

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТЫ СКОПЛЕНИЯ ОТСЛОИВШИХСЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА В АУСТЕНИТНЫХ КОТЛОВЫХ ТРУБАХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ

© 2020 г. Чжуань Сюй^{1,*}, Цзинчжэ Чжу^{1,**}

¹Школа машиностроения, Сянтаньский университет, Сянтань 411105, Хунань, КНР
E-mail: *xuzhiyuan@xtu.edu.cn; **779416172@qq.com

Поступила в редакцию 10.01.2019; после доработки 25.01.2019

Принята к публикации 01.03.2019

Аустенитные котельные трубы являются ключевыми компонентами современных угольных электростанций, но часто подвержены закупорке или даже разрушению, вызванными скоплением оксидных осадков с внутренней стороны трубы. Существующие методы неразрушающего контроля несколько недостаточны для количественной оценки высоты скопления отслоившихся оксидных осадков. Метод импульсных вихревых токов (ИВТ) обладает уникальными достоинствами, такими как большая глубина проникновения и различные характеристики сигнала, что дает прекрасную возможность для решения данной задачи. Настоящая работа служит предварительным исследованием для применения метода ИВТ для измерения скопления оксидов. Конечно-элементное моделирование и экспериментальные работы проводятся для подтверждения возможности и эффективности измерения ИВТ при различных обстоятельствах. Пиковое значение сигнала ИВТ линейно связано с высотой скопления и, таким образом, используется в качестве функции сигнала для количественного измерения высоты скопления. После анализа влияния смещения датчика и зазора между датчиком и трубой разработан датчик, состоящий из шлейфа с разъемом на концах. Чтобы определить неравномерность скопления предложена схема массива датчиков-катушек, а выходные сигналы массива характеризуют профиль внутреннего скопления. Наконец, объясняется принцип использования опорного сигнала для устранения помех вследствие изменения магнитных свойств стенки трубы.

Ключевые слова: аустенитная котельная труба, импульсные вихревые токи, неразрушающий контроль, конечно-элементное моделирование.

DOI: 10.31857/S0130308220040065

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для ускорения производительности генерации энергии и развития низкоуглеродной экономики в Китае постепенно развиваются в направлении больших мощностей и высоких показателей недавно построенные электростанции, работающие на сжигании угля. Сверхответственных и ультрасверхответственных агрегатов электростанций становится все больше и больше в угольной энергетике. Как ключевые компоненты в котлах электростанций трубы пароперегревателя и вторичного пароперегревателя широко изготавливаются из аустенитных нержавеющей сталей с высокой термостойкостью и сопротивлением ползучести, таких как TP304H, TP347H и TP321H [1—4]. К сожалению, эти типы нержавеющей стали обладают плохой устойчивостью к окислению вследствие воздействия паром, что делает котельные трубы подверженными к сильному окислению с внутренней стороны трубы после длительной работы при высокой температуре и высоком давлении [2, 3]. Образовавшиеся оксиды железа плотно прилипают к металлической подложке из-за их различных структур решетки. Кроме того, во время запуска и выключения котла в оксидных скоплениях будут создаваться большие термические напряжения, приводящие к растрескиванию, расслоению и отслаиванию скоплений. В секциях с низкой скоростью пара отслоившиеся крупные частицы будут опускаться и накапливаться. Если эти частицы не будут удалены вовремя, высота скопления со временем станет больше, и, следовательно, поток пара будет ограничен, и в конечном итоге может образоваться закупорка трубы, что может привести к перегреву трубы и ее разрыву [2—4].

Чтобы обеспечить безопасность эксплуатации и избежать непредвиденных отключений, было проведено много исследований эффективного метода неразрушающего контроля (НК) для измерения количества оксидных осадков в котельных трубах. Методы, о которых сообщается в литературе, в основном включают ультразвуковой контроль, рентгенографию, магнитный контроль, вихретоковый контроль и т.д. Ультразвуковой контроль имеет длительную историю в измерении толщин скоплений и служит инструментом, чтобы прогнозировать рост и расслоение оксидов, связывая энергию деформации, накопленную в оксидах, с их толщиной, температурой пара и временем [2, 3]. Однако, поскольку в ультразвуковом контроле в основном используется отражение на границе раздела сред, рассеяние и диффузное отражение ультразвуковых волн

на отдельных оксидных частицах делают этот метод неподходящим для измерения суммарной высоты осаджений. Радиография основывается на различии коэффициентов поглощения лучей стенкой трубы и оксидов железа. Этот метод интуитивно понятен и надежен, поскольку с его помощью можно получать изображение, отражающее состояние скоплений оксидных осаджений внутри трубы [3, 5]. Однако при применении в полевых условиях опасно и дорого использовать радиоактивные источники. Магнитный контроль основан на том факте, что аустенитная нержавеющая сталь является парамагнитной, в то время как окисленное паром железо в основном состоит из ферромагнитного Fe_3O_4 . Поэтому при намагничивании подозрительных мест труб накопление оксидных осаджений может быть определено по намагниченности [5—7]. Этот метод привлек большое внимание благодаря простой процедуре и высокой скорости обнаружения дефектов, но все же имеет два недостатка:

1. Калибровочная кривая между напряженностью магнитного поля и высотой скоплений является нелинейной, имеет тенденцию насыщаться при увеличении высоты скоплений до определенного значения. Следовательно, если измеряемая высота находится в зоне насыщения, точное количественное определение будет затруднено [6].

2. Аустенитная сталь с парамагнитной гранецентрированной кубической структурой может вызывать мартенситное превращение с образованием ферромагнитной α -фазы (объемно-центрированной кубической) после эксплуатации при высоких температурах [7, 8]. Вышеупомянутое изменение намагниченности повлияет на сигнал магнитного поля и приведет к значительному снижению точности измерений.

Другим потенциальным методом является вихретоковый (ВТ) контроль, основанный на явлении электромагнитной индукции. Поскольку электропроводность и магнитная проницаемость оксидов отличаются от основного металла, предыдущие исследования предполагали, что ВТК способен измерять толщину оксидов и, следовательно, может косвенно дать информацию об образовании оксида, его росте и расслоении. В работе [9] сообщается о разработке внутреннего ВТ-датчика для измерения толщины оксидов с внутренней стороны трубы в пароперегревателях и вторичных пароперегревателях [9]. Августиняк и соавторы связывают обработанный ВТ-сигнал с концентрацией магнитной фазы в оксидных осаджениях для оценки начального повреждения при ползучести в аустенитной котельной трубе [10].

С другой стороны, на данный момент недостаточно исследований, изучающих применение ВТК для измерения высоты скоплений. Недавно нами проведены предварительные эксперименты и было обнаружено, что возможно количественное определение высоты скоплений оксидных осаджений с помощью импульсного ВТК (ИВТК) [11]. При ИВТК используется ступенчатое напряжение для возбуждения датчика и демонстрируются определенные преимущества по сравнению с традиционным ВТК с точки зрения большей глубины проникновения и различных параметров, изменяющихся во времени. Эти преимущества позволяют с помощью метода ИВТК проникать сквозь стенку трубы и оксиды, осуществлять глубокую обработку сигналов, и, следовательно, преодолеть те недостатки, с которыми сталкиваемся при магнитном контроле.

Эта работа является продолжением предыдущего исследования и детально рассматривает результаты моделирования методом конечных элементов (ММКЭ) и результаты эксперимента. В разд. 2 рассматриваются геометрические параметры и физические свойства трубы TP347H и включенных оксидных отложений. В разд. 3 для изучения выходного сигнала ИВТК при наличии осажженных оксидов выполняется конечно-элементное моделирование. В разд. 4 проводятся эксперименты для проверки результатов ММКЭ и рассматриваются некоторые практические вопросы, включающие влияние смещения датчика, влияние зазора между датчиком и поверхностью, массивы катушек и принцип использования опорного сигнала. Наконец, заключение и будущая работа по данной тематике приведены в разд. 5.

2. ПАРАМЕТРЫ ОБРАЗЦОВ

2.1. Аустенитная труба

Испытуемый участок трубы был отрезан от трубы пароперегревателя TP347H во время периодического техобслуживания сверхответственной установки, работающей на угольном топливе, мощностью 600 МВт в провинции Хунань. Труба имела наружный диаметр 57 мм и толщину стенки 4,5 мм.

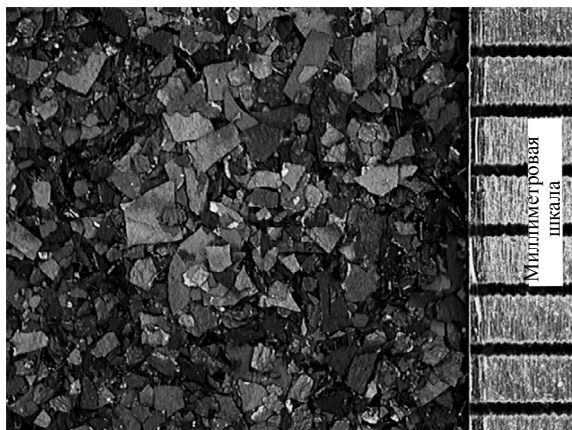


Рис. 1. Отслоившиеся оксидные частицы.

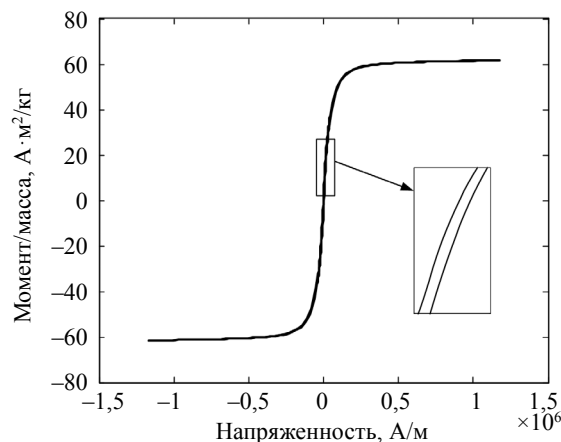


Рис. 2. Петля гистерезиса оксидных частиц.

2.2. Оксидные частицы

Оксидные частицы были собраны из осадений в таких же трубах вторичных пароперегревателей до процедуры продувки паром. На рис. 1 изображено некоторое количество оксидных осадений, полученное с помощью видеоизмерительной машины (Tztec vmc222). Каждая частица проявляет двухслойную структуру: черный слой указывает на магнетит (Fe_3O_4) и светло-серый слой, на гематит (Fe_2O_3). Рентгеноструктурный анализ показывает, что магнетит является основной фазой с массовой долей 65,4 %, поэтому все оксидные частицы проявляют ферромагнитные свойства. Таким образом, общая плотность и общая проводимость оксидных осадений рассчитываются путем взвешивания удельных электропроводностей плотности компонентов с соответствующими массовыми процентами.

Кроме того, магнитные свойства оксидных осадений измеряли с использованием магнитометра с вибрирующим образцом (VSM, Lakeshore 7404) при комнатной температуре в магнитном поле до $1,17 \times 10^6$ А/м. Частицы оксидов для измерения были разрезаны на мелкие кусочки. На рис. 2 показана петля гистерезиса, полученная с помощью VSM. Как видно, петля очень узкая, почти перекрывается, образуя единую кривую, которая показывает магнитомягкие свойства оксидов (коэрцитивная сила $H_{ci} \approx 2,505.26$ А/м). Кроме того, в начальной области намагниченности вблизи начала координат (см. рис. 2, увеличенный график) эти две кривые являются приблизительно линейными. Следовательно, учитывая относительно малую величину магнитного поля при ВТК, магнитная проницаемость будет упрощена как среднее значение наклонов двух соответствующих линий.

3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1. Приближение для модели

ММКЭ было проведено предварительно, чтобы подтвердить целесообразность предложенного метода. Как показано на рис. 1, частицы оксидов сильно различаются по форме и размеру. Также разумно предположить, что пространственное распределение оксидных осадений по всей области отложений является случайным, и физические состояния отдельных частиц статистически независимы друг от друга. Учитывая вышеупомянутые условия, всю область отложений можно рассматривать как дискретную случайную среду (ДСС) [12]. Хотя считается, что электромагнитное рассеяние с помощью ДСС можно моделировать непосредственно с помощью численно точного компьютерного решения макроскопических уравнений Максвелла, применимость этого прямого подхода все еще ограничена количеством составляющих частиц [12, 13]. Высокая плотность упаковки оксидных осадений делает повторные вычисления электромагнитного рассеяния большой практической задачей. Поэтому, основываясь на приближении эффективной среды, мы заменим область накопления однородным объектом с той же внешней границей. В дальнейшем область накопления будет моделироваться как непрерывный объем с электромагнитными свойствами, такими же, как у одной оксидной частицы.

3.2. Трехмерная конечно-элементная модель

На рис. 3 изображена конечно-элементная сетка для геометрических объектов, созданная в программном обеспечении ANSYS. Для ясности элементы воздушного пространства не отображаются. Датчик ВТК моделируется в виде двух катушек, намотанных вокруг внешней стенки трубы: одна (рядом с трубой) является измерительной катушкой, а внешняя — возбуждающей катушкой. Обмотки катушек имеют длину 160 мм и содержат 32 витка. Область скопления оксидов (окрашена в розовый цвет) моделируется в виде усеченного цилиндра с одинаковой высотой от внутренней части дна горизонтально расположенной трубы. По-видимому, такое упрощение не соответствует неровной поверхности реального отложения, но упрощает сопоставление характеристик сигнала с конкретной высотой. Как поясняется в разд. 2, электрическая проводимость и относительная магнитная проницаемость в месте скопления приняты постоянными, которые составляют 10^4 См/м и 4,8 соответственно. Проводимость трубы составляет 1,37 мСм/м, и предполагается, что ее магнитная проницаемость будет равна проницаемости вакуума.

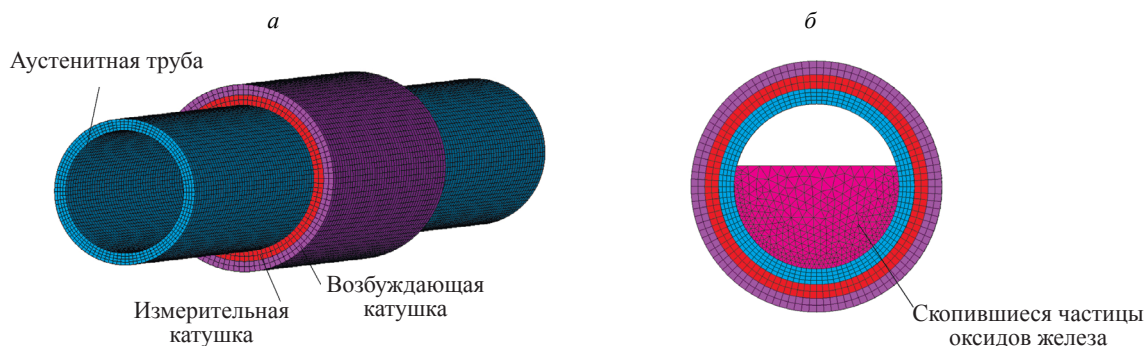


Рис. 3. Сетка конечных элементов без воздушного пространства: изометрическая проекция (а) и разрез (б).

Элементы SOLID236 применяются при построении конечно-элементной модели. Чтобы произвести точный расчет модели используется подходящая схема построения сетки. Сетки с шестигранными элементами применяются для трубы, катушек и воздушного пространства рядом с внешней стенкой, в то время как сетки с тетраэдрическими элементами используются в области скопления, внутреннем воздушном пространстве и остальной части внешнего воздушного пространства. Кроме того, более мелкое разбиение сетки выполняется в областях, где поле быстро меняется. Входное напряжение на элементы катушки возбуждения подается через элементы CIRCU124, используемые в качестве независимого источника напряжения. Прямоугольный импульс с частотой 5 Гц, амплитудой напряжения 0,4 В, коэффициентом заполнения 50 % и фронтами нарастания/спада длительностью 1 мс генерируется путем установки реальных констант элемента CIRCU124. Точно так же область измерительной катушки связывается с катушкой и резистором на 10 МОм, чтобы измерить наведенное напряжение. После задания граничных условий для параллельного распределения магнитного потока вдоль всех внешних границ выполняется транзитный анализ с шагом по времени 0,1 мс.

3.3. Результаты конечно-элементного моделирования

Модель МКЭ используется в качестве расчетного инструмента для прогнозирования параметров сигнала в различных условиях эксперимента и, таким образом, облегчает анализ влияния различных переменных на измерения. На рис. 4 показаны рассчитанные сигналы для высоты скоплений в диапазоне от 10 до 40 мм. Во время моделирования датчик располагается прямо над осевым центром области скопления. Можно видеть, что кривые сигнала в двух полупериодах обладают нечетной симметричностью. Увеличенная область показывает сигнал в самом начале и изменение сигнала напряжения во время эксперимента для различных высот. Сигнал увеличивается во времени и достигает пика в момент времени вблизи конца нарастания фронта импульса возбуждения, а затем постепенно уменьшается. По мере того как суммарная высота увеличивается, пиковое значение сигнала увеличивается, а скорость снижения сигнала после пика замедляется.

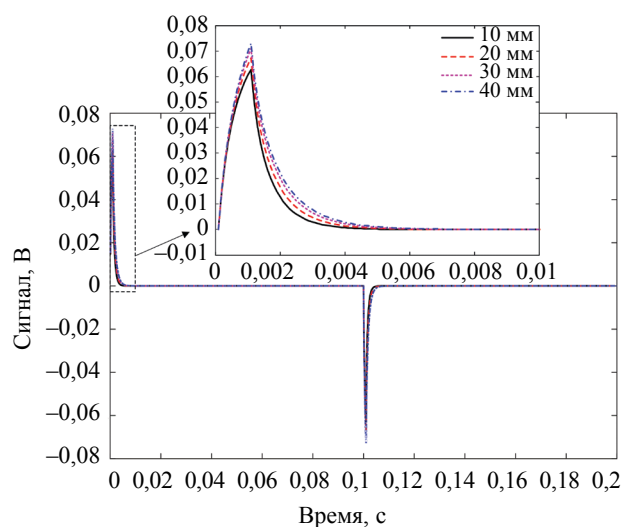


Рис. 4. Расчитанные сигналы для высот скоплений: 10, 20, 30 и 40 мм оксидных осаджений.

Рис. 5 иллюстрирует отношение пикового значения сигнала к высоте скоплений. Монотонное изменение демонстрирует, что возможно применять метод ИВТК для количественного измерения высоты скоплений оксидных осаджений. Аппроксимирующая прямая представлена, чтобы показать линейность данных. Значение R^2 составляет 0,9709, что указывает на хорошую точность, используя прямую линию в качестве калибровочной кривой для оценки высоты скоплений в реальном эксперименте.

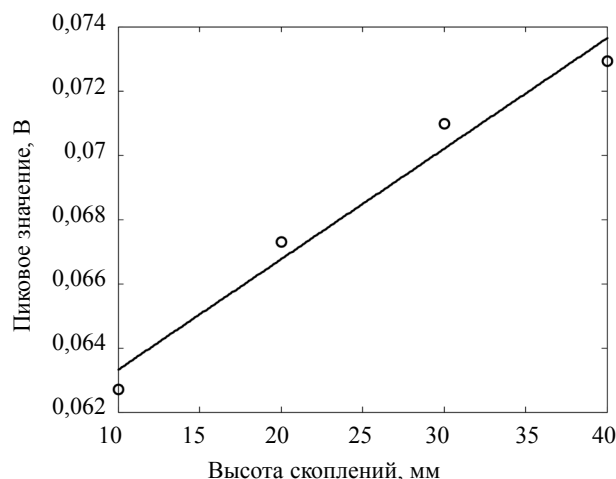


Рис. 5. Зависимость пиков рассчитанных сигналов от высоты скоплений.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

4.1. Постановка эксперимента

Для эксперимента в нашей лаборатории была разработана ИВТК-система. Система, главным образом, состоит из трех частей: генерация сигнала, взаимодействие сенсора с образцом и сбор данных. Прямоугольный сигнал с заданными параметрами получается с помощью функционального генератора, затем преобразуется в токовый сигнал и усиливается усилителем мощности. Катушка возбуждения датчика проводит усиленный прямоугольный ток и взаимодействует с образцом в виде вихревых токов, чье вторичное магнитное поле, таким образом, индуцирует сигнал напряжения в измерительной катушке. Этот сигнал перед экспериментом обрабатывается предва-

рительным усилителем, а затем подключается к системе сбора данных NI. В систему встроена процедура обработки сигналов, которая позволяет осуществлять: отображение в реальном времени, хранение данных для автономного анализа и определение нужных характеристик.

Для адаптации контура трубы котла датчик должен легко и быстро устанавливаться снаружи трубы. Учитывая это, датчик выполняется в виде плоского кабеля, концы которого имеют соответствующие размеры разъемов. Металлические пины гнездовых разъемов вставляются в печатную плату (ПП), чьи дорожки прокладываются так, чтобы жилы кабеля образовывали однослойные соленоиды. Номера катушек и их роль в качестве возбуждающей или измерительной можно легко менять, переставляя клеммы на ПП. Обмотка катушки является съемной и устанавливается путем вставки концов кабеля в разъемы. Такой подход позволяет сконструировать датчик, который легко оборачивается вокруг трубы и может использоваться на трубах разного диаметра, просто при замене длины кабеля.

4.2. Результаты эксперимента

4.2.1. Изменение высоты скоплений

Эксперименты проводили на образце трубы TP347H, описанной в разд. 2. Датчик имеет одну возбуждающую и одну измерительную катушки. Для симуляции скопления оксидных осадений пластиковый контейнер изготавливается в соответствии с внутренним профилем трубы с использованием технологии 3D-печати. Во время эксперимента требуемая высота скоплений может быть получена путем добавления или удаления некоторого количества оксидных частиц в контейнере. Частота возбуждения принимает значение до 2 Гц, чтобы создать более сильное поле в области глубокого накопления. Катушки имеют длину 80 мм. Другие параметры такие же, как и у расчетной модели.

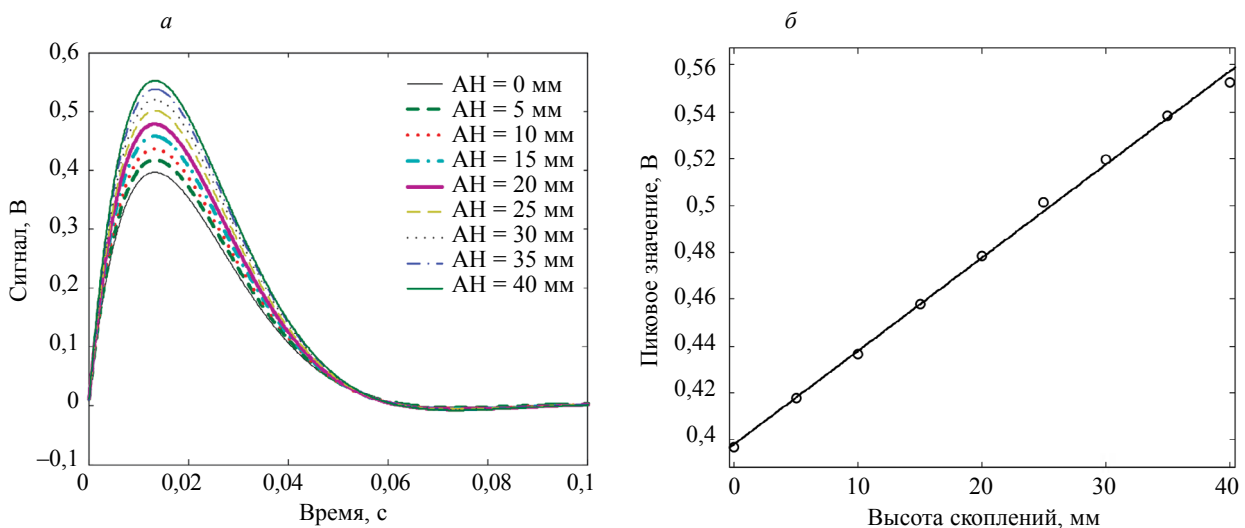


Рис. 6. Графики экспериментальных сигналов (а) и их пиков (б) для скоплений с различной высотой.

Рис. 6а показывает экспериментальные сигналы для скоплений с высотой от 0 мм (то есть без накопления) и до 40 мм. Соответствующая связь пика сигналов с высотой скоплений приведена на рисунке 6б. Когда высота увеличивается, амплитуда сигнала увеличивается, и пиковое значение линейно связано с высотой при значении R^2 , равного 0,9999. Однако эти сигналы, по-видимому, несколько отличаются по форме от сигналов при моделировании, и причина в том, что нижние частоты фильтруются предусилителем для получения высокого отношения сигнал/шум. Тем не менее экспериментальные измерения хорошо согласуются с результатами моделирования и тем самым подтверждают наше предыдущее предположение и моделирование.

4.2.2. Влияние смещения датчика

Поскольку датчик установлен на внешней стороне стенки трубы, точное местоположение скопления оксидных осадений оператору неизвестно, хотя участки, в которых возможно

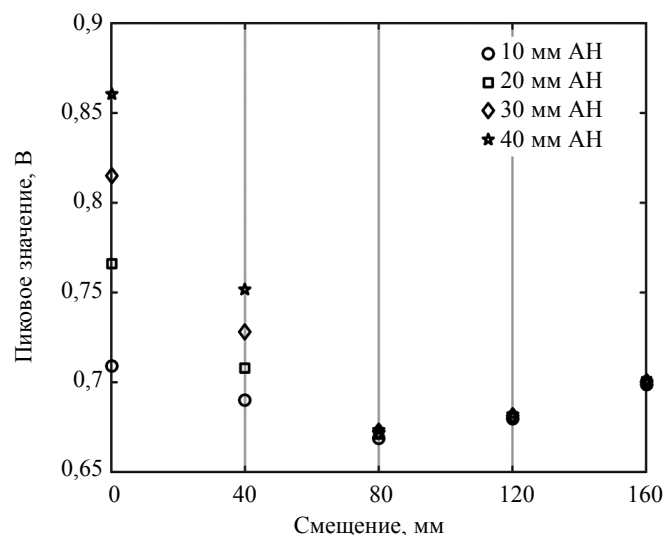


Рис. 7. Зависимость пикового значения экспериментального сигнала от расстояния смещения датчика для разных высот.

образование скоплений, можно предположить заранее. Следовательно, в реальности может случиться так, что датчик отклонится от места скопления.

На рис. 7 представлен график зависимости пика измеряемого в эксперименте сигнала от смещения датчика для оксидных осадений с высотой от 10 до 40 мм. Можно видеть, что с увеличением расстояния смещения пик сигнала постепенно уменьшается, но характер изменения пика сигнала все еще остается хорошим для смещения датчика до 80 мм. С другой стороны, когда расстояние достигает 80 мм, точки пиковых значений для разных высот скоплений почти перекрываются друг с другом. На самом деле, в точке смещения 80 мм зона обслуживания датчика находится вне области скопления. Различия между амплитудами сигналов слишком слабы, чтобы их можно было определить измерительной катушкой в лабораторных условиях, что делает количественное определение на основе пиковых значений ненадежным.

Следовательно, в реальных измерениях с использованием методики ИВТК крайне важно заранее получить информацию об области, склонной к накоплению, и только после этого можно выполнять другие процедуры, включая установку датчика. К счастью, практика показывает, что скопление оксидов железа, скорее всего, происходит в нижней части вертикальной ветки петли пароперегревателя трубы [3, 14], что помогает оператору быстро определять местонахождение участка с оксидными скоплениями для выполнения процедуры ИВТК. С другой стороны, перемещая датчик в непосредственной близости и сравнивая полученные пики сигнала, можно определить диапазон накопления оксидной окалины внутри измеряемой секции трубы.

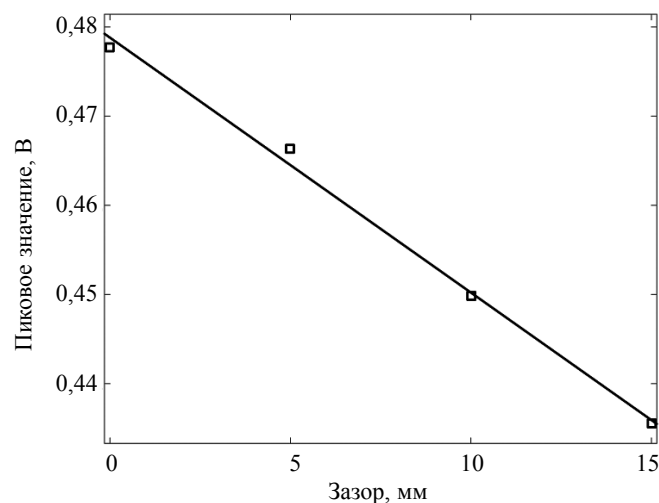


Рис. 8. Влияние зазора как функция расстояния от внешней поверхности образца трубы.

4.2.3. Влияние зазора

Котельные трубы электростанций, работающих на угле, также подвержены коррозии нагрева со стороны греющих газов. Максимальная толщина отложения золы может составлять до нескольких сантиметров, при этом внешний слой состоит в основном из слабо спеченной летучей золы [15]. В этом случае измерения будут выполняться с датчиком, приподнятым над стенкой трубы. На рис. 8 показаны результаты экспериментов с учетом влияния зазора. Высота скопления оксидов составляет 20 мм. Несколько губчатых прокладок находятся между датчиком и поверхностью трубы для имитации зазора. Аппроксимирующая сплошная линия ясно показывает, что пиковые значения экспериментальных сигналов значительно и почти линейно уменьшаются с увеличением зазора. Следовательно, для точного измерения крайне важно уменьшать или компенсировать влияние зазора на функцию выходного сигнала.

4.2.4. Массив катушек

Датчик в предыдущем опыте работал в режиме «один к одному», то есть использовалась только одна возбуждающая катушка и одна измерительная катушка. Сигнал, полученный этим датчиком, фактически является средним откликом образца в зоне действия датчика. Однако на самом деле, частицы отслаивающихся оксидов часто неравномерно распределены в области скопления, и степень загромождения из-за скоплений, в основном, определяется самой высокой точкой. Чтобы приспособиться к реальной ситуации, другой датчик с восемью возбуждающими катушками и восемью измерительными катушками разработан путем изменения схемы ПП. Оксидные частицы в контейнере, напечатанном на 3D-принтере, накапливаются в форме пологого ската, как показано на рис. 9. Во время эксперимента датчик устанавливается так, чтобы его парные катушки

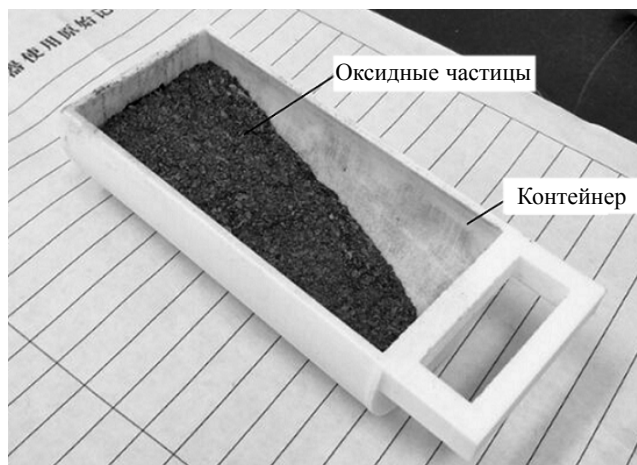


Рис. 9. Неравномерно расположенные оксидные частицы в контейнере.

располагались в местах от самого большого скопления до самого малого, которые соответственно помечены от одного до восьми. Ток возбуждения сначала подается на катушку возбуждения 1, и в это время измеряется напряжение в измерительной катушке 1. Затем то же происходит в следующей паре катушек. На рис. 10 показаны пиковые значения полученных сигналов в зависимости от номера катушки и линейная аппроксимация через эти точки. Поскольку номер катушки соответствует высоте накопления, установленная наклонная линия соответственно отражает профиль скоплений внутри трубы. Отклонение некоторых точек от аппроксимирующей линии, вероятно, объясняется тем фактом, что отдельные оксидные частицы фактически трудно расположить в форме клина в открытом контейнере. Принимая во внимание этот фактор, можно определить место скопления, склонное к закупорке внутри трубы, с использованием массива катушек.

4.2.5. Принцип использования опорного сигнала

Для решения проблемы неточности измерения, вызванной изменением магнитных свойств стенки аустенитной трубы, для обработки полученных сигналов применяется принцип использования опорного сигнала. Рис. 11 иллюстрирует данный принцип. Итоговый сигнал представляет собой дифференциальный сигнал, полученный путем вычитания опорного сигнала из исходного

измеренного сигнала. Эталоном является сигнал, измеренный при отсутствии в трубе скоплений. Поскольку этот сигнал представляет только сигнал стенки трубы, вклад, вносимый свойствами трубы, в дифференциальном сигнале аннулируется.

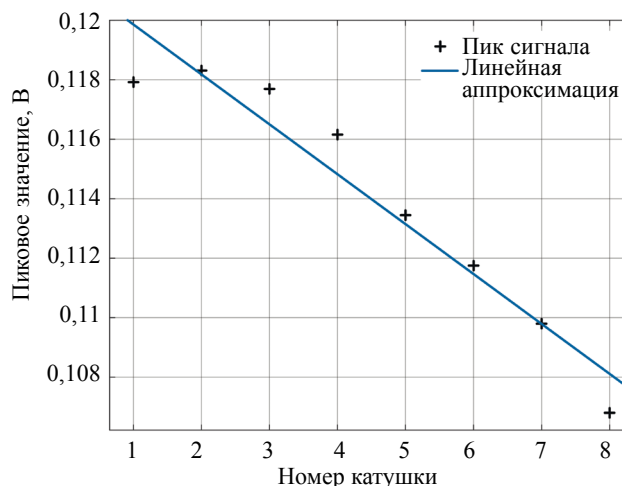


Рис. 10. График зависимости пиковых значений сигналов массива с 8-ю катушками от номера катушки.

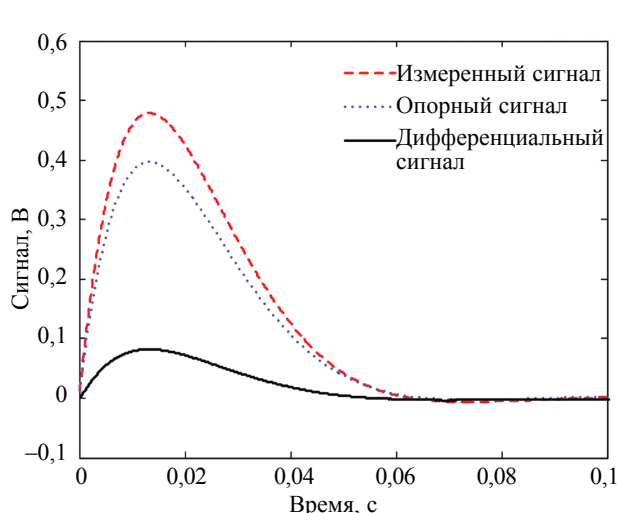


Рис. 11. Схематический пример использования опорного сигнала.

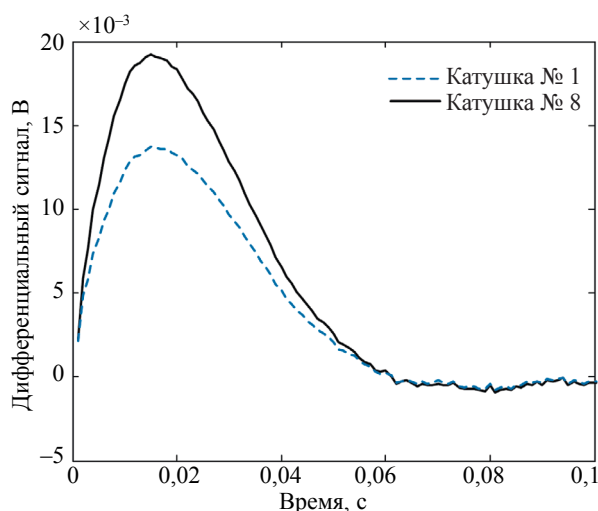


Рис. 12. Дифференциальные сигналы массива из 8 пар катушек, полученные вычитанием опорного сигнала, полученного при отсутствии скоплений в трубе.

На рис. 12 показаны дифференциальные сигналы массива катушек после вычитания опорного сигнала (для ясности показаны только кривые первой и восьмой пары катушек). Очевидно, что эти сигналы являются чистым сигналом от скопления оксидов. Если линия проходит через их пиковые значения, наклон будет таким же, как на рис. 10, и также отражает профиль накопления.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была исследована методика ИВТ для измерения высоты скоплений отслоившихся оксидов железа в аустенитных котельных трубах. Конечно-элементное моделирование и эксперименты проведены для проверки возможности и эффективности метода ИВТ при различных обстоятельствах. Основные результаты заключаются в следующем.

1. Пик сигнала ИВТ линейно связан с высотой скопления и, таким образом, служит характеристикой сигнала для количественного измерения высоты.

2. На выявляемость скоплений существенное влияние оказывает смещение датчика. Таким образом, необходимо собирать информацию о месте скопления на основе опыта или прогнозирования на основе модели.

3. Используя датчик с массивом катушек, можно различить неравномерность накопления, что позволяет определять наибольшие скопления, приводящие к закупорке внутри трубы.

4. Неточность, вызываемая изменением магнитных свойств аустенитной трубы, может быть устранена путем вычитания опорного сигнала из исходного сигнала ИВТК.

В работе по моделированию МКЭ однородный объект используется для аппроксимации осаждаемых оксидных частиц, дискретной природой которых и изменением плотности упаковки в реальном случае пренебрегают. Такое предположение, по-видимому, работает хорошо, но точное моделирование с учетом рассеяния еще предстоит провести в будущей работе. Кроме того, экспериментальная система ИВТК, разработанная в лаборатории, будет доработана, чтобы в результате иметь прибор для полевых применений, и для дальнейшей проверки новой методики необходимо провести дополнительные испытания в котельных трубах электростанций.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (No. 51505406).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Viswanathan R., Coleman K., Rao U.* Materials for ultra-supercritical coal-fired power plant boilers // Int. J. Press. Vessels Pip. 2006. V. 83. № 11—12. P. 778—783.
2. *Dooley R.B., Wright I.G., Tortorelli P.F., Schutze M.* Program on technology innovation: oxide growth and exfoliation on alloys exposed to steam. EPRI Report No. 1013666, Palo Alto, CA, 2007.
3. *Sabau A.S., Wright I.G., Shingledecker J.P.* Oxide scale exfoliation and regrowth in TP347H superheater tubes // Mater. Corros. 2012. V. 63. № 10. P. 896—908.
4. *Viswanathan R., Sarver J., Tanzosh J.M.* Boiler materials for ultra-supercritical coal power plants—steamside oxidation // J. Mater. Eng. Perform. 2006. V. 15. № 3. P. 255—274.
5. *Ohtomo A., Kihara S., Asakawa K.* Magnetic measurement of the quantity of steam-oxidized scale of boiler super-heater tubes // Ishikawajima-Harima Engineering Review. 1976. V. 16. № 2. P. 130—134.
6. *Qiang W.J., Shu G.G.* Magnetic NDT method for detecting oxide scale piled up in austenitic stainless steel tubes // Chin. J. Sci. Instrum. 2009. V. 30. № 6. P. 154—158.
7. *Wang W., Huang X., Li W.S., Gao Y.* Magnetism variance analysis of Super304H austenitic stainless steel after service // Eng. Fail. Anal. 2017. V. 80. P. 79—86.
8. *Byun T.S., Hashimoto N., Farrell K.* Temperature dependence of strain hardening and plastic instability behaviors in austenitic stainless steels // Acta Mater. 2004. V. 52. № 13. P. 3889—3899.
9. *Schadler D.M., Gehl S.M.* Advanced NDE techniques for fossil-fired boilers / Proceedings of 3rd EPRI Conference on Fossil Plant Inspection. Baltimore, MD, USA, 1991.
10. *Augustyniak B., Chmielewski M., Sablik M.J., Augustyniak M., Walker S.* A new eddy current method for nondestructive testing of creep damage in austenitic boiler tubing // Nondestr. Test. Eval. 2009. V. 24. № 1—2. P. 121—141.
11. *Xu Z., Zhu J., Yuan X., Lin W.* Pulsed eddy current testing for thickness measurement of oxide scales accumulated in austenitic boiler tubes // Nondestr. Test. 2017. V. 39. № 10. P. 12—16.
12. *Mishchenko M.I., Dlugach J.M., Yurkin M.A., Bi L., Cairns B., Liu L., Panetta R.L., Travis L.D., Yang P., Zakharova N.T.* First-principles modeling of electromagnetic scattering by discrete and discretely heterogeneous random media // Phys. Rep. 2016. V. 632. P. 1—75.
13. *Tishkovets V.P., Petrova E.V., Mishchenko M.I.* Scattering of electromagnetic waves by ensembles of particles and discrete random media // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2011. V. 112. № 13. P. 2095—2127.
14. *Sabau A.S., Wright I.G., Shingledecker J.P., Tortorelli P.F.* Managing oxide scale exfoliation in boilers with TP347H superheater tubes / 7th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants. Waikoloa, HI, USA, 2014. 821—831.
15. *Wright I.G., Shingledecker J.P.* Rates of fireside corrosion of superheater and reheater tubes: making sense of available data // Mater. High Temp. 2015. V. 32. № 4. P. 426—437.