

ВОЗМОЖНОСТИ РУЧНОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСОВ

© 2023 г. С.П. Шляхтенков^{1,*}, Д.Б. Некрасов^{2,**}, С.В. Палагин², О.В. Бессонова³,
А.А. Попков¹, С.А. Бехер¹

¹Сибирский государственный университет путей сообщения, Россия 630049 Новосибирск,
ул. Дуси Ковальчук, 191

²ООО «ЕВРАЗ», Россия 121353 Москва, ул. Беловежская, 4

³АО «ЕВРАЗ ЗСМК», Россия 654042 Новокузнецк, Космическое шоссе, 16
E-mail: *shlyakhtenkov@gmail.com; **dmitry.nekrasov@evraz.com

Поступила в редакцию 14.02.2023; после доработки 13.03.2023

Принята к публикации 17.03.2023

Исследована возможность применения вихретокового метода для оценки глубины трещин поверхности катания рельсов в эксплуатации при планировании и приеме работ рельсошлифовального поезда. Выполнены экспериментальные исследования влияния частоты возбуждения и угла наклона вихретокового преобразователя, состояния поверхности, глубины и угла наклона поверхностной трещины на амплитуду и фазу вихретокового сигнала. Определены возможности амплитудно-фазового способа отстройки от мешающих факторов, связанных с наклоном преобразователя и кривизной контролируемой поверхности. Исследована разрешающая способность дефектоскопа при оценке характеристик двух и более близко расположенных трещин — дефект типа «сетка» трещин. Глубина поверхностных трещин в диапазоне от 0,1 до 1,4 мм определялась металлографическим исследованием после проведения вихретокового контроля. Экспериментально обоснованы оптимальные параметры контроля и установлена корреляционная связь глубины трещины и проекции амплитуды сигнала на направление, перпендикулярное направлению изменения мешающего фактора — угла наклона преобразователя.

Ключевые слова: контроль вихретоковый, поверхность катания рельса, контактно-усталостные трещины, металлография, глубина трещины, способ отстройки от мешающего фактора.

DOI: 10.31857/S0130308223040036, EDN: YHPZUU

ВВЕДЕНИЕ

Вертикальные динамические силы от подвижного состава, продольные силы тяги и торможения, поперечные силы, возникающие при движении в кривых, создают в месте контакта колеса и рельса значительные локальные механические напряжения [1—3], превышающие предел текучести рельсовой стали. Развитие пластической деформации формирует наклепанный слой, структура и механические характеристики которого существенно отличаются от основного материала рельса [4—6]. Несмотря на повышение твердости поверхностного слоя и, соответственно, сопротивления износу, снижение пластичности стали увеличивает скорость развития усталостных трещин [7—10].

С целью предотвращения дальнейшего роста трещин и выхода их из наклепанного слоя в основной металл головки рельса проводится профилактическая шлифовка [11] поверхности катания на глубину не менее 0,1 мм. В инструкции по шлифовке и фрезерованию рельсов в пути в стационарных условиях, утвержденной Распоряжением ОАО «РЖД» 29.12.2014 г. № 3205р, установлено требование к толщине снимаемого слоя, которая должна превышать глубину контактно-усталостного повреждения на 0,5 мм. На железных дорогах РФ средства измерения глубины поверхностных трещин в эксплуатации до сих пор не применяются, толщина снимаемого материала определяется нормативными документами с учетом радиусов кривых участков пути и периодичности шлифовки.

В этих условиях создание методики измерения глубины поверхностных трещин является актуальной задачей, направленной на повышение эффективности применения технологии шлифовки рельса [12, 13] за счет снижения затрат на необоснованное рельсошлифование более необходимого и устранение последствий развития не полностью удаленных дефектов.

Для определения глубины поверхностных трещин в эксплуатации наиболее перспективным является вихретоковый контроль (ВТК) [14, 15]. Метод основан на регистрации параметров вихревых токов, возбуждаемых в объекте контроля первичным переменным магнитным полем. Основными преимуществами ВТК являются: бесконтактность, многопараметровость и возмож-

ность управления чувствительностью контроля по глубине поверхностного слоя подбором оптимальной частоты переменного тока в возбуждающей обмотке вихретокового преобразователя (ВТП) [16, 17].

Целью работы является определение возможностей ручного вихретокового контроля для измерения глубины контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов с оценкой показателей точности и степени влияния на результаты измерений мешающих факторов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводили на вырезанных из действующего пути фрагментах рельса типа Р65, категории ДТ350, стали марки Э76ХФ с реальными дефектами поверхности катания. На испытания отбирали образцы с дефектами нескольких типов: одиночные трещины, сетка трещин на рабочей грани и в середине поверхности катания, ориентированные вдоль, перпендикулярно и под углом к продольной оси рельса. ВТК образцов выполняли на частотах в диапазоне от 100 до 400 кГц дефектоскопом Вектор-60Д, зарегистрированном в Государственном реестре средств измерений под № 33845-12, в комплекте со стандартным ВТП ПВР-1. Преобразователь относится к параметрическим однокатушечным резонансным датчикам карандашного типа с диаметром ферромагнитного сердечника 1 мм. Выбор ВТП обусловлен достаточно широкой рабочей полосой частот с верхней границей 1 МГц и локальностью контроля, связанной с наличием ферромагнитного сердечника. Это обеспечивает возможность обнаружения и оценки параметров трещин глубиной от 0,1 мм при расстоянии между ними более 1 мм.

Для отстройки от мешающих факторов использовали амплитудно-фазовый способ [18]. Главной измеряемой характеристикой является проекция сигнала ВТП на ось, перпендикулярную направлению изменения сигнала под влиянием мешающего фактора, вызванного наклоном ВТП относительно нормали поверхности сканирования (рис. 1). Негативный эффект — уменьшение амплитуды полезного сигнала при этом компенсируется достаточно эффективным снижением неопределенности сигнала.

Выбор частоты возбуждения ВТП является основополагающим в технологии оценки глубины трещины, от частоты напрямую зависит диапазон показаний и погрешность метода. Один из основных критериев выбора частоты связан с необходимостью обеспечить максимальную чувствительность сигнала к глубине трещин от 0,1 до 0,5 мм [19]. На низких частотах вихревой ток проникает на большую глубину (толщина скин-слоя), что сопровождается увеличением диапазона измерения, при этом негативный эффект выражается в уменьшении чувствительности к дефектам малых, по сравнению со скин-слоем, размеров.

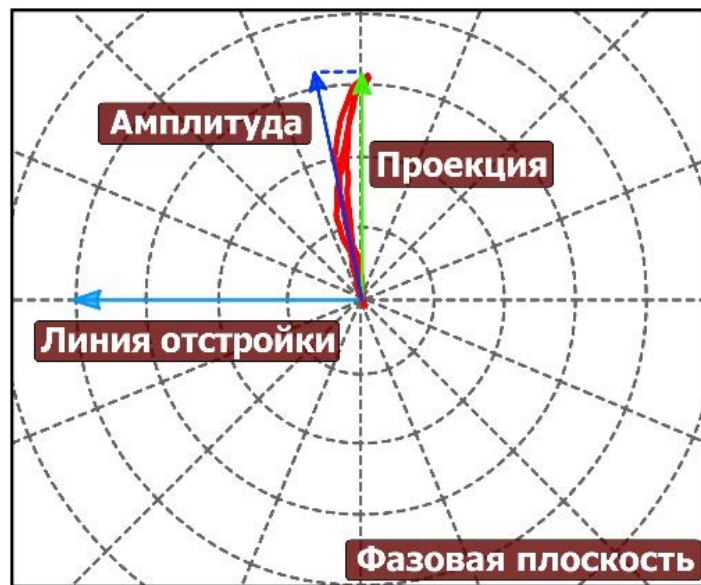


Рис. 1. Сигнал ВТП на фазовой плоскости при сканировании образца с одиночной трещиной и линия отстройки от мешающего фактора.

В предварительных экспериментах исследовали влияние частоты возбуждения вихревых токов на амплитуду полезного сигнала от трещины. В диапазоне частот (100—400) кГц с шагом в 100 кГц амплитуда сигнала монотонно возрастает при увеличении частоты в 4 раза. При этом регистрируемые сигналы находятся в диапазоне измерения, а уменьшение амплитуды на низких частотах может быть компенсировано увеличением усиления дефектоскопа, что позволяет выбрать для контроля произвольную частоту исследуемого диапазона.

Важным параметром дефектометрии сетки трещин является разрешающая способность аппаратуры, минимальное расстояние между дефектами, которые при контроле фиксируются отдельно. На частотах возбуждения вихревых токов от 100 до 400 кГц проведено сканирование фрагмента рельса с трещиной. Установлено, что на всех исследованных частотах сердечник ВТП обеспечивает уменьшение амплитуды сигнала на 50 % при смещении центра ВТП от центра трещины на расстояние 1 мм. Это позволяет независимо от частоты ВТП уверенно фиксировать сигналы от нескольких трещин, расстояние между которыми превышает 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На фрагментах рельсов, изъятых из эксплуатации, после травления в 50 %-растворе соляной кислоты выявляются тонкие единичные и групповые («сетка трещин») эксплуатационные контактно-усталостные трещины (рис. 2—7). Обнаруженные трещины контролировали вихретоковым методом, затем образцы с трещинами подвергали разрушающему контролю: разрезали по линии сканирования и параллельно ей на расстоянии 1 мм слева и справа и изготавливали металлографические шлифы. Оптическим микроскопом с увеличением $\times 100$ и $\times 200$ для каждой трещины в трех сечениях измеряли: глубину, ширину раскрытия на поверхности и угол наклона относительно нормали к поверхности катания. Всего в 6 образцах идентифицировано 69 дефектов (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики исследуемых образцов

№ образца	План пути, радиус	Пропущенный тоннаж, млн т брутто	Исследуемое сечение	Характеристики трещин			
				Количество	Диапазон глубин, мм	Место расположения	Угол на плоскости поверхности катания*, °
1	Кривая 300 м	320	Продольное	8	0,12—0,42	Рабочая грань	50
2	Прямая	1400	Продольное	5	0,25—0,35		60
3	Прямая	340	Продольное	18	0,61—1,73		35—40
4	Кривая 1150 м	270	Продольное	16	0,14—0,44	Центр поверхности катания	85—90
5	Кривая 650 м	180	Поперечное	9	0,20—0,76		0—10
6	Кривая 1000 м	150	Продольное	8	0,38—0,68		65
			Поперечное	5	0,67—0,92		0—15

*Угол на плоскости поверхности катания определялся относительно продольной оси рельса.

В образцах № 1, № 2, № 3 (см. рис. 2—4) трещины распространяются от рабочей выкружки поверхности катания рельса. Образцы № 2 и № 3 вырезаны из прямых участков пути с пропущенным тоннажем 1400 и 340 млн т брутто соответственно. Образец № 1 вырезан из рельса, расположенного в кривом участке пути с пропущенным тоннажем 320 млн т брутто. Трещины имеют глубину от 0,12 до 1,73 мм и ориентированы под наклоном относительно нормали поверхности катания (30—40)°. Для сканирования выбирали линию, на которой расстояние между трещинами составляет более 1 мм, что позволяет уверенно фиксировать сигналы ВТП. Сканирование этих образцов проводили вдоль рельса независимо от угла трещины в плоскости поверхности катания.

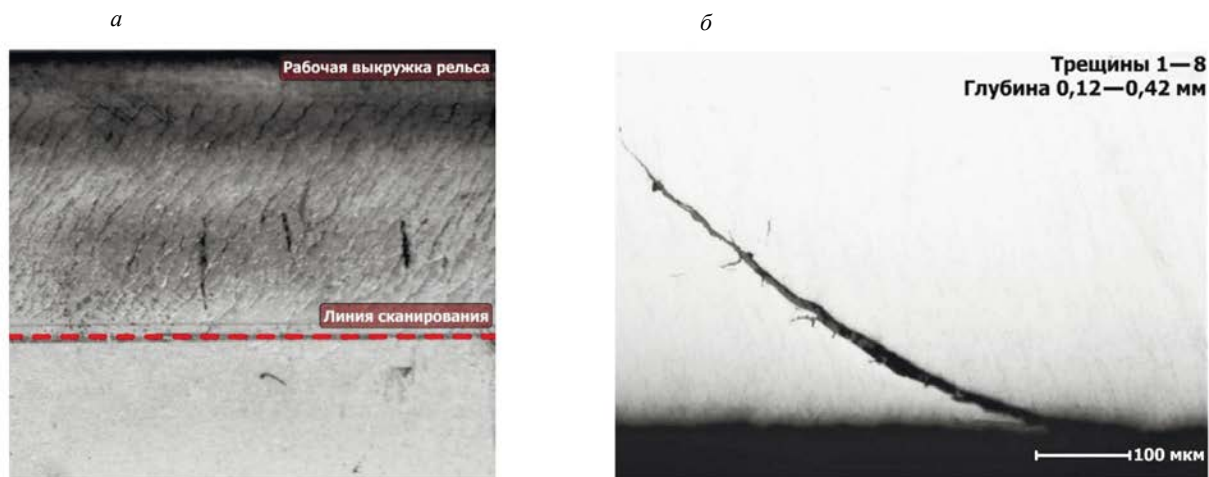


Рис. 2. Образец № 1 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

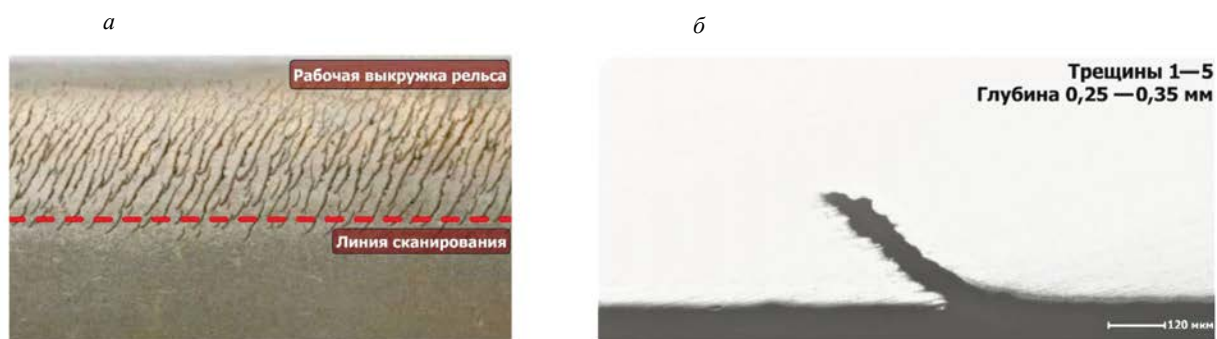


Рис. 3. Образец № 2 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

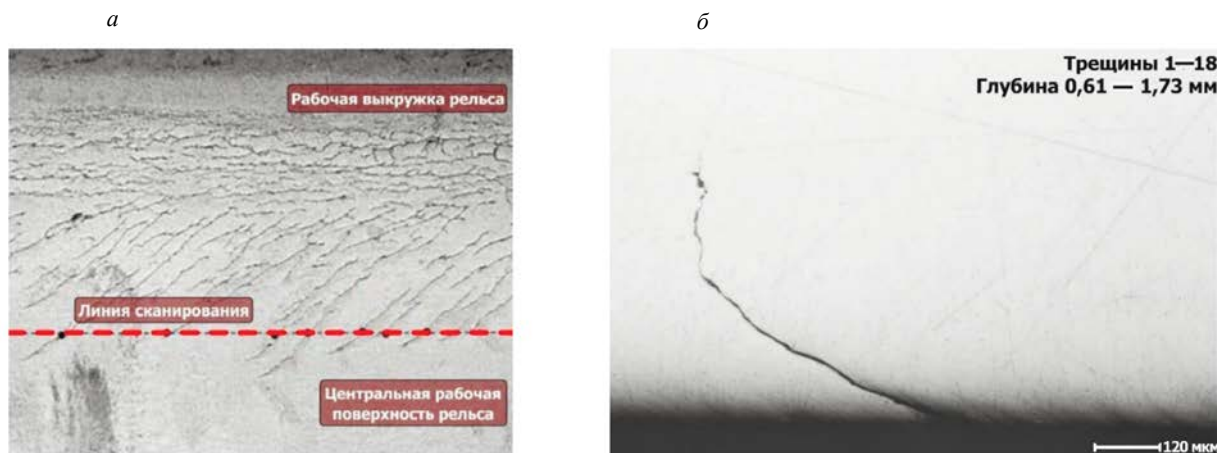


Рис. 4. Образец № 3 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

Трещины в средней части поверхности катания исследовали в образцах № 4, № 5, № 6 (рис. 4—6). Образцы вырезаны из кривых участков пути с пропущенным тоннажем от 150 до 270 млн т брутто и содержат трещины глубиной от 0,14 до 0,92 мм. Трещины в основном распро-

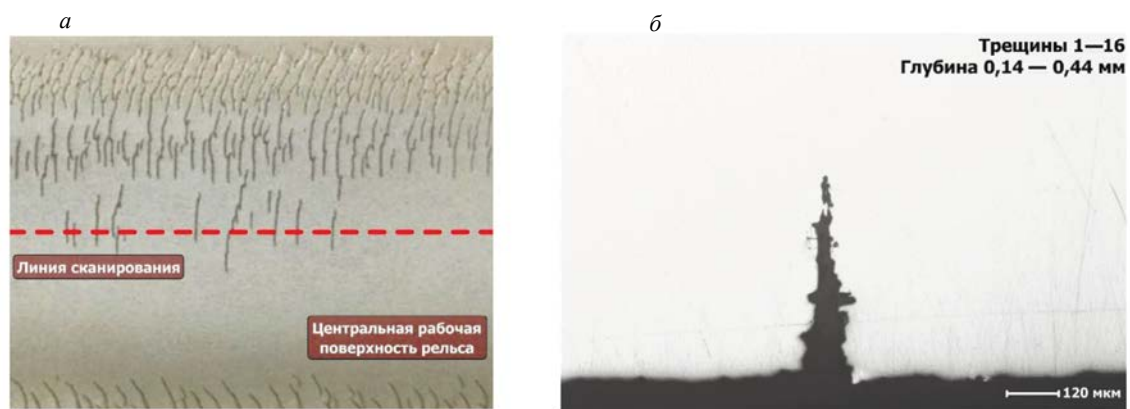


Рис. 5. Образец № 4 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

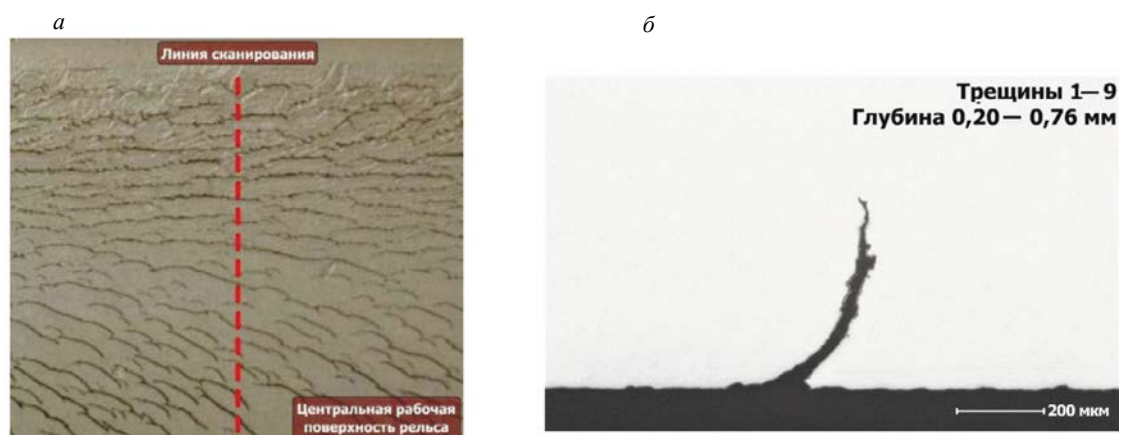


Рис. 6. Образец № 5 (а) с фотографией шлифа характерной трещины (б).

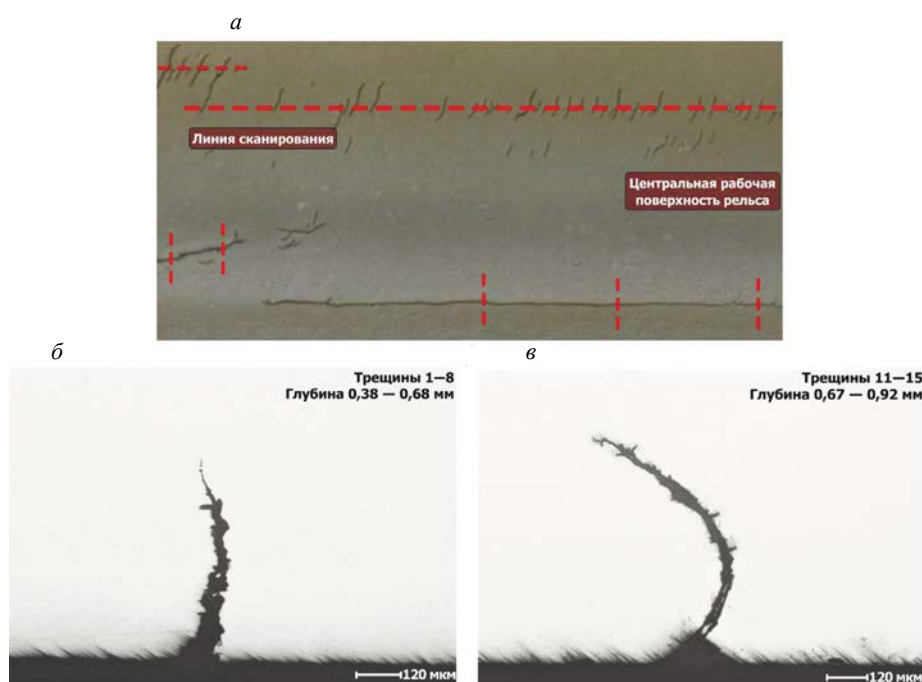


Рис. 7. Образец № 6 (а) с фотографиями шлифов характерных трещин (б, в).

страняются вглубь металла, перпендикулярно поверхности, некоторые имеют изгиб (рис. 6, 7). Сканирование ВТП проводилось как в продольном к оси рельса, так и в поперечном направлениях, в зависимости от преимущественной ориентации дефектов.

Для определения связи амплитуды сигнала с глубиной трещины на частотах 100 и 400 кГц проведено сканирование образцов вдоль траектории, обозначенной штриховой линией на рис. 2—7. В процессе контроля фиксировалась временная развертка проекции сигнала, определялись максимальные амплитуды сигнала ВТП и соответствующие им фазы (рис. 8).

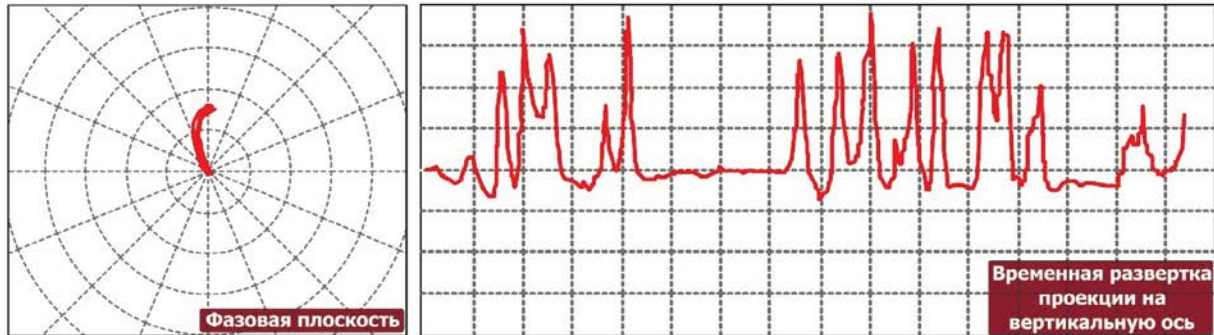


Рис. 8. Пример развертки на фазовой плоскости и временная развертка сигналов ВТП при сканировании образца 4.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе полученных данных построена зависимость проекции амплитуды сигнала дефектоскопа от глубины трещины (рис. 9). Амплитуда пересчитана к единичному коэффициенту усиления. Наибольший коэффициент корреляции наблюдается на частоте возбуждения преобразователя 100 кГц и по всем трещинам во всех образцах составляет 0,84. Для данных, полученных для образцов с глубиной трещин до 1 мм, коэффициент корреляции изменяется в диапазоне от 0,72 до 0,97.

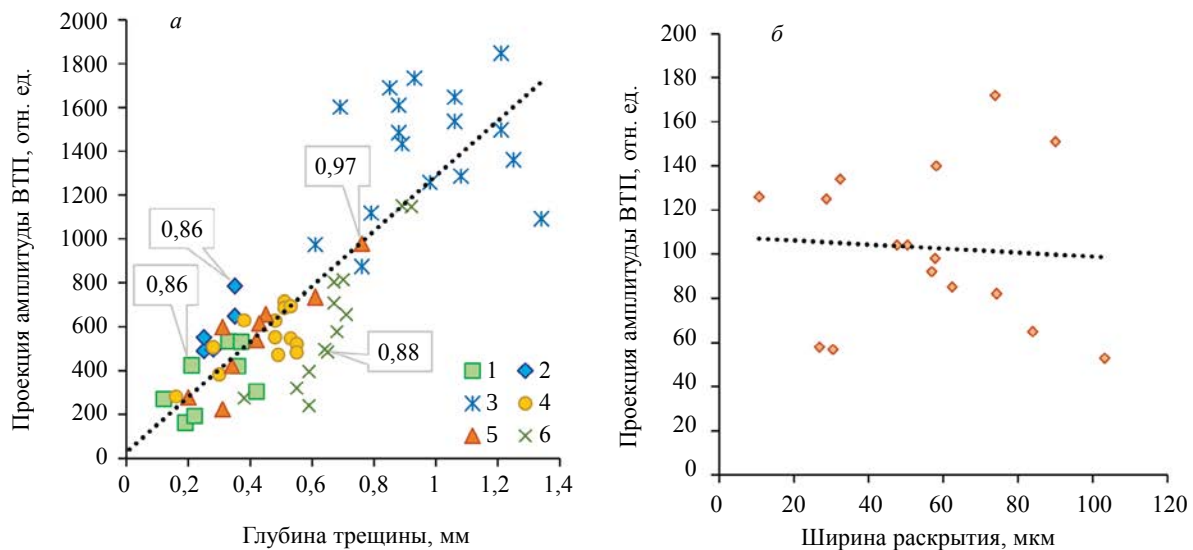


Рис. 9. Проекция амплитуды ВТП от трещин с разной глубиной (а) и шириной раскрытия (б) на частоте 100 кГц.

На частоте 400 кГц установлено меньшее, по сравнению с частотой 100 кГц, значение коэффициента корреляции амплитуды сигнала ВТП с глубиной трещины, которое не превышает 0,66. Этот эффект связан с меньшей в два раза глубиной проникновения вихревых токов и повышением чувствительности к углу наклона преобразователя на высокой частоте. Толщина скин-слоя, рассчитанная по формуле (1) для относительной магнитной проницаемости $\mu = 66$ и удельной проводимости $\sigma = 7,7$ МСм/м, составляет 0,07 мм для частоты 100 кГц и 0,035 мм для 400 кГц:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}. \quad (1)$$

Выполнена проверка влияния ширины раскрытия дефекта на сигнал ВТП (рис. 9б) для двух образцов в диапазоне раскрытий от 10 до 110 мкм. Рассчитанный коэффициент корреляции параметров регистрируемых сигналов ВТП с шириной раскрытия по абсолютному значению меньше 0,01.

Зависимость амплитуды сигнала A , выраженной в относительных единицах, от глубины трещины (см. рис. 9) на частоте 100 кГц аппроксимировали методом наименьших квадратов линейной зависимостью:

$$A = a \cdot h + b, \quad (2)$$

где h — глубина трещины, мм; $a = 1171$ мм⁻¹ — коэффициент пропорциональности; $b = 72$ — коэффициент смещения.

Средние квадратические отклонения коэффициентов пропорциональности и смещения $\sigma_a = 97$ мм⁻¹ и $\sigma_b = 62$ определяли по известным формулам математической статистики [20]:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum (A - a \cdot h_i - b)^2}{(n-2) \cdot \sum (h_i - \bar{h})^2}}; \quad (3)$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{\sum (A - a \cdot h_i - b)^2}{(n-2)} \cdot \frac{\sum h_i^2}{n \cdot \sum (h_i - \bar{h})^2}}. \quad (4)$$

Погрешности измерения глубины трещины ручным вихретоковым дефектоскопом на частоте 100 кГц в диапазоне от 0,12 до 0,9 мм содержат две составляющие: аддитивную и мультипликативную. Обе погрешности обусловлены статистической неопределенностью зависимости амплитуды сигнала от глубины трещины. Границы абсолютной аддитивной погрешности не зависят от значения измеряемой величины, а границы мультипликативной прямо пропорциональны ей. Доверительные границы погрешности, рассчитанные с учетом средних квадратических отклонений (3) и (4) с вероятностью $P = 95$ %, составили для аддитивной составляющей $\Delta = \pm 0,12$ мм, а для мультипликативной — $\delta = \pm 17$ %.

Производительность рельсошлифовального поезда характеризуется толщиной снимаемого металла, которая, например, для РШП-48К составляет от 0,1 до 0,25 мм. Ручной ВТК позволяет определить глубину поверхностной трещины до 0,9 мм (при больших глубинах назначается фрезерование) с погрешностью не более 0,3 мм, что соответствует ошибке при планировании работ на 1—3 прохода рельсошлифовального поезда. Дальнейшее развитие метода вихревых токов должно быть направлено на разработку способов автоматизированного сплошного контроля рельсов в эксплуатации съемными или мобильными средствами контроля.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Вихретоковым и металлографическим методами исследованы наиболее распространенные типы контактно-усталостных дефектов поверхности катания рельсов. Конфигурация трещин головки рельсов существенно зависит от пропущенного тоннажа, условий эксплуатации и содержания пути, места расположения: в прямых участках и в кривых. Трещины ориентированы под разными углами к продольной оси рельса от 0 до 90° и с наклоном относительно вертикальной оси 0—45°. При распространении в глубину рельса наклон трещин изменяется.

В экспериментах в условиях повторяемости показано, что наибольший вклад в неопределенность измерений при ручном ВТК вносит отклонение преобразователя от вертикальной оси в процессе сканирования. Для уменьшения влияния этого фактора в качестве информативного параметра выбрана проекция амплитуды сигнала ВТП на направление, перпендикулярное направлению изменения сигнала под действием мешающего фактора.

Показана возможность отдельной оценки глубины дефектов типа «сетка» трещин при использовании ВТП с сердечником диаметром не более 1 мм. Ширина огибающей сигнала, измеренная по уровню 0,5, не превышает 1 мм.

Установлена корреляционная связь проекции амплитуды ВТП с глубиной трещины по результатам вихретокового контроля и микрофрактографии. Корреляция результатов ВТК с шириной раскрытия трещин в диапазоне от 10 до 120 мкм отсутствует, коэффициент корреляции не превышает 0,01. Показано, что на частоте 100 кГц проекция амплитуды сигнала ВТП связана с глубиной трещины в диапазоне от 0,12 до 0,9 мм с коэффициентом корреляции 0,84. С уровнем значимости 5 % погрешности измерения глубин трещин вихретоковым методом состоят из относительной 17 % и абсолютной 0,12 мм погрешностей.

Исследования выполнены с использованием мер государственной поддержки на развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по теме «Высокопроизводительная технология скоростного шлифования рельсов и оборудование для ее реализации на основе интеллектуальных цифровых модулей», соглашение № 075-11-2022-014 от «08» апреля 2022 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бехер С.А., Коломеец А.О., Степанова Л.Н., Кочетков А.С. Исследования динамических сил в системе колесо-рельс в процессе движения грузового вагона // Контроль. Диагностика. 2016. № 7. С. 68—72.
2. Степанова Л.Н., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С. Исследование продольных напряжений в рельсах с использованием эффекта акустоупругости на действующем участке железнодорожного пути // Контроль. Диагностика. 2019. № 2. С. 14—21.
3. Мазов Ю.Н., Локтев А.А., Сычев В.П. Оценка влияния дефектов колес подвижного состава на состояние железнодорожного пути // Вестник МГСУ. 2015. № 5. С. 61—72.
4. Степанова Л.Н., Курбатов А.Н., Кабанов С.И. Определение напряжения сжатия в рельсе с использованием эффекта акустоупругости и тензометрии // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 7 (277). С. 14—23.
5. Муравьев В. В., Тапков С.В., Ленков С.В. Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 10—16.
6. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 13—23.
7. Коссов В.С., Волохов Г.М., Краснов О.Г., Овечников М.Н., Протопопов А.Л., Огуенко В.В. Влияние величины осевых нагрузок подвижного состава на контактно-усталостную долговечность рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 3. С. 149—156.
8. Величко Д.В., Севостьянов А.А., Антерейкин Е.С. Оценка надежности рельсов на участках Транссибирской магистрали // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1 (48). С. 5—11.
9. Махутов Н.А., Коссов В.С., Оганьян Э.С., Волохов Г.М., Овечников М.Н., Протопопов А.Л. Прогнозирование контактно-усталостных повреждений рельсов расчетно-экспериментальными методами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 4. С. 46—55.
10. Бондарев Э.С. Прогнозирование технического состояния рельсов по статистическим данным // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 4 (59). С. 55—61.
11. Ильиных А.С., Шаламова О.А., Юркова Е.О. Совершенствование организации работ по рельсошлифованию на основе оценки стоимости жизненного цикла рельсов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 1 (44). С. 26—32.
12. Белых В.В., Муравьев В.В., Степанов В.А. Использование информационной энтропии структуры стали для определения качества и ресурса ее функциональных свойств // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 3. С. 15—24.
13. Шур Е.А., Борц А.И., Сухов А.В., Абдурашитов А.Ю., Базанова Л.В., Заграничек К.Л. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 3. С. 3—9.

14. Дымкин Г.Я., Курков А.В., Смородинский Я.Г., Шевелев А.В. О чувствительности вихретокового контроля деталей железнодорожного подвижного состава // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 47—53.
15. *Sophian A., Tian G., Fan M.* Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A Review // Chin. J. Mech. Eng. 2017. V. 30. P. 500—514.
16. Жданов А.Г., Крюков А.С., Лунин В.П., Чегодаев В.В. Неразрушающий контроль поверхности головок рельсов вихретоковым методом // Технология машиностроения. 2015. № 6. С. 41—44.
17. *Nafiah Faris, Sophian Ali, Khan Md Raisuddin, Abidin Ilham Mukriz Zainal.* Quantitative evaluation of crack depths and angles for pulsed eddy current non-destructive testing // NDT & E International. 2019. V. 102. P. 180—188.
18. *Park Jeong, Lee Taek, Back In, Park Sang, Seo Jong, Choi Won, Kwon Se.* Rail surface defect detection and analysis using multi-channel eddy current method based algorithm for defect evaluation // Nondestructive Evaluation. 2021. V. 83
19. *Peng Xu, ChenLu Zhu, HongMing Zeng, Ping Wang.* Rail crack detection and evaluation at high speed based on differential ECT system // Measurement. 2020. V. 166. P. 108—152.
20. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки информации / 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматгиз, 1962. 349 с.