



## Корреляционный анализ сигналов контроля сварных стыков магнитодинамическим методом

Изложен способ повышения выявляемости дефектных сварных стыков железнодорожного пути. Способ основан на корреляционном анализе данных магнитодинамического метода неразрушающего контроля рельсов. Предложен механизм паспортизации сварных стыков рельсового пути.

А.А. Markov\*, А.Г. Antipov\*

### Application of Correlation Analysis for Weld Joint Inspection by Magnetic Flux Leakage Method

**Introduction.** Magnetic Flux Leakage (MFL) is a known method of rail NDT inspection. It implies the inspection vehicle is equipped with a magnetizing system to form a strong longitudinal magnetic flux in the rail. The distribution of magnetic field in the air in immediate proximity to the rail contains information on the internal structure of it.

**Method.** Besides the detecting of rail flaws, the method can be used to localize rail weld joints. A specific magnetic state of ferromagnetic material near the weld results in a distinctive signal recorded by a magnetic sensor. The signal of weld joint is very stable, that is confirmed by presented data. The stability means the signal form does not change significantly from inspection to inspection which are usually carried out several times a year. But if the defect develops in the weld joint the signal changes considerably. So, the changes in weld MFL signal are the evidence of defect presence in weld.

**Results.** To detect signal changes the correlation analysis of the signal is used. The research shows if the cross-correlation coefficient between signals of two successive inspections is less than 0.75 then the probability of defect presence is high and the additional investigation of this weld is needed. The automated correlation processing increases the efficiency of NDT data analysis significantly.

**Conclusion.** The other observed property of MFL weld signal is the uniqueness. Due to specific conditions during a welding process the magnetic state of the rail near the weld differs one from another. In conjunction with the signal stability the uniqueness makes cross-correlation matrix between signals of the same set of welds obtained in two successive inspections strongly diagonal. This means the probability of correct identification of certain weld on MFL data records using the correlation technique is rather high. Later facilitates the automated process of record matching.

**Keywords:** magnetic flux leakage, MFL, rail inspection, weld joint, correlation analysis

### Введение

В современных рельсовых путях сварка является основным способом формирования рельсовых бесстыковых пле-тей: на 2014 г. уже 70% главных путей ОАО «РЖД» являются бесстыковыми. На железных дорогах России эксплуатируются около 5 млн. сварных стыков рельсов. В основном по прочностным характеристикам зона сварного стыка мало отличается от зоны основного металла рельса. Однако нарушения технологии выполнения сварочных работ, появление несплошностей усталостного характера иногда приводят к изломам рельсов в зоне сварных стыков. В последние 10 лет до 35% изломов рельсов на железных дорогах ОАО «РЖД» происходят по дефектам в зоне сварных стыков.

На современных железных дорогах для контроля состояния рельсов широко применяются скоростные транспортные средства дефектоскопии: вагоны, автомотрисы и т. п., которые позволяют в наименьшей степени занимать рельсовые пути на технологические процедуры. Скоростная дефектоскопия предполагает использование соответствующих методов, в основном ультразвуковых и магнитных. Ультразвуковые методы позволяют достаточно подробно исследовать внутреннюю структуру рельса с целью обнаружения дефектов, но имеют целый ряд проблем с применением, в частности, с обеспечением надежного акустического контакта электроакустических преобразователей (излучателей и приемников) с рельсом, особенно при значительных скоростях сканирования.

В результате сигналы даже от стабильного отражателя (например, болтового отверстия) при периодическом контроле повторяются с низким коэффициентом корреляции и не могут быть использованы для мониторинга состояния контролируемого объекта — рельса.

Магнитный (магнитодинамический) метод (МД) более прост в использовании, меньше зависит от внешних условий. Данный метод предполагает, что в рельсе посредством намагничивающей системы дефектоскопа формируется продольное магнитное поле. В зонах структурных аномалий, характеризуемых пониженной магнитной проницаемостью материала, поле из рельса частично выходит на поверхность. Таким образом, по характеру распределения поля вокруг рельса можно судить о его

Submitted 15.05.15  
Accepted 05.06.15

Сотрудники научно-технического центра разработки съемных и переносных средств НК ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург

МАРКОВ  
Анатолий Аркадьевич

Директор, д. т. н.,  
III уровень по  
акустическому виду НК.



АНТИПОВ  
Андрей Геннадиевич

Ведущий инженер,  
к. ф.-м. н.



внутреннем состоянии. Датчик, двигающийся по поверхности катания вместе с намагничивающей системой, фиксирует изменения магнитного поля в воздухе в нескольких миллиметрах от верхней грани рельса. Таким образом, формируется непрерывный поток данных, привязанный к направленной вдоль рельса координате — так называемая дефектограмма магнитного канала.

Далее предлагается автоматизировать процесс сравнения сигналов на основе корреляционного анализа, что должно повысить выявляемость дефектных сварных стыков.

### Выявление дефектных сварных стыков посредством корреляционного анализа

При достаточном межполюсном расстоянии намагничивающей системы этим методом можно выявлять повреждения головки рельса при глубине залегания под верхней гранью до 15 мм [1]. К достоинствам метода следует отнести: возможность работы во всех климатических зонах при любых погодных условиях; высокую достоверность измерений, обеспечивающую хорошую повторяемость результатов и возможность мониторинга развития отдельных дефектов; возможность работы в широком диапазоне скоростей движения транспортного средства.

Помимо сигналов от дефектов на магнитной дефектограмме отражаются и различные конструктивные элементы рельсового пути. В частности, поскольку сварной шов и область рельса непосредственно рядом с ним представляет собой зону измененного магнитного состояния ферромагнетика, на магнитном канале появляются характерные сигналы, распознаваемые, в том числе, в процессе автоматической обработки дефектограммы [2].

Если в сварном стыке развивается дефект, затрагивающий головку рельса, сигнал на магнитной дефектограмме изменяется по сравнению с тем же сигналом в случае бездефектного рельса. Оператор-расшифровщик зачастую не обращает внимания на произошедшие изменения. Во-первых, новая форма сигнала сама по себе не всегда однозначно свидетельствует о дефектности сварки: подобные формы сигналов могут объясняться особенностями структуры сварного шва. Во-вторых, процесс сравнения старой и новой форм сигнала оказывается весьма трудоемким: необходимо найти рассматриваемую сварку на предыдущей дефектограмме, сопоставить и количественно оценить произошедшие изменения. В-третьих, при штатном анализе сигналов НК рельса масштаб совместного анализа ультразвуковых и магнитных дефектограмм составляет 25 м на экран, что не позволяет выполнить детальный анализ форм сигналов от сварного стыка. В результате возможное развитие опасного де-

фекта в сварном стыке может оказаться незамеченным.

Далее предлагается автоматизировать процесс сравнения сигналов на основе корреляционного анализа, что должно повысить выявляемость дефектных сварных стыков.

### Выявление дефектных сварных стыков посредством корреляционного анализа

Из всех конструктивных элементов, фиксируемых при сканировании рельсового пути магнитным методом контроля с использованием дефектоскопического средства (например, вагона-дефектоскопа), наиболее стабильными и повторяющимися от проезда к проезду являются сигналы от зон сварных стыков рельсов. Сигналы от болтовых стыков могут меняться со временем из-за температурного влияния на стыковые зазоры; сигналы от стрелочных переводов зависят от направления движения и, соответственно, от положения остряка перевода. Только сигналы от зон сварного стыка при неизменном состоянии соединения остаются стабильными в течение значительного периода времени.

В общем случае структура металла сварного стыка рельсов состоит из шести участков: шов; зона неполного расплавления; зона рекристаллизации (зона крупного зерна); зона пере-кристаллизации (зона мелкого зерна); зона неполной нормализации и зона основного металла [3]. Таким образом, в процессе перемещения (проезда) дефектоскопического средства над сварным стыком датчик магнитного поля проезжает от одной зоны основного металла до другой девять зон с разной структурой. Этот участок обычно обозначается как «зона термического влияния» или зона сварного стыка. Общая величина (длина) этой зоны зависит от применяемой технологии сварки (пульсирующим или непрерывным оплавлением) и может составлять до 80 мм. Естественно магнитная проницаемость составляющих участков зоны сварного стыка различна, что и обеспечивает формирование характерного сигнала (отклика) магнитного метода контроля при сканировании.

Форма сигнала МД метода может существенно меняться при изменении состояния сварного стыка в процессе эксплуатации: зарождении и развитии внутренних трещин кода 26.3, появление неровности на поверхности катания кода 46.3 (смятие головки из-за неравномерности механических свойств металла в месте сварного стыка), выкрашиваний металла на рабочей выкружке (код дефекта 10 или 11) [4] и механических повреждений головки рельса. Эта закономерность подтверждена наблюдениями состояния сварных стыков рельсов за достаточно длительный период времени по сигналам магнитного метода и дополнительных исследований альтернативными методами (визуальный осмотр и ультразвуковые исследования) разных участков рельсового пути.

С другой стороны, если внутреннее состояние сварного стыка остается неизменным, форма сигнала МД метода остается стабильной. Она демонстрирует высокую устойчивость к внешним факторам, таким как магнитное, температурное и механическое воздействия на рельс в процессе эксплуатации, если таковые не привели к существенным структурным изменениям в ферромагнитном материале. Кроме того, форма сигнала слабо зависит от того, какой именно экземпляр дефектоскопического оборудования использовался для получения данных: вагоны-дефектоскопы, оснащенные одинаковым типом намагничивающей системы и одинаковыми типами датчиков выдают весьма схожие результаты [2].

Таким образом, значительное искашение формы сигнала МД метода от зоны сварного стыка однозначно свидетельствуют о том, что во внутренней структуре последнего произошли существенные отклонения от первоначального состояния. Именно поэтому отслеживание изменений отклика от сварного стыка на магнитном канале является столь важной задачей.

На рис. 1 показано изменение сигнала от сварного стыка со временем. Сигналы записаны в ходе трех плановых проездов вагона-дефектоскопа по одному и тому же участку рельсового пути в разное время в течение почти одного года. В ходе тех же плановых проездов записаны сигналы, свидетельствующие о развитии поверхностного дефекта вблизи другого сварного стыка (рис. 2). В этом случае форма сигнала от самой сварки в течение года практически не изменилась. Сигнал от поверхностного дефекта — справа от стыка на расстоянии около 20 см — за месяц между первым и вторым проездами также остался почти прежним, но за год успел произойти существенные изменения.

Многие участки рельсового пути регулярно проверяются мобильными средствами дефектоскопии. Таким образом,

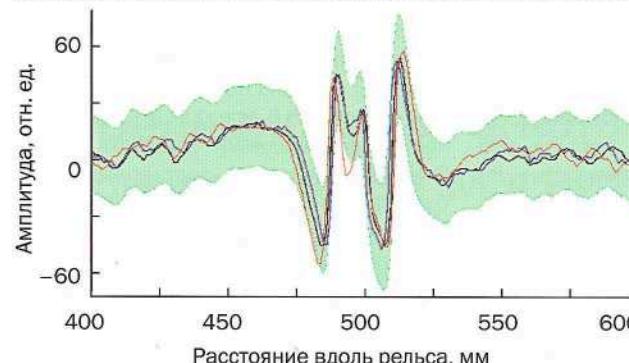


Рис. 1. Развитие дефекта в сварном стыке на участке Великие Луки — Зап. Двина (468 км 146 м). Временные интервалы между записями магнитного канала составили 1 месяц (синяя кривая) и 10,5 месяцев (красная кривая)

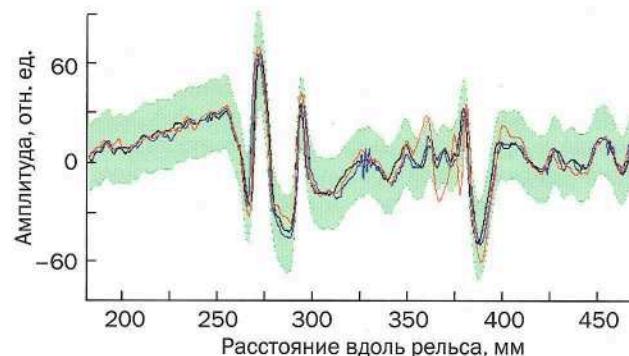


Рис. 2. Развитие поверхности дефекта в зоне сварного стыка на участке Великие Луки — Зап. Двина (468 км 146 м). Временные интервалы между записями магнитного канала составили 1 месяц (синяя кривая) и 10,5 месяцев (красная кривая)

данные для отслеживания изменений сигналов от сварных швов имеются. Однако на практике сравнение откликов от сварок, полученных в разные моменты времени, проводится редко. Причина этого кроется в трудоемкости процесса сравнения. Существующие на вагоне средства позиционирования — глобальная спутниковая система навигации и локальная система, основанная на датчике оборотов колеса с корректировкой по километровым столбам, — не способны обеспечить точность, требуемую для сопоставления сигналов дефектоскопических каналов. Поэтому для каждого объекта необходимо проводить дополнительную трудо затратную операцию — корректировку координат вручную. Решение данной проблемы может предоставить автоматическая расшифровка: помимо точного сопоставления распознанных сигналов (к числу которых относится большая часть откликов от сварок), привязка по распознанным объектам позволяет также повысить точность сопоставления и нераспознанных объектов. В этой ситуации корреляционный анализ играет важную роль именно при сопоставлении нераспознанных автоматической расшифровкой сигналов.

Другая проблема, возникающая при сопоставлении сигналов сварных стыков в ручном режиме, — необходимость объективной оценки произошедших изменений. Часто оператор-расшифровщик не придает значения искажениям

сигнала, возникшим со временем последней проверки. Если возникновение новых импульсов, как правило, привлекает внимание расшифровщика дефектограмм, то более тонкие детали — изменение амплитуды или ширины отдельных импульсов в сигнале — иногда остаются незамеченными. В данной ситуации корреляционный анализ полезен тем, что позволяет дать объективную количественную оценку произошедшему изменениям.

Безусловно, окончательное решение — считать ли обнаруженные искажения сигнала свидетельством развития дефекта в зоне сварного стыка — в любом случае остается за расшифровщиком. Но корреляционный подход дает важный показатель, на который можно ориентироваться в качестве селективного: например, отобрать для тщательного рассмотрения оператором только те сварные стыки, форма сигналов от которых изменилась в наибольшей степени.

#### О возможностях паспортизации сварных стыков

Важной особенностью сварного стыка является уникальность его образа на магнитной дефектограмме. Несмотря на то, что все сигналы от сварки имеют общие характерные признаки, связанные со спецификой магнитного состояния материала в области сварного шва, почти каждый экземпляр имеет свои отличительные черты. Эти отличительные черты складываются на этапе изготовления сварного шва, когда формируется его внутренняя магнитная структура. При попадании во внешнее намагничива-

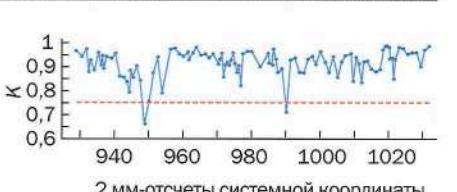


Рис. 3. Коеффициенты взаимной корреляции  $K$  между сигналами от сварок, которые получены в ходе проездов на участке СПб — Зеленогорск (24—26 км), выполненных с интервалом около 4 месяцев

между сигналами от сварных стыков на двухкилометровом отрезке рельсового пути, полученные с интервалом около 4 месяцев. Коэффициент корреляции

$$K = \max_s \frac{\sum_{n=-w}^{n=w} S_1(n)S_2(n-s)}{\sqrt{\sum_{n=-w}^{n=w} [S_1(n)]^2 \sum_{n=-w}^{n=w} [S_2(n-s)]^2}}$$

вычислялся для тридцатисантиметровых отрезков дискретизированных с шагом 2 мм записей магнитного канала  $S_1, S_2$ , содержащих сигнал от одной и той же сварки, согласно подтвержденным данным автоматической расшифровки. Длина отрезка задавалась параметром  $w$ ; за счет параметра сдвига  $s$  осуществлялась коррекция координат сигналов. У подавляющего большинства из 103 имеющихся на рассматриваемом участке сварных стыков форма сигналов практически не изменилась, но что указывают высокие значения коэффициентов корреляции (около 0,9). И лишь у пары сварных стыков сигналы претерпели достаточно существенные изменения — коэффициент корреляции оказался ниже критического порога 0,75. Именно эти два сварных стыка заслуживают внимательного рассмотрения на предмет наличия дефекта, в том числе и альтернативными методами контроля (визуальный осмотр и ультразвуковые исследования).

#### О возможностях паспортизации сварных стыков

На рис. 3 показаны величины коэффициентов взаимной корреляции

появляющее поле сформированная структура раз за разом воспроизводит одни и те же формы сигналов на магнитной дефектограмме вместе с особенностями, индивидуально характеризующими конкретный экземпляр сварного стыка. Разумеется, это происходит до тех пор, пока механические или иные воздействия не приводят к существенным изменениям состояния. На рис. 4 показаны корреляционные матрицы двухкилометрового отрезка рельсового пути на участке «СПб — Зеленогорск»: величина коэффициента взаимной корреляции показана цветом, на осях отложены но-

тические координаты (№ направления, № пути, нитка, километраж, пикет и № стыка на 100 м (на пикете/участке)). При этом наиболее объективным (не зависящим от оператора, осуществляющего ввод исходных данных) параметром является именно форма сигнала от зоны сварного стыка, полученного МД методом. Причем эта форма является уникальной характеристикой для каждого конкретного сварного стыка, так как обусловлена многими тонкими нюансами процесса изготовления сварки.

Введение соответствующего паспорта каждого сварного стыка рельса, лежащего в пути, позволит осуществлять мониторинг состояния рельсовой плети, совместно с данными других методов диагностики своевременно принять упреждающие меры по недопущению изломов по сварным стыкам и в целом повысить безопасность движения поездов.

#### Выводы

1. Возможности магнитодинамического метода контроля не ограничиваются обнаружением дефектов в головке рельсов. Регистрируемые на магнитной дефектограмме сигналы позволяют сформировать своеобразную топограмму пути с указанием местоположений болтовых, сварных стыков, стрелочных переводов и других объектов рельсового пути.

2. Сигналы МД метода обладают высокой повторяемостью от проезда к проезду, что позволяет осуществлять автоматическое выделение сигналов от стабильных объектов рельсового пути.

3. От каждого сварного стыка формируются уникальные характерные сигналы, связанные со спецификой магнитного состояния материала в области сварного шва.

4. Корреляционный анализ характерных сигналов от зон сварных стыков можно использовать для мониторинга

состояния зоны сварки и для своевременного обнаружения зарождения дефектов в этой зоне.

5. Стабильность и высокая повторяемость сигналов от зон сварных стыков рельсов в течение нескольких лет их эксплуатации позволяет предложить на базе образов сигналов магнитного метода своеобразный «паспорт» сварного стыка.

#### Литература

1. Антипов А.Г., Марков А.А. Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамическим методом в дефектоскопии рельсов. — Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 57–68.

2. Антипов А.Г., Марков А.А. Автоматизация анализа сигналов магнитодинамического контроля рельсов. — В мире НК. 2014. № 2 (64). С. 25–30.

3. Гудков А.В., Николин А.И., Турбина Л.А. и др. Контактная сварка рельсов и термическая обработка сварных стыков рельсов современного производства на рельсосварочных предприятиях ОАО «РЖД». — В кн.: Сварочные и наплавочные технологии на железнодорожном транспорте / Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» // Под ред. А. В. Гудкова. — М.: Интекст, 2008. — 176 с.

4. Марков А.А., Шпагин Д.А. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. — СПб.: Образование — Культура, 2013. — 283 с.

#### References

1. Antipov A.G., Markov A.A. Russian J. Non-destructive Testing. 2014, v. 50, no. 8, pp. 481–490.

2. Antipov A.G., Markov A.A. V mire NK [NDT World]. 2014, no. 2 (64), pp. 25–30 (in Russ.).

3. Gudkov A.V., Nikolin A.I., Turbina L.A., et al. Kontaktaya svarka relsov i termicheskaya obrabotka svarykh stykov relsov sovremennoego proizvodstva na relsosvarochnykh predpriyatiyakh OAO "RZHD" [Rail resistance welding and rail joint heat treatment at modern rail welding manufacture of OAO "RZHD"]. Sbornik nauchnykh trudov JFJ "VNIIZHT" "Svarochnye i naplavochnye tehnologii na zhelezno-dorozhnom transporte" [Welding and deposition techniques at railway transport], t. 3. By Gudkov A.V. Moscow, Intekst, 2008. P. 176. (in Russ.).

4. Markov A.A., Shpagnin D.A. Ultrazvukovaya defektoskopiya relsov [Rails Ultrasonic testing]. Saint-Petersburg, Obrazovanie — Kultura, 2013, 283 p. (in Russ.).

Статья получена 15 мая 2015 г.,  
в окончательной редакции — 5 июня

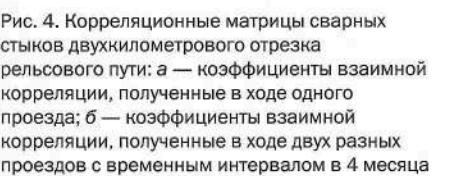


Рис. 4. Корреляционные матрицы сварных стыков двухкилометрового отрезка рельсового пути: а — коэффициенты взаимной корреляции, полученные в ходе одного проезда; б — коэффициенты взаимной корреляции, полученные в ходе двух разных проездов с временным интервалом в 4 месяца

мера сварок, участвующих в сравнении.

На рис. 4а показаны коэффициенты корреляции сигналов от сварок, полученных в ходе одного проезда, на рис. 4б — в ходе двух разных проездов с временным интервалом в 4 месяца. Выраженность диагонали на рис. 4а свидетельствует об уникальности образа каждого экземпляра сварки.

В меньшей степени особенности отдельных сварок выражены для сварок с номерами до 32 — эти сварки оказались довольно похожими друг на друга. Выраженность диагонали на рис. 4б свидетельствует о стабильности образа, т. е. неизменности его во времени. Даже по прошествии четырех месяцев, пользуясь исключительно данными корреляции, можно безошибочно определить соответствующую пару сигналов

2. Сигналы МД метода обладают высокой повторяемостью от проезда к проезду, что позволяет осуществлять автоматическое выделение сигналов от стабильных объектов рельсового пути.

3. От каждого сварного стыка формируются уникальные характерные сигналы, связанные со спецификой магнитного состояния материала в области сварного шва.

4. Корреляционный анализ характерных сигналов от зон сварных стыков можно использовать для мониторинга