от трещины № 5 меньше, чем от трещины № 4, что ожидаемо, т.к. трещина № 5 короче трещины № 4. Но более интересно следующее. Поперечные трещины № 6 и № 7 на радиографических снимках и на МПД-изображениях (см. рис. 6б и 6в) имеют примерно одинаковую протяженность и раскрытие. При ультразвуковом контроле они обе также выявлены достаточно уверенно с амплитудой, выше уровня настройки по зарубке, указанной для трещины № 1. При этом ультразвуковой контроль проводился под большим углом к оси шва. А вот при ВК параметры сигналов от трещин № 6 и № 7 существенно отличаются друг от друга.

Более того, из рис. 7 видно, что амплитуда ВК-сигнала от трещины № 7 оказалась ниже уровня, установленного при настройке строга, и даже ниже, чем амплитуда сигнала от трещин № 4 и № 5, имеющих значительно меньшую протяженность. Одной из возможных причин этого может быть

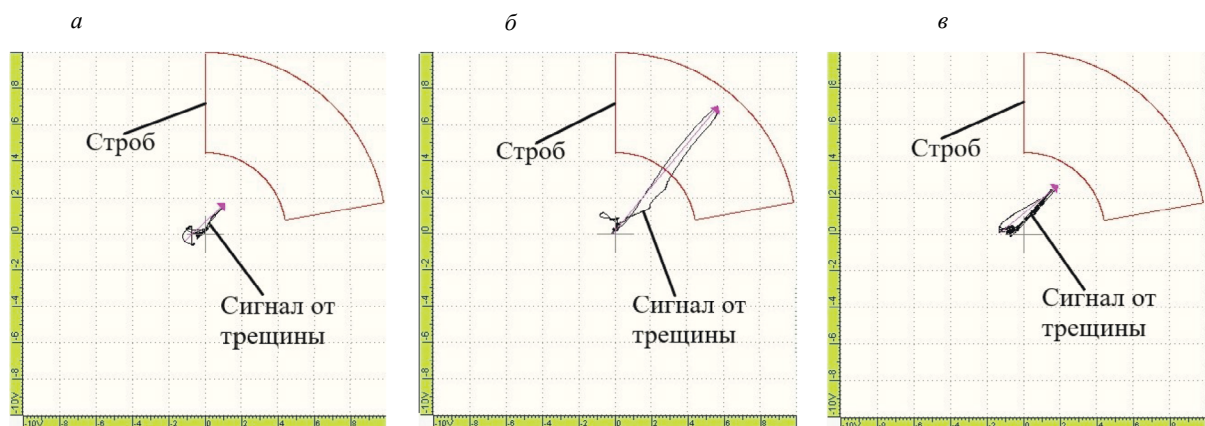


Рис. 7. ВК-сигналы от поверхностных трещин:
№ 5 (а); № 6 (б); № 7 (в).

то, что трещина № 7 расположена в сварном шве, выполненном ручной дуговой сваркой. Она может экранироваться шумами, создаваемыми чешуйчатостью валика усиления.

Для построения изображения дефектов в плане повышения производительности вихретокового контроля и, потенциально, контроля комплексом УЗК+ВК можно вместо одноэлементных использовать матричные вихретоковые датчики [15]. Предварительный анализ показал, что и в этом случае сигналы от трещин также могут селективироваться от шумов по ориентации в комплексной плоскости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При диагностировании резервуаров вертикальных стальных (РВС) в период их эксплуатации для повышения производительности контроля сварных швов стенки целесообразно найти альтернативу радиографическому и магнитопорошковому контролю, применяемым в настоящее время. В качестве такой альтернативы в настоящее время используется ультразвуковой контроль, который позволяет выявлять дефекты металла и сварных швов, в том числе при одностороннем доступе к стенке РВС и без удаления антикоррозионного покрытия (в определенных случаях).

2. Ультразвуковой контроль сварных швов малых толщин на стенке РВС имеет ряд особенностей. В статье на примере выявления продольных и поперечных трещин эксплуатационного происхождения проиллюстрировано, что дефекты в таких швах выявляются эхометодом с фазированными решетками и/или методом TOFD, однако при этом чувствительность может оказаться недостаточной для разбраковки трещин, расположенных вблизи поверхности валиков сварных швов.

3. Для повышения выявляемости эксплуатационных трещин в сварных швах при диагностировании РВС предложено рассмотреть возможность комплексного применения ультразвукового и вихретокового контроля. Показано, что вихретоковый контроль позволяет выявлять стянутые поверхностные трещины в сварных швах при наличии валиков усиления. Селектировать сигналы от трещин от шумов можно по амплитудному признаку, а также по фазе сигналов на комплексной плоскости.

4. Основным мешающим фактором, снижающим выявляемость трещин при вихретоковом контроле, являются шумы, создаваемые валиками сварных швов, которые на РВС не удаляются. Для принятия обоснованного решения о возможности использования комплекса в составе ультразвукового и вихретокового контроля для выявления трещин необходимо выполнить статистический анализ параметров шумов, создаваемых валиками усиления сварных швов.

Авторы благодарят фирмы «Олимпас-Москва» и ООО «Инженерные технические системы» за предоставленное оборудование и помощь в выполнении экспериментов, оказанную при подготовке настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю., Крысько Н.В., Придеин О.А., Идрисов М.Т.* Особенности обнаружения трещин при ультразвуковом контроле сварных соединений стенки РВС // Нефтяное хозяйство. 2022. № 1. С. 86—91.
2. *Алешин Н.П., Крысько Н.В., Щипаков Н.А., Могильнер Л.Ю.* Оптимизация параметров механизированного ультразвукового контроля протяженных сварных швов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 6. С. 352—363.
3. *Могильнер Л.Ю., Литвинов И.П., Окунев Д.В.* Технология ультразвукового контроля стальных вертикальных резервуаров без удаления защитного лакокрасочного покрытия // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2008. № 1 (11). С. 98—99.
4. *Алешин Н.П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. М.: Машиностроение, 2013. 574 с.
5. *Кретов Е.Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. Санкт-Петербург: Издательство Свен, 2007. 296 с.
6. *Дымкин Г.Я., Курков А.В., Смородинский Я.Г., Шевелев А.В.* О чувствительности вихретокового контроля деталей железнодорожного транспорта // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 47—53.
7. *Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V., Anosov M.S.* Ultrasonic and Eddy-Current Fatigue Monitoring of Austenitic Steel Welded Joints // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 7. P. 570—578. [*Гончар А.В., Ключников В.А., Мишакин В.В., Аносов М.С.* Ультразвуковой и вихретоковый контроль процесса усталостного разрушения сварных соединений из аустенитной стали // Дефектоскопия. 2021. № 7. С. 28—36.]
8. *Wright Michael.* Eddy Current Testing Technology. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2015. 413 p.
9. *Гурвич А.К., Ермолов И.Н.* Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев: Техника, 1972. 460 с.
10. *Ginzel Ed.* Phased Array Ultrasonic Technology. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2013. 260 p.
11. *Гинзел Э.* TOFD. Дифракционно-временной метод ультразвуковой дефектоскопии. М.: ДПК Пресс, 2021. 312 с.
12. *Муравьева О.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Волкова Л.В.* Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб магнитным, вихретоковым и ультразвуковым многократно-теневым методами контроля // Дефектоскопия. 2022. № 4. С. 14 — 25.
13. Сайт компании OLIMPUS. Режим доступа <http://www/olimpus-ims.com/ru>. Дата обращения 30.01.2022.
14. *Сясько В.А., Чертов Д.Н., Ивкин А.Е.* Измерение толщины стенок изделий из углеродистых композиционных материалов с использованием вихретокового фазового метода // Дефектоскопия. 2011. № 8. С. 76—84.
15. ISO 17643. Non-destructive testing of welds — Eddy current examination of welds by complex plane analysis.
16. *Крюков А.С., Чегодаев В.В., Жданов А.Г., Лунин В.П.* Метод определения объема произвольно расположенных локальных дефектов при вихретоковом контроле цилиндрических изделий многоэлементными преобразователями // Дефектоскопия. 2012. № 12. С. 46—56.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БЕСКОНТАКТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ АКТИВНОГО ВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2022 г. Е.В. Глушков^{1,*}, Н.В. Глушкова^{1,**}, О.А. Ермоленко^{1,***}

¹Институт математики, механики и информатики, Кубанский государственный университет,
Россия 350040 Краснодар, ул. Ставропольская, 149
E-mail: *evg@math.kubsu.ru; **nvg@math.kubsu.ru; ***o.ermolenko.a@gmail.com

Поступила в редакцию 14.05.2022; после доработки 24.06.2022
Принята к публикации 01.07.2022

При контроле состояния тонкостенных конструкций ультразвуковыми бегущими волнами наряду с традиционным способом их возбуждения и регистрации сетью пленочных пьезоэлементов все более активно используются бесконтактные (воздушно-связные) преобразователи. Разработка и успешное применение таких диагностических систем базируется на математическом и компьютерном моделировании протекающих здесь волновых процессов. В настоящей работе приводится описание моделей, созданных на основе использования интегральных и асимптотических представлений возбуждаемых волн через фурье-символы матрицы Грина рассматриваемой связанной системы источник — акустическая среда — упругий волновод. По сравнению с традиционным конечно-элементным моделированием они обладают такими преимуществами как малозатратность параметрического анализа, наглядность волновой структуры решения и возможность решения задач селективного возбуждения и максимизации амплитуды требуемых мод выбором оптимального наклона источника и центральной частоты. Приводятся численные примеры верификации разработанных моделей и определения оптимальных параметров работы источника.

Ключевые слова: бесконтактный ультразвуковой преобразователь, упругий волновод, интегральные и асимптотические представления, бегущие волны, оптимальный угол наклона.

DOI: 10.31857/S0130308222080024, EDN: BQBCUZ

ВВЕДЕНИЕ

Примеры использования бесконтактных ультразвуковых (УЗ) преобразователей для возбуждения и приема бегущих волн Рэлея и Лэмба известны с 1950-х годов. Так, например, в классической монографии И.А. Викторова [1] дается описание способа возбуждения бегущих волн через слой жидкости, который назван иммерсионным методом клина, и приводятся примеры его практической реализации для обнаружения зон отслоения в топливных элементах атомных реакторов [2] и для неразрушающего контроля листов металла [3]. В контактном варианте пьезоэлемент, прикрепленный к верхней грани пластикового клина с определенным углом раствора θ , излучает плоскую волну, распространяющуюся с обусловленной его упругими свойствами скоростью c_0 . При выполнении условия $\sin \theta = c_0/c_n$ эта волна возбуждает в образце бегущую волну рэлеевского типа, распространяющуюся вдоль его поверхности со скоростью c_n . В бесконтактном (иммерсионном) варианте пьезоисточник помещается в слой жидкости, что дает возможность легко варьировать угол его наклона для возбуждения различных бегущих волн, а также для учета зависимости скорости c_n от частоты, обусловленной дисперсионными свойствами образца.

Однако погружение зондируемого образца в жидкую среду не всегда возможно, особенно при необходимости контроля больших площадей протяженных конструкций, а работа бесконтактного УЗ преобразователя через воздушную среду ограничивается сильным рассогласованием акустических импедансов, приводящим к почти полному отражению падающей волны от поверхности образца. Поэтому бесконтактные методы УЗ контроля не находили широкого применения до появления в 1980—90-х годах нового поколения пьезокерамических преобразователей с воздушной связью (air-coupled transducers — АСТ) [4, 5], показавших возможность возбуждения бегущих волн [6, 7]. В настоящее время наряду с пьезокерамическими АСТ, дающими узкополосный зондирующий сигнал с определенной центральной частотой, разрабатываются бесконтактные УЗ излучатели, работающие на других принципах, например, импульсные широкополосные магнитострикционные преобразователи [8], которые применяются в комплекте с лазерными виброметрами, используемыми для сканирования возбуждаемых в образце поверхностных волн [9].

Бесконтактные АСТ применяются для обнаружения скрытых дефектов [10] и контроля состояния материалов (см., например, обзоры [11, 12]), в том числе для определения эффективных

упругих модулей C_{ij} анизотропных материалов сложной структуры, таких как полимерные композиционные материалы и армированные углепластики [13], древесина [14—16], минерально-полимерная бумага [17], железобетон [18], или даже для контроля спелости авокадо [19]. Один из перспективных методов использования АСТ для получения характеристик материала основан на построении так называемых полярных скан-образов (polar scans), которые получаются при варьировании наклона источника [20, 21]. На критических углах наклона θ , когда проекция длины волны зондирующего квазигармонического сигнала совпадает с длиной возбуждаемых в образце объемных или поверхностных волн, наблюдается резонансный рост коэффициента прохождения. Для изотропных материалов он проявляется в полярных сканах в виде концентрических окружностей, а для анизотропных композитов дает более сложный рисунок. Считается, что эти узоры уникальны для каждого образца, представляя собой «акустические отпечатки пальцев механических свойств» [22].

Традиционно АСТ используются для обнаружения дефектов и повреждений в поле отраженных или прошедших акустических волн (зондирование в эхорежиме или в режиме сквозного просвечивания [23]). При этом перемещение бесконтактных источников и приемников УЗ сигналов вдоль поверхности с помощью роботов-манипуляторов позволяет автоматизировать контроль больших площадей инспектируемых изделий [24, 25]. Наряду со сканированием с помощью зондирующих объемных упругих волн для протяженных тонкостенных конструкций используются бегущие волны, которые распространяются на сравнительно большие расстояния, взаимодействуя с неоднородностями (дефектами) любой природы и выявляя их наличие возникающими при дифракции отраженными и рассеянными бегущими волнами. Волновой мониторинг с помощью бегущих волн, получивший название SHM-технологии (от Structural Health Monitoring — SHM [26, 27]), не предполагает перемещения источника вдоль поверхности. Обычно для их возбуждения и регистрации используется сравнительно редкая сеть пленочных пьезоэлементов, прикрепленных к поверхности или вмонтированных внутрь контролируемого образца. Однако для этой цели могут быть использованы и современные АСТ [28].

Для создания эффективных систем УЗ контроля и корректной интерпретации результатов измерений используются математические модели, описывающие процессы возбуждения, распространения и дифракции бегущих волн в рассматриваемой слоистой структуре. Взаимодействие акустических волн с упругими телами является классической задачей структурной акустики. Развитые здесь методы и подходы [29—31] позволяют исследовать закономерности прохождения и отражения акустических сигналов через твердую преграду и дисперсионные характеристики возбуждаемых в ней бегущих упругих волн. Для более точного количественного моделирования волновых процессов с учетом связного волнового взаимодействия пьезопреобразователей с зондируемой структурой в настоящее время, как правило, используются пакеты прикладных программ, реализующие прямые численные методы, базирующиеся на сеточной аппроксимации решения, например, метод конечных элементов (МКЭ) [32]. Однако сеточная аппроксимация волновых процессов численно затратна и без постпроцессорной обработки не дает физически наглядной картины возбуждения волн различного типа и распределения энергии источника между ними, поэтому здесь также используются полуаналитические и гибридные численно-аналитические подходы [33, 34].

В предыдущей работе [35], посвященной моделированию пленочных преобразователей как элементов SHM-систем, дается описание полуаналитических моделей, разработанных на основе использования явных интегральных и асимптотических представлений возбуждаемых волн через фурье-символы матрицы Грина рассматриваемой волноводной структуры. Настоящую работу можно рассматривать как ее продолжение и обобщение на случай бесконтактных преобразователей. Моделирование возбуждаемых объемных акустических и бегущих упругих волн здесь также базируется на построенных ранее явных представлениях функции Грина для связной системы источник — акустическая среда — упругий волновод [36, 37].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривается упругая (в общем случае многослойная анизотропная) пластина толщины H , погруженная в акустическую среду (воздух, вода). С ней взаимодействует волновое поле акустического давления p_0 , генерируемое бесконтактным УЗ преобразователем, находящимся на расстоянии d от поверхности пластины (рис. 1). В результате в пластине возбуждается поле смещений \mathbf{u} , а в верхнем и нижнем акустических полупространствах $z \geq 0$ и $z \leq -H$ — поле отраженных и прошедших волн p_{sc}^- и p_{sc}^+ . Нестационарные колебания $p(\mathbf{x}, t)$ и $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ описываются

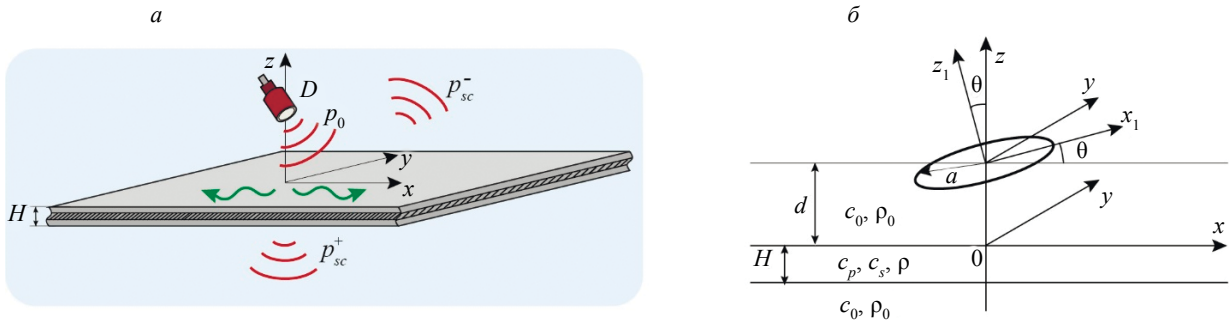


Рис. 1. Зондирование бесконтактным преобразователем (АСТ) (а); геометрия задачи (б).

их частотными спектрами, поэтому задача сводится к определению комплексных амплитуд установившихся гармонических колебаний $p(\mathbf{x}, \omega)e^{-i\omega t}$ и $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega)e^{-i\omega t}$; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, f — частота; гармонический множитель $e^{-i\omega t}$ далее опущен.

Поле источника моделируется линейной суперпозицией полей $g_0(\mathbf{x}, \xi)$, возбуждаемых точечными источниками (монополями) с центрами в точках $\xi = (\xi, \eta, \zeta)$, которые распределены по поверхности D излучающего элемента с некоторой плотностью, задаваемой функцией $q_0(\xi)$:

$$p_0(\mathbf{x}) = \iint_D g(\mathbf{x}, \xi) q_0(\xi) d\xi. \quad (1)$$

Для учета частотной характеристики источника p_0 необходимо домножить на функцию $S(\omega)$, задающую частотный спектр рассматриваемого преобразователя: $p_0 := p_0 S(\omega)$. У АСТ преобразователей излучающая пластина (область D), как правило, круговой формы. Она может располагаться как параллельно поверхности образца, так и наклонно под некоторым углом θ (рис. 1б). Отметим, что в рамках описываемой модели поверхность D может быть неплоской. Например, поле акустического микроскопа [38, 39] моделируется интегралом (1) по вогнутой поверхности излучающего элемента.

При проведении расчетов в качестве g_0 берется частное решение уравнения Гельмгольца с дельта-функцией в правой части (функция Грина для безграничной среды):

$$g_0(\mathbf{x}, \xi) = -\frac{1}{4\pi R} e^{i\kappa_0 R}, \quad R = |\mathbf{x} - \xi|, \quad (2)$$

а остальные сомножители монополя ($i\rho_0\omega V_0$ [40]) перенесены в q_0 . Здесь $\kappa_0 = \omega/c_0$ — волновое число; c_0 — скорость звука; ρ_0 — плотность акустической среды; V_0 — объемная скорость монополя. Величину q_0 можно назвать объемным напряжением, ее размерность — сила, отнесенная к объему, в н/м³; размерность g_0 — 1/м.

При наличии отражающей пластины к g_0 добавляются функции g_{sc}^\pm , описывающие поле отраженных и прошедших волн: $g = g_0 + g_{sc}^-$ при $z \geq 0$ и $g = g_{sc}^+$ при $z \leq -H$, а в самой пластине поле смещений \mathbf{u} описывается аналогично представлению (1) с помощью решения $\mathbf{g}_u(\mathbf{x}, \xi)$ связанной задачи: точечный источник — акустическая среда — упругая пластина:

$$p(\mathbf{x}) = \iint_D g(\mathbf{x}, \xi) q_0(\xi) d\xi \approx \sum_j A_j g(\mathbf{x}, \xi_j), \quad z \geq 0, \quad z \leq -H, \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \iint_D \mathbf{g}_u(\mathbf{x}, \xi) q_0(\xi) d\xi \approx \sum_j A_j \mathbf{g}_u(\mathbf{x}, \xi_j), \quad -H \leq z \leq 0. \quad (4)$$

Коэффициенты A_j выражаются через весовые коэффициенты кубатурной формулы и значения q_0 в узлах ξ_j сетки, покрывающей область D ; для квадратной сетки с шагом h — $A_j = q_0(\xi_j) h^2$. В численных примерах область D берется круговой радиуса a , а распределение $q_0(\xi)$ равномерным

($q_0 = \text{const}$). Сопоставление с экспериментальными и МКЭ-результатами других авторов показывает, что такая модель источника обеспечивает адекватное описание реальных волновых процессов (см., например, сопоставления с [23], приведенные в [36, 37]). Амплитуда смещений \mathbf{u} пропорциональна суммарной нагрузке $F = \pi a^2 q_0$ (размерность — н/м); для удобства на графиках ниже они приводятся нормированными к максимальным значениям или к амплитуде смещений $v_0 = F \nabla g_0 / (\rho_0 \omega^2)$, генерируемых эквивалентным точечным источником у поверхности пластины ($R = d$). Следует также помнить, что диапазон частотного спектра $S(\omega)$ реальных АСТ ограничен; как правило, он сосредоточен в окрестности определенной центральной частоты f_c . Приведенные ниже численные результаты получены для $S = 1$, т.е. для широкополосного импульсного источника.

В акустической среде $\mathbf{u} = \nabla p / (\rho_0 \omega^2)$ [40], соответственно вектор-функция Грина для перемещений доопределяется в ней соотношением $\mathbf{g}_u = \nabla g / (\rho_0 \omega^2)$. Для погруженных волноводов с плоско-параллельными границами (многослойные пластины) применение преобразования Фурье F_{xy} по горизонтальным координатам x и y позволяет выразить функции Грина g и \mathbf{g}_u через их фурье-символы $G = F_{xy}[g]$ и $\mathbf{G} = F_{xy}[\mathbf{g}_u]$:

$$g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) = F_{xy}[G] = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} G(\boldsymbol{\alpha}, z; \boldsymbol{\xi}) e^{-i(\alpha_1 x + \alpha_2 y)} d\alpha_1 d\alpha_2, \quad \boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2) \quad (5)$$

и аналогично для \mathbf{g}_u . Контур Γ_1, Γ_2 идут вдоль вещественных осей комплексных плоскостей α_1 и α_2 , отклоняясь от них при обходе вещественных полюсов в соответствии с принципом предельного поглощения. Функции G и \mathbf{G}_u выражены через элементы матрицы Грина K для упруго-акустического полупространства $z \leq 0$, на которое действует наведенная падающим полем поверхностная нагрузка q [36]:

$$G(\boldsymbol{\alpha}, z; \boldsymbol{\xi}) = [\tilde{G}_0 + \tilde{G}_{sc}^-] e^{-i(\alpha_1 \xi + \alpha_2 \eta)}, \quad z \geq 0; \quad (6)$$

$$\tilde{G}_0 = -e^{-\sigma_0 |z - \zeta|} / (2\sigma_0), \quad \tilde{G}_{sc}^- = -(\rho_0 \omega^2 \hat{K}_{33} + \sigma_0 \Delta) e^{-\sigma_0 |z + \zeta|} / (2\sigma_0 \Delta_0);$$

$$\Delta_0 = \sigma_0 \Delta - \rho_0 \omega^2 \hat{K}_{33}, \quad \sigma_0 = \sqrt{\alpha^2 - \kappa_0^2};$$

$$\text{Re } \sigma_0 \geq 0, \quad \text{Im } \sigma_0 \leq 0, \quad \alpha^2 = |\boldsymbol{\alpha}|^2 = \alpha_1^2 + \alpha_2^2, \quad \boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2),$$

$\hat{K}_{33}(\boldsymbol{\alpha}, z)$ и $\Delta(\boldsymbol{\alpha})$ — числитель и знаменатель элемента $K_{33}(\boldsymbol{\alpha}, z)$ матрицы K : $K_{33} = \hat{K}_{33} / \Delta$, в формулы (6) \hat{K}_{33} входит при $z = 0$. В нижнем полупространстве $z \leq 0$ фурье-символ функции Грина смещений выражается через элементы третьего столбца матрицы K :

$$\mathbf{G}_u(\boldsymbol{\alpha}, z; \boldsymbol{\xi}) = \hat{\mathbf{K}}_3 \tilde{Q} e^{-i(\alpha_1 \xi + \alpha_2 \eta)}, \quad z \leq 0; \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_3 = \hat{\mathbf{K}}_3 / \Delta, \quad \hat{\mathbf{K}}_3 = (\hat{K}_{13}, \hat{K}_{23}, \hat{K}_{33})^T, \quad \tilde{Q} = -e^{-\sigma_0 z} / \Delta_0.$$

Важно, что эти представления справедливы для произвольного вертикально-неоднородного упруго-акустического полупространства $z \leq 0$, контактирующего с верхним акустическим полупространством $z \geq 0$, в котором расположен источник. В частности, упругий слой может быть не только изотропным и однородным, как при моделировании УЗ зондирования металлических образцов (алюминиевых, стальных и т.п.), но и многослойным анизотропным (слоистые композиты). Для проведения расчетов использовались алгоритмы вычисления элементов матрицы K , которые к настоящему времени хорошо разработаны и реализованы в виде компьютерных программ (см. обзор в работе [41]). Численное интегрирование на основе представлений (3)—(5) позволяет получать такие же количественные данные об амплитудно-частотных характеристиках волнового поля, возбуждаемого бесконтактным преобразователем, как и при использовании прямых численных методов, базирующихся на сеточной аппроксимации.

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ И НАКЛОННЫЙ ИСТОЧНИКИ

Параметры ξ и η входят в функции Грина G и \mathbf{G}_u только через экспоненту $e^{-i(\alpha_1\xi+\alpha_2\eta)}$, поэтому в случае горизонтального источника с плоским излучающим элементом ($z = \text{const} > 0$) интегрирование по области D в представлении (3) — (4) сводится к преобразованию Фурье от заданного распределения $q_0(\xi, \eta)$:

$$\iint_D q_0(\xi, \eta) e^{i(\alpha_1\xi+\alpha_2\eta)} d\xi d\eta = F_{xy}[q_0] = Q_0(\boldsymbol{\alpha}). \quad (8)$$

В случае изотропной пластины двукратные интегралы по α_1, α_2 сводятся к однократным по α , что существенно облегчает численное интегрирование.

Для наклонного кругового источника интегрирование по D также можно свести к функции Q_0 , но от более сложного аргумента и с дополнительным интегрированием по угловой координате. Однако такие представления оказались слишком громоздкими, более удобно и менее затратно использование суперпозиции конечного числа монополей в соответствии с формулами (3) и (4). Вычислительные затраты снижаются за счет того, что представление функций Грина g и \mathbf{g}_u сводится к однократным интегралам, а в дальней зоне используется их асимптотика, дающая объемные акустические и бегущие упругие волны.

Для верификации такого подхода к моделированию работы наклонного источника проводилось сопоставление с 3D МКЭ-результатами, полученными с помощью пакета Comsol Multiphysics 5.6 (модуль Acoustic-Solid Interaction) (<https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics>). В качестве примера на рис. 2 показано сечение в плоскости $y = 0$ пространственного распределения амплитуды поля давления $|p(x, 0, z)|$, рассчитанного с помощью 3D МКЭ (слева) и суперпозиции точечных источников (справа).

Здесь и на рис. 3 рассматривается погруженная в воду алюминиевая пластина толщиной $H = 2$ мм; источник радиуса $a = 5,5$ мм (как у использовавшихся для измерений преобразователей PNL F19-012 R (Starmans NDT, Чехия) и CF200 (Sonotec, Германия)) расположен на расстоянии $d = 10$ мм от пластины, угол наклона $\theta = 15^\circ$, частота $f = 100$ кГц. Скорость звука в воде $c_0 = 1485$ м/с, плотность $\rho_0 = 1000$ кг/м³; скорость продольных и поперечных объемных волн в алюминии: $c_p = 6175$ м/с и $c_s = 3103$ м/с, плотность $\rho = 2700$ кг/м³.

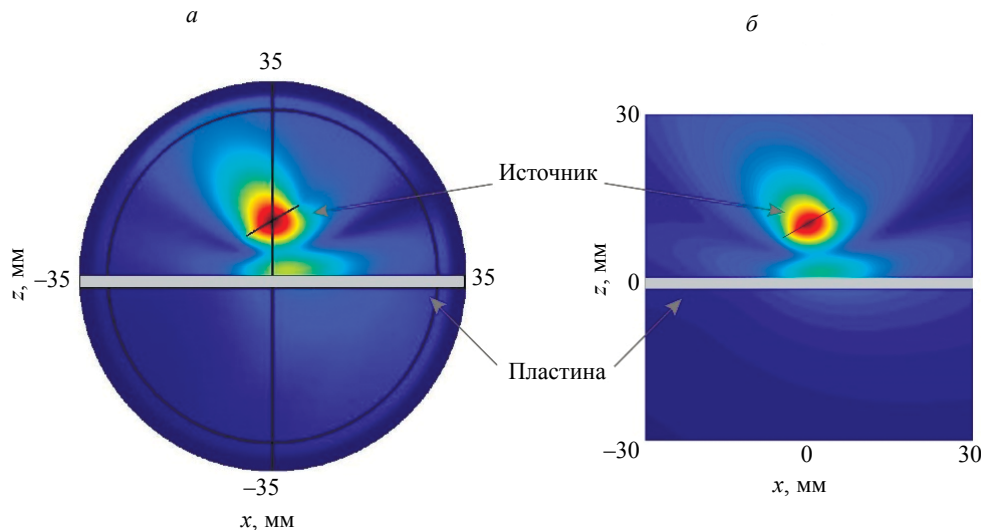


Рис. 2. Верификация представления (3): поле давления $|p|$, рассчитанное с помощью МКЭ (а) и как сумма точечных источников (б).

Поскольку МКЭ применим только в ограниченной области, бесконечная среда и волновод искусственно ограничиваются поглощающим слоем (perfect match layer — PML) [42], внутренняя граница которого показана на рис. 2 окружностью радиуса 30 мм. Хотя искусственное ограничение

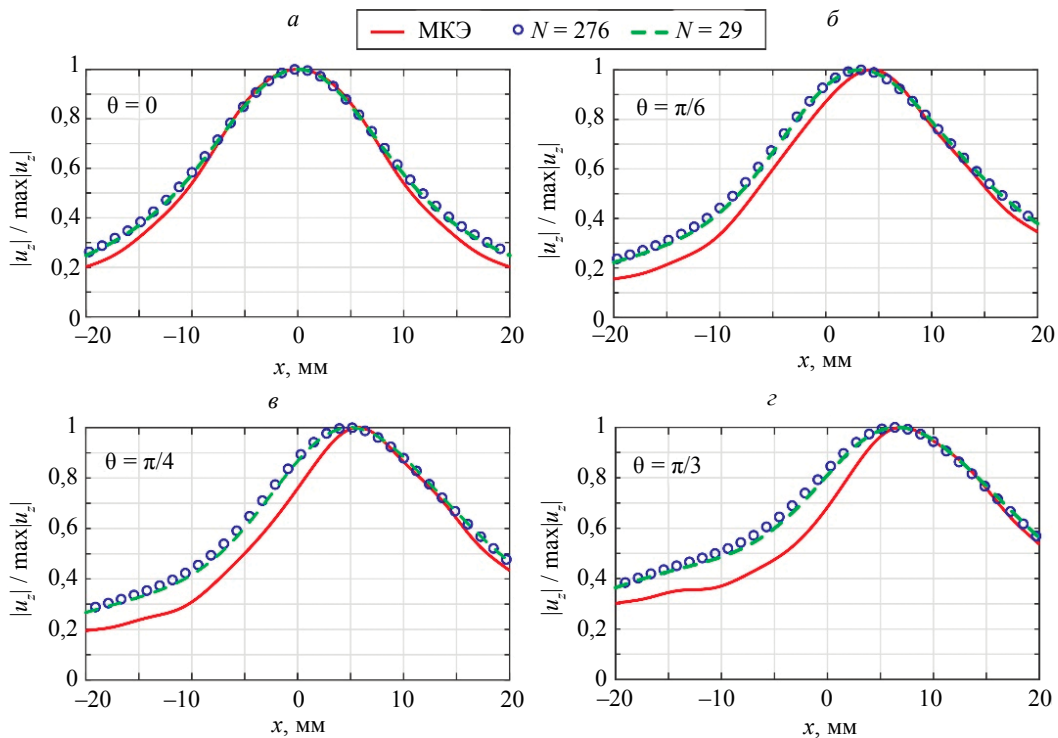


Рис. 3. Верификация представления (4): вертикальные перемещения $|u_z| / \max|u_z|$ на поверхности пластины $z = 0$ в зависимости от x ; $f = 100$ кГц; угол наклона источника $\theta = 0$ (а), $\theta = \pi/6$ (б), $\theta = \pi/4$ (в), $\theta = \pi/3$ (г).

объема немного искажает условия формирования поля установившихся колебаний (а иногда, например, в случае возбуждения в пластине обратных волн использование PML приводит к существенно неверным результатам [34]), в данном случае обе модели дают хорошо согласующиеся картины распределения амплитуды волнового поля. Но для получения МКЭ-результата потребовалось более четырех часов против двух минут при использовании суперпозиции (3) с числом источников $N_s = 441$.

Для верификации представления (4) на рис. 3 приводятся нормированные к максимуму графики амплитуды вертикальных смещений $|u_z|$ на ее поверхности $z = 0$ в зависимости от x при углах наклона кругового источника $\theta = 0, 30, 45$ и 60° ; сравниваются результаты, полученные с помощью МКЭ и суперпозицией точечных источников при $N_s = 29$ и 276 . Последние демонстрируют быструю сходимость с увеличением N_s и хорошо согласуются с МКЭ-результатами в предсказании положения точки максимума, которая с увеличением θ смещается вправо. На рис. 4 показано аналогичное сопоставление смещений в зависимости от частоты f . С увеличением угла наклона здесь появляются дополнительные локальные максимумы, указывающие на существование оптимальных для возбуждения бегущих волн сочетаний частоты и угла наклона источника.

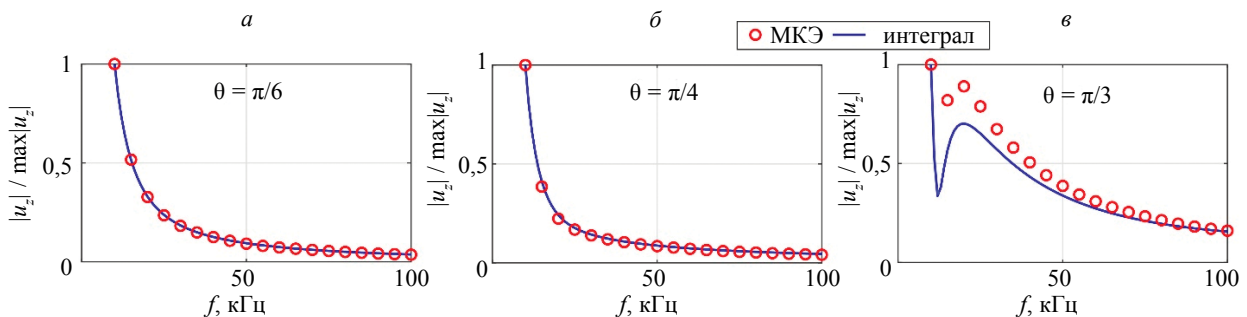


Рис. 4. Верификация представления (4): $|u_z| / \max|u_z|$ в зависимости от частоты f ; $x = 20$ мм, $z = 0$, угол наклона источника $\theta = \pi/6$ (а), $\theta = \pi/4$ (б), $\theta = \pi/3$ (в).

БЕГУЩИЕ ВОЛНЫ

Точечный источник, как и горизонтальный круговой, возбуждает в изотропной пластине осесимметричное волновое поле \mathbf{u} , радиальная и вертикальная компоненты которого u_r и u_z зависят только от $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ и z и не зависят от угловой координаты φ . Осесимметричными являются и входящие в представление (4) волновые поля $\mathbf{g}_u(\mathbf{x}, \xi_j)$, каждое в своей системе цилиндрических координат с центром в (ξ_j, η_j) :

$$\begin{aligned} x - \xi_j &= r_j \cos \varphi_j, & y - \eta_j &= r_j \sin \varphi_j, \\ r_j &= \sqrt{(x - \xi_j)^2 + (y - \eta_j)^2}, & z &= z_j. \end{aligned}$$

Радиальная и вертикальная компоненты вектора $\mathbf{g}_u = (g_r, g_z)$ представимы в виде однократных контурных интегралов, которые выражаются через сумму вычетов в полюсах подынтегральных функций ζ_n , попадающих внутрь замкнутого контура. В дальней зоне $\kappa_0 r_j \gg 1$ [36]:

$$\begin{aligned} g_r &\sim \sum_n P_n(z) e^{-\sigma_n d_j} H_1^{(1)}(\zeta_n r_j), \\ g_z &\sim \sum_n R_n(z) e^{-\sigma_n d_j} H_0^{(1)}(\zeta_n r_j). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь ζ_n — вещественные и близкие к вещественной оси корни характеристического (дисперсионного) уравнения

$$\Delta_0(\alpha, \omega) = 0 \Rightarrow \alpha = \zeta_n(\omega), \quad (10)$$

$P_n = -i\hat{P}(\zeta_n, z)/(2\Delta'_0(\zeta_n))$, $R_n = i\hat{R}(\zeta_n, z)\zeta_n/(2\Delta'_0(\zeta_n))$, \hat{P} и \hat{R} — числители функций $P(\alpha, z)$ и $R(\alpha, z)$, входящих в традиционное [43] представление $\mathbf{K}_3 = (-i\alpha_1 P, -\alpha_2 P, R)^T$ для изотропного полупространства; $\sigma_n = \sigma_0(\zeta_n) = \sqrt{\zeta_n^2 - \kappa_0^2}$, d_j — расстояние от центра монополя ξ_j до поверхности $z = 0$, $H_m^{(1)}$ — функции Ханкеля.

В дальней зоне $\zeta_n r \gg 1$ можно воспользоваться асимптотикой функций Ханкеля:

$$H_m^{(1)}(\zeta_n r_j) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi i}} \exp[i(\zeta_n r_j - m\pi/2)] / \sqrt{\zeta_n r_j}$$

и разложениями:

$$\begin{aligned} \zeta_n r_j &= \zeta_n [r - (\xi_j \cos \varphi + \eta_j \sin \varphi)] + O(1/(\zeta_n r)), \\ 1/(\zeta_n r) &= 1/(\zeta_n r) + O(1/(\zeta_n r)^2). \end{aligned}$$

Их подстановка в представление (4) дает асимптотику поля \mathbf{u} в виде цилиндрических бегущих волн, в которых полюса ζ_n играют роль волновых чисел. Вертикальная компонента смещений:

$$u_z \sim \sum_n a_n(z, \varphi) e^{i\zeta_n r} / \sqrt{\zeta_n r} + O(1/(\zeta_n r)), \quad \zeta_n r \gg 1, \quad (11)$$

$$a_n = R_n(z) Q_n(\varphi), \quad Q_n = \sqrt{2/(\pi i)} \sum_j A_j e^{-i\zeta_n [\xi_j \cos \varphi + \eta_j \sin \varphi]} e^{-\sigma_n d_j},$$

радиальная компонента u_r имеет аналогичное представление через $P_n(z)$.

Данные асимптотические представления дают такую же количественную информацию о суммарной амплитуде волнового поля \mathbf{u} , как и исходное разложение (4), но с гораздо меньшими вычислительными затратами. Каждое слагаемое суммы (11) описывает отдельную моду бегущих волн, причем зависимость от пространственных переменных r , φ и z в них полностью разделена.

Дисперсионные характеристики и затухание цилиндрической волны с расстоянием определяются зависящим только от r фактором $e^{i\zeta_n r} / \sqrt{\zeta_n r}$, в то время как $R_n(z)$ дает зависимость от глубины, т.е. собственную форму n -той моды. Два этих фактора определяются только волноводными свойствами среды и не зависят от характеристик источника. Размер, форма и наклон источника, как и задающий амплитуду акустического сигнала коэффициент q_0 , входят в сомножитель $Q_n(\varphi)$, определяющий амплитуду и диаграмму направленности каждой из возбуждаемых бегущих волн.

В анизотропном случае асимптотика бегущих волн имеет аналогичный вид [41], но из-за зависимости полюсов ζ_n от угловой координаты волновые числа в показателях экспонент уже зависят от φ , задавая квазицилиндрические волн с некруговым фронтом. Скорость их распространения зависит от направления, а вектор групповой скорости отклоняется от волнового вектора.

Полученные интегральные и асимптотические представления являются удобным инструментом для анализа энергетического баланса в системе источник — акустическая среда — погруженный волновод. Осредненный за период колебаний поток энергии, переносимой каждой модой через поперечное сечение волновода, выражается через амплитудные коэффициенты разложения $\mathbf{a}_n = (a_x, a_y, a_z)$, в то время как общая мощность источника вычисляется интегрированием плотности потока энергии по окружающей его замкнутой поверхности (для рассматриваемой модели — по верхней и нижней стороне излучающей пластины [36]). Такой анализ позволяет, в частности, проследить распределение волновой энергии, поступающей от источника в пластину через акустическую среду, между возбуждаемыми в ней бегущими волнами, в том числе и проявление эффекта эстафетной передачи энергии [44, 45].

При исчезающе малой плотности акустической среды ($\rho_0 \omega^2 \rightarrow 0$) уравнение (10) вырождается в дисперсионное уравнение $\Delta(\alpha, \omega) = 0$ для ненагруженной пластины. Его вещественные корни являются волновыми числами незатухающих бегущих волн (для однородного волновода — волн Лэмба [1]). При относительно малой плотности $\rho_0/\rho \ll 1$ эти корни смещаются с вещественной оси в комплексную плоскость α , давая вытекающие бегущие волны [46—48], которые распространяются вдоль поверхности волновода с фазовой скоростью $c_n = \omega / \text{Re} \zeta_n$ и дополнительным экспоненциальным затуханием $e^{-\text{Im} \zeta_n r}$ (декремент затухания $\delta_n = 2\pi \text{Im} \zeta_n / \text{Re} \zeta_n \ll 1$). Кроме того, появляются две незатухающие ($\delta_n = 0$) бегущие волны Шолте—Стоунли [49]. Дисперсионные (частотные) зависимости $\zeta_n(\omega)$ для волн Лэмба хорошо известны [1], а для волновода, погруженного в акустическую среду с относительно малой плотностью, картина дисперсионных кривых практически не меняется (рис. 5а). Для иллюстрации влияния слоистости справа на рис. 5б приведены дисперсион-

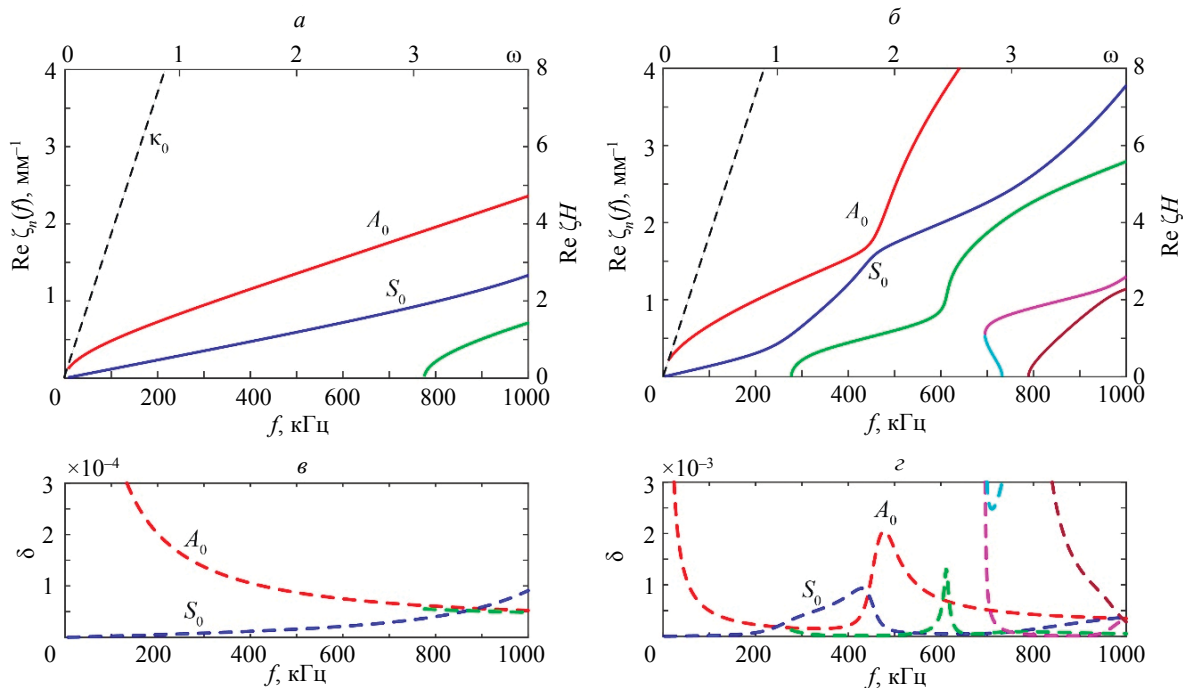


Рис. 5. Дисперсионные кривые $\text{Re} \zeta_n(f)$ для алюминиевой пластины (а) и двуслойного волновода плексиглас/алюминий (б) в воздухе; снизу декременты затухания соответствующих бегущих волн $\delta_n(f)$ (в), (г).

ные кривые для двуслойного образца плексиглас/алюминий той же суммарной толщины $H = 2$ мм ($h_1 = h_2 = 1$ мм, параметры плексигласа $c_p = 2813$ м/с, $c_s = 974$ м/с, $\rho = 1190$ кг/м³). Наряду с размерными значениями частоты и волновых чисел на верхней и правой осях отложены безразмерная круговая частота $\omega = 2\pi f H / c_s$ и безразмерные волновые числа $\zeta_n H$ (c_s — скорость поперечных волн в однородном слое). Штриховой луч на рис. 5 показывает частотную зависимость волнового числа звуковых волн $\kappa_0 = \omega / c_0$; дисперсионные кривые волн Шолте—Стоунли идут вдоль этого луча.

Следует отметить, что волновые числа ζ_n входят и в амплитудные коэффициенты Q_n , которые тем самым зависят не только от параметров источника, но и от дисперсионных характеристик возбуждаемых бегущих волн. Очевидно, что выбор параметров источника, приводящих к увеличению абсолютной величины Q_n , дает также увеличение амплитуды соответствующей бегущей волны.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ БЕГУЩИХ ВОЛН

В рамках представления (11) задача выбора оптимальных режимов возбуждения бегущих волн сводится к максимизации амплитудных коэффициентов a_n , в которые параметры источника входят только через сомножители Q_n . На рис. 6 показана зависимость абсолютной величины такого сомножителя от частоты и угла наклона для фундаментальной моды A_0 , возбуждаемой воздушно-связным преобразователем в алюминиевой пластине, и соответствующей моды в двуслойном образце плексиглас/алюминий (первая дисперсионная кривая на рис. 5а и 5б соответственно). Аналогичные поверхности $Q_n(\varphi, \theta)$ строятся и для волновых чисел ζ_n остальных мод, но их практическая ценность меньше, так как амплитуда второй фундаментальной моды S_0 , возбуждаемой АСТ, на 2-3 порядка меньше, чем моды A_0 , а высшие изгибные моды появляются только на нерабочих для рассматриваемых АСТ частотах выше 200 кГц.

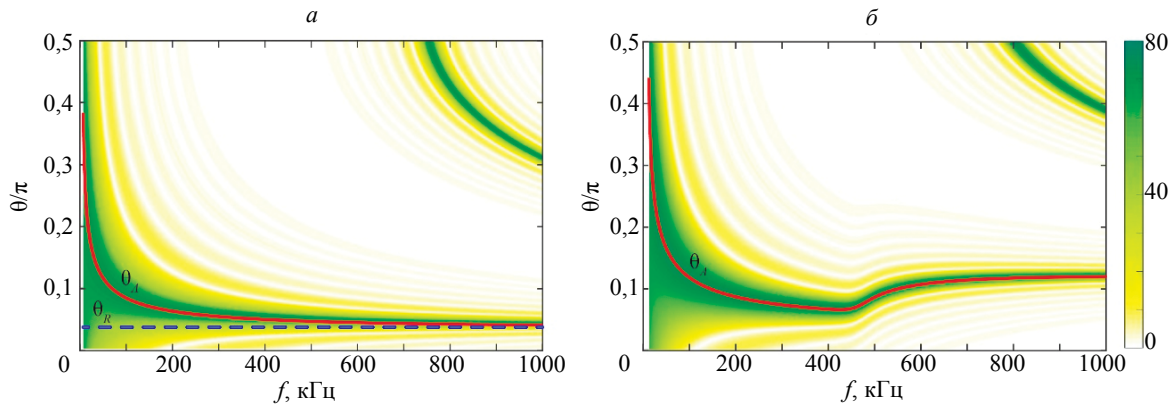


Рис. 6. Поверхности функции $Q_n(f, \theta)$ фундаментальной моды A_0 для однородного (а) и двуслойного (б) волноводов; сплошная линия — значение критического угла для возбуждения моды A_0 , горизонтальная штриховая линия — для рэлеевской волны.

Видно, что амплитуда Q_n достигает максимальных значений на частотах f , близких к нулю, причем для всего диапазона изменения угла наклона θ . Но с увеличением частоты зона максимумов быстро стягивается в узкий коридор, идущий на рис. 6а с постепенным снижением к значению $\theta = \theta_R$, где $\theta_R = \arcsin(c_0/c_R)$ — угол возбуждения волны Рэлея, распространяющейся вдоль поверхности $z = 0$ со скоростью c_R (для алюминия $c_R = 2957$ м/с, $\theta_R = 0,042\pi$ или $7,4^\circ$). Значения критических углов, при которых плоская звуковая волна возбуждает в образце одну из бегущих волн, определяется из условия совпадения ее фазовой скорости $c_n = \omega/\zeta_n$ со скоростью движения точки пересечения плоского фронта с границей раздела сред: $c_0 \sin\theta = c_n$.

В отличие от бездисперсионной волны Рэлея критические углы возбуждения нормальных мод частотно зависимы. Сплошными линиями на рис. 6а и 6б показаны примеры такой зависимости для критического угла θ_A для моды A_0 в однородной пластине и соответствующей моды в двуслойном образце. На рис. 6 эти линии идут по центру зон максимума, чем подтверждается согласованность коэффициентов Q_n с условиями возбуждения бегущих волн квазиплоскими волнами, генерируемыми наклонным АСТ. Однако коэффициенты Q_n в дополнение к указанию на оптимальные

частоты и углы наклона дают также и количественную информацию, учитывающую амплитудно-частотную характеристику источника, причем и для излучателей сложной формы (сфокусированные источники, фазированные решетки и т.п.). Такая информация принципиально недоступна при использовании только законов преломления и отражения плоских волн.

Стремление значения критического угла θ_A к θ_R объясняется тем, что с ростом частоты дисперсионные кривые $\zeta_A(f)$ асимптотически сближаются с лучом $\zeta_R = \omega/c_R$, дающим дисперсионную зависимость для волны Рэлея в полупространстве с теми же упругими свойствами, что и в окрестности поверхности слоистого волновода. Этим объясняется и изгиб в окрестности $f = 500$ кГц как дисперсионной кривой A_0 на рис. 5б, так и соответствующей кривой $\theta_A(f)$ на рис. 6б. Он отражает перестройку тенденции от сближения на низких и средних частотах к значениям характеристик волны Рэлея для осредненных упругих модулей двуслойного образца к ее характеристикам для более мягкого плексигласа при $f \rightarrow \infty$. Тем самым на высоких частотах оптимальным для возбуждения моды A_0 становится угол наклона $\theta_A = 0,12\pi (\approx 22^\circ)$.

Интересно также отметить появление на высоких частотах ($\approx 800\text{—}1000$ кГц) дополнительной полосы максимумов Q_n , которая возникает на уровне предельного угла наклона $\theta = \pi/2 (90^\circ)$, спускаясь в этом диапазоне до $0,3\pi\text{—}0,4\pi$. Ее появление обусловлено взаимодействием с пластиной бокового лепестка диаграммы направленности поля источника p_0 , который растет с увеличением частоты. Угол наклона квазиплоского фронта этого лепестка, очевидно гораздо меньше, чем у главного, и в указанном диапазоне совпадает со значениями критического угла $\theta_A(f)$.

На фиксированной частоте f каждая из этих полос дает локальное значение оптимального угла наклона. В качестве примера на рис. 7 приведены нормированные вертикальные компоненты $|a_z/v_0|$ амплитудного коэффициента асимптотики возбуждаемых бегущих волн (11) для моды A_0 в зависимости от θ на низких, средних и высоких частотах из рассматриваемого диапазона. Для двуслойной пластины приведено два варианта зондирования: со стороны плексигласа и со стороны алюминия (рис. 7б и 7в). Из-за большого акустического сопротивления даже пиковые значения амплитуды смещений на поверхности алюминиевой пластины на четыре порядка меньше, чем смещения v_0 звукового поля в свободном пространстве (рис. 7а). На высоких частотах 500 и 1000 кГц пиковые значения на рис. 7б (плексиглас/алюминий) становятся на два порядка больше, а при зондировании со стороны алюминия (см. рис. 7в), наоборот, проявляется только пик на частоте 200 кГц, в то время как на высоких частотах они в масштабе рисунка не видны. Разная высота пиков указывает на учет в асимптотике свойств материала через элемент матрицы Грина — сомножитель R_n . Он также дает и обусловленную свойствами волновода частотную зависимость амплитуды a_n .

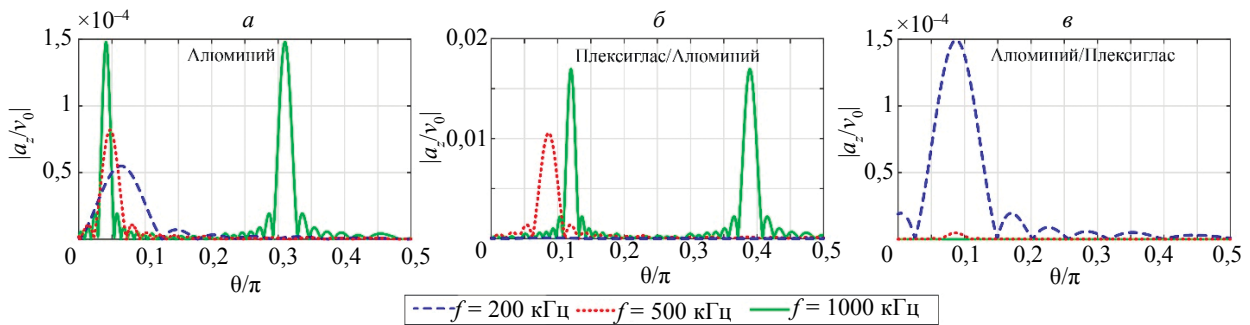


Рис. 7. Зависимость амплитудного множителя $|a_z/v_0|$ фундаментальной моды A_0 от угла наклона θ на различных частотах f для однородной (а) и двуслойной (б, в) пластин.

Для иллюстрации частотной зависимости на рис. 8 приведены графики $|a_z/v_0|$ для фиксированных углов наклона $\theta = 0, 7,4^\circ$ и 30° . Локальные максимумы данных кривых коррелируют с получающимися при сечении показанных на рис. 6 поверхностей Q_n вдоль соответствующих горизонтальных линий $\theta = \text{const}$, но в них также учитывается и влияние зависящих от частоты сомножителей R_n и $1/v_0$. Очевидно, лучшим из приведенных является угол $\theta = 7,4^\circ$, так как он обеспечивает близкую к максимуму амплитуду колебаний поверхности образца в наиболее широком частотном диапазоне, попадая в коридор максимумов на рис. 6 для алюминиевого образца. Однако для пластин из других материалов оптимальный угол наклона должен быть изменен, причем, судя по изгибу кори-

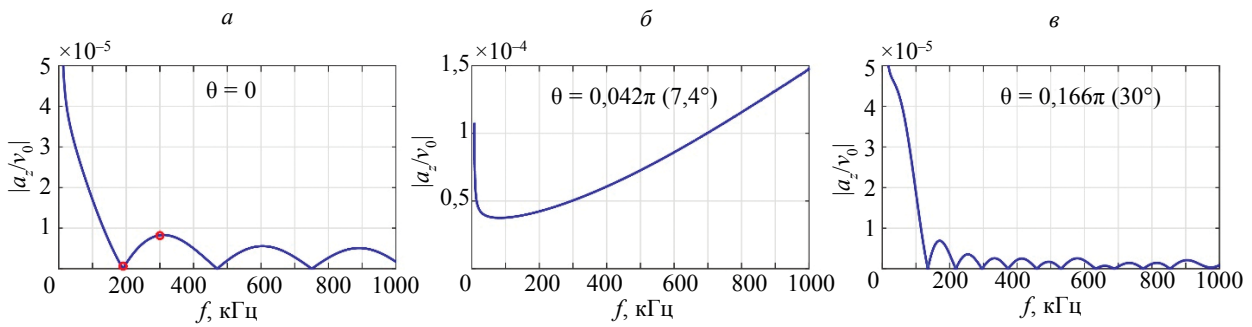


Рис. 8. Пример частотных зависимостей амплитудного множителя a_n в асимптотике бегущих волн (11) для фундаментальной моды A_0 на поверхности алюминиевой пластины при различных углах наклона источника θ : $\theta = 0$ (а), $\theta = 0,042\pi$ (б), $\theta = 0,166\pi$ (в).

дора на рис. 6б, для неоднородных пластин требуется тонкая настройка, учитывающая частотный диапазон рассматриваемого преобразователя.

Высота источника d практически не влияет на положение точек максимума, т.е. на оптимальный наклон источника. Математически это объясняется тем, что расстояния до поверхности d_j входят в Q_n только через экспоненты $e^{-\sigma_n d_j}$, в которых σ_n чисто мнимая, так как $\zeta_n < \kappa_0$ (см. штриховую линию для κ_0 на рис. 5). Поэтому их абсолютная величина $|e^{-\sigma_n d_j}| = 1$ не зависит от расстояния d_j . В сумме по j эти экспоненты складываются при различных значениях сдвига фазы, но изменение общего расстояния d при фиксированном наклоне источника этот сдвиг фаз не меняет. С физической точки зрения независимость оптимальных θ от d можно объяснить тем, что угол наклона квазиплоского фронта главного лепестка поля источника p_0 к поверхности образца не зависит от высоты. Меняется только расположение локальной области основного взаимодействия акустического пучка с пластиной на ее поверхности.

Для горизонтального кругового источника ($\theta = 0$) $Q_n = \sqrt{2/\pi i} Q_0(\zeta_n) e^{-\sigma_n d}$, где Q_0 определяется интегралом (8). При $q_0 = \text{const}$ он берется в явном виде: $Q_0 = 2q_0 J_1(a\zeta_n)/(a\zeta_n)$, J_1 — функция Бесселя. При совпадении аргумента $a\zeta_n$ с нулями функции J_1 , $Q_n = 0$, т.е. на соответствующих частотах n -тая мода не возбуждается. Например, на рис. 8а $a_z = 0$ на частоте $f = 190$ кГц, близкой к центральной частоте преобразователя Sonates CF200, так как $a\zeta_1 = 3,831$ — первый ноль функции J_1 . И наоборот, $|a_n|$ принимает максимальные значения в точках максимума Q_0 . На рис. 8а это частоты $f = 285$ и 591 кГц, соответствующие точкам максимума $a\zeta_1 = 5,03$ и $8,463$. Это так называемые частоты наилучшего возбуждения (sweet spots по терминологии, используемой в SHM для генерации бегущих волн пленочными пьезопреобразователями [50]). Сопоставление графиков на рис. 8а и 8в показывает, что при наклоне источника эти точки сгущаются, смещаясь влево.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дано обобщение полуаналитической модели работы бесконтактного воздушно-связного УЗ преобразователя на случай его наклонного позиционирования для возбуждения бегущих волн в инспектируемом образце. Показаны ее преимущества в плане физической наглядности волновой структуры решения и значительно меньших вычислительных затратах, чем при использовании МКЭ. Приводятся численные примеры, показывающие возможность определения оптимальных углов наклона и частотных диапазонов с учетом волноводных свойств зондируемого образца, который может быть не только изотропным упругим слоем, но и многослойным анизотропным композитом.

Работа выполнена в рамках проекта № FZEN-2020-0017 государственного задания Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 169 с.
2. Worlton D.C. Ultrasonic testing with Lamb waves // Nondestruct. test. 1957. V. 15. No 4. P. 218—222.

3. Лефельд В. Испытание листового материала, труб и штанг при помощи ультразвуковых поверхностных и пластиночных волн / Труды Межд. симпозиума о применении ультразвука (русский пер.). ЧССР, Братислава, сентябрь. 1962.
4. Farlow R., Kelly S.P., Hayward G. Advances in air coupled NDE for rapid scanning applications / 1994 Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium. 1994. V. 2. P. 1099—1102.
5. Grandia W., Fortunko C. NDE applications of air-coupled ultrasonic transducers / IEEE Ultrasonic Symposium, Proceedings. 1995. V. 1. P. 697—709.
6. Castaings M., Cawley P. The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers // J. Acoust. Soc. Am. 1996. V. 100. No 5. P. 3070—3077.
7. Safaeinili A., Lobkis O.I., Chimenti D.E. Quantitative materials characterization using air-coupled leaky Lamb waves // Ultrasonics. 1996. V. 34. P. 393—396.
8. Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V., Kolomeets N.P., Chulkov A.O., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Investigating vibration characteristics of magnetostrictive transducers for air-coupled ultrasonic NDT of composites // NDT & E International. 2019. V. 107. No. 102151. P. 1—10.
9. Derusova D.A., Vavilov V.P., Shpil'noi V.Y., Nekhoroshev V.O., Druzhinin N.V. Features of laser-vibrometric nondestructive testing of polymer composite materials using air-coupled ultrasonic transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 12. P. 1060—1071. [Дерусова Д.А., Вавилов В.П., Нехорошев В.О., Шпилюной В.Ю., Дружинин Н.В. Особенности лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов с использованием воздушно-связанных ультразвуковых преобразователей // Дефектоскопия. 2021. № 12. С. 26—38.]
10. Römmeler A., Zolliker P., Neuenschwander J. Air coupled ultrasonic inspection with Lamb waves in plates showing mode conversion // Ultrasonics. 2020. V. 100. No. 105984. P. 1—12.
11. Green R.E. Non-contact ultrasonic techniques // Ultrasonics. 2004. V. 42. P. 9—16.
12. Chimenti D.E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization // Ultrasonics. 2014. V. 54. No. 7. P. 1804—1816.
13. Рыков А.Н. Ультразвуковой акустический контроль с идентификацией дефектов изделий из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2018. № 2. С. 48—58.
14. Takahashi V., Lematre M., Fortineau J., Lethiecq M. Elastic parameters characterization of multilayered structures by air-coupled ultrasonic transmission and genetic algorithm // Ultrasonics. 2022. V. 119. No. 10661. P. 1—9.
15. Dahmen S., Ketata H., Hédi Ben Ghazlen M., Hosten B. Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave // Ultrasonics. 2010. V. 50. No. 4—5. P. 502—507.
16. Fang Y., Lin L., Feng H., Lu Zh., Emms G.W. Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. V. 137. P. 79—87.
17. Gómez Álvarez-Arenas T.E., Soto D.A. Characterization of mineral paper by air-coupled ultrasonic spectroscopy // Ultrasonics. 2012. V. 52. No. 6. P. 794—801.
18. Evani S.K., Spalvier A., Popovics J.S. Air-coupled ultrasonic assessment of concrete rail ties // NDT & E International. 2021. V. 123. No. 102511. P. 1—8.
19. Fariñas L., Sanchez-Torres E.A., Sanchez-Jimenez V., Diaz R., Benedito J., Garcia-Perez J.V. Assessment of avocado textural changes during ripening by using contactless air-coupled ultrasound // Journal of Food Engineering. 2021. V. 289. No. 110266. P. 1—9.
20. Kersemans M., Martens A., Van Den Abeele K., Degrieck J., Pyl L., Zastavnik F., Sol H., Van Paepegem W. The quasi-harmonic ultrasonic polar scan for material characterization: Experiment and numerical modeling // Ultrasonics. 2015. V. 58. P. 111—122.
21. Martens A., Kersemans M., Daemen J., Verboven E., Van Paepegem W., Delrue S., Van Den Abeele K. Characterization of the orthotropic viscoelastic tensor of composites using the Ultrasonic Polar Scan // Composite Structures. 2019. V. 230. No. 111499. P. 1—10.
22. Kersemans M., Martens A., Degrieck J., Van Den Abeele K., Delrue S., Pyl L., Zastavnik F., Sol H., Van Paepegem W. The ultrasonic polar scan for composite characterization and damage assessment: past present and future // Applied Sciences. 2016. V. 6. No. 2. P. 1—15.
23. Aanes M., Lohne K.D., Lunde P., Vestrheim M. Beam diffraction effects in sound transmission of a fluid-embedded viscoelastic plate at normal incidence // J. Acoust. Soc. Am. 2016. V. 140. No. 1. P. EL67.
24. Huber A. Non-destructive testing of future rocket boosters using air-coupled ultrasound / Proceeding of the 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016). (Germany, Munich, 13—17 June 2016). 2016. P. 1—9.
25. Adebahr W., Bernhardt Y., Kreutzbruck M. 3D-robotized air-coupled ultrasound measurements of large components / Proceeding of the 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016) (Germany, Munich, 13—17 June 2016). 2016. P. 1—8.
26. Raghavan A., Cesnik C.E.S. Review of guided-wave Structural Health Monitoring // The Shock and Vibration Digest. 2007. V. 39. P. 91—114.

27. *Giurgiutiu V.* Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors, 2nd Edition. New-York: Elsevier Academic Press, 2014. 1032 p.
28. *Ramadas C., Hood A., Khan I., Balasubramaniam K., Joshi M.* An experimental study on the behavior of A0 mode transduced using misaligned air-coupled transducers in composite laminates // *Applied Acoustics*. 2014. V. 83. P. 141—149.
29. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 342 с.
30. *Шендеров Е.Л.* Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989. 304 с.
31. *Junger M.C., Feit D.* Sound structures and their interaction / 2nd Edition. Boston, MA: MIT Press, 1986. 462 p.
32. *Hosten B., Biateau Ch.* Finite element simulation of the generation and detection by air-coupled transducers of guided waves in viscoelastic and anisotropic materials // *J. Acoust. Soc. Am.* 2008. V. 123. No. 4. P. 1963—1971.
33. *Masmoudi M., Castaings M.* Three-dimensional hybrid model for predicting air-coupled generation of guided waves in composite material plates // *Ultrasonics*. 2012. V. 52. No. 1. P. 81—92.
34. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Евдокимов А.А.* Гибридная численно-аналитическая схема для расчета дифракции упругих волн в локально неоднородных волноводах // *Акустический журнал*. 2018. Т. 64. № 1. С. 3—12.
35. *Eremin A.A., Glushkov E.V., Glushkova N.V.* Application of Piezoelectric Wafer Active Sensors for Elastic Guided Wave Excitation and Detection in Structural Health Monitoring Systems for Elongated Constructions // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 10. P. 795—809. [*Еремин А.А., Глушков Е.В., Глушкова Н.В.* Применение пленочных пьезопреобразователей для возбуждения и регистрации бегущих упругих волн в системах активного мониторинга протяженных конструкций // *Дефектоскопия*. 2020. № 10. С. 24—38.]
36. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Мякишева О.А.* Распределение энергии ультразвукового излучателя между бегущими волнами, возбуждаемыми в погруженном упругом волноводе // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 6. С. 723—735.
37. *Glushkov E.V., Glushkova N.V., Miakisheva O.A.* Backward waves and energy fluxes excited in acoustic medium with an immersed plate // *Ultrasonics*. 2019. V. 92. P. 158—168.
38. *Tutov S.A., Maev P.G., Bogachenkov A.H.* Линзовый многоэлементный акустический микроскоп в режиме измерения параметров слоистых объектов // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 5. С. 546—552.
39. *Morokov E., Levin V., Chernov A., Shanygin A.* High resolution ply-by-ply ultrasound imaging of impact damage in thick CFRP laminates by high-frequency acoustic microscopy // *Composite Structures*. 2021. V. 256. No. 113102. P. 1—13.
40. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
41. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В.* Бегущие волны в многослойных анизотропных композитах // *ПММ*. 2021. Т. 85. Вып. 3. С. 296—308.
42. *Joly P.* An elementary introduction to the construction and the analysis of perfectly matched layers for time domain wave propagation // *SeMA J.* 2012. V. 57. P. 5—48.
43. *Ворович И.И., Бабешко В.А.* Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. 320 с.
44. *Глушкова Н.В., Фоменко С.И.* Эффект эстафетной передачи энергии между модами бегущих волн / Труды VII Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (Ростов-на-Дону, 15 — 18 октября 2013 г.). 2013. Т. 1. С. 159—163.
45. *Glushkov E., Glushkova N., Fomenko S.* Wave energy transfer in elastic half-spaces with soft interlayers // *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. V. 137. No. 4. P. 1802—1812.
46. *Меркулов Л.Г.* Затухание нормальных волн в пластинах, находящихся в жидкости // *Акуст. журн.* 1964. Т. 10. № 2. С. 206—212.
47. *Rokhlin S.I., Chimenti D.E., Nayfeh A.H.* On the topology of the complex wave spectrum in a fluid-coupled elastic layer // *J. Acoust. Soc. Am.* 1989. V. 85. No. 3. P. 1074—1080.
48. *Shuvalov A.L., Poncelet O., Deschamps M.* Analysis of the dispersion spectrum of fluid-loaded anisotropic plates: leaky-wave branches // *J. Sound Vib.* 2006. V. 296. P. 494—517.
49. *Sessarego J.-P., Sagéoli J., Gazanhes C., Überall H.* Two Scholte-Stoneley waves on doubly fluid-loaded plates and shells // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 101. No. 1. P. 135—142.
50. *Giurgiutiu V.* Tuned Lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring // *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2005. V. 16. P. 291—305.

ИММЕРСИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ОБЪЕКТОВ КРИВОЛИНЕЙНОГО ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫМИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ

© 2022 г. Г.Я. Дымкин^{1,2,*}, А.В. Кириков^{3,**}, К.А. Бондарчук^{2,***}

¹АО «НИИ мостов», Россия 190013 Санкт-Петербург, Московский пр-т, 22

²ФГБОУ ВО ПГУПС, Россия 190068 Санкт-Петербург, Московский пр-т, 9

³«Nordinkraft AG», 75196 Remchingen, Schauinslandstr, 16

E-mail: *gdymin@gmail.com; **andrej.kirikov@nordinkraft.de; ***bondarchukksenya1801@gmail.com

Поступила в редакцию 07.06.2022; после доработки 02.07.2022

Принята к публикации 08.07.2022

Предложен способ контроля изделий с плоской и криволинейной поверхностью с применением поверхностных ультразвуковых волн в иммерсионном варианте. Теоретическими и экспериментальными исследованиями показано, что при протяженности зоны контроля от 20λ до 50λ комплексное применение эхо-импульсного совместно с амплитудным и временным вариантами теневого метода обеспечивает возможность выявления на плоских и криволинейных поверхностях как трещин, так и дефектов с гладким профилем глубиной от долей длины волны. Результаты исследований использованы при разработке установки автоматического контроля рельсов в потоке производства, испытания которой подтвердили высокую чувствительность и помехозащищенность иммерсионного контроля поверхностными волнами.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, поверхностные волны, криволинейный профиль, иммерсионный вариант, дефекты с гладким профилем, трещины.

DOI: 10.31857/S0130308222080036, EDN: BQСJMU

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач, связанных с высокопроизводительным контролем поверхности длинномерных изделий, например рельсов, в условиях их промышленного производства, применяют вихретоковый метод и реализующие его средства неразрушающего контроля. Присущие им недостатки и ограничения — низкая чувствительность по отношению к некоторым типам дефектов, сравнительно невысокая помехозащищенность по отношению к электромагнитному фону металлургического предприятия и остаточной намагниченности объекта контроля, трудности применения на криволинейных участках профиля, необходимость размещать вихретоковые датчики почти вплотную к движущемуся объекту контроля, а также малая глубина проникновения вихревых токов в ферромагнитные металлы и сплавы, инициируют интенсивные поиски альтернативных методов и средств обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов длинномерных изделий.

Одной из таких альтернатив, потенциально снимающих большую часть ограничений, присущих вихретоковому контролю, является применение поверхностных ультразвуковых волн.

Поверхностные ультразвуковые волны рэлеевского типа находят широкое применение в задачах дефектоскопии [1]. С практической точки зрения преимущества волн Рэлея, распространяющихся вдоль свободной поверхности твердого тела, связаны, прежде всего, с их локализацией в поверхностном слое и, вследствие этого, высокой чувствительностью к поверхностным дефектам и более медленным, чем для объемных волн, спадом амплитуды с расстоянием. Поверхностные несовершенства, возникающие как при изготовлении, так и при эксплуатации металлоизделий (трещины, волосовины, плены, отпечатки и др.), имеют разнообразную форму и не только приводят к изменению амплитудных и временных параметров прошедшего сигнала, но и создают рассеянные рэлеевскую и объемные продольную и поперечную волны, что обуславливает возможность применения как эхо-импульсного, так и теневого методов ультразвукового контроля. Важно также, что волны рэлеевского типа могут распространяться вдоль криволинейных (выпуклой и вогнутой) поверхностей, что позволяет выявлять неоднородности на поверхностях сложной формы [2].

В то же время волны Рэлея характеризуются высокой чувствительностью к контакту поверхности с другой средой [3], в частности к наличию на поверхности слоя жидкости или локальных капель и загрязнений, следствием чего является рассеяние на зоне контакта (что вызывает появление помех), а также трансформация рэлеевской волны в зоне контакта в неоднородную волну, уносящую энергию в среду, контактирующую с поверхностью, что приводит к уменьшению длины прозвучиваемого участка поверхности.

Указанный недостаток обуславливает интерес к возможности выполнения контроля в иммерсионном варианте, т.е. при погружении объекта контроля в жидкую среду, что, безусловно, уменьшит длину контролируемого участка, но в то же время исключит условия для рассеяния поверхностных волн на локальных загрязнениях поверхности.

Поверхностные волны на плоской границе твердого полупространства с жидким слоем конечной и бесконечной толщины теоретически и экспериментально исследованы в работах И.А. Викторова [5, 6], где получены аналитические выражения и даны оценки дисперсии фазовой скорости волн и затухания. Закономерности и эффективность преобразования поверхностных волн в объемные продольные, излучаемые в контактирующую с твердым телом жидкость, изучены в [7], где авторы ограничились решением двумерной задачи. Конечность размеров излучателя в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, обуславливает направленность поля возбужденной рэлеевской волны, изученную И.А. Викторовым [8] применительно к импульсному режиму.

Исследования закономерностей взаимодействия волн Рэлея с щелями прямоугольной формы и полуцилиндрическими канавками, а также распространения их по поверхности сложной геометрии (например, пилообразной или шероховатой) представлены, в частности, в экспериментальных работах [9, 10]. В [11] показано, что для прямоугольной канавки малой глубины коэффициенты отражения (R_d) и прохождения (D_d) в стали и дюралюминии отличаются незначительно; это позволяет сравнивать экспериментальные данные, полученные для границы воздух—сталь в лабораторных условиях, и данные, полученные в [9] для границы воздух—дюралюминий.

Наличие указанных фундаментальных теоретических и экспериментальных результатов создает необходимую базу для изучения эхо-импульсного и теневого методов иммерсионного контроля изделий с неплоской поверхностью поверхностными квазирэлеевскими волнами.

С целью исследования закономерностей распространения, отражения и прохождения поверхностных волн при расположении изделия в иммерсионной среде рассмотрим расположенное в жидкости твердое тело, поверхность которого имеет плоские и цилиндрический (выпуклый или вогнутый) участки. Поверхностная волна, возбужденная на плоском участке твердого тела методом клина с помощью пьезопреобразователя, расположенного в иммерсионной жидкости под рэлеевским углом, распространяется в направлении перпендикулярном образующей цилиндра, встречая на своем пути поверхностный дефект в виде узкой прямоугольной (модель трещины) или полуцилиндрической (модель неровности) канавки, расположенной на криволинейном или плоском участке поверхности, ориентированной перпендикулярно направлению распространения волны и перекрывающей всю ширину пучка поверхностных волн.

Рассмотрим далее акустические тракты для поставленной задачи. При выводе аналитических выражений для амплитуд теневого и эхосигнала положим, что: однородное, изотропное и идеально упругое твердое тело расположено в идеальной жидкости; радиус кривизны поверхности твердого тела много больше длины волны; путь от излучающего и приемного преобразователей до поверхности твердого тела, проходимый волной в жидкости, не превышает величину ближней зоны преобразователя; модели дефектов, расположенные в слое локализации поверхностных волн (порядка полутора длин волн), удалены от точек возбуждения и приема поверхностных волн на расстояние, значительно превышающее длину волны. Возможная протяженность акустического тракта при иммерсионном контроле поверхностными волнами (величина зоны контроля) определяется затуханием поверхностных волн за счет излучения в жидкость [5]. Теоретическая и экспериментальная оценка спада амплитуды поверхностной волны с расстоянием (рис. 1) показывает, что при иммерсионном варианте контроля наличие толстого слоя жидкости на поверхности изделия весьма значительно (с 0,01 до 0,5—0,6 дБ на длину волны) увеличивает ослабление амплитуды распространяющейся поверхностной волны. В то же время, физические свойства иммерсионной жидкости незначительно влияют на затухание поверхностной волны и на возможности ультразвукового контроля соответственно.

Таким образом, протяженность эффективной зоны иммерсионного контроля поверхностными волнами для применяемых методов контроля составляет от 20λ до 50λ и при практически реализуемых параметрах ультразвукового преобразователя (размерах активной зоны, частоте, расстоянии в иммерсионной жидкости до объекта контроля) находится преимущественно в ближней зоне поля. Для решения поставленных в настоящей работе инженерных задач ограничимся при анализе акустического тракта энергетическим приближением, дающим достаточную точность.

Экспериментальные исследования методов иммерсионного контроля поверхностными волнами, выполненные в настоящей работе для верификации и дополнения теоретических оценок, проведены с использованием специализированной дефектоскопической аппаратуры и серийных приборов, пьезоэлектрических преобразователей для контактного и иммерсионного контроля с рабо-

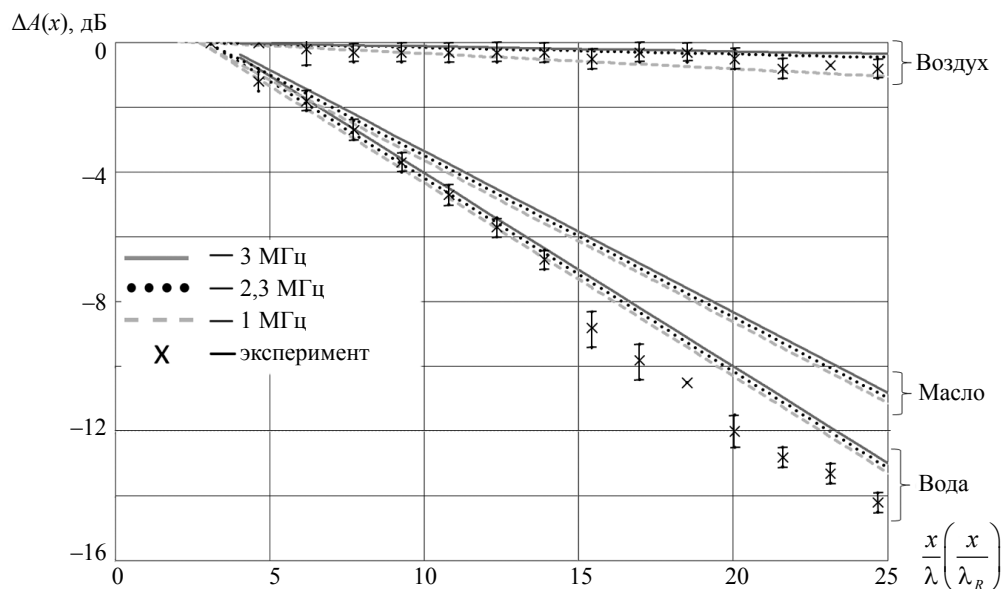


Рис. 1. Ослабление амплитуды поверхностной волны с расстоянием.

чими частотами 1—3 МГц, иммерсионной ванны с механизмами позиционирования. В стальных образцах для исследований фрезерованием выполнены канавки прямоугольной и цилиндрической формы и переменной глубины. Все измерения выполняли многократно с исключением резко отклоняющихся значений. По данным измерений рассчитывали средние значения и 95 % доверительные интервалы, показанные на рисунках с экспериментальными данными.

ТЕНЕВОЙ МЕТОД

Наличие повреждений поверхности обуславливает изменение как амплитудных, так и временных параметров импульсов поверхностных ультразвуковых волн, распространяющихся по участку изделия. Регистрация этих изменений, являющихся признаком наличия дефекта, лежит в основе амплитудного и временного теневого методов.

На рис. 2 представлены общая схема, модели дефектов и модель акустического тракта теневого метода, на которой отмечен криволинейный участок твердого тела.

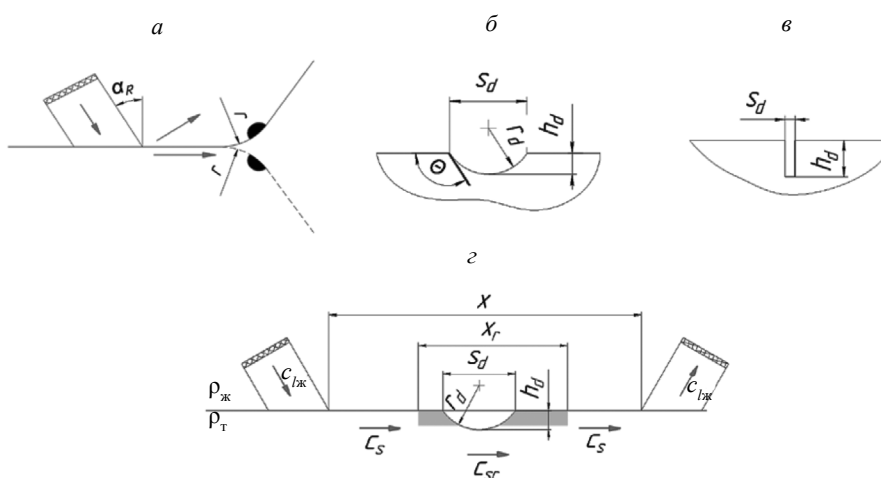


Рис. 2. Общая схема акустического тракта теневого метода контроля поверхностными волнами (а); модели дефектов: полцилиндрическая канавка (б), прямоугольная канавка (в); модель акустического тракта (г).

На рисунке приняты следующие обозначения: $\rho_{ж}$, $\rho_{т}$ — плотности жидкости и твердого тела соответственно; $c_{лж}$ — скорость продольной волны в жидкости; c_{s} , c_{sr} — скорости поверхностных волн в твердом теле, граничащем с жидкостью, на его плоской и криволинейной поверхностях соответственно; x — длина пути поверхностной волны в акустическом тракте (от излучателя до приемника); x_r — длина криволинейного (выпуклого или выгнутого) цилиндрического участка поверхности радиусом r .

Акустический тракт амплитудного теневого метода будем характеризовать отношением амплитуды сигнала, прошедшего тракт с дефектом (A_d^T), к амплитуде сигнала на бездефектном участке (A_0^T) — коэффициентом выявляемости дефекта:

$$K^T = \frac{A_d^T}{A_0^T}. \quad (1)$$

В энергетическом приближении запишем интенсивность I_d^T сигнала поверхностной волны, прошедшей акустический тракт, представленный на рис. 2з, в виде:

$$I_d^T = I_n \tilde{Q}(b, x) \tilde{D}_d(h_d, s_d) \tilde{K}_a(b) \tilde{\Psi}(x, r, x_r), \quad (2)$$

где I_n — интенсивность излученной волны в твердое тело; $\tilde{Q}(b, x)$ — коэффициент, характеризующий уменьшение интенсивности за счет расхождения пучка поверхностных волн при распространении. Для ближней зоны, в которой фронт волны можно считать плоским, $\tilde{Q}(b, x) = 1$, а для

дальней зоны (цилиндрический фронт) — $\tilde{Q}(b, x) = \frac{b^2}{\lambda x}$; $\tilde{D}_d(h_d, s_d)$ — коэффициент прохождения через дефект по интенсивности; $\tilde{K}_a(b)$ — коэффициент осевой концентрации поля поверхностных волн, излучаемых преобразователем шириной b , который для ближней зоны принимает значе-

ние $\tilde{K}_a = 1$, для дальней зоны — $\tilde{K}_a = \frac{0,5 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 b}{\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} b \right) + \frac{2\pi}{\lambda} b \cdot Si \left(\frac{2\pi}{\lambda} b \right) - 1}$; $\tilde{\Psi}(x, r, x_r)$ — коэффициент,

характеризующий уменьшение интенсивности за счет затухания поверхностной волны при ее распространении вдоль границы с жидкостью (см. рис. 1) и переизлучения объемных волн на участке вогнутой криволинейной поверхности [4].

Потери энергии и соответственно значения коэффициентов прохождения при огибании поверхностной волной трещиноподобных и пологих дефектов обуславливаются: отражением поверхностной волны от встречающихся на ее пути перегибов (углов) поверхности, дополнительным затуханием за счет излучения объемных волн при распространении волны вдоль вогнутого участка поверхности, а также рассеянием в виде объемных волн, возникающих вследствие дифракции на острых углах и участках с радиусом меньше длины волны [12].

С учетом принятых допущений и выражений для потерь на границе с жидкостью и на вогнутой криволинейной поверхности из [4, 7] формулы для амплитуд теневого сигнала и коэффициентов выявляемости протяженных прямоугольной ($K_{дп}^T$) и полуцилиндрической ($K_{дц}^T$) канавок, ориентированных перпендикулярно пучку могут быть записаны в виде:

$$K_{дп}^T = D_{дп}, \quad (3)$$

где $D_{дп}$ — коэффициент прохождения по амплитуде для узкой прямоугольной канавки малой глубины, выражение для которого получено в [10]:

$$K_{дц}^T = \exp \left[-(\alpha_R + \alpha_S)(s_{dr_d} - s_d) + \alpha_{Sr} s_d - \alpha_{Sr_d} s_{dr_d} \right], \quad (4)$$

где α_R , α_S — коэффициенты затухания поверхностной волны при распространении вдоль границы раздела твердая среда—воздух и твердая среда—жидкость соответственно; α_{Sr} , α_{Sr_d} — коэффициенты дополнительного затухания поверхностной волны на вогнутых цилиндрических участках поверхности радиусами r и r_d соответственно, обеспечивающие, как следует из [4, 9], приемлемую точность как при больших, так и при малых волновых радиусах кривизны; s_{dr_d} — длина пути по поверхности канавки.

Необходимо отметить, что приведенные формулы не учитывают дифракционных эффектов, приводящих к преобразованию поверхностных волн в объемные, рассеиваемые дефектом.

Результаты выполненных в работе экспериментальных исследований ослабления амплитуды теневого сигнала от глубины прямоугольной и полуцилиндрической канавок, а также данные, рассчитанные по (3), (4) и представленные в [9], показаны на рис. 3.

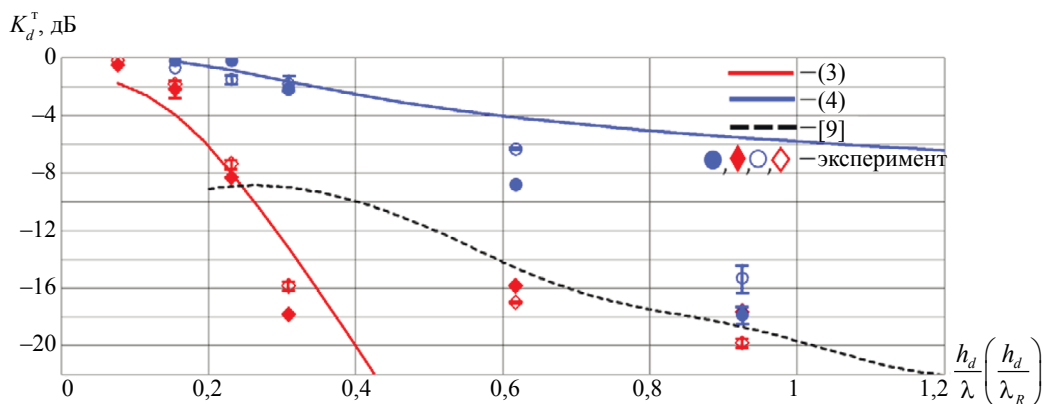


Рис. 3. Коэффициенты выявляемости узкой ($s_d \lambda \rightarrow 0$) прямоугольной ($\blacklozenge, \blacklozenge$) и полуцилиндрической ($s_d \lambda \approx 5$) (\bullet, \square) канавок глубиной h_d при теновом методе контроля поверхностными волнами: \blacklozenge, \square — сталь—воздух; \blacklozenge, \bullet — сталь—вода.

Как видно, экспериментальные данные для коэффициентов выявляемости прямоугольной канавки на свободной поверхности стального образца и при иммерсионном контроле (см. рис. 3) удовлетворительно согласуются с расчетами по формуле (3) для малых глубин дефекта и с результатами, полученными в [9] для алюминиевых образцов. Отличие теоретических результатов от данных эксперимента при глубинах канавки больших половины длины волны обусловлено, по-видимому, использованием приближения, не учитывающего влияние волн, огибающих трещину (прямоугольную канавку), распространяясь вдоль ее граней. С увеличением отношения h_d/s_d коэффициенты выявляемости для прямоугольной (трещиноподобной) и гладкой канавки с полуцилиндрическим дном сближаются.

В процессе экспериментальных исследований теневого метода установлено также, что снижение эффективности возбуждения поверхностной волны в случае, когда дефект оказывается в зоне падающего пучка, оказывает более значительное влияние на амплитуду теневого сигнала, чем рассеяние распространяющейся поверхностной волны дефектом. Этот эффект, проявляющийся в снижении коэффициента преобразования продольной волны в жидкости в поверхностную волну, — «параметрический» эффект, определяюще зависит от формы поверхностного дефекта и отношения размеров дефекта и зоны возбуждения, не поддается аналитической оценке, однако может быть эффективно использован при практическом контроле.

Результаты проведенных исследований акустического тракта амплитудного теневого метода иммерсионного контроля поверхностными волнами показывают:

1) коэффициенты выявляемости трещиноподобных (прямоугольная канавка) и гладких (полуцилиндрическая канавка) поверхностных дефектов слабо зависят от акустических характеристик металла и среды, с которой контактирует контролируемая поверхность;

2) при расположении металлического изделия как в воздухе, так и в воде приемлемый для практических задач дефектоскопии коэффициент выявляемости обеспечивается для перпендикулярных направлению распространения волны дефектов глубиной более $(0,3—0,5)\lambda$.

Для оценки влияния геометрии и размера канавки на временной сдвиг Δt прошедшего импульса поверхностной волны, являющийся признаком дефекта при временном теновом методе, выполним расчеты времени распространения, полагая вслед за [4], что траектория распространения импульса повторяет форму дефекта.

В таком случае, в предположении, что поверхностная волна последовательно распространяется вдоль передней и задней граней прямоугольной канавки с пренебрежимо малым раскрытием ($s_d \rightarrow 0$), разница между временами распространения сигнала на дефектном и бездефектном участках может быть определена по простой формуле:

$$\Delta t_{\text{н}} = \frac{2h_d}{c_s} - \frac{s_d}{c_s} \approx \frac{2h_d}{c_s}. \quad (5)$$

Для полуцилиндрической канавки необходимо учитывать также, что скорость поверхностной волны на криволинейной поверхности канавки зависит от радиуса кривизны, а скоростная поправка, согласно [4, 9], справедлива как для малых, так и больших радиусов. При этом в важном для практики диапазоне радиусов канавки изменение скорости поверхностной волны пренебрежимо мало (менее 0,04).

Рассчитав длину s_{dr_d} пути импульса по поверхности полуцилиндрической канавки шириной s_d и глубиной h_d и используя результаты [4], получим аналитические выражения для времени распространения поверхностных волн по участку, включающему канавку, позволяющие проанализировать закономерности влияния размеров канавки на временной сдвиг (Δt_{r_d}) прошедшего сигнала, регистрируемого при теневом методе:

$$\Delta t_{r_d} = \frac{\pi \left(\frac{s_d^2 + 4h_d^2}{8h_d} \right) \cdot \arcsin \left(\frac{4h_d s_d}{s_d^2 + 4h_d^2} \right)}{90} \cdot \frac{1}{c_R} \times \left[1 - \frac{\left[1 + \frac{s}{q} + \frac{k_s e_q}{2s e_s} \left(1 - \frac{s^2}{q^2} \right) \right] + \left[1 + \frac{s}{q} - \frac{k_R e_s}{2s e_q} \left(1 - \frac{s^2}{q^2} \right) \right] - \frac{2s^2}{k_i^2} \left(\frac{k_i^2}{k_l^2} - 1 \right)}{k_R r_d \left[\left(1 - \frac{s}{q} \right) \left(\frac{e_q}{e_s} - \frac{e_s}{e_q} \right) + \frac{4k_R s}{k_i^2} \left(\frac{k_i^2}{k_l^2} - 1 \right) \right]} \right]^{-1} \cdot \frac{s_d}{c_R}, \quad (6)$$

где $s = \sqrt{k_R^2 - k_i^2}$; $q = \sqrt{k_R^2 - k_l^2}$; $e_q = \exp[2\text{arcth}(q/k_R)]$; $e_s = \exp[2\text{arcth}(s/k_R)]$; k_p , k_p , k_s — волновые числа поперечной, продольной, поверхностной волн соответственно.

Результат расчета по выражению (6) представлен на рис. 4.

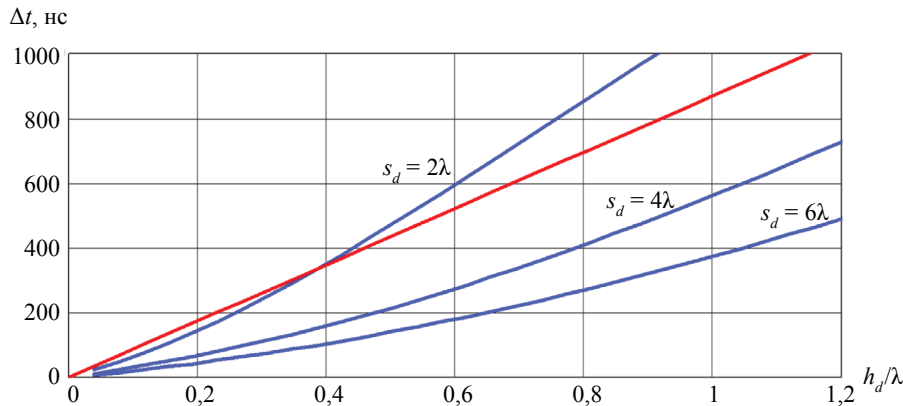


Рис. 4. Зависимость временного сдвига прошедшего сигнала поверхностной волны от волновой глубины h_d/λ прямоугольной (—) и полуцилиндрической (—) канавок.

Выполненный анализ временного варианта теневого метода позволяет заключить, что: зависимость временного сдвига (задержки) импульса поверхностной волны при прохождении им как прямоугольной, так и полуцилиндрической канавок практически линейно зависит от волновой глубины канавки h_d/λ ; с ростом ширины полуцилиндрической канавки временной сдвиг значительно снижается.

На рис. 5 представлены полученные при контроле динамические огибающие амплитуды и временного сдвига сигнала, прошедшего по поверхности изделия, на которой имеются два дефекта.

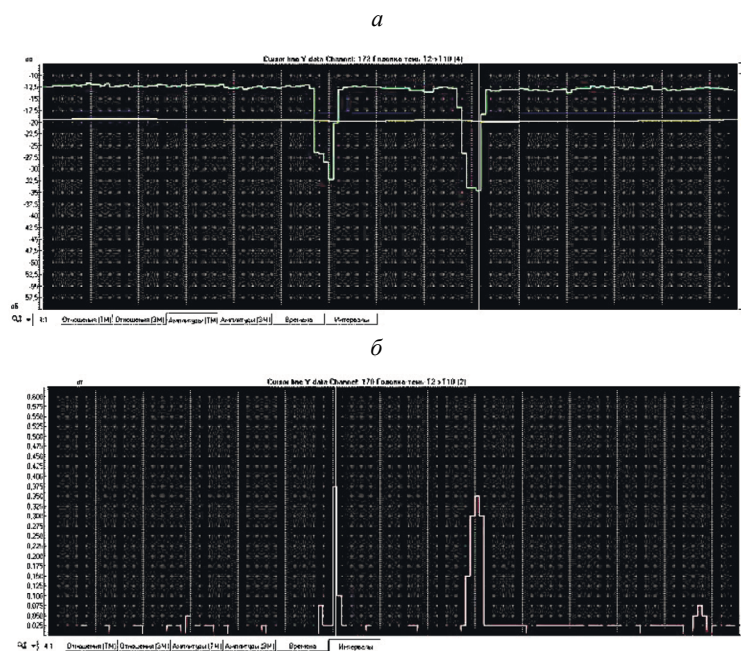


Рис. 5. Динамические огибающие амплитуды (а) и временного сдвига (б) теневого сигнала при перемещении по поверхности изделия, на которой имеются два дефекта.

Как видно, падение амплитуды прошедшего (теневого) сигнала сопровождается увеличением времени его распространения, что подтверждает эффективность совместного использования амплитудного и временного вариантов теневого метода контроля поверхностными волнами. Регистрация двух параметров будет способствовать повышению помехозащищенности контроля и предоставляет потенциальные возможности оценки глубины (размера) выявленного дефекта.

ЭХО-ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД

Для эхометода контроля совмещенным преобразователем и бесконечно протяженной канавки может быть принята модель акустического тракта, отличие которой от рассмотренной выше модели для теневого метода заключается в необходимости учета не коэффициента прохождения, а коэффициента отражения от дефекта, а геометрическая разница сводится к тому, что для эхометода расстояния, пройденные волной на всех участках пути от излучателя до дефекта и обратно, равны (рис. 6).

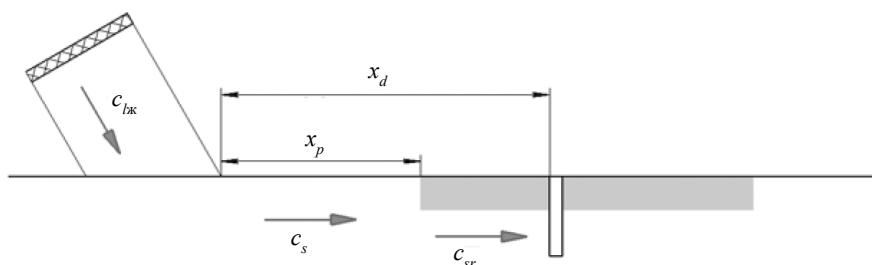


Рис. 6. Модель акустического тракта эхометода ультразвукового контроля поверхностными волнами.

По аналогии с приведенным ранее выражением для теневого метода (2) запишем интенсивность эхосигнала от дефекта в виде:

$$I_d^3 = I_n \tilde{Q}(b, x_d) \tilde{R}_d(h_d, s_d) \tilde{K}_a(b) \tilde{\Psi}(x_d, x_p, r). \quad (7)$$

При расположении дефекта на акустической оси преобразователя $\tilde{K}_a = 1$. В таком случае для дальнейшей зоны амплитуду эхосигнала можно записать в виде:

$$A_d^3 = A_n \left(\frac{1}{x_d} \right) R_d \exp \left[-2(\alpha_R + \alpha_S)x_d - 2\alpha_{Sr}(x_d - x_p) \right]. \quad (8)$$

На расстояниях, не превышающих величину ближней зоны преобразователя, для которой $\tilde{Q}(b, x_d) = 1$, амплитуда эхосигнала принимает вид:

$$A_d^3 = A_n R_d \exp \left[-2(\alpha_R + \alpha_S)x_d - 2\alpha_{Sr}(x_d - x_p) \right]. \quad (9)$$

При практическом контроле настройка чувствительности выполняется по эхо-сигналу от эталонного отражателя, в качестве которого для поверхностных волн принято использовать прямой двугранный угол в образце из контролируемого материала [13]. Положим, что расстояние от точки возбуждения—приема поверхностных волн до эталонного отражателя выбрано минимальным, достаточным для раздельного наблюдения и измерения зондирующего и отраженного импульсов. В таком случае влияние затухания поверхностных волн практически отсутствует даже в случае контакта поверхности с жидкостью — $\Psi = 1$. Для оценки возможного влияния контакта с жидкостью на коэффициент отражения поверхностной волны от прямого двугранного угла (R_{inf}) проведен эксперимент, который не показал значимого изменения амплитуды эхосигнала от прямого двугранного угла при погружении образца в воду. В связи с этим (R_{inf}) принят равным значению, полученному для рэлеевской волны [11], и амплитуда A_0 опорного эхосигнала от эталонного отражателя равна:

$$A_0 = 0,67A_n. \quad (10)$$

В результате с учетом [7] для коэффициента выявляемости дефекта, расположенного в ближней зоне поля преобразователя, получим:

$$K_d^3 = \frac{3}{2} R_d \exp \left[-2(\alpha_R + \alpha_S)x_d - 2\alpha_{Sr}(x_d - x_p) \right]. \quad (11)$$

Полученное общее выражение может быть использовано для детального анализа акустического тракта эхо-импульсного иммерсионного контроля поверхностными волнами.

Для модели дефекта в виде прямоугольной канавки его следует дополнить формулами для R_d из [11].

Данные расчетов и экспериментальные значения коэффициента выявляемости прямоугольной и полуцилиндрической канавок на плоской поверхности в воздухе и в воде представлены на рис. 7.

Наблюдается удовлетворительное качественное и количественное совпадение результатов выполненных в работе экспериментов с теоретическими и опытными данными других авторов

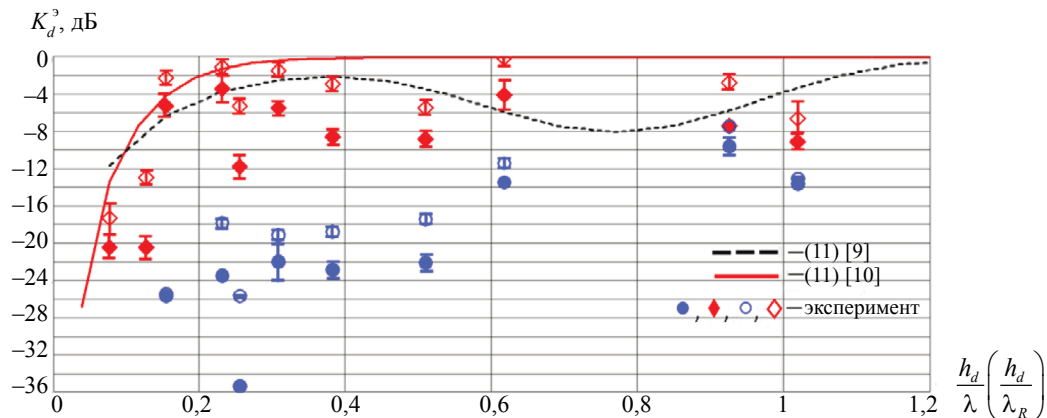


Рис. 7. Коэффициенты выявляемости узкой ($s_d/\lambda \rightarrow 0$) прямоугольной (\blacklozenge, \circ) и полуцилиндрической ($s_d/\lambda \approx 5$) (\bullet, \circ) канавок глубиной h_d при эхометодоме контроля поверхностными волнами: \circ, \bullet — сталь—воздух; \blacklozenge, \bullet — сталь—вода.

[9, 11]. При этом отсутствие осцилляций на расчетной кривой для прямоугольной канавки объясняется, как и для теневого метода, использованным в [11] энергетическим приближением.

Из рис. 7 видно, что коэффициенты выявляемости для вариантов контроля на воздухе и в иммерсионной среде отличаются незначительно; выявляемость полуцилиндрической канавки эхо-методом близка к выявляемости прямоугольной канавки при глубинах от длины волны и более; приемлемые для практики значения коэффициентов выявляемости обеспечиваются для трещиноподобных дефектов глубиной более $0,2\lambda$ и дефектов с гладким профилем глубиной более $0,6\lambda$.

Влияние ширины гладкого дефекта на его выявляемость иллюстрируется данными, представленными на рис. 8. Как видно, и при эхо-импульсном, и амплитудном теневом методах критически снижается выявляемость полуцилиндрических канавок, ширина которых превышает глубину на порядок и более.

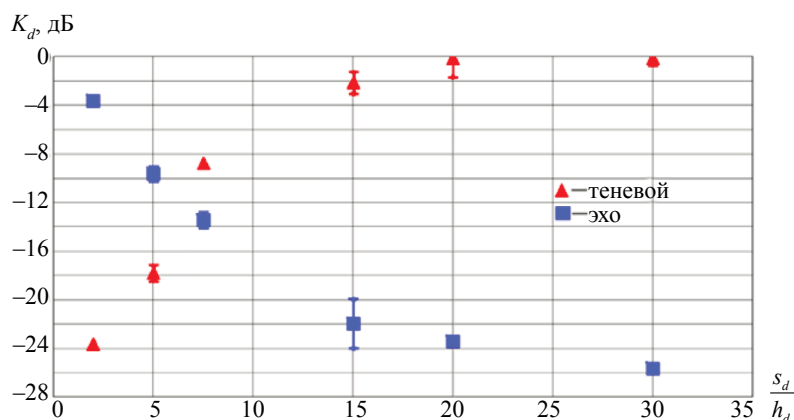


Рис. 8. Зависимость коэффициентов выявляемости при эхо- и теневом методах от относительной ширины полуцилиндрической канавки.

На основе выполненных исследований иммерсионного ультразвукового контроля поверхностными волнами:

обоснована возможность применения эхоимпульсного, а также амплитудного и временного вариантов теневого методов для иммерсионного контроля поверхностными волнами плоских и криволинейных (выпуклых и вогнутых) поверхностей изделий сложной формы поперечного сечения;

разработана методика комплексного применения методов и обоснованы требования к оборудованию иммерсионного ультразвукового контроля поверхностными волнами для выявления дефектов с гладким профилем и трещиноподобных поверхностных дефектов глубиной в доли длины волны;

создана установка NORDINSCAN-RAIL-S (рис. 9) компания «Нординкрафт» для автоматического иммерсионного ультразвукового контроля качества поверхности рельса, включающая много-

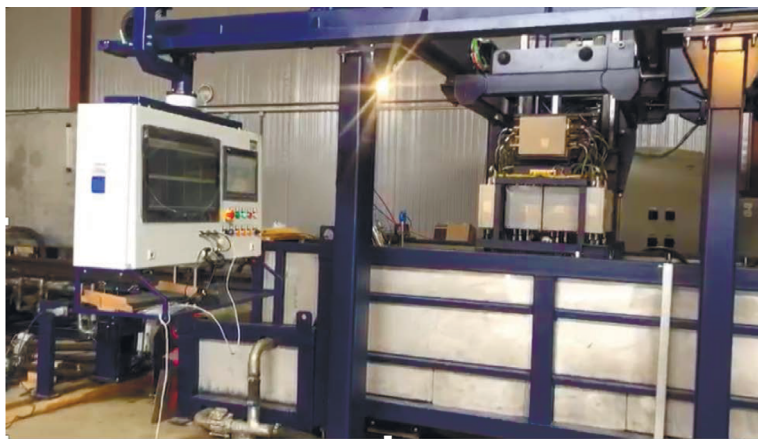


Рис. 9. Общий вид установки ультразвукового контроля качества поверхности рельса NORDINSCAN-RAIL-S (компания «Нординкрафт») в линии приемочного контроля рельсов металлургического предприятия.

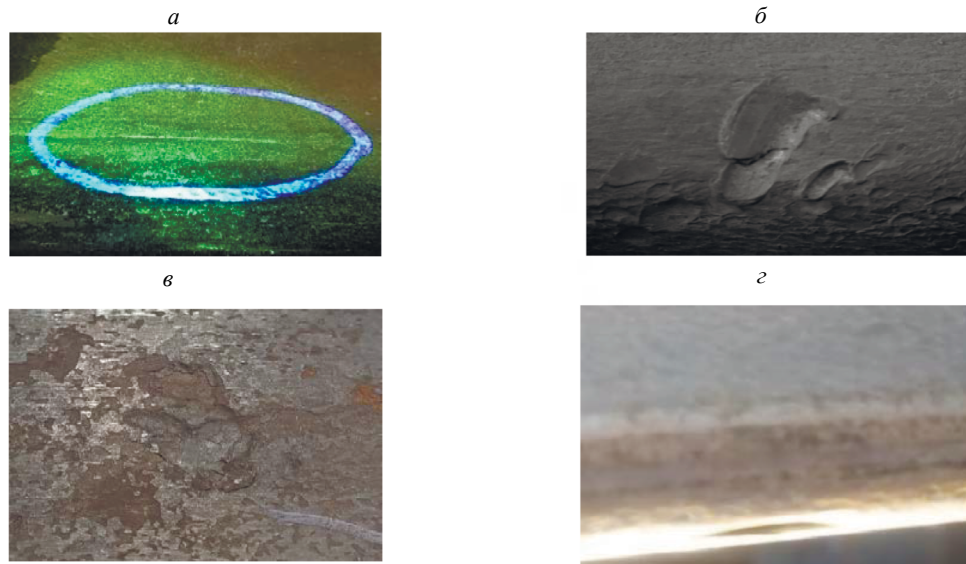


Рис. 10. Примеры недопустимых поверхностных металлургических дефектов рельсов, выявленных при иммерсионном контроле поверхностными волнами: риска протяженностью 30 мм вдоль направления прокатки на поверхности катания (а); отпечаток $\sim 12 \times 10$ мм глубиной 1,0 мм на поверхности катания головки (б); плена $\sim 12 \times 17$ мм глубиной 0,8 мм на подошве (в); трещина на кромке пера подошвы (з).

канальный дефектоскопический аппаратно-программный комплекс с блоками пьезоэлектрических фазированных антенных решеток [14] и позволяющая выполнять в потоке производства приемочный контроль железнодорожных рельсов и рельсового проката всех типов с целью выявления дефектов по всему периметру поверхности (в том числе в зонах, недоступных для вихретокового контроля).

На рис. 10 приведены примеры реальных дефектов (трещин, отпечатков, плен, раковин, рисок), выявленных с использованием описанной в статье методики и оборудования.

ВЫВОДЫ

Результаты представленных в статье исследований и их реализация при создании оборудования и технологии ультразвукового контроля рельсов с целью выявления поверхностных дефектов: сформировали методическую основу комплексного применения эхо-импульсного метода совместно с амплитудным и временным вариантами теневого метода иммерсионного контроля поверхностными волнами;

показали высокую чувствительность, повышенную помехозащищенность и дополнительные возможности контроля криволинейных поверхностей изделий сложной формы с использованием иммерсионной технологии применения поверхностных ультразвуковых волн;

расширили возможности применения ультразвуковых поверхностных волн для задач дефектоскопии при подводном положении объекта контроля и в иммерсионных технологиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупан А.В. Ультразвуковой контроль поверхностными волнами. М.: Спектр, 2014. 120 с.
2. Жостков Р.А. Восстановление неоднородностей среды при микросейсмическом зондировании вдоль криволинейной поверхности // Акустический журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 708—720.
3. Баев А.Р., Пантелеенко Ф.И., Захаренко В.В., Размыслович Г.И., Жаворонков К.Г., Гиль Н.Н. Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая граница акустического контакта // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9. № 1. С. 18—39.
4. Викторов И.А. Волны типа рэлеевских на цилиндрических поверхностях // Акустический журн. 1958. № 2. С. 131—136.
5. Викторов И.А., Грищенко Е.К., Каёкина Т.М. Исследование распространения ультразвуковых поверхностных волн на границе твердого тела с жидкостью // Акустический журн. 1963. № 2. С. 162—170.

6. *Викторов И.А.* К расчету фазовых скоростей поверхностных волн на границе твердого полупространства с жидким слоем // *Акустический журн.* 1977. № 6. С. 947—948.
7. *Никифоров Л.А., Харитонов А.В.* Возбуждение поверхностной волны ультразвуковым пучком на границе раздела жидкость—твердая среда // *Дефектоскопия.* 1973. № 3. С. 45—53.
8. *Викторов И.А., Зубова О.М.* О диаграммах направленности излучателей волн Лэмба и Рэлея // *Акустический журн.* 1963. № 2. С. 171—175.
9. *Викторов И.А.* О влиянии несовершенств поверхности на распространение рэлеевских волн // *ДАН СССР.* 1958. Т. 119. № 3. С. 463—465.
10. *Жарылкапов С.Ж., Крылов В.В.* Рассеяние волн Рэлея на выемке произвольной глубины // *Акустический журн.* 1987. № 5. С. 878—883.
11. *Данилов В.Н., Ямщиков В.С.* К вопросу о рассеянии поверхностных волн Рэлея на пограничных дефектах // *Акустический журн.* 1985. № 3. С. 323—327.
12. *Ахромеева И.Д., Крылов В.В.* Преобразование волн Рэлея в объемные на локальных дефектах поверхности // *Акустический журн.* 1977. № 4. С. 510—516.
13. *Дамаскин А.Л., Дымкин Г.Я., Костюк О.М.* Исследование акустического тракта при эхоимпульсном контроле поверхностными волнами // *Дефектоскопия.* 1991. № 2. С. 26—30.
14. *Кириков А.В., Дымкин Г.Я.* Устройство для иммерсионного ультразвукового контроля / Патент на изобретение № 2723913 от 21.02.2020 г.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВОГО МЕТОДА НА МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЯХ ПРИ КОНТРОЛЕ ПРУТКОВОГО ПРОКАТА

© 2022 г. О.В. Муравьева^{1,2,*}, А.Ф. Брестер¹, В.В. Муравьев^{1,2}

¹ Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова,
Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
E-mail: *pmkk@istu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2022; после доработки 04.07.2022
Принята к публикации 08.07.2022

Приведены результаты сравнения чувствительности к дефектам различных информативных параметров сигналов, полученных при реализации электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях. В качестве информативных параметров предложено использование статистических параметров сигналов во временной и спектральной областях. Показана однозначная связь большинства информативных параметров с обобщенной характеристикой дефекта, определяемой произведением глубины залегания дефекта на его диаметр. Показана возможность оценки обобщенной характеристики для выявленных естественных дефектов пруткового проката.

Ключевые слова: чувствительность, информативный параметр, дефект, прутковый прокат, электромагнитно-акустический преобразователь, многократный зеркально-теневого метод.

DOI: 10.31857/S0130308222080048, EDN: BQEKGO

ВВЕДЕНИЕ

Прутковый прокат широко применяется в различных сферах машиностроительных производств для изготовления ответственных деталей оборудования: болтовых и сварных конструкций, инструмента (инструментальные стали), пружин (рессорно-пружинные стали), насосных штанг, валов центробежных насосов (конструкционные углеродистые стали) и т.д. Появление различных типов дефектов пруткового проката возможно в процессе любого технологического цикла производства проката и ведет к их развитию при эксплуатации в условиях высоких нагрузок, под воздействием коррозионных сред, температурных градиентов и, как следствие, к выходу из строя оборудования [1—6].

Для выявления поверхностных дефектов проката преимущественное использование получили магнитные и вихретоковые методы, обеспеченные большим разнообразием автоматизированных установок контроля благодаря преимуществу бесконтактной работы [7—10]. Ограничения по глубине залегания выявляемых дефектов, невозможность выявления внутренних дефектов, а также влияние мешающих факторов (изменение магнитных и электрических свойств) ограничивают область использования указанных методов.

Ультразвуковые (УЗ) эхометоды, широко используемые для выявления внутренних дефектов, имеют ограничения применительно к контролю пруткового проката:

зависимость результатов дефектоскопии от качества акустического контакта с объектом контроля при использовании контактных (иммерсионных) пьезопреобразователей, особенно в случае горячекатаной поверхности объекта, а, следовательно, недостаточная воспроизводимость и достоверность контроля;

необходимость использования поступательно-вращательного движения объекта, а, следовательно, ограничение производительности контроля;

наличие мертвой зоны и сложность выявления дефектов произвольной ориентации;

невозможность контроля объектов малых диаметров в связи со сложностью обеспечения надежного акустического контакта пьезопреобразователя с цилиндрической поверхностью и необходимостью создания специализированных притертых преобразователей.

Использование эффектов волноводного распространения ультразвука [11—17] устраняет необходимость сканирования тела прутка, при этом имеются ограничения по минимальной длине прутка, обусловленные наличием мертвой зоны, недостаточная чувствительность к дефектам, протяженным вдоль всей длины прутка, низкая разрешающая способность.

Использование бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей [18—25] (ЭМАП) перспективно благодаря ряду преимуществ в сравнении с контактными пьезопреобразователями: возможность возбуждения—приема любых типов волн, в том числе поперечных горизонтальной поляризации; отсутствие требований по дополнительной обработке поверхностей; отсутствие износа преобразователей в процессе сканирования; возможность контроля объектов в условиях высоких температур и др.

Одним из перспективных подходов к контролю пруткового проката малого диаметра является использование зеркально-теневого метода на многократных отражениях, реализованного с использованием специализированных бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей проходного типа (для излучения—приема объемных волн) и ЭМА-преобразователей накладного типа (для излучения—приема рэлеевских волн) [26—29]. Метод позволяет отстроиться от качества акустического контакта, тем самым существенно повысить достоверность и воспроизводимость результатов контроля. Большинство традиционно используемых УЗ методов неразрушающего контроля (эхометод, зеркально-теневого и ряд других) в качестве информативного параметра используют амплитудный признак. Ввиду того, что амплитуда принятого сигнала в существенной мере зависит от стабильности акустического контакта, определяемого качеством контролируемой поверхности, его ухудшение может приводить как к недобраковке при использовании эхометодов, так и к перебраковке при использовании амплитудных теневых методов. Наряду с амплитудным в качестве информативных признаков сигналов УЗ методов также используют временные параметры (при определении координат дефектов), индикатрисы рассеяния (при оценке формы дефекта), пространственные и временные огибающие сигнала (при определении условных размеров дефекта) [30], спектральные характеристики сигналов [31—33], параметры структурного шума [34—35]. Имеются сведения об использовании для анализа сигналов методов фрактального анализа [36], интеллектуальных методов обработки сигналов в мультимасштабной области [37], методы восстановления формы дефекта с применением компьютерной томографии [38], методы голографа скорости [39], методы свертки и глубокого обучения [40—42] и др.

В работе [43] показано, что при реализации ЭМА зеркально-теневого метода на многократных отражениях в качестве информативных возможно использование статистических и спектральных параметров серии многократных отражений. Ввиду большой номенклатуры пруткового проката и изделий из него по сталям и сплавам и по диаметрам требуется обоснование обобщенных информативных параметров и критериев браковки.

Цель работы: оценка сравнительной чувствительности информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях во временной и спектральной областях для искусственных дефектов различной глубины и размера, и естественных дефектов пруткового проката различных диаметров и марок стали с целью обоснования обобщенных информативных параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Блок-схема и фото информационно-измерительной системы для реализации ЭМА зеркально-теневого метода на многократных отражениях показаны на рис. 1. Специализированный бесконтактный ЭМА-преобразователь проходного типа обеспечивает излучение—прием поперечных волн с осевой поляризацией во всех радиальных направлениях в поперечном сечении прутка.

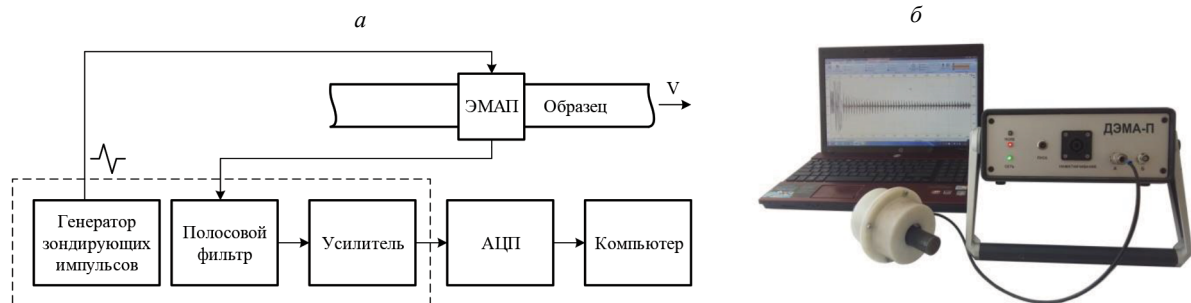


Рис. 1. Блок-схема (а) и фото (б) информационно-измерительной системы:

1 — генератор зондирующих импульсов; 2 — проходной ЭМА преобразователь; 3 — исследуемый образец прутка; 4 — полосовой фильтр; 5 — высокочастотный усилитель; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — персональный компьютер с программным обеспечением ПРИНЦ.

Результатом измерений являются осциллограммы серии многократных отражений УЗ волны по диаметру образца. Информационно-измерительная система обеспечена специализированным программным обеспечением, позволяющим управлять настройками измерений, осуществлять фильтрацию, потенцирование, интерполяцию регистрируемых сигналов, реализующим методы корреляции сигналов, пакетного анализа данных, накопление и сохранение результатов контроля в компьютере в расширениях, доступных для дальнейшей обработки, и другими функциональными возможностями. Основные характеристики информационно-измерительной системы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики информационно-измерительной системы

Характеристика	Значение
Контролируемые диаметры, мм	7—50
Погрешность измерения времени (определения диаметра и скорости)	0,05 %
Диапазон рабочих частот, МГц	0,5—5
Амплитуда зондирующего импульса, кВ	1,5
Коэффициент усиления	80 дБ
Уровень шумов в рабочей полосе частот, мкВ	50
Частота дискретизации, МГц	500
Разрядность АЦП	8-битный

В качестве настроечного образца для обоснования информативных параметров метода использован прутки из стали 03Х14Н7Б диаметром $D = 22$ мм с нанесенными искусственными дефектами в виде плоскодонных отверстий радиального направления диаметрами d , равными 1,5 и 3 мм, с различной глубиной залегания h (рис. 2).

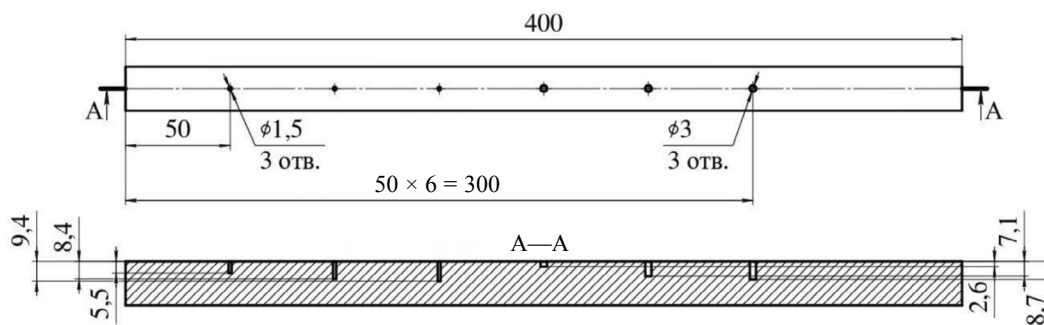


Рис. 2. Образец с плоскодонными отверстиями.

Результатом измерений являются осциллограммы серии многократных отражений волны по диаметру образца. В качестве примера на рис. 3 представлены серии импульсов сигналов, полученных при регистрации серии многократных переотражений поперечных волн для бездефектной части образца и для областей с искусственными дефектами различных диаметров и глубины залегания. Видно, что осциллограммы характеризуется резким ослаблением серии многократных отражений и сокращением времени реверберации для участков образца с дефектами. Ввиду того, что проходной ЭМА-преобразователь формирует акустические волны с фокусировкой по центру, ослабление сигнала существенно зависит не только от размера дефекта, но и от положения дефекта относительно центра цилиндрического образца (увеличивается с приближением дефекта к центру образца). Указанные эффекты характеризуют и зеркально-теневой метод контроля листов, где увеличение глубины залегания дефекта, ведет к уменьшению коэффициента выявляемости. Отметим,

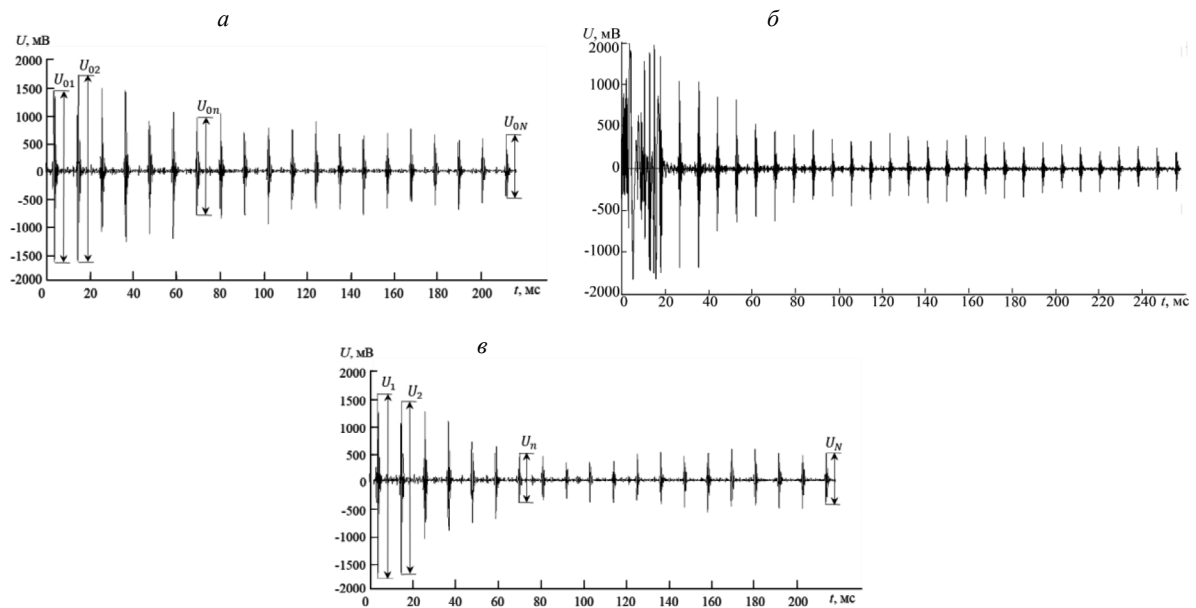


Рис. 3. Осциллограммы отраженных сигналов для бездефектного участка (а); для участка с искусственным дефектом диаметром $d = 1,5$ мм с глубиной залегания $h = 8,4$ мм (б); для участка с искусственным дефектом диаметром $d = 3$ мм с глубиной залегания $h = 8,7$ мм (в).

что для поверхностных дефектов дополнительное ослабление серии многократных отражений обусловлено также снижением эффективности ЭМА-преобразования ввиду искажения траектории вихревых токов и линий магнитного поля в области дефекта.

С целью учета совместного влияния диаметра дефекта d и глубины его залегания h на ослабление серии импульсов многократных отражений введем понятие обобщенной характеристики дефекта G , определяемой произведением dh , и безразмерной обобщенной характеристики дефекта G_n , пронормированной на квадрат радиуса объекта:

$$G = dh, \quad G_n = \frac{dh}{r^2}. \quad (1)$$

Исследованы следующие статистические характеристики осциллограмм серии многократных отражений, представляемых в виде последовательности данных в массиве x_n , определяемых диаметром объекта D и числом анализируемых отражений N : математическое ожидание M_x , дисперсия D_x , среднеквадратическое отклонение σ_x , асимметрия S_x и эксцесс E_x .

С целью возможности сравнительной оценки результатов контроля прутков различных диаметров размер анализируемого массива менялся пропорционально диаметру исследуемого прутка и включал количество отражений N , равное 20. Во избежание влияния на результаты анализа зондирующего импульса, соответствующий ему интервал времени удалялся из анализируемого массива.

Также рассчитывался многократный коэффициент выявляемости K_N во временной области (аналог коэффициента выявляемости при зеркально-теновом методе), определяемый формулой:

$$K = \sum_{n=1}^N K_n = \sum_{n=1}^N (U_{0n} - U_n) / U_{0n}, \quad (2)$$

где U_{0n} — значение амплитуды импульса при каждом n -м отражении для бездефектной области образца (опорный сигнал); U_n — значение амплитуды импульса при каждом n -ом отражении для области с дефектом; N — количество анализируемых отражений (см. рис. 3).

Величина K не может превышать значения, соответствующего общему количеству анализируемых эхоимпульсов. Величина K , принимающая значения меньше либо равные нулю, соответствует бездефектной области. Максимальное значение K соответствует наиболее дефектному участку.

С целью отстройки от эффективности ЭМА-преобразования, определяемого маркой стали, конструктивными зазорами между ЭМА-преобразователем и объектом контроля, каждая статистиче-

ская характеристика C_d для дефектной области прутка была пронормирована относительно аналогичной характеристики C_0 для бездефектного участка:

$$C_n = \frac{C_d}{C_0}, \quad (3)$$

где C_n — нормированное значение статистической характеристики.

Нормированный коэффициент выявляемости определялся с использованием формулы

$$K_n = 1 - \frac{K}{N}. \quad (4)$$

С целью увеличения отношения «сигнал—шум» в области отсутствия отраженных сигналов при недостаточной эффективности ЭМА-преобразования использована также операция возведения массива данных исходного сигнала в квадрат, что позволило уменьшить влияние на результаты анализа уровня шумов и помех (рис. 4).

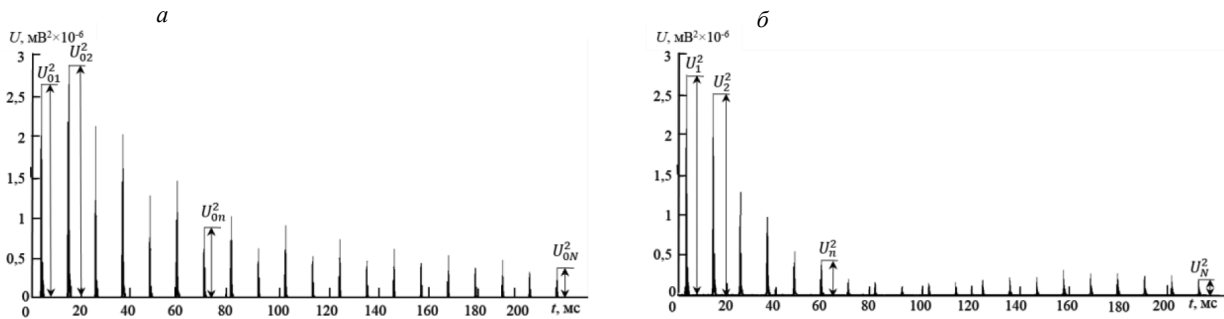


Рис. 4. Осциллограммы сигнала, возведенного в квадрат, для бездефектной области (а) и области с дефектом $d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм (б).

Дополнительно проведен спектральный анализ полученных сигналов методом дискретного преобразования Фурье с использованием программного обеспечения WinПОС на массиве данных с количеством отсчетов, соответствующих 20 отражениям. Вид амплитудных спектров сигналов для бездефектной области и области с искусственным дефектом представлены на рис. 5.

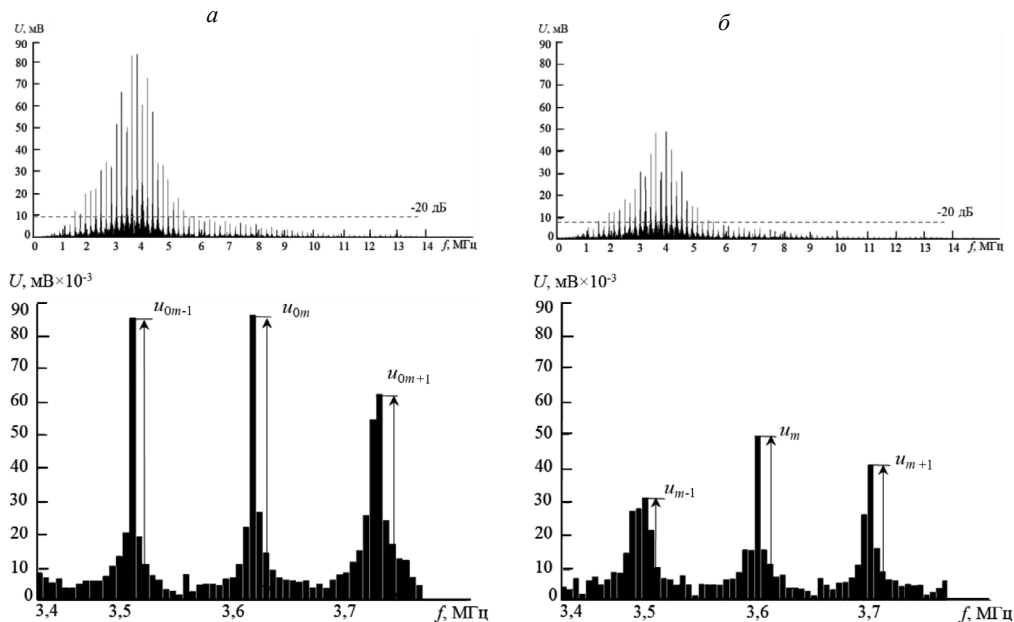


Рис. 5. Спектральная плотность исходного сигнала для бездефектной области (а) и области с дефектом $d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм (б).

Спектр исходного сигнала представляется совокупностью отдельных гармоник, следующих с определенной периодичностью Δf , определяемой диаметром D объекта и скоростью C ультразвуковой волны:

$$C_i = D \cdot \Delta f. \quad (5)$$

Спектральной гармонике с максимальной амплитудой соответствует основная резонансная частота УЗ импульса (3,7 МГц). Бездефектная область образца характеризуется высокой амплитудой спектральной составляющей на частоте резонанса (84 мВ) и достаточно равномерным распределением по амплитуде отдельных спектральных составляющих в полосе спектра $\Delta f = 3,9$ МГц (по уровню 20 дБ). Для участка образца с дефектами наблюдается уменьшение спектральной составляющей на частоте резонанса (48 мВ), большей неравномерностью в распределении амплитуд отдельных спектральных составляющих и расширением полосы спектра ($\Delta f = 4,2$ МГц по уровню 20 дБ).

Для спектральных характеристик сигналов, представляемых в виде последовательности отсчетов по частоте f , были рассчитаны аналогичные статистические характеристики (математическое ожидание M_{ns} , дисперсия D_{ns} , среднеквадратическое отклонение σ_{ns} , асимметрия S_{ns} , и эксцесс E_{ns}). Количество спектральных линий при расчетах ограничено уровнем -20 дБ относительно максимума спектральной плотности (см. рис. 5).

Формула для многократного спектрального коэффициента выявляемости K_s аналогична формуле для коэффициента выявляемости во временной области:

$$K_s = \sum_{m=1}^M K_m = \sum_{m=1}^M (u_{0m} - u_m) / u_{0m}, \quad (6)$$

где u_{0m} — значение амплитуды m -ой спектральной линии для бездефектной области образца (опорный сигнал); u_m — значение амплитуды m -ой спектральной линии для области с дефектом; M — количество анализируемых спектральных линий (см. рис. 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нормированные значения информативных параметров сигналов (статистические характеристики и коэффициент выявляемости) во временной и спектральной областях для областей образца с искусственными дефектами приведены в табл. 2. Здесь и далее информативные параметры для исходного сигнала обозначены цифрой «1», для спектра исходного сигнала — цифрой «2», для сигнала, возведенного в квадрат, и его спектра — цифрами «3» и «4» соответственно. Значения параметров упорядочены в порядке увеличения обобщенной характеристики дефекта G .

Видно, что для исходного сигнала параметры дисперсии D_n , среднеквадратического отклонения σ_n , асимметрии S_n и коэффициента выявляемости K_n характеризуются однозначной зависимостью от обобщенной характеристики дефекта G , определяемой линейными линиями тренда с высокими значениями коэффициентов достоверности аппроксимации R^2 (от 0,88 до 0,95). При этом для спектра сигнала высокие значения коэффициента R^2 имеют параметры математического ожидания M_n , дисперсии D_n и среднеквадратического отклонения σ_n . Низкими значениями коэффициента R^2 для исходного сигнала характеризуются зависимости от обобщенной характеристики дефекта G информативных параметров математического ожидания M_n и эксцесса E_n ; для спектра исходного сигнала — асимметрии S_n , эксцесса E_n и коэффициента выявляемости K_n . Следует отметить, что для сигнала, возведенного в квадрат, и для его спектра практически все зависимости параметров от обобщенной характеристики дефекта характеризуются высокими значениями достоверности аппроксимации — от 0,7 до 0,96.

Зависимости нормированных значений каждого из исследованных параметров для исходного сигнала (кривая 1), спектра исходного сигнала (кривая 2), сигнала, возведенного в квадрат (кривая 3), и спектра сигнала, возведенного в квадрат (кривая 4), от обобщенной характеристики дефекта G представлены на рис. 6. Видно, что большинство исследованных параметров с увеличением обобщенной характеристики дефекта G имеет тенденцию к уменьшению. Исключением являются зависимости коэффициента выявляемости исходного сигнала и сигнала, возведенного в квадрат, что согласуется с его определением (см. формулу (1)).

Введем понятие чувствительности γ_{C_n} к обобщенному размеру дефекта данного информативного параметра, определяемой тангенсом угла наклона линии тренда для данного информативного параметра к оси абсцисс:

Таблица 2

Нормированные значения статистических параметров сигналов при различных значениях обобщенной характеристики дефекта G , коэффициент достоверности аппроксимации R^2 , чувствительность к обобщенной характеристике

Обобщенная характеристика дефекта G_n / G , мм ²	Математическое ожидание M_n	Дисперсия D_n	Среднеквадратическое отклонение σ_n	Асимметрия S_n	Экцесс E_n	Коэффициент выявляемости
1 — Исходный сигнал						
0 (бездефектный участок)	1	1	1	1	1	1
0,064 / 7,8 ($d = 3$ мм, $h = 2,6$ мм)	1,027	0,647	0,804	-0,535	1,581	0,701
0,068 / 8,25 ($d = 1,5$ мм, $h = 5,5$ мм)	1,004	0,628	0,792	-1,894	1,531	0,717
0,104 / 12,6 ($d = 1,5$ мм, $h = 8,4$ мм)	1,019	0,571	0,756	-3,466	1,540	0,706
0,117 / 14,1 ($d = 1,5$ мм, $h = 9,4$ мм)	1,023	0,444	0,667	-5,722	1,513	0,645
0,176 / 21,3 ($d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм)	1,023	0,399	0,632	-5,529	1,845	0,564
0,216 / 26,1 ($d = 3$ мм, $h = 8,7$ мм)	1,018	0,272	0,522	-9,074	1,622	0,496
R^2	0,30	0,91	0,95	0,92	0,60	0,88
Чувствительность γ_{C_n} , 1/мм ²	0,077	3,08	2,05	45,7	2,74	2,07
2 — Спектр исходного сигнала						
0 (бездефектный участок)	0,891	0,626	0,791	0,849	0,752	0,878
0,064 / 7,8 ($d = 3$ мм, $h = 2,6$ мм)	0,891	0,601	0,775	0,871	0,804	0,781
0,068 / 8,25 ($d = 1,5$ мм, $h = 5,5$ мм)	0,858	0,544	0,737	0,872	0,815	0,733
0,104 / 12,6 ($d = 1,5$ мм, $h = 8,4$ мм)	0,766	0,416	0,645	0,870	0,825	0,671
0,117 / 14,1 ($d = 1,5$ мм, $h = 9,4$ мм)	0,752	0,367	0,606	0,792	0,686	0,785
0,176 / 21,3 ($d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм)	0,613	0,254	0,504	0,863	0,811	0,536
0,216 / 26,1 ($d = 3$ мм, $h = 8,7$ мм)	0,94	0,90	0,95	0,50	0,39	0,73
Чувствительность γ_{C_n} , 1/мм ²	1,68	3,16	2,14	0,610	0,829	1,74
3 — Сигнал, возведенный в квадрат						
0 (бездефектный участок)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,064 / 7,8 ($d = 3$ мм, $h = 2,6$ мм)	0,647	0,643	0,802	1,262	1,517	0,530
0,068 / 8,25 ($d = 1,5$ мм, $h = 5,5$ мм)	0,628	0,588	0,767	1,310	1,660	0,556
0,104 / 12,6 ($d = 1,5$ мм, $h = 8,4$ мм)	0,571	0,488	0,699	1,360	1,810	0,536
0,117 / 14,1 ($d = 1,5$ мм, $h = 9,4$ мм)	0,444	0,291	0,539	1,468	2,159	0,455
0,176 / 21,3 ($d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм)	0,399	0,284	0,533	1,485	2,133	0,359
0,216 / 26,1 ($d = 3$ мм, $h = 8,7$ мм)	0,272	0,117	0,342	1,566	2,492	0,275
R^2	0,91	0,91	0,94	0,89	0,92	0,83
Чувствительность γ_{C_n} , 1/мм ²	3,08	3,87	2,90	2,445	6,51	2,91
4 — Спектр сигнала, возведенного в квадрат						
0 (бездефектный участок)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,064 / 7,8 ($d = 3$ мм, $h = 2,6$ мм)	0,865	0,645	0,803	0,819	0,645	0,647
0,068 / 8,25 ($d = 1,5$ мм, $h = 5,5$ мм)	0,842	0,590	0,768	0,796	0,616	0,640
0,104 / 12,6 ($d = 1,5$ мм, $h = 8,4$ мм)	0,788	0,489	0,700	0,771	0,583	0,623
0,117 / 14,1 ($d = 1,5$ мм, $h = 9,4$ мм)	0,627	0,291	0,539	0,724	0,521	0,451
0,176 / 21,3 ($d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм)	0,587	0,285	0,533	0,718	0,491	0,392
0,216 / 26,1 ($d = 3$ мм, $h = 8,7$ мм)	0,382	0,117	0,342	0,701	0,489	0,263
R^2	0,95	0,91	0,94	0,78	0,72	0,92
Чувствительность γ_{C_n} , 1/мм ²	2,79	3,87	2,90	1,25	2,09	3,15

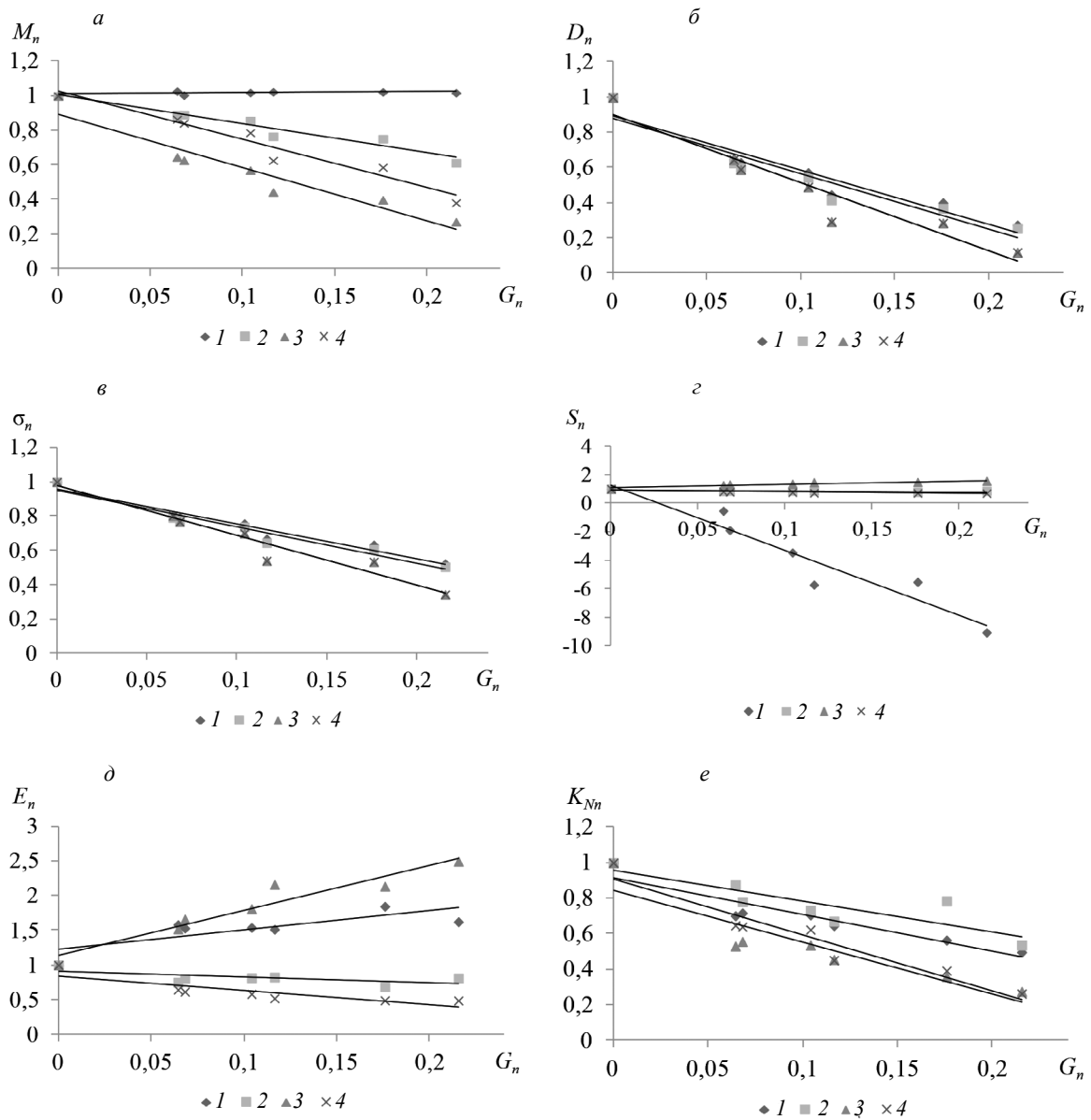


Рис. 6. Зависимости нормированных значений параметров «математическое ожидание» M_n (а), «дисперсия» D_n (б), «среднеквадратическое отклонение» σ_n (в), «асимметрия» S_n (г), «эксцесс» E_n (д), «коэффициент выявляемости» (е) от обобщенной характеристики дефекта G : 1— исходный сигнал; 2 — спектр исходного сигнала; 3 — сигнал, возведенный в квадрат; 4 — спектр сигнала, возведенного в квадрат.

$$\gamma_{c_n} = \frac{C_{n \max} - C_{n \min}}{G_{\max}}, \quad (7)$$

где $C_{n \max}$ и $C_{n \min}$ — максимальное и минимальное значения нормированных параметров; G_{\max} — максимальное по модулю значение обобщенной характеристики дефекта.

Рис. 7 представляет гистограммы сравнительной чувствительности к обобщенной характеристике дефекта каждого из исследованных параметров, выраженных в дБ. Видно, что наихудшей чувствительностью обладает параметр «математическое ожидание» M_n для исходного сигнала (−64 дБ), ему же соответствует минимальный коэффициент достоверности аппроксимации (0,3). В случае анализа исходного сигнала наилучшую чувствительность к обобщенной характеристике дефекта имеет параметр «асимметрия» S_n (−8 дБ), а остальные параметры находятся в диапазоне

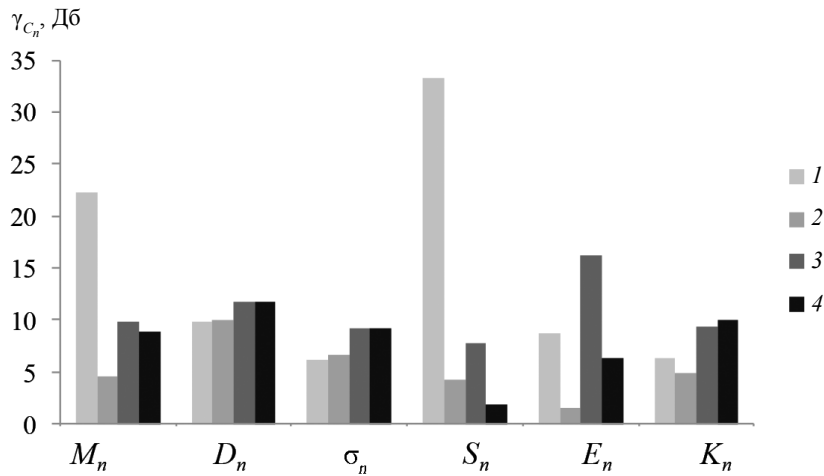


Рис. 7. Сравнительная чувствительность к обобщенной характеристике дефекта параметров сигналов: 1 — исходный сигнал; 2 — спектр исходного сигнала; 3 — сигнал, возведенный в квадрат; 4 — спектр сигнала, возведенного в квадрат.

31—35 дБ. В случае анализа сигнала, возведенного в квадрат, чувствительность для большинства характеристик соизмерима между собой и выше значений для аналогичных параметров исходного сигнала (25—33 дБ). При анализе спектральных параметров сигналов диапазон чувствительности исследованных параметров составляет 31—46 дБ для спектра исходного сигнала и 30—40 дБ для спектра сигнала, возведенного в квадрат.

Анализ информативных параметров показывает, что параметр дисперсии является наиболее устойчивым с точки зрения наиболее достоверной корреляции с обобщенной характеристикой дефекта, наиболее высокой чувствительности с наибольшей равномерностью при анализе сигналов и их спектров.

Предложенный подход использован для анализа информативных параметров и оценки обобщенных характеристик естественных дефектов, выявленных с использованием зеркально-теневого метода на многократных отражениях [44]. Исследовались прутки рессорно-пружинных сталей, используемые при производстве пружин на НПЦ «Пружина», диаметрами от 10 до 30 мм различных производителей (ОАО «Ижсталь», ЗАО «ЗМЗ», ЗАО «ОМЗ», ОАО «СеверстальМетиз») с различными видами обработки проката (горячекатаный, горячекатаный с обточенной или шлифованной поверхностью, калиброванный, прокат со специальной отделкой поверхности). Металлопрокат должен соответствовать ГОСТ 14959—79 «Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали», согласно которому «на поверхности прутков не допускаются дефекты в виде раскатанных пузырей, прокатных плен, закатов, раскатанных загрязнений, рябизны, закатанной окалины, трещин напряжения».

Выявленные в процессе сканирования участки прутков с дефектами, где наблюдалось максимальное ослабление серии отражений, были подтверждены визуально (поверхностные дефекты) и металлографическими исследованиями (внутренние дефекты). Обнаруженные дефекты классифицировались в соответствии с ГОСТ 1778—70 и ГОСТ 21014—88. Фото и результаты металлографии некоторых из выявленных дефектов представлены на рис. 8, описание образцов приведено в табл. 3.

В отличие от традиционного эхометода ультразвукового контроля, с использованием многократного зеркально-теневого метода выявляются внутренние дефекты, минимальные размеры составляют десятые доли от длины акустической волны. Высокая чувствительность объясняется меньшими потерями энергии при распространении акустической волны за счет расхождения волны только в одном направлении по образующей прутка при фокусировке в поперечном сечении.

Для сигналов, полученных в зонах обнаруженных естественных дефектов, были рассчитаны статистические параметры (см. табл. 4). С использованием расчетной чувствительности каждого из параметров для модельных дефектов в предположении линейного характера зависимости оценены обобщенные характеристики выявленных дефектов. В табл. 5 представлены результаты расчета обобщенных характеристик естественных дефектов с использованием различных информативных параметров, ранжированные в порядке их увеличения для наиболее информативного параметра

Таблица 3

Результаты металлографических исследований выявленных дефектных участков

# образца	Диаметр прутка, мм	Марка стали	Результаты металлографических исследований и визуального контроля
# 1	Ø25	60С2А	Трещина
# 2	Ø30	60С2ХФА	Неметаллические включения «оксиды точечные» округлой 0,12×0,12 мм и неправильной формы, вытянутые по направлению волокна длиной 1 мм
# 3	Ø25	60С2А	Закат
# 4	Ø21	60С2ХФА	Единичное неметаллическое включение округлой формы 0,15×0,15 мм «силикат недеформирующийся»
# 5	Ø11,75	60С2Г	Прокатная плена глубиной залегания 0,05—0,13 мм
# 6	Ø24	60С2А	Неметаллические включения мелких зерен, расположенных в виде строчек, «оксиды строчечные»
# 7	Ø25	60С2А	Раковина
# 8	Ø12	60С2А	Дефекты поверхности в виде трещин с обезуглероженными стенками и разветвленными концами глубиной залегания 0,05—0,13 мм «раскатанный пузырь»; «закат»; «раскатанная трещина»

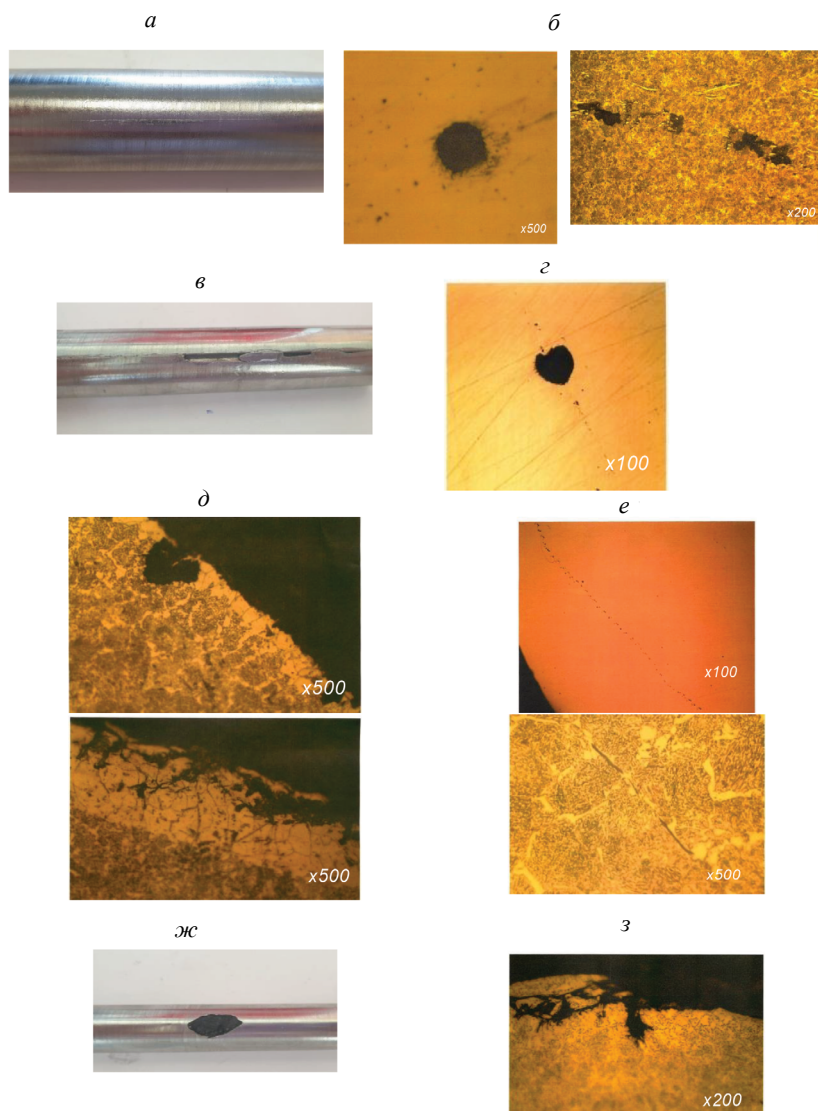


Рис. 8. Фото и результаты металлографии некоторых из выявленных дефектов:
 а — образец #1; б — образец #2; в — образец #3; г — образец #4; д — образец #5; е — образец #6; ж — образец #7; з — образец #8.

Таблица 4

Нормированные значения статистических параметров сигналов для естественных дефектов

Тип естественного дефекта (#)	M_n	D_n	σ_n	S_n	E_n	K_n
1 — Исходный сигнал						
Трещина (# 1)	1,025	0,789	0,888	0,780	1,274	0,827
Оксиды точечные (# 2)	0,786	0,711	0,843	-0,386	1,465	0,646
Закат (# 3)	1,044	0,675	0,822	1,384	0,924	0,761
Силикат недеформирующийся (# 4)	1,299	0,651	0,807	1,323	0,809	0,581
Прокатная плена (# 5)	1,693	0,553	0,744	0,472	0,617	0,671
Оксиды строчечные (# 6)	0,787	0,436	0,660	-11,041	0,657	0,501
Раковина (# 7)	0,914	0,313	0,560	5,675	0,861	0,506
Раскатанный пузырь (# 8)	0,965	0,234	0,484	5,965	1,354	0,335
2 — Спектр исходного сигнала						
Трещина (# 1)	0,908	0,788	0,888	0,979	0,964	0,916
Оксиды точечные (# 2)	0,965	0,709	0,842	0,730	0,539	0,455
Закат (# 3)	0,858	0,675	0,822	1,019	1,021	0,777
Силикат недеформирующийся (# 4)	0,913	0,595	0,771	0,620	0,406	0,512
Прокатная плена (# 5)	0,870	0,529	0,727	0,954	1,014	0,667
Оксиды строчечные (# 6)	0,911	0,403	0,634	0,489	0,271	0,424
Раковина (# 7)	0,590	0,313	0,560	0,903	0,798	0,609
Раскатанный пузырь (# 8)	0,646	0,226	0,475	0,632	0,442	0,475
3 — Сигнал, возведенный в квадрат						
Трещина (# 1)	0,792	0,810	0,900	1,320	1,731	0,728
Оксиды точечные (# 2)	0,711	0,749	0,865	1,285	1,547	0,125
Закат (# 3)	0,682	0,419	0,648	1,061	1,174	0,585
Силикат недеформирующийся (# 4)	0,651	0,338	0,582	1,359	1,835	0,247
Прокатная плена (# 5)	0,553	0,177	0,421	0,995	1,082	0,420
Оксиды строчечные (# 6)	0,436	0,122	0,349	2,029	4,534	0,312
Раковина (# 7)	0,321	0,083	0,289	0,988	0,995	0,293
Раскатанный пузырь (# 8)	0,234	0,076	0,275	1,544	2,269	0,118
4 — Спектр сигнала, возведенного в квадрат						
Трещина (# 1)	0,918	0,810	0,900	0,974	0,945	0,938
Оксиды точечные (# 2)	0,944	0,728	0,853	0,780	0,623	0,495
Закат (# 3)	0,685	0,419	0,647	1,005	1,003	0,636
Силикат недеформирующийся (# 4)	0,659	0,307	0,554	0,560	0,346	0,455
Прокатная плена (# 5)	0,486	0,172	0,415	0,929	0,939	0,404
Оксиды строчечные (# 6)	0,368	0,060	0,245	0,446	0,324	0,154
Раковина (# 7)	0,288	0,083	0,289	0,957	0,917	0,349
Раскатанный пузырь (# 8)	0,356	0,070	0,264	0,607	0,417	0,225

Таблица 5

Результаты расчета обобщенных характеристик естественных дефектов с использованием различных информативных параметров

# естественного дефекта	$G, \text{мм}^2$					
	M_n	D_n	σ_n	S_n	E_n	K_n
1 — Исходный сигнал						
Трещина (# 1)	104	2,14	2,00	1,30	-3,12	4,60
Оксиды точечные (# 2)	-35,0	5,33	5,27	1,65	-2,64	6,25
Закат (# 3)	19,4	7,39	7,96	-3,55	-1,60	9,61
Силикат недеформирующийся (# 4)	-545	11,4	10,6	-0,19	22,0	22,9
Прокатная плена (# 5)	-981	12,2	11,5	1,91	24,60	12,8
Оксиды строчечные (# 6)	-106	15,9	14,9	-0,59	24,9	16,3
Раковина (# 7)	448	23,2	22,6	42,1	32,6	30,9
Раскатанный пузырь (# 8)	191	29,4	30,3	-15,1	20,9	30,5
2 — Спектр исходного сигнала						
Трещина (# 1)	0,822	1,95	1,82	-12,3	15,8	10,3
Оксиды точечные (# 2)	8,83	4,55	4,56	10,3	-11,9	3,44
Закат (# 3)	7,34	7,15	7,67	-17,4	19,2	9,50
Силикат недеформирующийся (# 4)	8,74	12,2	11,5	2,75	-15,2	18,2
Прокатная плена (# 5)	7,77	13,0	12,0	-75,2	86,5	36,5
Оксиды строчечные (# 6)	19,4	14,6	13,5	29,7	-32,7	23,0
Раковина (# 7)	8,59	23,6	23,1	-115	119	47,6
Раскатанный пузырь (# 8)	38,5	28,0	28,6	-9,14	19,6	31,0
3 — Сигнал, возведенный в квадрат						
Трещина (# 1)	2,14	1,40	1,39	-2,86	-2,29	8,84
Оксиды точечные (# 2)	5,18	3,64	4,18	-14,7	-14,4	5,99
Закат (# 3)	7,38	7,36	8,36	-6,42	-6,03	8,56
Силикат недеформирующийся (# 4)	12,2	20,6	21,2	4,34	0,830	15,9
Прокатная плена (# 5)	11,4	20,9	19,6	-15,8	-15,6	29,3
Оксиды строчечные (# 6)	15,5	27,9	25,6	2,73	-1,47	19,7
Раковина (# 7)	23,2	31,4	33,9	-60,2	-81,6	28,4
Раскатанный пузырь (# 8)	29,1	32,9	37,1	6,58	3,28	29,4
4 — Спектр сигнала, возведенного в квадрат						
Трещина (# 1)	1,05	1,60	1,55	-4,13	3,79	4,74
Оксиды точечные (# 2)	5,96	3,64	4,21	6,48	-7,69	-1,48
Закат (# 3)	8,27	7,41	8,50	-8,74	7,04	7,50
Силикат недеформирующийся (# 4)	21,3	20,7	21,4	0,547	-5,08	17,7
Прокатная плена (# 5)	18,8	22,1	21,0	-41,8	34,3	20,8
Оксиды строчечные (# 6)	27,4	27,9	25,7	14,9	-17,3	19,5
Раковина (# 7)	36,7	33,9	39,5	-59,7	38,8	37,5
Раскатанный пузырь (# 8)	41,2	32,9	37,1	4,27	-5,56	27,8

«дисперсия». Анализ результатов оценки обобщенных характеристик естественных дефектов показал, что параметры математического ожидания, асимметрии и эксцесса для анализируемых сигналов и их спектров дают при расчете отрицательные значения обобщенной характеристики для некоторых видов дефектов, в отличие от модельных дефектов, для которых параметры асимметрии и эксцесса имеют однозначную связь с обобщенной характеристикой. В связи с этим указанные параметры не могут рассматриваться в качестве информативных при формировании браковочных критериев и расчете обобщенной характеристики дефекта G .

Анализ параметров дисперсия и среднеквадратическое отклонение дают близкие по значениям обобщенные характеристики.

На рис. 9 в качестве примера представлены значения обобщенной характеристики дефекта G , определенной с использованием наиболее информативных параметров дисперсии и коэффициента выявляемости, как имеющих наиболее высокую чувствительность и наибольший коэффициент достоверности аппроксимации R^2 . Видно, что минимальные значения обобщенной характеристики имеют поверхностные трещины (дефекты #1, #8) и внутренние дефекты малых размеров (#2), большие значения соответствуют грубым поверхностным дефектам (дефекты #3, #7), а также скоплению металлических включений (#6). Указанные закономерности соответствуют представлениям о формировании акустического поля проходного ЭМА-преобразователя с фокусировкой по центру и уменьшением амплитуды смещений на поверхности [44].

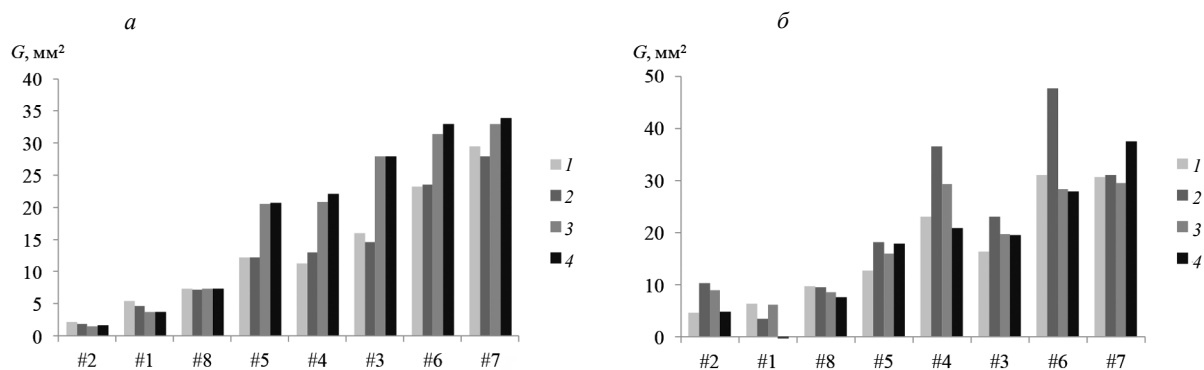


Рис. 9. Значения обобщенной характеристики дефекта G , определенной с использованием параметра дисперсии (а) и коэффициента выявляемости (б):

1 — исходный сигнал; 2 — спектр исходного сигнала; 3 — сигнал, возведенный в квадрат; 4 — спектр сигнала, возведенного в квадрат.

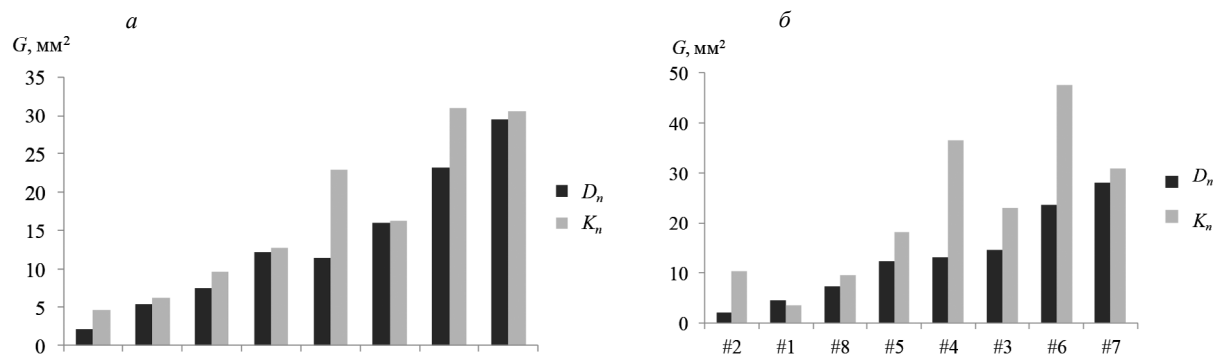


Рис. 10. Значения обобщенной характеристики дефекта G , определенной с использованием параметров дисперсии и коэффициента выявляемости:

исходный сигнал (а); спектр исходного сигнала (б).

Значения рассчитанных обобщенных характеристик выявленных естественных дефектов от 2 до 30 мм² в случае анализа дисперсии и от 5 до 50 мм² в случае анализа коэффициента выявляемости, в целом, коррелируют между собой. Обнаруженные дефекты соизмеримы по своим обобщенным характеристикам модельным дефектам со значениями G_n от 8 до 26 мм² (см. табл. 5).

В случае анализа параметра дисперсии более высокую чувствительность к дефектам с малыми значениями обобщенной характеристики имеет место при анализе исходного сигнала и его спектра. Параметр «коэффициент выявляемости» для большинства естественных дефектов дает более высокое значение обобщенной характеристики для малых дефектов и, следовательно, имеет более высокую чувствительность (рис. 10).

ВЫВОДЫ

1. Для описания искусственных дефектов прутков при реализации зеркально-теневого метода на многократных отражениях предлагается использовать обобщенную характеристику, определяемую произведением глубины залегания дефекта на его диаметр, пронормированную на квадрат радиуса объекта.

2. В качестве информативных параметров предложено использование следующих статистических параметров серии многократных переотражений: математическое ожидание, дисперсия, эксцесс, асимметрия S_n , эксцесса E_n , а также коэффициент выявляемости при анализе сигналов во временной и спектральной областях.

3. Анализ информативных параметров показывает, что нормированные параметры дисперсии и коэффициента выявляемости обладают наиболее достоверной корреляцией с обобщенной характеристикой дефекта и наиболее высокой чувствительностью при анализе сигналов и их спектров.

4. Параметр коэффициент выявляемости для большинства естественных дефектов дает более высокое значение обобщенной характеристики для дефектов с малой обобщенной характеристикой и, следовательно, имеет более высокую чувствительность.

5. Минимальные значения обобщенной характеристики имеют поверхностные трещины и внутренние дефекты малых размеров; большие значения соответствуют грубым поверхностным дефектам и также дефекту, распределенному по внутреннему периметру прутка (скопление металлических включений).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А., Нуждина Т.В., Гончарова Д.А. Подготовка перлитных сталей для холодной штамповки // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 38—42. DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-11-38-42
2. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А., Матвеев Ю.И., Деев В.Б. Оценка качества стального проката для холодной объемной штамповки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 7. С. 551—556. DOI 10.17073/0368-0797-2018-7-551-556
3. Науменко В.В., Мунтин А.В., Даниленко А.В., Баранова О.А. Исследование природы образования поверхностных дефектов горячекатаного проката в прикромочной зоне // Сталь. 2020. № 1. С. 40—45.
4. Жуков Д.В., Белов М.Л. Способы выявления специфических дефектов в сталях с высокой обрабатываемостью резанием // Сталь. 2018. № 8. С. 37—39.
5. Ding H., Zhang A. B., Qi D. T., Li H. B., Qi G. Q., Ding N., Bai Z. Q., Fan L., Ge P. L. Failure analysis of a sucker rod fracture in an oilfield // Engineering Failure Analysis. 2020. V. 109. P. 104300. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104300>
6. Khlybov O.S., Khrameshin D.V., Kabakov Z.K. Diagnostic and Automatic Adjustment Algorithms for a Non-Destructive Statistical Monitoring System for the Mechanical Properties of Hot-Rolled Metal Stock // Metallurgist. 2018. V. 62. P. 627—633. DOI 10.1007/s11015-018-0701-3
7. Буда Г.В. Неразрушающий контроль механических свойств стального проката (обзор). II. Контроль вязких свойств // Дефектоскопия. 2005. № 5. С. 54—76.
8. Duminova N.S., Kornilov V.L., Urtsev V.N., Voronkov S.N., Sidorenko N.S. Certification of Mill 5000 (PJSC «ММК») Rolled Flat Products by Non-Destructive Control Methods // Metallurgist. 2019. V. 62. № 11—12. P. 1219—1224. DOI 10.1007/s11015-019-00777-z
9. Dymkin G.Y., Shevelev A.V., Kurkov A.V., Smorodinskii Y.G. On the Sensitivity of Eddy Current Testing of Parts of Railway Rolling Stock // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. № 8. P. 610—616. DOI 10.1134/S1061830919080059

10. *Shejuan X., Mingming T., Pan X., Cuixiang P., Zhenmao C., Toshiyuki T.* A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection // *NDT & E International*. 2017. V. 86. P. 153—163. DOI:10.1016/j.ndteint.2016.12.006
11. *Zima B., Rucka M.* Guided ultrasonic waves for detection of debonding in bars partially embedded in grout // *Construction and Building Materials*. 2018. V.168. P. 124—142. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.107
12. *Saravanan T.J.* Elastic wave methods for non-destructive damage diagnosis in the axisymmetric viscoelastic cylindrical waveguide // *Measurement*. 2021. V. 177. P. 109253. DOI 10.1016/j.measurement.2021.109253
13. *Alves M., Melo M., Medeiros L. H., Novo L., Barbosa D., Coutinho M., Tarragó, V., Santos R., Neto H., Gama P.* Nondestructive Technique for Fault Locating on Anchor Rods by Reflectometry // *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. 2021. P. 1—3. DOI 10.1109/IMOC53012.2021.9624761
14. *Majhi S., Mukherjee A., George N.V., Uy B.* Corrosion detection in steel bar: A time-frequency approach // *NDT & E International*. 2019. V. 107. P. 102150. DOI 10.1016/j.ndteint.2019.102150
15. *Zhao J., Durham N., Abdel-Hadi K., McKenzie C.A., Thomson D.J.* Acoustic guided wave techniques for detecting corrosion damage of electrical grounding rods // *Measurement*. 2019. V. 147. P. 106858. DOI 10.1016/j.measurement.2019.106858
16. *Li Z., Wang Y., Zheng J., Liu N., Li M., Teng J.* Stress measurement for steel slender waveguides based on the nonlinear relation between guided wave group velocity and stress // *Measurement*. 2021. V. 179. P. 109465. DOI 10.1016/j.measurement.2021.109465
17. *Стрижак В.А., Хасанов Р.Р., Пряхин А.В.* Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 159—166. DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166
18. *Hirao M., Ogi H.* *Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs*. Tokyo: Springer Japan, 2017. 380 p.
19. *Aleshin N.P., Krysko N.V., Kusyy A.G., Skrynnikov S.V., Mogilner L. Yu.* Investigating the Detectability of Surface Volumetric Defects in Ultrasonic Testing with the Use of Rayleigh Waves Generated by an Electromagnetic-Acoustic Transducer // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 5. P. 361—368. [Алешин Н.П., Крысько Н.В., Кусый А.Г., Скрынников С.В., Могильнер Л.Ю. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // *Дефектоскопия*. 2021. № 5. С. 22—30. DOI 10.31857/S0130308221050031]
20. *Бабкин С.Э.* Определение скорости основных типов акустических волн в металлах приставным датчиком // *Дефектоскопия*. 2020. № 4. С. 32—39. DOI 10.31857/S0130308220040041
21. *Murav'eva O., Murav'ev V., Volkova L., Kazantseva N., Nichipuruk A., Stashkov A.* Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology // *Additive Manufacturing*. 2022. V. 51. P. 102635. DOI 10.1016/j.addma.2022.102635
22. *He C., Deng P., Lu Y., Liu X., Jiao J., Wu B.* Estimation of Surface Crack Depth using Rayleigh Waves by Electromagnetic Acoustic Transducers // *Journal of Acoustics and Vibrations*. 2017. V. 22 (4). P. 541—548. DOI 10.20855/ijav.2017.22.4501.
23. *Wang P., Zhang Y., Yao E., Mi Y., Zheng Y., Tang Ch.* Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostrictive EMAT characteristic parameters // *Measurement*. 2021. V. 168. P. 108187. DOI 10.1016/j.measurement.2020.108187
24. *Cong M., Wu X., Qian C.* A Longitudinal Mode Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) Based on a Permanent Magnet Chain for Pipe Inspection // *Sensors*. 2016. V. 16 (5). P. 740. DOI 10.3390/s16050740
25. *Dehui W., Jiaxin Y., Wenxiong Ch., Teng W.* An electromagnetic acoustic transducer with electromagnetic pulse restraining // *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2021. V. 63. P. 111—117. DOI 10.1784/insi.2021.63.2.111
26. *Петров, К.В., Соков М.Ю., Муравьева О.В.* Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 135—146. DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146
27. *Муравьева О.В., Муравьев В.В., Башарова А.Ф., Синцов М.А., Богдан О.П.* Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона // *Сталь*. 2020. № 8. С. 63—68.
28. *Муравьева О.В., Зорин В.А.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн // *Дефектоскопия*. 2017. № 5. С. 3—9.
29. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А., Зорин А.В.* Акустическая структуро-скопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22. № 1. С. 37—44. DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-37-44
30. *Клюев В.В.* *Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль*. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.

31. Качанов В.К., Соколов И.В., Первушин В.В., Тимофеев Д.В. Структуроскопия изделий из полимерных материалов с помощью анализа мгновенного спектра ультразвуковых сигналов // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 3—10. DOI 10.1134/S0130308219060010
32. Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю., Плеснецов С.Ю., Билык З.В., Хорошайло Ю.Е., Ефименко С.А., Салам Б. Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 14—21. DOI 10.31857/S0130308220010029
33. Ерофеев В.И., Иляхинский А.В., Никитина Е.А., Пахомов П.А., Родюшкин В.М. Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 3. С. 65—70. DOI 10.24411/1683-805X-2019-13007
34. Хлыбов А.А., Углов А.Л. Об использовании параметров структурного шума при контроле поверхностными акустическими волнами Рэлея стали 20ГЛ в процессе упругопластического деформирования // Дефектоскопия. 2021. № 7. С. 3—10. DOI 10.31857/S0130308221070010
35. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В. Структурно-чувствительные акустические параметры конструкционных сталей. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2020. 152 с.
36. Хлыбов А.А., Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Шатагин Д.А., Киселев А.В. Оценка возможностей использования фрактальной размерности и информационной энтропии упругих волн для оценки поврежденности стали 20 при малоциклового усталости // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24. № 3. С. 17—25. DOI 10.22213/2413-1172-2021-3-17-25
37. García-Gómez J., Gil-Pita R., Rosa-Zurera M., Romero-Camacho A., Jiménez-Garrido J. A., García-Benavides V. Smart sound processing for defect sizing in pipelines using EMAT actuator based multi-frequency Lamb waves // 2018. Sensors. V. 18. № 3. P. 802. DOI 10.3390/s18030802
38. Bazulin E.G., Evseev I.V. Applying Plane Wave Imaging Technology in Ultrasonic Nondestructive Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 6. P. 423—436. [Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Применение технологии Plane Wave Imaging в ультразвуковом неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2021. № 6. С. 3—16. DOI 10.31857/S0130308221060014
39. Потапов А.И., Кондратьев А.В., Смородинский Я.Г. Неразрушающий контроль структурно-неоднородных композиционных материалов методом годографа скорости упругих волн // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 11—19. DOI 10.1134/S0130308219060022
40. Sudheera K., Nandhitha N.M., VPaineni Bhavagna Venkat Sai, Nallamothu Vijay Kumar. Deep Learning Techniques for Flaw Characterization in Weld Pieces from Ultrasonic Signals // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 10. P. 820—830. [Судхира К., Нандхита Н.М., Пайнени Бхавагна Венкат Сай В., Налламоту В.К. Методы глубокого обучения для определения параметров дефектов в сварных швах по ультразвуковым сигналам // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 49—59. DOI 10.31857/S013030822010005X].
41. Gao X., Shi Y., Du K., Zhu Q., Zhang W. Sparse Blind Deconvolution with Nonconvex Optimization for Ultrasonic NDT Application // Sensors. 2020. V. 20. P. 6946. DOI 10.3390/s20236946
42. Shi Y., Xu W., Zhang J., Li X. Automated Classification of Ultrasonic Signal via a Convolutional Neural Network // Appl. Sci. 2022. V.12. P.4179. DOI 10.3390/app12094179
43. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Габбасова М.А., Булдакова И.В., Соков М.Ю. Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом // Автоматрия. 2016. Т. 52. № 4. С. 62—70. DOI 10.15372/AUT20160408
44. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В., Фокеева Е.Н. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 3—12.
45. Петров К. В., Муравьева О. В., Мышкин Ю. В., Башарова А. Ф. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов // Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 16—24. DOI 10.1134/S0130308219020027

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ГИГАЦИКЛОВОМ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2022 г. Р.А. Саврай^{1,*}, Л.Х. Коган^{2,**}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

E-mail: *ras@imach.uran.ru; *lhkogan@el.ru

Поступила в редакцию 05.05.2022; после доработки 02.06.2022

Принята к публикации 03.06.2022

Предыдущие исследования показали возможность проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321. Однако сталь AISI 321 обладает недостаточно высокой контактной выносливостью в условиях циклического ударного нагружения. Поэтому значительный интерес представляет применение физических методов для неразрушающего контроля усталостной деградации поверхностно-упрочненной аустенитной стали AISI 321, обладающей повышенной контактной выносливостью. Целью работы явилось исследование возможности проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321, подвергнутой поверхностной упрочняющей фрикционной обработке. Механические испытания на контактную гигацикловую усталость проводили по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения. Показано, что проведение вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении поверхностно-упрочненной стали AISI 321 возможно, однако имеет определенные ограничения вследствие немоного изменения показаний вихретокового прибора α от числа циклов нагружения. При этом можно контролировать развитие интенсивного разрушения поверхностного слоя стали, которое при данных условиях нагружения наблюдается в диапазоне числа циклов 3×10^8 — 5×10^8 , учитывая в методике контроля неоднозначный характер зависимостей показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения. Контроль может проводиться путем измерений показаний вихретокового прибора на частотах возбуждения вихретокового преобразователя $f = 96$ — 124 кГц. В этом случае в большей степени анализируются поверхностные слои, в которых интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, оказывающие влияние на физические характеристики стали. Наибольшее влияние на величину α оказывает пластическая деформация и разрушение поверхности стали.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, коррозионноустойчивая аустенитная сталь, фрикционная обработка, градиентный упрочненный слой, структура, контактная усталость, усталостное выкрашивание.

DOI: 10.31857/S013030822208005X, EDN: BQHCPC

ВВЕДЕНИЕ

Изучение контактной выносливости и разработка способов неразрушающего контроля (НК) усталостной деградации аустенитных хромоникелевых сталей, которые широко используются для изготовления различных элементов конструкций, является актуальной задачей. Данная задача может быть решена с использованием методов вихретокового НК [1]. В частности, была показана возможность проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321 [2]. Однако сталь AISI 321 обладает недостаточно высокой контактной выносливостью в условиях циклического ударного нагружения, что проявилось в появлении глубоких и протяженных локализованных выкрошенных участков на поверхности материала [3]. Повышение механических свойств аустенитных нержавеющей сталей достигается за счет использования различных поверхностных модифицирующих обработок [4—17]. При этом отмечается, что для повышения контактной выносливости металлических материалов упрочненный слой должен быть градиентным [18—21]. Эффективным способом формирования градиентного упрочненного слоя на поверхности металлических материалов является фрикционная обработка скользящим индентором [22—26], которая была успешно применена для повышения контактной выносливости стали AISI 321 [22]. В этой связи, значительный интерес представляет применение методов НК для контроля усталостной деградации поверхностно-упрочненной аустенитной стали AISI 321 при контактном нагружении. Цель настоящей работы — исследование возможности проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали

AISI 321, подвергнутой поверхностной упрочняющей фрикционной обработке. Механические испытания на контактную гигацикловую усталость проводили по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала исследования использовали коррозионностойкую аустенитную сталь AISI 321 промышленной плавки, химический состав которой представлен в табл. 1. В состоянии поставки сталь представляла собой прокатанный лист толщиной 10 мм. Образцы для механических испытаний на контактную усталость изготавливали в виде пластин размерами 70×40 мм. Термическую обработку (закалку) подготовленных образцов из стали AISI 321 проводили путем нагрева до температуры 1100 °С, выдержке при этой температуре в течение 40 мин и охлаждения в воду. Поверхность образцов подвергали механическому шлифованию (как описано в [3]) и, дополнительно, электролитическому полированию (как описано в [22]).

Фрикционную обработку поверхности образцов осуществляли в безокислительной среде аргона с обдувом путем прямолинейного скольжения сферического индентора из синтетического алмаза с радиусом сферы 3 мм, при нагрузке $P = 294$ Н и средней скорости скольжения $V = 0,01$ м/с. После каждого хода индентора происходила смена направления движения на противоположное с поперечным смещением $d = 0,02$ мм [22].

Механические испытания на контактную гигацикловую усталость с ультразвуковой частотой нагружения по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» проводили с использованием ультразвуковой установки и специальной оснастки оригинальной конструкции [27] при частоте колебаний индентора $f = 21$ кГц, амплитуде колебаний индентора $A = 10$ мкм, постоянной нагрузке на индентор $P = 170$ Н на базе $N = 10^9$ циклов нагружения. Индентор цилиндрической формы диаметром 8 мм с плоской торцевой поверхностью изготавливали из твердого сплава марки ВК8 (в мас. %: 92 WC, 8 Co). Подробное описание испытательной установки представлено в [3]. В результате контактно-усталостных испытаний с различным числом циклов нагружения на поверхности образца были сформированы пятна контакта. Дополнительную подготовку поверхности пятен контакта перед последующими исследованиями и измерениями не проводили.

Таблица 1

Химический состав стали AISI 321, мас. %

C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Mo	Co	Nb	Cu	P	S	Fe
0,05	16,80	8,44	0,33	1,15	0,67	0,26	0,13	0,03	0,31	0,036	0,005	Основа

Структуру стали в поперечном сечении изучали на нетравленном шлифе методом оптической микроскопии с применением микроскопа Neophot-21. Поверхности образцов после фрикционной обработки и пятен контакта после контактно-усталостных испытаний изучали с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA II XMU. Глубину контактных повреждений определяли с помощью оптического профилометра Wyko NT-1100. Рентгеноструктурный фазовый анализ выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении до и после контактно-усталостных испытаний.

Измерение электромагнитных параметров выполняли на лабораторном макете вихретокового прибора с использованием дифференциально включенных накладных трансформаторных вихретоковых преобразователей с плоской торцевой поверхностью. Локальность контроля использованного вихретокового преобразователя составляет около 6 мм в диаметре. Определяли показания вихретокового прибора α при частотах возбуждения преобразователя $f = 24, 36, 72, 96, 112$ и 124 кГц. Величину показаний вихретокового прибора α находили как среднее арифметическое из 5-6 измерений. Абсолютная погрешность измерений величины α составила $\Delta\alpha = \pm 3$ дел. Показания вихретокового прибора α прямо пропорциональны ЭДС, наведенной в измерительной обмотке вихретокового преобразователя и представляют собой показания в делениях аналогового стрелочного индикатора М265М. Одно деление шкалы индикатора соответствует величине напряжения 0,75 мВ. Подробное описание и схема вихретокового прибора, порядок балансировки схемы измерений и настройки чувствительности, а также схематическое изображение использованного пре-

образователя с указанием размеров обмотки возбуждения и сердечников приведены в [2]. При данной схеме измерений величина $\alpha = 0$ дел. соответствует стандартному образцу, положительные значения α свидетельствуют о росте, а отрицательные значения α свидетельствуют об уменьшении сигнала вихретокового преобразователя.

Определение величины удельного электрического сопротивления ρ производили косвенным методом с помощью микрометра БСЗ-010-2. При этом на рабочей части образцов, имеющей постоянное поперечное сечение площадью S , измеряли величину электрического сопротивления R на участке заданной длины $L = 22$ мм, после чего удельное электрическое сопротивление рассчитывали по формуле $\rho = (R \cdot S)/L$. Расчетную глубину проникновения электромагнитного поля в исследуемые образцы (при ослаблении поля в e раз) оценивали по формуле $\delta = 503 \{ \rho / (\mu_i \cdot f) \}^{1/2}$ [28], где ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом·мм²/м; μ_i — начальная магнитная проницаемость; f — частота возбуждения вихретокового преобразователя, Гц. При расчете принимали $\mu_i = 1$ для стали после закалки и $\mu_i = 208$ для стали после фрикционной обработки [29].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура стали AISI 321 после термической обработки является полностью аустенитной с включениями карбида титана TiC [22, 23]. Следует отметить, что неметаллические включения могут образовывать строчечные скопления (рис. 1). Фрикционная обработка приводит к формированию 100% мартенсита деформации на выглаженной поверхности стали (рис. 2), микротвердость которой составила 780 ± 30 HV0.025. При этом общая глубина упрочненного слоя достигает 500 мкм. Шероховатость поверхности стали перед контактно-усталостными испытаниями составила $Ra = 0,23$ мкм [22].

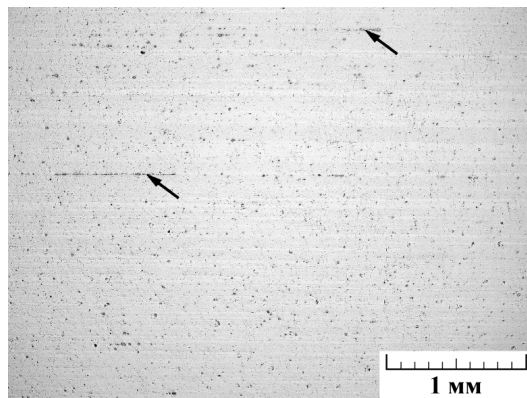


Рис. 1. Неметаллические включения (оптическая микроскопия) в закаленной стали AISI 321. Стрелками обозначены строчечные скопления неметаллических включений.

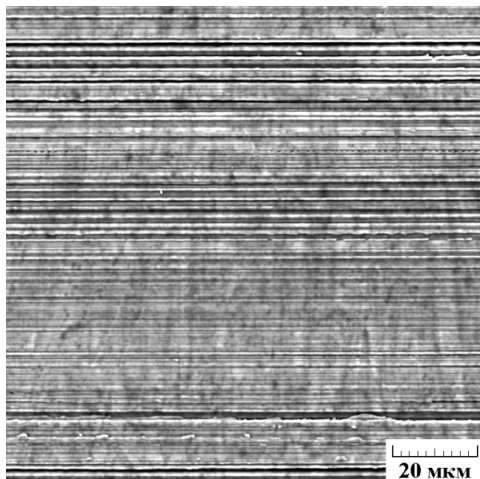


Рис. 2. Вид поверхности (электронная сканирующая микроскопия) стали AISI 321 после фрикционной обработки.

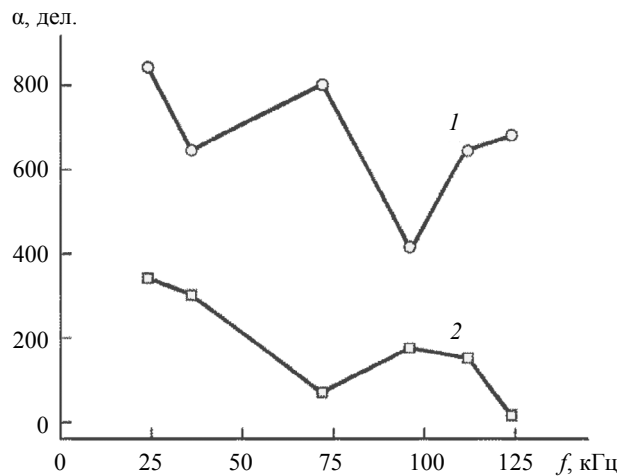


Рис. 3. Влияние частоты возбуждения вихрекового преобразователя f на показания вихрекового прибора α при измерении на образцах стали AISI 321 до (1) и после (2) фрикционной обработки.

На рис. 3 представлены результаты измерения вихрековых характеристик стали AISI 321 до и после поверхностной фрикционной обработки при измерении на разных частотах. Из этих данных следует, что в закаленном состоянии показания вихрекового прибора α не являются монотонными, что можно было бы ожидать в результате объемной термической обработки. Это обусловлено тем, что прокатная сталь имеет ярко выраженную полосчатую структуру, которая частично сохраняется после закалки. При этом в структуре можно наблюдать чередующиеся полосы зерен аустенита с меньшим или большим количеством включений (см. рис. 1).

Механизм влияния неметаллических включений на вихрековые характеристики обусловлен тем, что включения повышают удельное электросопротивление стали AISI 321. Показания вихрекового прибора являются комплексным параметром и определяются значениями начальной магнитной проницаемости μ_i и удельного электрического сопротивления ρ объекта измерения при заданной частоте возбуждения f вихрекового преобразователя $\alpha \sim \{f/(\mu_i \cdot \rho)\}^{1/2}$ [30]. Поэтому рост электросопротивления должен приводить к снижению величины α . Поскольку глубина проникновения электромагнитного поля δ зависит от частоты возбуждения f вихрекового преобразователя (чем больше f , тем меньше δ) [28], то для каждого значения частоты в анализируемом объеме материала может находиться разное количество включений. В табл. 2 приведена глубина проникновения электромагнитного поля в образцы закаленной стали AISI 321 с полностью аустенитной структурой, рассчитанная с учетом экспериментально определенного значения ρ , которое составило $0,6955 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Видно, что на различных частотах глубина δ существенно отличается, при этом на максимальной использованной частоте $f = 124 \text{ кГц}$ величина δ в 2,3 раза меньше, чем на минимальной частоте $f = 24 \text{ кГц}$.

Таблица 2

Расчетная глубина δ проникновения электромагнитного поля в образцы стали AISI 321 до и после фрикционной обработки (ФО) в зависимости от частоты возбуждения f вихрекового преобразователя

f , кГц		24	36	72	96	112	124
δ , мм	Без ФО	2,710	2,213	1,565	1,355	1,255	1,192
	После ФО	0,188	0,153	0,108	0,094	0,087	0,083

Фрикционная обработка оказывает сильное влияние на показания вихрекового прибора α (см. рис. 3, кривая 2). Для всех используемых частот вихрекового преобразователя величина α после фрикционной обработки ниже, чем после закалки (см. рис. 3, кривая 1). При этом на минимальной использованной частоте $f = 24 \text{ кГц}$ показания вихрекового прибора составляют $\alpha = 342$ дел. Увеличение частоты f от 24 до 72 кГц сопровождается снижением величины α до

значения 70 дел. С увеличением частоты f от 72 до 96 кГц наблюдается резкий рост величины α до 176 дел. Дальнейшее увеличение частоты f от 96 до 124 кГц сопровождается сначала плавным, а затем более интенсивным снижением показаний вихретокового прибора вплоть до $\alpha = 16$ дел.

Отмеченное немонотонное изменение показаний вихретокового прибора в зависимости от частоты возбуждения вихретокового преобразователя при измерении на образцах поверхностно-упрочненной стали AISI 321 (см. рис. 3, кривая 2) может быть обусловлено конкурирующим влиянием степени деформации и количества мартенсита деформации на величину магнитной проницаемости стали. При этом, с одной стороны, образование ферромагнитной α' -фазы (мартенсита деформации) должно приводить к росту начальной магнитной проницаемости и снижению показаний вихретокового прибора. С другой стороны, исследование влияния фрикционной обработки на магнитные и электромагнитные характеристики отожженной стали Ст3 показало, что фрикционная обработка приводит к уменьшению начальной магнитной проницаемости и росту удельного электросопротивления стали. Важно подчеркнуть, что влияние фрикционной обработки на начальную магнитную проницаемость существенно более сильное, чем на электросопротивление [29]. Снижение магнитной проницаемости стали в результате упрочняющей фрикционной обработки связано с сильным диспергированием структуры поверхностного слоя, резким увеличением в нем плотности дислокаций [29], вызывающим рост уровня микронапряжений и их градиентов. Это приводит к увеличению значений критических полей взаимодействия доменных границ с дефектами, границами зерен и фрагментов, и, соответственно, затруднению процессов перемагничивания [31, 32].

Величина степени деформации и количество мартенсита деформации в поверхностных слоях стали AISI 321, подвергнутой фрикционной обработке, неодинаковы на различной глубине. Исследование фазового состава и остаточных напряжений (табл. 3) показало, что на поверхности стали AISI 321 после фрикционной обработки содержание мартенсита деформации составило 100 об. % при максимальном уровне остаточных сжимающих напряжений. На глубине до 50 мкм количество мартенсита деформации изменяется несущественно, тогда как уровень остаточных напряжений резко снижается. На глубине от 50 до 100 мкм наблюдается резкое снижение количества мартенсита деформации. При этом в указанном интервале глубин сохраняется достаточно высокий уровень остаточных напряжений (см. табл. 3). В табл. 2 для различных частот возбуждения вихретокового преобразователя также приведена глубина проникновения электромагнитного поля в образцы поверхностно-упрочненной стали AISI 321. Отметим, что из-за градиентного характера упрочненного поверхностного слоя, глубина проникновения электромагнитного поля может быть оценена только приблизительно. Тем не менее из данных, представленных в табл. 2, видно, что при частотах возбуждения преобразователя $f = 24\text{—}124$ кГц глубина проникновения электромагнитного поля составляет $\delta = 0,188\text{—}0,083$ мкм. Именно в этом диапазоне глубин наблюдается существенное изменение структурного состояния поверхностного слоя стали AISI 321, подвергнутой фрикционной обработке (см. табл. 3). Таким образом, наблюдаемое снижение величины α с увеличением частоты f от 24 до 72 кГц можно объяснить постепенным увеличением количества мартенсита деформации в зоне контроля. Резкий рост величины α с увеличением частоты f от 72 до 96 кГц обусловлен возросшим влиянием остаточных напряжений. Снижение показаний вихретокового прибора при дальнейшем увеличении частоты f от 96 до 124 кГц обусловлено дополнительным увеличением количества мартенсита деформации в зоне контроля, который, в свою очередь, компенсирует влияние остаточных напряжений.

Таблица 3

Объемная доля α' -фазы $V_{\alpha'}$ и остаточные напряжения в α' -фазе $\sigma_{\alpha'}$ и γ -фазе σ_{γ} на различной глубине от поверхности h в поверхностном слое стали AISI 321 после фрикционной обработки

h , мкм	0	21	51	89	96	105	160	240	340
$V_{\alpha'}$, об. %	100	100	88	53	26	14	5	0	0
$\sigma_{\alpha'}$, МПа	-539	-135	-128	-102	-	-	-	-	-
σ_{γ} , МПа	-	-	-	-	-41	-64	34	-	-6

Исследование пятен контакта методами сканирующей электронной микроскопии (рис. 4) показало, что в зоне воздействия плоской торцевой поверхности индентора (центральная зона)

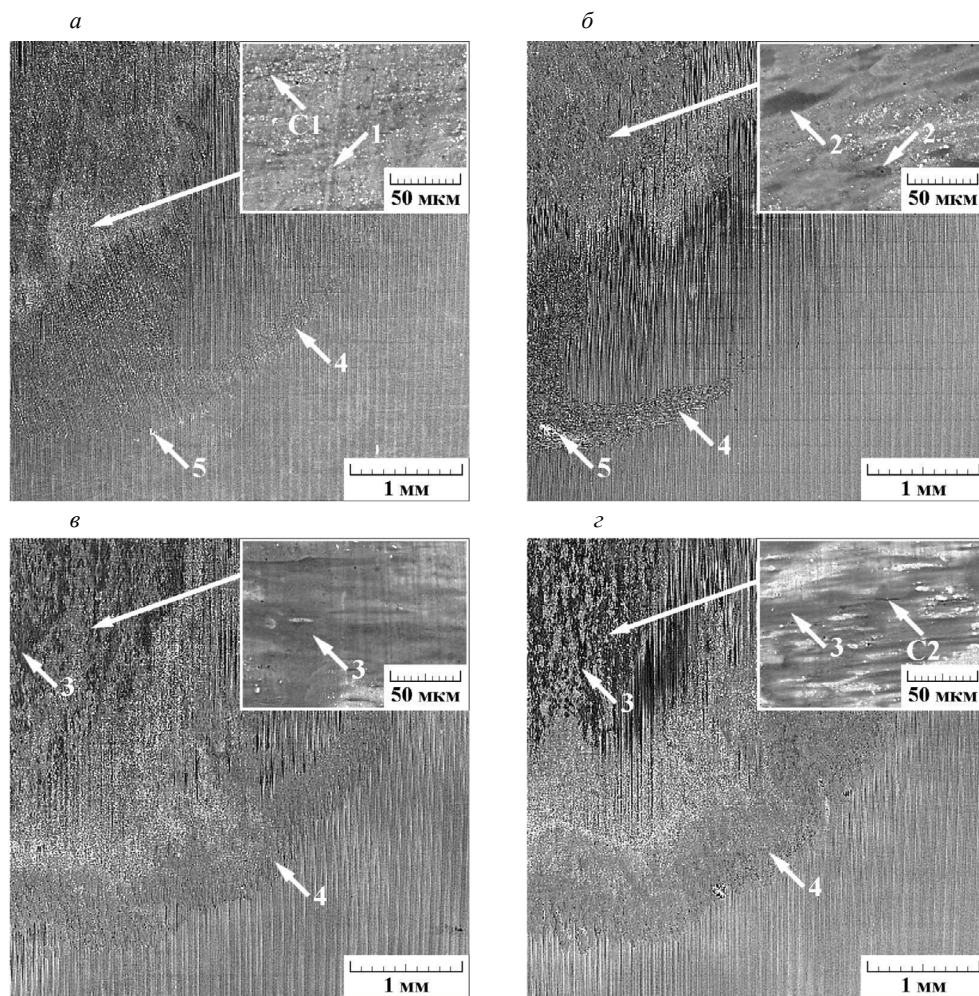


Рис. 4. Пятна контакта (электронная сканирующая микроскопия) после контактно-усталостных испытаний поверхностно-упрочненной стали AISI 321 с числом циклов нагружения $N = 10^8$ (а), 5×10^8 (б), 8×10^8 (в) и 10^9 (г). Стрелками 1 обозначены следы поверхностного пластического деформирования; 2 — участки равномерного выкрашивания; 3 — протяженные локализованные выкрошенные участки; 4 — кольцеобразный след пластического деформирования; 5 — частично соединенные между собой разрушенные участки; C1, C2 — трещины.

при числе циклов нагружения 10^8 на поверхности стали подвергнутой фрикционной обработке, наблюдаются следы деформационного воздействия (обозначены стрелкой 1 на рис. 4а) и трещины (обозначены стрелкой C1 на рис. 4а). Следовательно, уже на данной стадии нагружения начинается разрушение поверхностного слоя стали. С увеличением числа циклов контактного нагружения до 3×10^8 на поверхности стали появляются отдельные выкрошенные участки, а при числе циклов нагружения 5×10^8 наблюдается равномерное выкрашивание поверхностного слоя стали (обозначены стрелками 2 на рис. 4б), свидетельствующее о продолжающемся разрушении поверхностного слоя в результате механического воздействия индентора. Нагружение до 8×10^8 — 1×10^9 циклов приводит к появлению протяженных выкрошенных участков (обозначены стрелками 3 на рис. 4в, г). На поверхности нижележащих слоев вновь формируются трещины (обозначены стрелкой C2 на рис. 4г). Однако глубина контактных повреждений при этом составляет 1–2 мкм [22] и существенно меньше, чем толщина упрочненного фрикционной обработкой поверхностного слоя (порядка 500 мкм) и глубина контактных повреждений (около 20 мкм) после ударного контактно-усталостного нагружения неупрочненной стали AISI 321 [3]. Следовательно, после 10^9 циклов контактного нагружения, разрушению подвергся не весь упрочненный слой, а только его тонкая поверхностная часть.

В зоне воздействия на образец края индентора (периферийная зона) при числе циклов нагружения 10^8 на поверхности стали виден слабо выраженный кольцеобразный (по форме индентора)

след пластического деформирования (обозначен стрелками 4 на рис. 4). С увеличением числа циклов контактного нагружения вплоть до 10^9 этот кольцеобразный след становится более выраженным (см. рис. 4). При числе циклов нагружения 1×10^8 — 5×10^8 в зоне воздействия периферийной части индентора также наблюдаются разрушенные участки, которые частично соединены между собой (обозначены стрелками 5 на рис. 4а, б). Однако площадь этих участков относительно небольшая, и они не образуют на поверхности такую кольцеобразную зону разрушения, как после ударного контактно-усталостного нагружения неупрочненной стали AISI 321 [3]. Кроме того, дальнейшее нагружение до 8×10^8 — 1×10^9 циклов не сопровождается появлением таких разрушенных участков (см. рис. 4в, з). Появление этих разрушенных участков связано с дефектами упрочненного поверхностного слоя, в частности скоплениями пор, и концентрацией напряжений в периферийной зоне пятен контакта [22].

Результаты дюрOMETрического исследования показали, что с увеличением числа циклов нагружения до 5×10^8 наблюдается рост значений микротвердости от 780 HV_{0,025} (микротвердость упрочненного поверхностного слоя перед нагружением) до 1010 HV_{0,025}, то есть имеет место дополнительное упрочнение поверхностного слоя. Наиболее вероятными механизмами упрочнения являются диспергирование структуры вплоть до нанокристаллического состояния и рост плотности дислокаций. Таким образом, начальная стадия процесса усталостного выкрашивания поверхностного слоя стали (см. рис. 4б) сопровождается ростом микротвердости. Это свидетельствует о том, что разрушение происходит после того, как произошло дополнительное упрочнение, и выкрашиванию подвергаются в первую очередь те участки поверхности, твердость которых достигла максимально возможных значений, и они исчерпали свой запас пластичности в данных условиях нагружения. При увеличении числа циклов от 5×10^8 до 10^9 наблюдается снижение значений микротвердости до величины 800 HV_{0,025}, что свидетельствует о развитии процессов разрушения (см. рис. 4в, з).

На рис. 5 представлены зависимости показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения, измеренные на пятнах контакта после контактно-усталостных испытаний стали AISI 321,

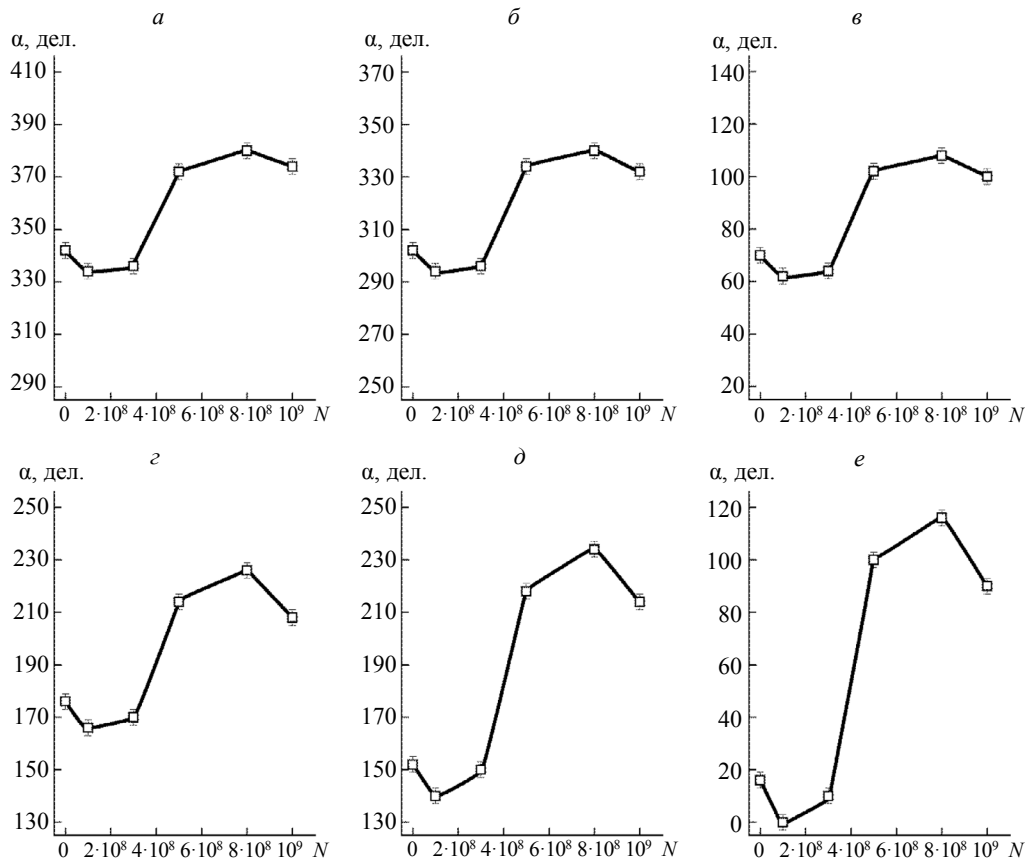


Рис. 5. Зависимости показаний вихретокового прибора α на частоте $f = 24$ кГц (а), 36 кГц (б), 72 кГц (в), 96 кГц (г), 112 кГц (д) и 124 кГц (е) от числа циклов нагружения N , измеренные на пятнах контакта после контактно-усталостных испытаний поверхностно-упрочненной стали AISI 321.

подвергнутой поверхностной упрочняющей фрикционной обработке. Видно, что у поверхностно-упрочненной стали AISI 321 для всех частот возбуждения вихретокового преобразователя зависимости показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения носят качественно одинаковый характер, при котором показания вихретокового прибора α сначала снижаются до 10^8 циклов нагружения. С увеличением числа циклов нагружения до 3×10^8 наблюдается незначительный рост величины α , который сменяется ее резким ростом при нагружении до 5×10^8 циклов. Дальнейшее нагружение до 8×10^8 циклов приводит к замедлению роста величины α , а при нагружении в диапазоне от 8×10^8 до 10^9 циклов вновь наблюдается снижение показаний вихретокового прибора α . При этом, на максимальной использованной частоте $f = 124$ кГц рассматриваемая зависимость является наиболее выраженной (см. рис. 5e). Это свидетельствует о том, что в поверхностных слоях более интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, влияющие на физические характеристики стали, поскольку глубина проникновения электромагнитного поля δ зависит от частоты (чем больше f , тем меньше δ) [28].

Наблюдаемое снижение показаний вихретокового прибора α у поверхностно-упрочненной стали AISI 321 при увеличении числа циклов нагружения до 10^8 (см. рис. 5) обусловлено появлением трещин в поверхностном слое (см. рис. 4a), которое приводит к росту электросопротивления содержащего трещины поверхностного слоя [33]. При увеличении числа циклов до 3×10^8 — 5×10^8 наблюдаемый рост величины α у поверхностно-упрочненной стали AISI 321 совпадает с развитием выкрашивания поверхностного слоя стали (см. рис. 4б) и, по-видимому, обусловлен диспергированием структуры в процессе контактно-усталостного нагружения и соответствующим уменьшением начальной магнитной проницаемости. Замедление роста величины α при увеличении числа циклов до 8×10^8 совпадает с появлением протяженных выкрошенных участков (см. рис. 4в). Как было отмечено выше, разрушению поверхностного слоя предшествует его упрочнение. Поэтому отдельные участки поверхности продолжают упрочняться, однако по мере развития разрушения, таких участков становится меньше, и их вклад в уменьшение начальной магнитной проницаемости также снижается. Дальнейшее нагружение до 10^9 циклов вновь сопровождается снижением показаний вихретокового прибора α (см. рис. 5). Это обусловлено наблюдаемым разрушением тонкого (1-2 мкм) поверхностного слоя и формированием трещин на поверхности нижележащих слоев (см. рис. 4г). Отметим, что величина α хотя и несколько снизилась, однако не достигла своих значений перед испытаниями. Можно ожидать, что при контактно-усталостных испытаниях в результате интенсивного ударного воздействия индентора структурные изменения происходят на глубине, превышающей толщину разрушившегося поверхностного слоя. Соответственно, показания вихретокового прибора α также изменяются (см. рис. 5).

Таким образом, используя амплитудный метод вихретокового НК, можно контролировать процесс усталостной деградации при гигацикловой контактной усталости поверхностно-упрочненной стали AISI 321. Зависимости показаний вихретокового прибора имеют немонотонный характер (см. рис. 5), однако можно контролировать развитие интенсивного разрушения поверхностного слоя стали. Контроль может проводиться путем измерений показаний вихретокового прибора на частотах возбуждения вихретокового преобразователя $f = 96$ — 124 кГц. В этом случае в большей степени анализируются поверхностные слои, в которых интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, оказывающие влияние на физические характеристики стали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321, подвергнутой поверхностной упрочняющей фрикционной обработке. Механические испытания на контактную гигацикловую усталость проводили по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость-плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения. Показано, что проведение вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении поверхностно-упрочненной стали AISI 321 возможно, однако имеет определенные ограничения вследствие немонотонного изменения показаний вихретокового прибора α от числа циклов нагружения. При этом можно контролировать развитие интенсивного разрушения поверхностного слоя стали, которое при данных условиях нагружения наблюдается в диапазоне числе циклов 3×10^8 — 5×10^8 , учитывая в методике контроля неоднозначный характер зависимости показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения. Контроль может проводиться путем измерений показаний вихретокового прибора на частотах возбуждения вихретокового преобразователя $f = 96$ — 124 кГц. В этом случае в большей степени анализируются поверхностные слои, в которых интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, оказывающие влия-

ние на физические характеристики стали. Наибольшее влияние на величину α оказывает пластическая деформация и разрушение поверхности стали. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методик оценки степени усталостной деградации и остаточного ресурса поверхностно-упрочненных изделий из аустенитных сталей, подвергающихся в процессе эксплуатации контактно-усталостному нагружению, а также методик оценки структурной однородности упрочненных поверхностных слоев.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по теме «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3. Электронная сканирующая микроскопия и механические испытания выполнены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН. Авторы выражают благодарность Ю.М. Колобылину за участие в экспериментальных исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакунов А.С., Мужуцкий В.Ф., Шубочкин С.Е. Современное решение задач вихретоковой структуроскопии // Дефектоскопия. 2004. № 5. С. 79—84.
2. Savrai R.A., Kogan L.Kh. Eddy Current Testing of Fatigue Degradation of Metastable Austenitic Steel under Gigacycle Contact-Fatigue Loading // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 5. P. 393—400. [Саврай Р.А., Коган Л.Х. Вихретоковый контроль усталостной деградации метастабильной аустенитной стали при гигацикловом контактно-усталостном нагружении // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 56—63.]
3. Savrai R.A., Makarov A.V., Osintseva A.L., Malygina I.Yu. Estimating the contact endurance of the AISI 321 stainless steel under contact gigacycle fatigue tests // Journal of Materials Engineering and Performance. 2018. V. 27. Is. 2. P. 601—611.
4. Tsay L.W., Liu Y.C., Lin D.-Y., Young M.C. The use of laser surface-annealed treatment to retard fatigue crack growth of austenitic stainless steel // Materials Science and Engineering A. 2004. V. 384. Is. 1—2. P. 177—183.
5. Tokaji K., Kohyama K., Akita M. Fatigue behaviour and fracture mechanism of a 316 stainless steel hardened by carburizing // International Journal of Fatigue. 2004. V. 26. P. 543—551.
6. Ceschini L., Minak G. Fatigue behaviour of low temperature carburized AISI 316L austenitic stainless steel // Surface and Coatings Technology. 2008. V. 202. Is. 9. P. 1778—1784.
7. Stinville J.C., Villechaise P., Templier C., Riviere J.P., Drouet M. Plasma nitriding of 316L austenitic stainless steel: Experimental investigation of fatigue life and surface evolution // Surface and Coatings Technology. 2010. V. 204. Is. 12—13. P. 1947—1951.
8. Kikuchi S., Nakahara Y., Komotori J. Fatigue properties of gas nitrided austenitic stainless steel pre-treated with fine particle peening // International Journal of Fatigue. 2010. V. 32. P. 403—410.
9. Celik O., Baydogan M., Atar E., Sabri Kayali E., Cimenoglu H. Fatigue performance of low temperature nitrided AISI 321 grade austenitic stainless steel // Materials Science and Engineering: A. 2013. V. 565. P. 38—43.
10. Hsu J.-P., Wang D., Kahn H., Ernst F., Michal G.M., Heuer A.H. Fatigue crack growth in interstitially hardened AISI 316L stainless steel // International Journal of Fatigue. 2013. V. 47. P. 100—105.
11. Peng Y., Liu Z., Chen C., Gong J., Somers M.A.J. Effect of low-temperature surface hardening by carburization on the fatigue behavior of AISI 316L austenitic stainless steel // Materials Science and Engineering A. 2020. V. 769. 138524. P. 1—9.
12. Muñoz-Cubillos J., Coronado J.J., Rodríguez S.A. Deep rolling effect on fatigue behavior of austenitic stainless steels // International Journal of Fatigue. 2017. V. 95. P. 120—131.
13. Lei Y.B., Wang Z.B., Xu J.L., Lu K. Simultaneous enhancement of stress- and strain-controlled fatigue properties in 316L stainless steel with gradient nanostructure // Acta Materialia. 2019. V. 168. P. 133—142.
14. Spadaro L., Hereñú S., Strubbia R., Gómez Rosas G., Bolmaro R., Rubio González C. Effects of laser shock processing and shot peening on 253 MA austenitic stainless steel and their consequences on fatigue properties // Optics and Laser Technology. 2020. V. 122. 105892. P. 1—8.
15. Carneiro L., Wang X., Jiang Y. Cyclic deformation and fatigue behavior of 316L stainless steel processed by surface mechanical rolling treatment // International Journal of Fatigue. 2020. V. 134. 105469. P. 1—11.
16. Ho H.S., Zhou W.L., Li Y., Liu K.K., Zhang E. Low-cycle fatigue behavior of austenitic stainless steels with gradient structured surface layer // International Journal of Fatigue. 2020. V. 134. 105481. P. 1—9.

17. Yang S., Zeng W., Yang J. Characterization of shot peening properties and modelling on the fatigue performance of 304 austenitic stainless steel // *International Journal of Fatigue*. 2020. V. 137. 105621. P. 1—10.
18. Walvekar A.A., Sadeghi F. Rolling contact fatigue of case carburized steels // *International Journal of Fatigue*. 2017. V. 95. P. 264—281.
19. Li W., Liu B. Experimental investigation on the effect of shot peening on contact fatigue strength for carburized and quenched gears // *International Journal of Fatigue*. 2018. V. 106. P. 103—113.
20. Cao Z., Liu T., Yu F., Cao W., Zhang X., Weng Y. Carburization induced extra-long rolling contact fatigue life of high carbon bearing steel // *International Journal of Fatigue*. 2020. V. 131. 105351. P. 1—6.
21. Paladugu M., Scott Hyde R. Material composition and heat treatment related influences in resisting rolling contact fatigue under WEC damage conditions // *International Journal of Fatigue*. 2020. V. 134. 105476. P. 1—9.
22. Savrai R.A., Osintseva A.L. Effect of hardened surface layer obtained by frictional treatment on the contact endurance of the AISI 321 stainless steel under contact gigacycle fatigue tests // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. V. 802. 140679. P. 1—10.
23. Savrai R.A., Makarov A.V., Malygina I.Yu., Rogovaya S.A., Osintseva A.L. Improving the strength of the AISI 321 austenitic stainless steel by frictional treatment // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2017. Is. 5. P. 43—62. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2017.5.043-062>
24. Deng S.Q., Godfrey A., Liu W., Zhang C.L. Microstructural evolution of pure copper subjected to friction sliding deformation at room temperature // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. V. 639. P. 448—455.
25. Narkevich N.A., Shulepov I.A., Mironov Yu.P. Structure, mechanical, and tribotechnical properties of an austenitic nitrogen steel after frictional treatment // *The Physics of Metals and Metallography*. 2017. V. 118. Is. 4. P. 399—406.
26. Savrai R.A., Makarov A.V., Malygina I.Yu., Volkova E.G. Effect of nanostructuring frictional treatment on the properties of high-carbon pearlitic steel. Part I: microstructure and surface properties // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. V. 734. P. 506—512.
27. Патент РФ № 162959. Устройство для контактно-усталостных испытаний образцов материалов / Р.А. Саврай, А.В. Макаров // БИМП. 2016. № 19.
28. Дорофеев А.Л. Индукционная структуроскопия. М.: Энергия, 1973. 176 с.
29. Макаров А.В., Саврай Р.А., Горкунов Э.С., Мальгина И.Ю., Коган Л.Х., Поздеева Н.А., Колобылин Ю.М. Влияние упрочняющей фрикционной обработки на особенности магнитного и вихретокового контроля отожженной конструкционной стали, подвергнутой циклическому нагружению // *Дефектоскопия*. 2008. № 7. С. 74—92.
30. Дякин В.В., Сандовский В.А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. М.: Наука, 1981. 136 с.
31. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.
32. Jiles D.C. The effect of compressive plastic deformation on the magnetic properties of AISI 4130 steels with various microstructures // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1988. V. 21. No. 7. P. 1196—1204.
33. Макаров А.В., Горкунов Э.С., Саврай Р.А., Коган Л.Х., Юровских А.С., Колобылин Ю.М., Мальгина И.Ю., Давыдова Н.А. Влияние комбинированной деформационно-термической обработки на особенности электромагнитного контроля усталостной деградации закаленной конструкционной стали // *Дефектоскопия*. 2013. № 12. С. 22—40.

КОНТРОЛЬ СОСТАВА ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ ПУТЕМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2022 г. М.М. Матлин^{1,*}, Е.Н. Казанкина¹, В.А. Казанкин¹

¹Волгоградский государственный технический университет, Россия 400005 Волгоград, пр-т Ленина, 28
E-mail: *matlin@vstu.ru

Поступила в редакцию 29.03.2022; после доработки 06.06.2022

Принята к публикации 17.06.2022

Описан метод контроля количества цемента в изделиях из цементно-песчаной смеси по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора. Показано, что для материалов из цементно-песчаной смеси в достаточно широком диапазоне изменения глубин остаточных отпечатков и контактных нагрузок при внедрении сферического индентора справедлива линейная зависимость глубины остаточного отпечатка от нагрузки. Это позволило использовать для разработанного метода контроля закономерности пластической твердости.

Ключевые слова: цементно-песчаная смесь, сферический индентор, контактная нагрузка, упругопластическая контактная деформация, пластическая твердость.

DOI: 10.31857/S0130308222080061, EDN: BQUTRS

ВВЕДЕНИЕ

Строительство и эксплуатация промышленных и гражданских объектов предусматривает регулярный мониторинг качества используемых материалов и изделий на всех этапах жизненного цикла: от изготовления до утилизации. В связи с этим разработка оперативных методов контроля свойств строительных материалов остается актуальной задачей. Задача обеспечения контроля качества строительно-монтажных работ является актуальной не только в России, но в зарубежных странах: подробное сопоставление систем управления качеством строительства в различных странах (России, Германии, Финляндии, Японии, Великобритании, США) приведено в работе [1].

В настоящее время методы оперативного неразрушающего контроля достаточно широко используются, в том числе и в строительной отрасли: акустический, виброакустический, вихретоковый, магнитный, радиационный, радиоволновой и др. [2]. Следует отметить, что эти методы определяют объемные свойства материала и требуют предварительной тарировки по результатам традиционных механических испытаний. Поскольку очаги разрушения зарождаются, как правило, на поверхности элементов конструкций, то наиболее информативными являются методы, позволяющие определять физико-механические свойства материала непосредственно на поверхности. Такие методы в настоящее время также применяют на практике. Так, например, согласно [3], для неразрушающего контроля прочности бетона используют методы контактного нагружения: упругого отскока, пластической деформации, ударного импульса; в качестве оборудования применяют склерометр Шмидта [4] или его аналоги, молоток Кашкарова, приборы типа ОНИКС (НПП «Интерприбор» г. Челябинск) и др. В работе [5] приведен обзор наиболее распространенных методов неразрушающего контроля бетонных конструкций, используемых в строительной отрасли. В работе [6] отмечено, что испытание путем внедрения сферического индентора является многообещающим дополнительным инструментом для определения характеристик строительных материалов.

Одним из основоположников исследования аналитических взаимосвязей параметров упругопластического внедрения сферического индентора со свойствами испытываемого материала является академик А.Ю. Ишлинский [7]. Эти исследования были продолжены и развиты в многочисленных работах отечественных и зарубежных ученых. Ряд полученных результатов включены в действующие стандарты и руководящие документы, например, [8, 9]. Следует отметить, что описанные методы предназначены для контроля металлов и сплавов. Что же касается строительных материалов, то такие методы также активно разрабатываются в настоящее время. В работе [10] приведен обзор использования метода внедрения индентора для отдельного определения свойств различных фаз асфальтобетона. В работе [11] описана методика определения свойств ряда строительных вязкоупругих материалов: полиоксиметиленовых, битумных и битумно-наполнительных мастик с помощью сферического инструментального теста на вдавливание. Разработанный метод позволяет измерять две независимые вязкоупругие функции — модуль релаксации сдвига и коэффициент Пуассона. В работе [12] методом микроиндентирования выполнен анализ влияния температу-

ры на ползучесть цементных растворов. В работе [13] также путем вдавливания индентора исследовали ползучесть цементных материалов в масштабах от нано- до микрометров. Это исследование выполнено с целью установить связь макроскопических свойств бетона с лежащими в его основе нано- и микроструктурами и фазами. В работе [14] исследовали влияние состава смеси на твердость бетонной поверхности в условиях зимней эксплуатации при использовании агрессивных антиобледенительных химикатов. Установлена корреляция между твердостью поверхности и свойствами бетона на сопротивление поверхностному истиранию при использовании в качестве дорожного покрытия.

Цементно-песчаные смеси широко используют для изготовления бетона, кирпичной кладки, балок, плит перекрытий, заливки полов, штукатурки, изготовления черепицы, а в последнее время и для 3D-печати зданий [15]. Состав цементно-песчаных смесей регламентирован стандартом [16]; при этом соотношение цемента и песка в них может существенно отличаться. Следует отметить, что на прочность цементно-песчаных смесей оказывает влияние много различных факторов: происхождение песка, размер его частиц, марка цемента и т.п. В работе [17] исследовано влияние морского песка (менее дефицитного по сравнению с речным песком) как мелкого заполнителя на механические и прочностные свойства цементного раствора и бетона. Испытания по определению прочности на сжатие, модуля упругости цементного раствора и бетона показали, что использование морского песка вполне допустимо.

В работе [18] показано, что количество песка оказывает непосредственное влияние на строительные характеристики смеси, прочность и долговечность затвердевшего бетона. Установлено оптимальное значение количества песка при котором прочность цементно-песчано-гравийного материала является наибольшей.

В работе [19] исследовано влияние на свойства высокопрочного бетона изменения соотношения песка и заполнителя при одинаковом водоцементном соотношении. Авторы провели эксперименты по выявлению влияния на текучесть, сопротивление отрыву, прочность, модуль Юнга, усадку при высыхании и долговечность высокопрочного бетона при изменении соотношения песка и общего заполнителя. Установлено, что возможно получение бетона требуемого качества, даже если отношение песка к сумме заполнителей будет несколько увеличено в пределах, при которых сопротивление отрыву не ухудшается.

В работе [20] отмечено, что в современной строительной отрасли запасы природного песка истощаются из-за быстрых изменений в строительной деятельности. Кроме того, песок хорошего качества, возможно, придется транспортировать на большие расстояния, что увеличивает стоимость строительства. Таким образом, становится неизбежным использование альтернативных материалов для мелких заполнителей, которые включают переработанные заполнители, искусственный песок, дробленый каменный порошок и т. д. В работе экспериментально исследовано влияние замены природного песка промышленным песком на свойства цементного раствора со смесью 1:2, 1:6 и 1:3. Показано, что искусственный песок можно рекомендовать для замены природного речного песка в цементном растворе до 80 %. В работе [21] исследовано влияние величины песчинок на прочностные характеристики цементного раствора. Установлено, что образцы с более крупной фракцией песка получили более высокую прочность на сжатие через 7 и 28 дней, чем образцы с более мелкой фракцией песка. Однако, когда использовалось более высокое отношение воды к цементу (0,65—0,67), образцы с более мелкой фракцией песка достигли более высоких пределов прочности при длительном сжатии, изгибе и растяжении при раскалывании, чем образцы с более крупной фракцией песка.

В работе [22] проведена разрушающая и неразрушающая оценка бетона для оптимального соотношения объема песка и заполнителя. Заполнители вносят наибольший вклад в объем бетона и являются решающим параметром, определяющим его механические свойства. Определяли прочность на сжатие, прочность на растяжение и модуль упругости. Установлено, что оптимальное соотношение песка и заполнителя составило 0,40 и 0,44 для максимального размера заполнителя 12 и 19 мм соответственно, независимо от соотношения вода—цемент.

В работе [23] исследована форма частиц промышленного песка, текстура поверхности и поведение в бетоне. Установлено, что бетон на основе промышленного песка имеет большую прочность по сравнению с бетоном на основе речного песка.

В работе [24] исследовано влияние соотношения песок/заполнитель на прочность, долговечность и микроструктуру самоуплотняющегося бетона. Испытания проводились на образцах при пяти соотношениях песок/заполнитель: 51, 52, 53, 54 и 55 %. Установлено, что большая доля крупного заполнителя улучшила механические свойства на 10 % по сравнению с контрольными образцами (соотношение песок/заполнитель 52 %).

Согласно [25], предусмотрены различные испытания строительных растворов как в процессе изготовления, так и после затвердевания: определение подвижности, средней плотности, предела прочности и др. Недостатком этих методов является то, что они только косвенно оценивают количество цемента в цементно-песчаной смеси. В то же время известно, что одним из существенных параметров, определяющим конечную надежность и прочность строительной конструкции, является именно количество цемента, содержащееся в строительном растворе. В работе [26] предложен способ определения количества цемента в грунтоцементном материале конструкции путем добавления в цементный раствор порошкообразного индикатора — графита и последующего определения электропроводности раствора. Очевидно, что контроль количества цемента этим методом может происходить только в процессе заливки раствора. Таким образом, научной задачей является исследование закономерностей упругопластического внедрения индентора в поверхность строительных материалов (в данной работе цементно-песчаной смеси) с целью определения свойств готовых строительных изделий.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе для исследования соотношения цемента и песка на готовых изделиях путем упругопластического внедрения сферического индентора было предложено использовать методику, описанную в работах [27, 28]. Как известно, из всех методов испытания путем внедрения сферического индентора только число пластической твердости, определяемое по действующему стандарту [28], не зависит от условий испытания (в широком диапазоне изменения контактных нагрузок и диаметра сферического индентора) и, следовательно, является константой для данного материала. Это свойство пластической твердости базируется на линейной зависимости глубины остаточного отпечатка от контактной нагрузки. Несмотря на очевидные преимущества пластической твердости, возможность ее использования для строительных материалов не является очевидной и требует проведения дополнительных исследований. В связи с этим предварительно был экспериментально изучен характер зависимости глубины остаточного отпечатка от контактной нагрузки при упругопластическом внедрении сферического индентора в изделия из цементно-песчаной смеси. В практическом плане это исследование также является актуальным, поскольку позволит оперативно и без разрушения контролировать качество цементно-песчаной смеси как после изготовления строительных сооружений, так и при проведении мониторинга реального состояния строительных конструкций после длительной эксплуатации или воздействия различных внешних факторов: землетрясение, пожар и т.п. Следует подчеркнуть, что завышение марки раствора приводит к созданию излишнего запаса прочности и вызывает увеличение стоимости строительства и необоснованный перерасход цемента, а занижение марки приводит к тому, что возведенные конструкции обладают недостаточной прочностью и жесткостью, что во время их эксплуатации приводит к появлению трещин, больших прогибов или даже к авариям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для экспериментального исследования выбрали составы плиток из цементно-песочной смеси, наиболее часто используемые на практике; соотношение цемента и песка: для кладки кирпича — 1 часть цемента и 1,5 или 3 части песка; для стяжек — 1 часть цемента и 2 или 3 части песка; для штукатурки — 1 часть цемента и 3 части песка и др. При этом марки цемента по прочности могут отличаться. Смеси при соотношении песка и цемента 5:1 и выше (так называемые тощие смеси) используются редко, поскольку медленно застывают и имеют склонность осыпаться со временем. Для изготовления плиток из цементно-песочной смеси использовали цемент марки М500 [29] и речной песок, который по значению модуля крупности [30] относится к группе песка «очень мелкий». Подготовленную смесь перемешивали миксером и заливали в подготовленные формы. Изготовленные плитки имели толщину 80 мм, что соответствует требованию стандарта [3] при использовании метода пластических деформаций. В качестве индентора использовали закаленный стальной шарик (из стали ШХ-15) с твердостью по Виккерсу не менее HV850 кгс/мм² и диаметром 10 мм. Нагружение проводили с помощью прессы Бринелля ТШ-2. Глубину остаточных отпечатков измеряли с помощью индикатора часового типа (с ценой деления 0,001 мм), установленного в индикаторной стойке. Расстояние между отпечатками — не менее 30 мм, число повторных нагружений — 5 [3]. Испытания проводили через 28 суток после затвердевания смеси, когда смесь достигает проектной прочности.



Рис. 1. Поверхность плитки из цементно-песчаной смеси с остаточными отпечатками от сферического индентора.

На рис. 1 показана поверхность плитки из цементно-песчаной смеси с остаточными отпечатками от сферического индентора.

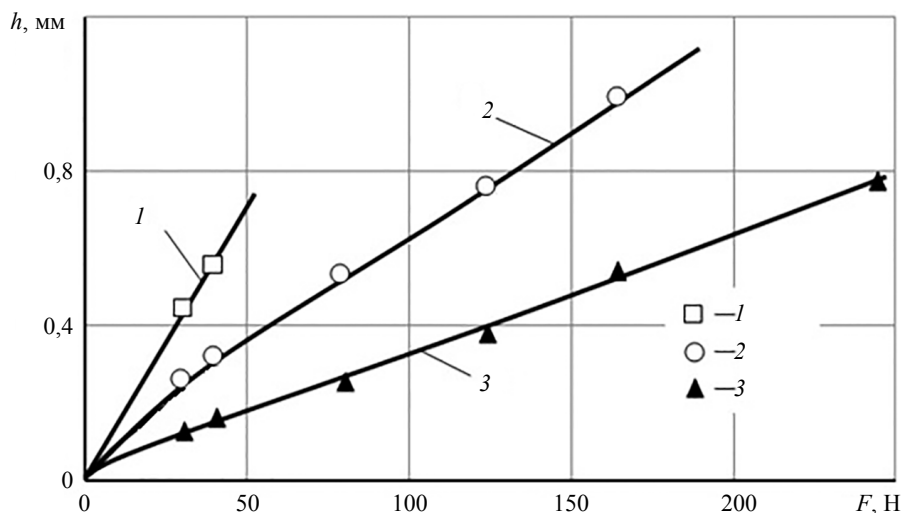


Рис. 2. Графики экспериментальных зависимостей глубин h остаточных отпечатков от контактной нагрузки F при внедрении стального сферического индентора (диаметром 10 мм) в поверхности плиток: кривая 1 соответствует цементно-песчаной смеси с соотношением компонентов 1 к 3; кривая 2 соответствует цементно-песчаной смеси с соотношением компонентов 1 к 1; кривая 3 соответствует плитке из чистого цемента.

На рис. 2 показаны графики экспериментальных зависимостей глубин h остаточных отпечатков от контактной нагрузки F при внедрении стального сферического индентора (диаметром 10 мм) в поверхности ряда плиток из цементно-песчаной смеси.

Из рис. 2 видно, что для плиток из цементно-песчаной смеси зависимость $h(F)$ имеет линейный характер (по крайней мере, до глубин $h = (0,08—0,10)D$, где D — диаметр сферического индентора), а, следовательно, для них может быть определено и значение пластической твердости согласно стандарту [28]. В табл. 1 для всех исследованных цементно-песчаных плиток пластическую твердость НД [28] вычисляли по формуле:

Расчет пластической твердости НД цементно-песчаных плиток

Соотношение песка и цемента мате- риала плитки	Контактные нагрузки, Н		Глубины остаточных отпечатков, мм		Пластическая твердость НД, МПа, см. (1)
	F_1	F_2	h_1	h_2	
3:1	613	818	0,440	0,574	49
2,5:1	613	818	0,325	0,434	60
2:1	818	1643	0,320	0,680	73
1,5:1	818	1643	0,290	0,585	89
1:1	1643	3270	0,520	0,950	120
0,5:1	1643	3270	0,310	0,670	144
0:1	1643	3270	0,250	0,510	199

$$\text{НД} = \frac{F_2 - F_1}{\pi D(h_2 - h_1)}, \quad (1)$$

где F_1 и F_2 — нагрузки на сферический индентор; h_1 и h_2 — отвечающие им глубины остаточных отпечатков; D — диаметр сферического индентора.

Результаты, приведенные в табл. 1, проиллюстрированы графически на рис. 3. Эти результаты можно аппроксимировать следующей зависимостью:

$$C = 0,0887\text{НД}^{1,312} + 8, \quad (2)$$

где C — процент содержания цемента в плитке из цементно-песчаной смеси.

Как видно из рис. 3 погрешность при использовании зависимости (2) в большинстве случаев не превышает (2—6)% по сравнению с экспериментальными данными, приведенными в табл. 1.

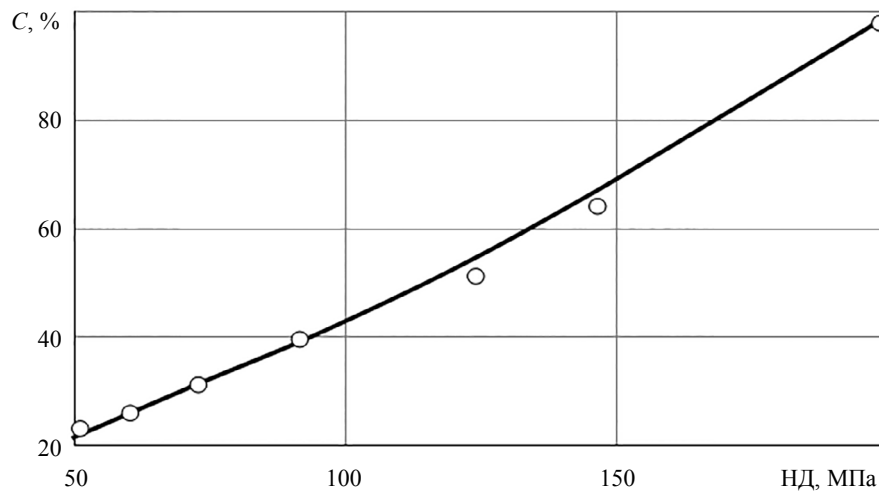


Рис. 3. График зависимости содержания цемента C в плитке из цементно-песчаной смеси в зависимости от пластической твердости НД плитки: значки — данные табл. 1; линия — расчет по формуле (2).

Следует отметить, что для определения твердости можно использовать как стационарные, так и переносные твердомеры [31]. Для готовых крупногабаритных строительных изделий целесообразно использовать переносной вакуумный твердомер [32, 33], в котором закрепление на контролируемой поверхности и создание рабочей нагрузки реализуют при помощи атмосферного давления. Общий вид вакуумного твердомера показан на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид вакуумного твердомера.

Диаметральные размеры вакуумного твердомера определяются необходимой величиной рабочей нагрузки на индентор. Для создания рабочей нагрузки в 1 Н требуется 12—13 мм² активной площади верхней крышки твердомера [34]. Таким образом, например, при необходимой величине рабочей нагрузки $F = 981$ Н необходимый диаметр верхней крышки твердомера составит ~130 мм, а при $F = 4905$ Н — ~285 мм, что вполне приемлемо для переносного твердомера, предназначенного для контроля крупногабаритных строительных изделий. Для создания вакуума в полости твердомера можно использовать вакуум-насос ВН-461М или НВР-1,25Д, а также их аналоги.

Вакуумный твердомер работоспособен при любой ориентации в пространстве с возможностью самоустанавливания на поверхности детали, что позволяет применять его в сочетании с исполнительными органами робототехнических устройств. Возможно также использование твердомера для дистанционного контроля; для этого необходимо в качестве датчика перемещений установить, например, индуктивный датчик.

Необходимо отметить, что наиболее достоверное определение твердости металла обеспечивается прямыми статическими методами измерения, выполняемыми согласно действующим стандартам; все остальные методы в той или иной степени являются косвенными, основанными на корреляции различных механических и физических параметров с характеристиками твердости, определенными прямыми методами. При применении твердомеров статического действия обеспечивается также и наименьшая погрешность измерения твердости.

ВЫВОДЫ

Установлено, что для материалов из цементно-песчаной смеси в достаточно широком диапазоне изменения глубин остаточных отпечатков при внедрении сферического индентора и контактных нагрузок справедлива линейная зависимость глубины остаточного отпечатка от нагрузки. Это

позволяет использовать закономерности пластической твердости для контроля содержания цемента в этих материалах. При использовании иных сочетаний марок цемента и песка следует дополнительно экспериментально устанавливать количественную зависимость процентного содержания цемента от пластической твердости. В тоже время в массовом строительстве используется относительно небольшое количество сочетаний марок цемента и песка, для которых можно предварительно установить соответствующую зависимость по описанной методике.

Работа выполнена в рамках конкурса МК-2021 (грант Президента России № МК-84.2021.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Поletaев К.Н., Юферева А.Д.* Сравнение отечественной и зарубежной систем управления качеством строительства // StudArctic forum. № 1 (5). 2017. С. 65—76.
2. ГОСТ Р 56542—2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Введ. 30.10.2019.
3. ГОСТ 22690—2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. Межгосударственный стандарт. Введ. 01.04.2016.
4. DIN EN 12504-2-2019-10. Испытания бетона в конструкциях. Часть 2. Неразрушающий контроль. Определение критерия отскока.
5. *Helal J., Sofi M., Mendis P.* Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods // Electronic Journal of Structural Engineering. 2015. V. 14. № 1. P. 97—105.
6. *Fadil H., Jelagin D.* Spherical indentation test for quasi-non-destructive characterisation of asphalt concrete. Part I // Materials and Structures. 2022. V. 3(55). № 102.
7. *Ишлинский А.Ю.* Осесимметричная задача пластичности и проба Бринелля // Прикладная математика и механика. 1944. Т. 8. Вып 3. С. 201—223.
8. ГОСТ Р 56474—2015. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Введ. 15.06.2015.
9. РД ЭО 0186-00. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса сосудов энергоблоков АЭС. М.: Концерн Росэнергоатом, 1999.
10. *Xu L., Sun D., Ma J., Sun G., Ling S., Hu M.* Applications of depthsensing indentation on asphalt materials: A review // Construction and Building Materials. 2021. V. 268. № 121195.
11. *Fadil H., Jelagin D., Larsson P.-L.* On the Measurement of two Independent Viscoelastic Functions with Instrumented Indentation Tests // Experimental Mechanics. 2018. V. 58. № 2. P. 301—314.
12. *Frech-Baronet J., Sorelli L., Chen Z.* A closer look at the temperature effect on basic creep of cement pastes by microindentation // Construction and Building Materials. 2020. V. 258. № 119455.
13. *Wei Y., Liang S., Gao X.* Indentation creep of cementitious materials: Experimental investigation from nano to micro length scales // Construction and Building Materials. 2017. V. 143. P. 222—233.
14. *Amini K., Sadati S., Ceylan H., Taylor P.* Effects of mixture proportioning, curing, and finishing on concrete surface hardness // ACI Materials Journal. 2019. V. 116. № 2. P. 119—126.
15. *Гришин В.А.* Анализ исследований состава цементно-песчаной смеси для 3D печати зданий. Технические науки: проблемы и решения / Сборник статей по материалам XLIV международной научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 64—68.
16. ГОСТ 28013—98. «Растворы строительные. Общие технические условия» (с изменением № 1, ИУС 11-2002). Введ. 01.07.1999.
17. *Karthikeyan G., Vijai K., Regin D.J.J.* Influence of marine sand as fine aggregate on mechanical and durability properties of cement mortar and concrete // Materials Research Express. 2022. V. 9 (3). № 035504.
18. *Li X., Zhang S., Wu H.* Study on the Material Properties of Cement-sand gravel // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 513. № 012036.
19. *Nakata Y., Saito T., Kajita H., Otsuka S., Haruyama N.* Influence on properties of high-strength concrete by the change of sand-total aggregate ratio in identical water-cement ratio // Journal of Structural and Construction Engineering. 2018. V. 83 (748). P. 751—761.
20. *Mathew B., Freeda Christy C., Joseph B., Anuragi P.* An experimental study on properties of cement mortar by replacement of natural sand with manufactured sand // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2016. V. 7. № 4. P. 483—490.
21. *Lim S., Tan C., Chen K., Lee M., Lee W.* Effect of different sand grading on strength properties of cement grout // Construction and Building Materials. 2013. V. 38. P. 348—355.

22. *Mohammed T.U., Mahmood A.H., Mohammad Z.B.H., Joy J.A., Ahmed M.A.* Destructive and non-destructive evaluation of concrete for optimum sand to aggregate volume ratio // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2021. V. 15. № 6. P. 1400—1414.
23. *Shen W., Yang Z., Cao L., Cao Liu, Liu Y., Yang H., Lu Z., Bai J.* Characterization of manufactured sand: Particle shape, surface texture and behavior in concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 114. P. 595—601.
24. *Lin W.* Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 242. № 118046.
25. ГОСТ 5802—86. «Растворы строительные. Методы испытаний». Введ. 01.07.1986.
26. *Гришко Д.А.* Патент 2513567 РФ МПК G01N 27/22. Способ определения количества цемента в грунтоцементном материале конструкции / Оpubл. 20.04.2014. Бюл. № 11.
27. *Матлин М.М., Мозгунова А.И., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А.* Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин: монография. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 247 с.
28. ГОСТ 18835—73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. Введ. 01.01.74 (ограничение срока действия снято Межгосударственным Советом стандартизации, метрологии и сертификации, протокол № 3-93, ИУС № 5/6, 1993 г.).
29. ГОСТ 31108—2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 1.03.2021 (введен вместо ГОСТ 10178—85 и ГОСТ 31108—2016).
30. ГОСТ 8736—2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Введ. 01.04.2015.
31. *Матюнин В.М.* Индентирование в диагностике механических свойств материалов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 288 с.
32. *Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н., Костюков В.А.* Контроль твердости крупногабаритных металлоизделий (обзор публикаций) // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2020. № 10. С. 30—33.
33. *Дрозд М.С., Матлин М.М., Бугаевский М.В., Самарин С.Э.* А. с. № 1126838 МПК G01N 3/42. Устройство для определения твердости материалов / Оpubл. 30.11.1984. Бюл. № 44.
34. *Александров М.П.* Подъемно-транспортные машины. М.: Высшая школа, 1985. 520 с.

РАЗРАБОТКА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОЖНЫХ ДОЗИМЕТРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

© 2022 г. А.И. Сюрдо^{1,*}, А.М. Волошин¹, Р.М. Абашев¹, В.С. Красноперов², И.И. Мильман¹,
Е.В. Моисейкин³

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

²АО «Уральский электромеханический завод»,
Россия 620000 Екатеринбург, ул. Студенческая, 9

³Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: *surdo@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 31.05.2022; после доработки 06.07.2022

Принята к публикации 08.07.2022

Для автоматизированной системы индивидуального дозиметрического контроля, использующей для считывания эффект оптически стимулированной люминесценции, создан прототип кожного дозиметра с нижним пределом диапазона измеряемой дозы 100 мкЗв, энергетические и дозовые характеристики которого удовлетворяют Российским и зарубежным нормам радиационной безопасности. Полученное стало возможным в результате разработки и реализации описанного в работе нового подхода к созданию на поверхности детектора чувствительного к облучению слоя с массовой толщиной 5 мг/см². В основе подхода лежит специальная лазерная обработка поверхности детектора, логике подбора параметров которой уделено особое внимание.

Ключевые слова: индивидуальный дозиметрический контроль, кожные дозиметры, оптически стимулированная люминесценция, индивидуальный эквивалент дозы в коже, корунд, анионная дефектность, поверхность, ИК-лазерная обработка, тонкие чувствительные к облучению слои, дозовые и энергетические зависимости.

DOI: 10.31857/S0130308222080073, EDN: BQYGEZ

ВВЕДЕНИЕ

Применение эффекта оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ) для измерения доз облучения является новым трендом в индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК) в XXI веке [1—3]. По нашим данным в России планируется к выпуску пока единственная автоматизированная ОСЛ-система ИДК КОРОС333, которая разрабатывается совместно специалистами из Института физики металлов УрО РАН, АО «Уральский электромеханический завод» и Уральского федерального университета. Система КОРОС-333 имеет в своем составе считывающее и стирающее устройства и 3 типа дозиметров для измерения индивидуального эквивалента дозы облучения (ИЭД) всего тела $H_p(10)$, ИЭД хрусталика глаза $H_p(3)$ и ИЭД кожного покрова $H_p(0,07)$ [4, 5]. Согласно предъявляемым требованиям перечисленные типы дозиметров должны измерять $H_p(10)$, $H_p(3)$ и $H_p(0,07)$ в смешанных полях бета- и фотонных ионизирующих излучений и в широком дозовом и энергетическом диапазонах, которые установлены в нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009 [6].

Одна из основных сложностей при создании дозиметров для измерения $H_p(0,07)$ или кожных дозиметров связана с разработкой воспроизводимой технологии получения тонких чувствительных к облучению слоев с массовой толщиной 5 мг/см². В [6] такое требование к массовой толщине чувствительного слоя базируется на необходимости ее близости к массовой толщине чувствительного к облучению базального слоя кожи, которая в соответствии с современными представлениями составляет ~5 мг/см². Даже незначительное относительно 5 мг/см² увеличение чувствительного слоя у детектора кожного дозиметра приводит к существенной недооценке $H_p(0,07)$ [7]. Согласно [6] для имитации кожного покрова человека в составе дозиметра также должен быть покровный слой толщиной 5 мг/см², который равен толщине эпидермиса или защитного ороговевшего слоя открытых участков кожи тела. Исключения составляют ладони и пятки. Для них в кожных дозиметрах используется покровный слой с массовой толщиной 40 мг/см². В этой связи важно отметить, что в серийно выпускаемых не только ОСЛ-системах, но и термолюминесцентных системах ИДК отсутствуют дозиметры для измерения $H_p(0,07)$, полностью удовлетворяющие вышеуказанным требованиям. Толщины чувствительных слоев у большинства из них составляют не менее 7 мг/см² [8—12].

В [13] нами был предложен способ нанесения тонких наноструктурированных слоев анионодефицитного корунда ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}\delta$) на алюминиевую подложку с помощью распыления мишени импульсным наносекундным электронным пучком. Проведенные люминесцентные исследования, включая измерения кривых затухания ОСЛ и кривых термостимулированной люминесценции (ТСЛ), у таких слоев показали [14], что для них характерен значительный фединг или быстрая потеря дозиметрической информации при хранении. Указанное свойство сильно ограничивает применение подобных материалов в ИДК.

Поэтому нами было предпринято еще несколько попыток создания детекторов с тонким чувствительным слоем, у которых доза облучения могла быть считана не только с использованием ОСЛ, но и ТСЛ. Чувствительные слои толщиной 5 мг/см^2 создавались ИК-лазерной обработкой поверхности термооптически обработанных кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}\delta$ [15, 16] и специальным образом подготовленной поверхности кристаллов корунда стехиометрического состава или $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [17]. Второй способ [17] оказался более технологичным и воспроизводимым. Однако высвечиваемые в ходе считывания ОСЛ- и ТСЛ-выходы из таких слоев оказались недостаточными для измерения $H_p(0,07) \leq 500 \text{ мкЗв}$. Приемлемым, согласно [18, 19], должен быть нижний предел диапазона измеряемой дозы 100 мкЗв с пределом допускаемой основной относительной погрешности измерения 26% .

Не менее жесткие требования предъявляются к дозовому и энергетическим диапазонам [18, 19]. При облучении бета- и фотонными ионизирующими излучениями считываемые с кожных дозиметров сигналы должны быть пропорциональны дозе в диапазоне $100 \text{ мкЗв} — 10 \text{ Зв}$. Такие дозиметры также должны иметь расширенный энергетический диапазон: от 15 кэВ до 3 МэВ – для фотонных ионизирующих излучений и от 60 до 800 кэВ — для бета-излучений.

Поэтому целью работы являлась разработка прототипа дозиметра для измерения $H_p(0,07)$ с нижним пределом диапазона измеряемой дозы не более 100 мкЗв , а также исследование у него дозовых и энергетических зависимостей при облучении бета- и фотонными ионизирующими излучениями в диапазонах, включающих требуемые в НРБ 99/2009 [6].

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, СПОСОБЫ ИХ ОБРАБОТКИ, СРЕДСТВА И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Конструкция прототипа кожного ОСЛ-дозиметра изображена на рис. 1. Большинство ее элементов выполнено из пластика с использованием аддитивных технологий, включая 3D-печать. У дозиметра имеется корпус (1), в котором размещаются карточка (2) с детектором (3) и защитная пленка толщиной 5 мг/см^2 (4). Конструктив корпуса также содержит два гибких элемента (5), позволяющих удерживать дозиметр на пальце руки.

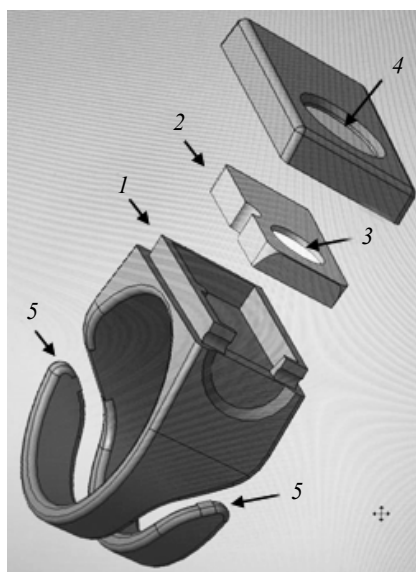


Рис. 1. Конструкция прототипа кожного ОСЛ-дозиметра:
1 — корпус; 2 — карточка; 3 — детектор; 4 — защитная пленка; 5 — гибкие элементы удерживания.

В качестве образцов детекторов в прототипе использовали монокристаллы $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ диаметром 5 мм и толщиной 1 мм. Одна из плоских поверхностей каждого образца специальным образом обрабатывалась, и далее на ней сканирующим ИК-лазерным лучом создавался тонкий чувствительный к облучению слой [17]. Лазерную обработку образцов проводили на установке LaserPro Mercury II M-25 с длиной волны излучения 10,6 мкм, плотностью сканирования $s = 4\text{--}20 \text{ мм}^{-1}$, частотой лазерных импульсов $f = 0,4\text{--}4,0 \text{ кГц}$, скоростью сканирования $v_{\text{скан}} = 0,06\text{--}0,10 \text{ м/с}$ и энергией, передаваемой в одном импульсе, $E_{\text{pulse}} = 3\text{--}30 \text{ мДж}$. Для повышения ОСЛ-выхода детекторов и, как следствие, для снижения у них нижнего предела диапазона измеряемой дозы подбирали оптимальные режимы лазерной обработки путем изменения s , f , v и E_{pulse} .

Микроскопические исследования, направленные на изучение микроструктуры чувствительных слоев и ее связи с ОСЛ-свойствами, проводили в проходящем свете на микроскопе МИН-8 с цифровой фотокамерой типа TourCam UCMOS09000КРВ. Полученные цифровые изображения обрабатывали с помощью специального программного обеспечения AmScore.

Прототип дозиметра облучали на фантоме, имитирующем палец руки и имеющем близкий к телу человека эффективный атомный номер. При фотонном облучении дозовую и энергетическую зависимости для дозиметров измеряли с использованием изотопных источников на основе ^{137}Cs и ^{60}Co , а также рентгеновского аппарата типа Eresco 65 MF4. Для получения рентгеновского излучения с так называемым «узким спектром» N16-N250, в соответствии с [20, 21], выбирали необходимые значения высокого напряжения и толщины фильтрующих элементов. Индивидуальные эквиваленты доз $H_p(0,07)$ при фотонном облучении определяли расчетным путем с учетом экспозиционной дозы, измеренной клиническим дозиметром 27012, данных [20, 21] и эффективной энергии фотонного излучения.

Дозовую зависимость при бета-облучении определяли с использованием бета-источника $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ со средней энергией 930 кэВ. При исследовании энергетической зависимости чувствительности дозиметров наряду с $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ использовали источники бета-излучения ^{147}Pm и ^{85}Kr со средней энергией 60 и 250 кэВ соответственно. Величину $H_p(0,07)$ при бета-облучении оценивали расчетно-экспериментальным методом по результатам измеренных флюенсов у используемых бета-источников и данным об эквивалентной дозе на единичный флюенс при заданной энергии бета-частиц [6].

Кривые ОСЛ измеряли на считывателе КОРОС-333. ОСЛ-сигнал в нем регистрировался фотоумножителем N10682-110 фирмы Hamamatsu. Источником стимуляции служила сборка из мощных светодиодов с максимумом излучения при $\lambda_{\text{stim}} = 530 \text{ нм}$. Для получения наилучшего соотношения «сигнал/шум» при регистрации применяли спектральное разделение стимулирующего и ОСЛ-сигналов. Для этих целей задействовали наборы абсорбционных светофильтров из цветного стекла типа ЖС18 и СС15 [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены микроскопические изображения поверхности образцов детекторов № 1 и № 2 соответственно до (а) и после лазерной обработки (б), которая проводилась по технологии, описанной в [17], со следующими параметрами: $s = 20 \text{ мм}^{-1}$, $f = 3,9 \text{ кГц}$, $v_{\text{скан}} = 0,1 \text{ м/с}$, $E_{\text{pulse}} = 3,0 \text{ мДж}$. Как видно, лазерное сканирование с параметрами из [17] приводит к появлению микрокристаллической структуры на поверхности образца № 2. Однако на ней невозможно выявить не только треки перемещения лазерного луча, но и следы его импульсного воздействия, что может быть вызвано сильным перекрытием областей воздействия лазерного луча. Отмеченное может способствовать не только неоднократному переплавлению чувствительного слоя детектора в соседних областях, но и подавлению ОСЛ-выхода из него.

Для проверки выдвинутого предположения были изменены режимы лазерного сканирования. При одном из них (для образца № 3) значения s , f , v и E_{pulse} подбирались так, чтобы области воздействия лазерного импульса вдоль и поперек треков сканирования не перекрывались (рис. 2в), а при другом (для образца № 4) — так, чтобы указанные области имели минимальные перекрытия (рис. 2г). В итоге такого подбора получились следующие значения параметров лазерной обработки: для образца № 3: $s = 10 \text{ мм}^{-1}$, $f = 0,4 \text{ кГц}$, $v_{\text{скан}} = 0,1 \text{ м/с}$, $E_{\text{pulse}} = 30 \text{ мДж}$; для образца № 4: $s = 14 \text{ мм}^{-1}$, $f = 0,4 \text{ кГц}$, $v_{\text{скан}} = 0,06 \text{ м/с}$, $E_{\text{pulse}} = 30 \text{ мДж}$.

Кривые ОСЛ образцов №№ 1—4, микрофотографии которых приведены на рис. 2 (а—г), представлены на рис. 3 (кривые 1—4 соответственно). Из приведенных данных следует, что у образца № 3, не имеющего перекрытия областей воздействия лазерного пучка, ОСЛ-выход (кривая 3) в ~4 раза меньше такового у образца № 2 (кривая 2), обработанного по технологии, как в

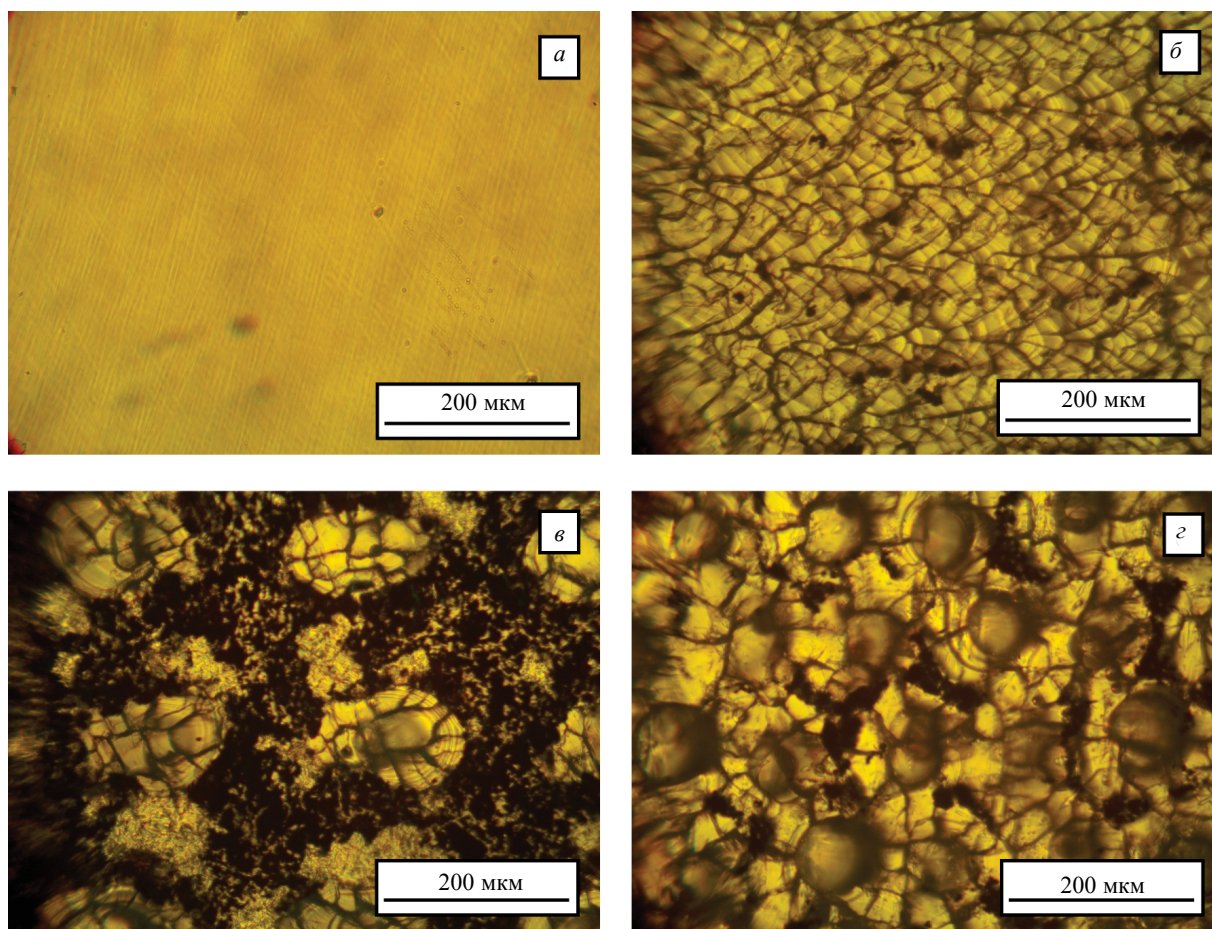


Рис. 2. Микрофотографии поверхности образцов № 1—4 соответственно до (а) и после ИК-лазерной обработки в соответствии с [17] (б), без перекрытия областей воздействия (в) и с их минимальным перекрытием (г).

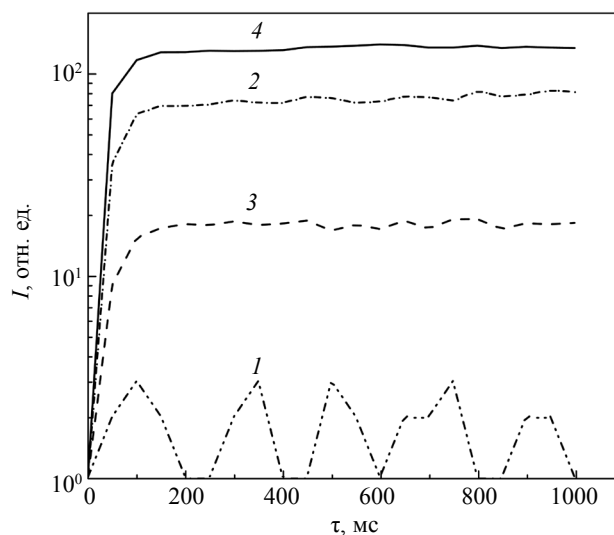


Рис. 3. Кривые ОСЛ образцов № 1—4 (кривые 1—4 соответственно), микрофотографии которых приведены на рис. 2 и доза облучения которых составляла 30 мЗв.

[17], и в ~ 9 раз превышает ОСЛ-выход необработанного образца 1 (кривая 1). Однако если учесть, что измененная структура у образца № 3 занимает $\sim 28\%$ площади обработанной поверхности, то при нормировке на нее ОСЛ-выходы образцов № 2 и № 3 становятся близкими. При

увеличении указанной площади до 100 % (см. рис. 2а), как у образца № 4, ОСЛ-выход возрастает в ~8 раз относительно образца № 3. Подбирая сочетание значений s и $v_{\text{скан}}$ и тем самым незначительно, до 10—20 %, увеличивая величину перекрытия областей с измененной структурой, удалось поднять ОСЛ-выход детекторов еще в 1,5-2 раза, что позволило уверенно измерять $H_p(0,07) \geq 100$ мкЗв.

Как выше отмечено, важным параметром кожных детекторов является толщина чувствительного слоя. Для ее определения проводилась механическое утонение с минимально возможным шагом ~5—8 мкм и с последующим измерением ОСЛ-выхода. Полученная зависимость нормированного ОСЛ-выхода от толщины удаленного слоя у одного из образцов, подвергнутых оптимальной ИК-лазерной обработке, показана на рис. 4. Из приведенной зависимости следует, что первый слой толщиной ~15—20 мкм не является ОСЛ-активным (рис. 4, участок I). Более того, как видно из рис. 4, он ослабляет ОСЛ-выход из образца не менее, чем на 15—20 %. Неактивный слой имеет белую окраску и достаточно легко удаляется шлифовкой с использованием алмазного инструмента. Под ним находится ОСЛ-активный слой, поскольку при его утонении ОСЛ-выход начинает падать (рис. 4, участок II). Активный слой уже близок по цвету к основному материалу. Его твердость значительно выше первого слоя. После удаления неактивного, ОСЛ-активный слой в проходящем свете продолжает иметь микрокристаллическую структуру, подобную изображенной на рис. 2а. После утонения образца еще на 10—15 мкм указанная структура практически полностью исчезает, а микроскопическое изображение поверхности становится как у монокристалла (см. рис. 2а). Одновременно резко, на 95—98 %, снижается ОСЛ-выход. Дальнейшее его утонение незначительно уменьшает ОСЛ-выход (рис. 4, участок III). На основании анализа данных ~10 подобных экспериментов по утонению с контролем толщины образцов и ОСЛ-выхода была сделана оценка толщины ОСЛ-активного чувствительного к облучению слоя. Она составила ~12 мкм или ~5 мг/см², что на ~20 % больше длины волны используемого ИК-лазерного излучения и вполне вписывается в известные закономерности взаимодействия оптического излучения с непрозрачным для него веществом [22]. Небольшое превышение толщины созданного ОСЛ-активного слоя может быть вызвано образованием кратеров, глубина которых, по нашим оценкам изменения микроскопических изображений при утонении, составляет при используемых режимах ИК-лазерной обработки 12—15 мкм.

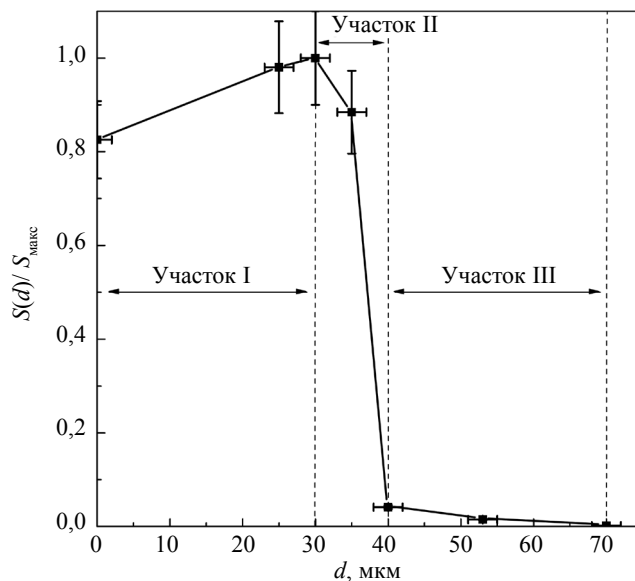


Рис. 4. Зависимость нормируемой светосуммы ОСЛ от толщины удаленного слоя, созданного ИК-лазерной обработкой на поверхности образца $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при $s = 15$ мм⁻¹, $f = 0,4$ кГц, $v_{\text{скан}} = 0,029$ м/с и $E_{\text{pulse}} = 30$ мДж.

С учетом полученных данных были изготовлены несколько десятков образцов детекторов с тонким чувствительным к облучению слоем. Далее такие детекторы помещались в кожные дозиметры (см. рис. 1), проводилась их калибровка при $H_p(0,07) = 10$ мЗв и изучались дозовые зависимости.

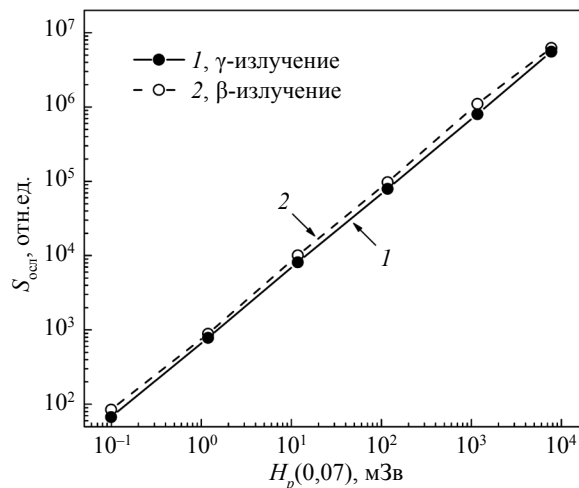


Рис. 5. Дозовые зависимости показаний калиброванных кожных дозиметров при измерении $H_p(0,07)$ в полях фотонного (1) и бета- (2) излучений.

На рис. 5 показаны зависимости ОСЛ-выхода для калиброванных дозиметров от дозы $H_p(0,07)$ при гамма- и бета-облучении в поле соответственно источников ^{137}Cs (кривая 1) и $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (кривая 2). В двойных логарифмических координатах они линейны в диапазоне $H_p(0,07)$ от 100 мкЗв до 10 Зв как при гамма-, так и при бета-облучении. Значения пределов основной погрешности для указанного диапазона доз были определены по результатам 20 измерений в каждой из указанных на рис. 5 точек и не превысили требуемых в [19]. В частности, для $H_p(0,07) = 100$ мкЗв такой предел в случае фотонного облучения составил 19 %, бета-облучения – 25 %, а требуемые пределы для обоих видов облучения согласно [19] не должны быть выше 26 %.

Известно, что корунд является нетканеэквивалентным материалом. Его эффективный атомный номер равен 10.6. Для учета указанного отклонения в алгоритме расчета доз облучения необходимо знание энергетической зависимости ОСЛ-выхода у дозиметра или хода с жесткостью. Такие измерения с прототипом дозиметра были проведены для бета- и фотонных ионизирующих излучений (рис. 6, кривые 1, 2). Согласно нормативным документам [18, 19] для бета-излучений энергетическая зависимость должна быть измерена в диапазоне 60–800 кэВ, а для фотонных — 15 кэВ–3 МэВ.

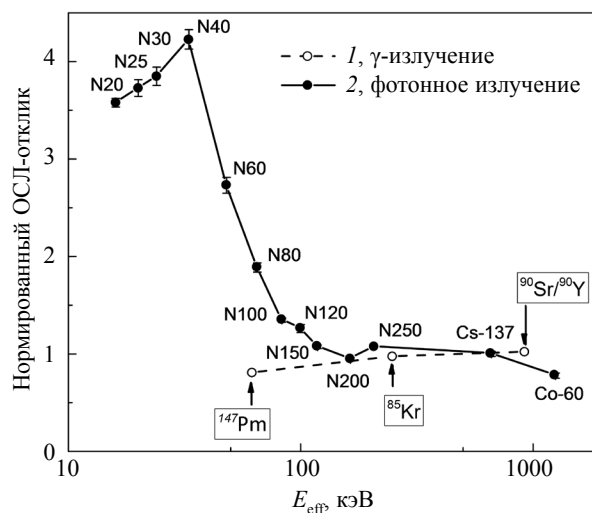


Рис. 6. Энергетические зависимости чувствительности прототипа дозиметра при измерении индивидуального эквивалента дозы $H_p(0,07)$ в полях бета- (1) и фотонного (2) излучений.

В случае с бета-облучением ОСЛ-выход незначительно, в пределах 20 %, увеличивается с ростом энергии (рис. 6, кривая 1), что укладывается в нормы [23] и не требует учета в алгоритме расчета доз. Для фотонного облучения полученная энергетическая зависимость близка к известной [2, 24] с максимумом вблизи 40 кэВ для дозиметров с детекторами толщиной ~1 мм на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, используемых для измерения $H_p(10)$. Однако в отличие от последних, у прототипа кожного дозиметра, содержащего разработанный детектор с тонким чувствительным слоем линейной толщиной 12 мкм и массовой толщиной 5 мг/см², ОСЛ-выход в диапазоне энергий 15—40 кэВ изменяется сравнительно слабо, всего на 20 %. Объяснение заключается в следующем. У толстых детекторов при уменьшении энергии в указанном диапазоне ОСЛ-выход падает в ~56 раз из-за сильного поглощения мягкого излучения поверхностными слоями, что приводит к занижению показаний, связанных с измеряемой дозой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для автоматизированной системы индивидуального дозиметрического контроля, использующей для считывания эффект оптически стимулированной люминесценции, создан прототип кожного дозиметра с нижним пределом диапазона измеряемой дозы 100 мкЗв, энергетические и дозовые характеристики которого удовлетворяют Российским и зарубежным нормам радиационной безопасности. Полученное стало возможным в результате разработки и реализации описанного в работе нового подхода к созданию на поверхности детектора чувствительного к облучению слоя с массовой толщиной 5 мг/см². В основе подхода лежит специальная лазерная обработка поверхности детектора, логике подбора параметров которой уделено особое внимание. Так, обнаружено, что измененная обработкой структура поверхности детектора в области воздействия лазерного импульса сильно неоднородна. В ее центре находится кратер, а на его периферии — микрокристаллическая структура. Именно она является ОСЛ-активной.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1) при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-48-660045).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yukihara E.G., McKeever S.W.S., Akselrod M.S.* State of art: Optically stimulated luminescence dosimetry – Frontiers of future research // *Radiation Measurements*. 2014. V. 71. P. 15—24.
2. *Yukihara E.G., McKeever S.W.S.* Optically Stimulated Luminescence: Fundamentals and Applications. Chichester: Wiley, 2011. P. 384.
3. *Botter-Jensen L., McKeever S.W.S., Wintle A.G.* Optically Stimulated Luminescence Dosimetry // Elsevier Science. 2003. P. 355.
4. *Туйков А.С., Абашев Р.М., Красноперов В.С., Сюрдо А.И.* Спектральное и временное разделение сигналов оптической стимуляции и оптически стимулированной люминесценции в аниондефектном корунде / *Физика. Технологии. Инновации ФТИ2021. Тезисы докладов*. Екатеринбург: изд-во УрФУ, 2021. С. 491—492.
5. АО «Уральский электромеханический завод» [электронный ресурс]: Автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля КОРОС-333, URL: <http://ural.prom-rus.com/kontrolno-izmeritelnie-pribori-i-avtomatika/oborydovanie-metrologicheskoe/40860/> (дата обращения: 21.04.2022).
6. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. НРБ99/2009. Санитарные правила и нормативы. М.: Роспотребнадзор, 2009. С. 100.
7. *Сюрдо А.И., Болдеш А.В., Власов М.И., Мильман И.И.* Оценка погрешностей измерения поглощенных доз кожными и глазными дозиметрами с отличающимися толщинами активных и защитных слоев // *Аппаратура и новости радиационных измерений*. 2014. № 1. С. 2—8.
8. *Bilski P., Olko P., Burgkhardt B., Piesch E.* Ultra-thin LiF:Mg,Cu,P detectors for beta dosimetry // *Radiation Measurements*. 1995. V. 24. No. 4. P. 439—443.
9. *Luo Ling Z., Velbeck Ken, Rotunda Joseph, Esser Reiner.* An improved HarshawTLD™ extremity dosimeter – DXTRAD beta ring // *Radiation Measurements*. 2011. V. 46. Is. 6—7. P. 621—625.
10. *Asena A., Crowe S.B., Kairn T., Dunn L., Cyster M., Williams I.M., Charles P.H., Smith S.T., Trapp J.V.* Response variation of optically stimulated luminescence dosimeters // *Radiation Measurements*. 2014. V. 61. P. 21—24.
11. *Perks C.A., Yahnke C., Million M.* Medical dosimetry using Optically Stimulated Luminescence dots and microStar readers // *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. 2008. V. 43. Is. 8. P. 10.
12. *Шлеенкова Е.Н.* Экспериментальное исследование характеристик индивидуальных термолюминесцентных дозиметров для измерения эквивалентных доз в коже и хрусталике глаза // *Радиационная гигиена*. 2014. Т. 7. № 4.

13. Ильвес В.Г., Соковнин С.Ю., Сурдо А.И., Власов М.И., Мильман И.И. Способ получения тонкослойного, основанного на эффектах термически и/или оптически стимулированной люминесценции детектора заряженных частиц ядерных излучений на основе оксида алюминия / Патент РФ на изобретение № 2507629 от 20.02.2014. Бюл. № 5.
14. Surdo A.I., Vlasov M.I., Il'ves V.G., Milman I.I., Pustovarov V.A., Sokovnin S.Yu. Nanostructured layers of anion-defective gamma-alumina — New perspective TL and OSL materials for skin dosimetry. Preliminary results // Radiation Measurements. 2014. V. 71. P. 47—50.
15. Сарычев М.Н., Мильман И.И., Сурдо А.И., Абашев Р.М. Способ получения тонкослойных детекторов ионизирующих излучений для кожной и глазной дозиметрии, использующий стандартный детектор $Al_2O_3:C$ на базе анион-дефектного корунда: патент на изобретение / Патент РФ на изобретение № 2697661 от 16.08.2019. Бюл. № 23.
16. Туйков А.С., Сурдо А.И., Абашев Р.М., Красноперов В.С., Мильман И.И. Спектральное и временное разделение сигналов оптической стимуляции и оптически стимулированной люминесценции в анионодефектном корунде / Физика. Технологии. Инновации: сборник статей VIII Международной молодежной научной конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2021. С. 462—468.
17. Мильман И.И., Сурдо А.И., Абашев Р.М. Способ получения тонкослойных детекторов ионизирующих излучений для кожной и глазной дозиметрии / Патент РФ на изобретение № 2747599 от 11.05.2021. Бюл. 14.
18. IEC 62387:2020. Radiation protection instrumentation — Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta.
19. СТО 1.1.1.01.001.0877-2020. Автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля атомных электростанций. Технические требования, 2020.
20. ISO 4037-4:2019. Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 4: Calibration of area and personal dosimeters in low energy X reference radiation fields.
21. ГОСТ 8.087—2000. Установки дозиметрические рентгеновского и гамма-излучений эталонные. Методика поверки по мощности экспозиционной дозы и мощности кермы в воздухе. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
22. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / Курс лекций. М.: Наука, 1989. С. 280.
23. МУ 2.6.5.037-2016. Контроль эквивалентной дозы фотонного и бета-излучения в коже и хрусталике глаза. Москва: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016.
24. Gasparian P.B.R., Vanhavere F., Yukihiro E.G. Evaluating the influence of experimental conditions on the photon energy response of $Al_2O_3:C$ optically stimulated luminescence detectors // Radiation Measurements. 2012. V. 47. P. 243—249.



28 июня 2022 года на 85-м году жизни ушел из жизни доктор физико-математических наук, заслуженный работник высшей школы, профессор кафедры физики, кафедры методов контроля и диагностики **Виталий Федорович Новиков**.

Виталий Федорович родился 3 августа 1937 года в селе Заводопетровский Ялуторовского района Тюменской области. Окончил в 1961 году Тюменский педагогический институт по специальности «Учитель физики и основ производства»; в 1964 году — аспирантуру Уральского государственного университета. Специализировался на проблемах физики магнитных явлений в твердых телах.

С октября 1964 года Виталий Федорович работал в Тюменском индустриальном университете. Он внес огромный вклад в становление и развитие ВУЗа. Под его руководством выполнены и защищены 10 кандидатских и одна докторская диссертации. Долгие годы профессор Новиков возглавлял кафедру физики, кафедру методов контроля и диагностики Института промышленных тех-

нологий и инжиниринга Тюменского индустриального университета. Много сил и энергии Виталий Федорович отдал созданию и развитию в вузе научной, методической и лабораторной базы по механике, электричеству и оптике. Он автор более двадцати изобретений, двухсот научных трудов, более шестидесяти учебно-методических указаний.

Виталий Федорович удостоен целого ряда наград:
звания «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации»;
медали «За развитие нефтегазового комплекса России»;
медали «Ветеран труда»;
медали «За доблестный труд»;
нагрудные знаки «За отличные успехи в работе» и «Изобретатель СССР»;
знак «Победитель социалистического соревнования»;
большой и малой серебряных медалей ВДНХ СССР;
почетной грамоты Тюменской областной Думы.



Однако самое главное то, что Виталий Федорович был очень добрым, искренним и благожелательным человеком. Память о нем сохранится в сердцах десятков его учеников и сотен специалистов по неразрушающему контролю, которым посчастливилось общаться с Учителем и замечательным специалистом.