

ВИХРЕТОКОВЫЙ ДАТЧИК С ДВУХЧАСТОТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ГЛУБОКИХ ТРЕЩИН

© 2020 г. Чуанлун Ван¹, Мэйсянь Ву¹, Дунли Чжан^{1,*}

¹ Северный университет Минзу, Северный Вэньчан, 204, район Сися, 750021, Иньчуань, Нинся-Хуэйский автоном. район, Китай
E-mail: zdlisr@163.com

Поступила в редакцию 20.05.2020; после доработки 09.06.2020
Принята к публикации 09.06.2020

Скин-эффект — это обычное явление при вихретоковом контроле (ВТК), из-за которого вихревые токи концентрируются возле поверхности образца и не могут распространяться вглубь материала. Для улучшения способности обнаружения глубоких дефектов предлагается новый датчик с двухчастотным возбуждением, с помощью которого можно уменьшать плотность вихревых токов около поверхности образца. Цель работы, заключающаяся в обнаружении глубоких трещин в образце из нержавеющей стали, достигается с помощью этого датчика. В этой статье для определения частоты, тока возбуждения и расположения катушек зонда используется программное обеспечение ANSYS. Способность нового зонда обнаруживать глубокие трещины подтверждена экспериментами. Результаты показывают, что сигнал от трещин глубиной 10 и 15 мм в 4 и 4,47 раза больше, чем сигнал от трещины глубиной 5 мм. Датчик более чувствителен к глубоким трещинам.

Ключевые слова: ВТК, датчик, глубокая трещина, двухчастотное возбуждение.

DOI: 10.31857/S0130308220120076

1. ВВЕДЕНИЕ

Методика вихретокового контроля (ВТК) имеет преимущества в виде высокой чувствительности, бесконтактного контроля и широкого диапазона применения [1—4]. ВТК широко используется в промышленности и производстве, что позволяет эффективно снизить затраты на промышленное производство и обеспечить безопасную работу оборудования. Но из-за скин-эффекта обнаружение глубоких дефектов в металлических материалах по-прежнему затруднено.

Скин-эффект, проявляющий себя при ВТК, приводит к насыщению сигнала от дефекта по мере увеличения его глубины [5, 6]. Когда глубина дефекта больше определенного значения, вихретоковый датчик не может точно обнаружить дефект и определить его глубину, поскольку глубина проникновения вихревых токов зависит от частоты возбуждения, магнитной проницаемости материала, электропроводности и размера зонда [7, 8]. Следовательно, для улучшения возможностей датчиков обычно используются снижение частоты возбуждения или оптимизация параметров конструкции. Однако, если частота слишком низкая, отношение сигнал / шум и разрешение также уменьшатся. При оптимизации структурных параметров может быть в определенной степени улучшена способность зонда обнаруживать глубокие трещины, но это улучшение не является значительным [9—11].

В данной работе предлагается вихретоковый датчик с двухчастотным возбуждением. Численное моделирование используется для оптимизации конструктивных параметров датчика. Наконец, экспериментально проверена возможность обнаружения глубоких трещин.

2. ПРИНЦИП ДВУХЧАСТОТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

2.1. Настройка двухчастотных сигналов

Многочастотное возбуждение обычно используется в обычных вихретоковых датчиках. Согласно теории рядов Фурье, любой периодический сигнал состоит из множества синусоидальных сигналов различных амплитуд и разных частот [12, 13]. Использование общих периодических сигналов полезно для получения информации о трещинах разной глубины. Обычно многочастотное возбуждение осуществляется одной катушкой возбуждения, а затем сигналы принимаются другой катушкой. Хотя разные глубины проникновения вихревых токов могут быть получены на разной частоте, глубина проникновения вихревых токов все еще ограничена скин-эффектом.

Ввиду превосходства многочастотного возбуждения, в этой статье для возбуждения используются два синусоидальных сигнала разной частоты. Катушки возбуждения работают синхронно, и вихревые токи, генерируемые в испытательном образце, являются суперпозицией токов, индуци-

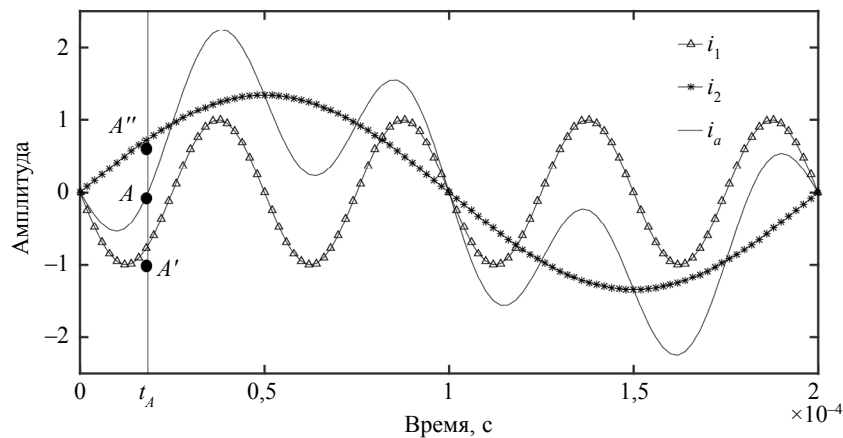


Рис. 1. Два синусоидальных сигнала возбуждения с разными частотами.

рованных двумя катушками возбуждения соответственно. Плотность вихревых токов возле поверхности образца равна нулю, что увеличивает глубину проникновения вихревого тока [14]. Для усиления эффекта многочастотного возбуждения используются два синусоидальных сигнала разной амплитуды и разных частот.

На рис. 1 показаны формы синусоидальных сигналов возбуждения 5 и 20 кГц с различной амплитудой в одном цикле. A' и A'' на рисунке — это две точки на кривых i_1 (20 кГц) и i_2 (5 кГц) в определенный момент времени, i_a — результат суперпозиции i_1 и i_2 . Регулируя амплитуду сигнала возбуждения в точках A' и A'' , суперпозиция плотностей вихревых токов около поверхности образца становится равной нулю. Если поместить приемную катушку в точку, легко получить сигналы от глубоких дефектов.

2.2. Суперпозиция плотностей вихревых токов

На рис. 2а показаны две кривые плотности вихревого тока, распределенные по глубине объекта контроля. Они наводятся токами возбуждения на двух разных частотах в двух катушках соответственно. Вследствие различия частот также отличаются и вихревые токи, распределенные по глубине. Регулируя величину и фазу токов возбуждения, чтобы вихревые токи возле поверхности испытательного образца имели одинаковую величину, противоположную по направлению, можно достичь того, что скин-эффект будет подавлен. На рис. 2а (для демонстрации общей закономерности на оси координат на графике не отмечены конкретные значения) показаны кривые плотности вихревого тока $J(f_1)$ и $J(f_2)$, индуцированные двумя возбуждающими катушками C_1 и C_2 по отдельности перед регулировкой токов возбуждения. На рис. 2б показаны кривые после регулировки тока возбуждения и результат их наложения ($J(f_1) - J(f_2)$). Можно заметить, что распределе-

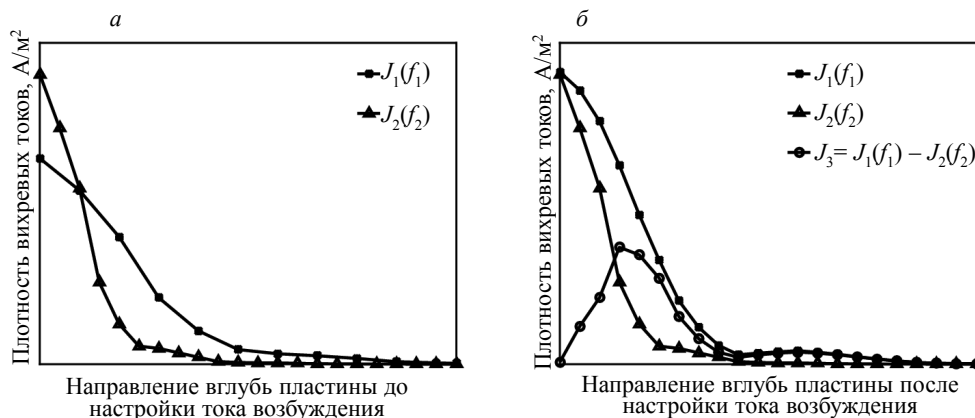


Рис. 2. Суперпозиция вихревых токов.

ние плотности вихревых токов изменилось. Вихревой ток больше не концентрируется около поверхности образца, а концентрируется внутри материала. Это облегчает получение информации о дефектах.

3. РАЗРАБОТКА НОВОГО ДАТЧИКА

3.1. Численная модель

Рис. 3 представляет собой структурный вид нового зонда. Новый зонд состоит из двух катушек возбуждения и одной измерительной катушки. R_0 — внешний диаметр катушки возбуждения; R_i — внутренний диаметр; H_c — высота; N — количество витков; D — глубина прорези; a — расстояние между осями катушек возбуждения C_1 и C_2 . Измерительная катушка C_3 расположена прямо над средней точкой линии, соединяющей две катушки возбуждения.

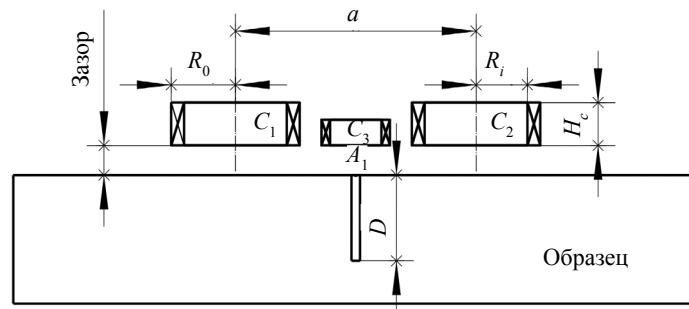


Рис. 3. Численная модель.

Для определения соотношения токов возбуждения новый датчик помещали на образец размером $200 \times 200 \times 50$ мм³, изготовленный из аустенитной нержавеющей стали SUS304.

3.2. Результаты расчетов

Моделирование проводилось с использованием программного обеспечения ANSYS. Параметры катушки возбуждения приведены в табл. 1. Межосевое расстояние a между двумя катушками возбуждения составляет 20 мм. Частоты возбуждения составляют 5 и 20 кГц соответственно. На две катушки возбуждения подается переменный ток 5 А с нулевой фазой. Чтобы гарантировать, что плотность вихревого тока на поверхности образца как можно ближе к нулю, мы наблюдаем изменение плотности вихревого тока в точке, непрерывно изменяя соотношение токов возбуждения в двух катушках. В результате обнаружено, когда отношение равно 0,67, то может быть достигнута цель наложения в точке A_1 .

Таблица 1
Параметры катушки возбуждения

Наименование	R_p , мм	R_0 , мм	Зазор, мм	N
Катушка возбуждения	28	25	2	140

На рис. 4 показаны кривые распределения вихревых токов вглубь, а также результат их нормирования на максимальное значение, когда две круглые катушки возбуждаются по отдельности. Из рис. 4б могут быть получены соответствующие стандартные глубины проникновения на двух частотах возбуждения (глубины, соответствующие вертикальной оси 0,37), которые составляют 4,53 и 8,20 мм.

На рис. 5а показано распределение плотности вихревых токов и результат их нормирования на максимальное значение. Это результат векторного вычитания кривых распределения, индуцированных в средней точке линии, когда две катушки возбуждения возбуждаются отдельно. Видно,

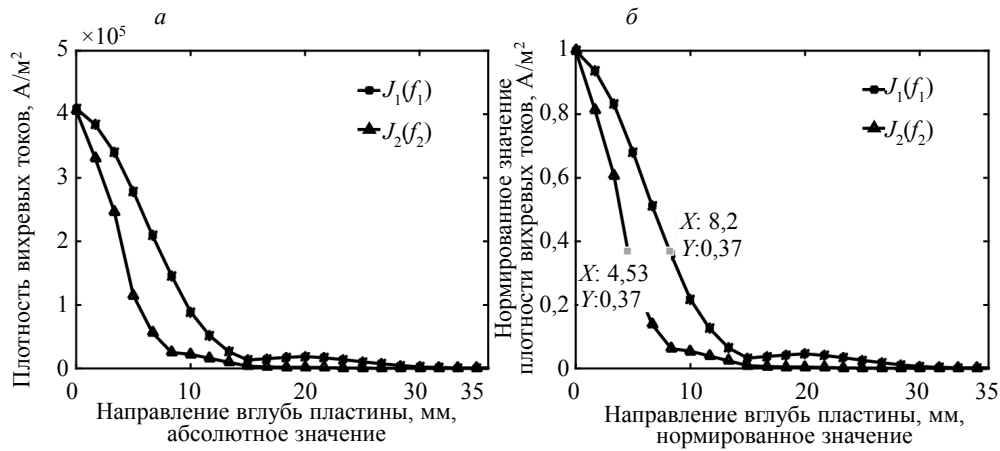


Рис. 4. Распределения плотностей вихревых токов для катушек, возбуждаемых по отдельности.

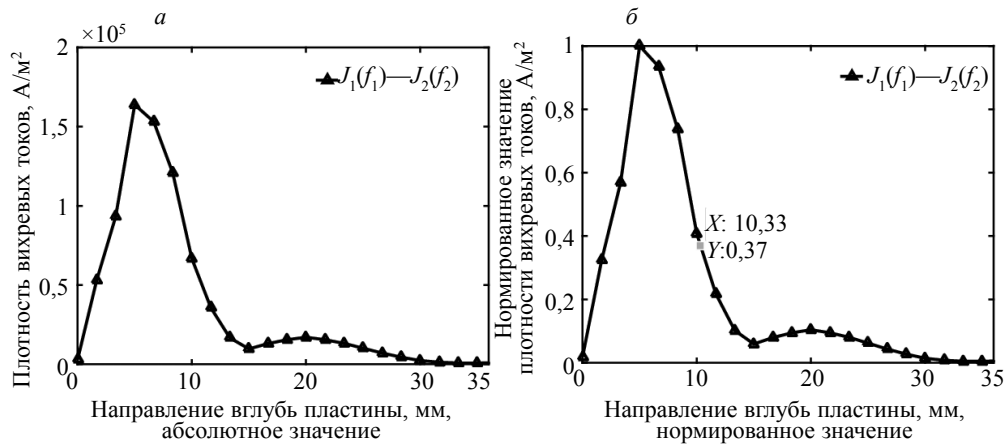


Рис. 5. Распределение плотности вихревых токов с использованием нового датчика.

что плотность вихревых токов стремится к нулю на поверхности образца. Вихревые токи в основном сосредоточены ниже поверхности пластины на 9 мм. Согласно определению стандартной глубины проникновения с использованием максимальной плотности вихревого тока в качестве эталона, теоретическая глубина проникновения при использовании нового датчика составляет 10,33 мм (рис. 5б). Это в 2,28 и 1,26 раза больше, чем при использовании обычного. Видно, что двухчастотное возбуждение может эффективно улучшить способность зонда обнаруживать глубокие трещины.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВОГО ДАТЧИКА

4.1. Экспериментальная установка

Для проверки эффективности нового датчика был разработан и произведен образец из нержавеющей стали SUS304, как показано на рис. 6. Он имеет размер $1350 \times 350 \times 20$ мм³, проводимость $\sigma = 1,43 \times 10^6$ См/м, относительная проницаемость $\mu_r = 1$. В образце были пропилены три одно-типные канавки шириной 1 мм и глубиной 5, 10 и 15 мм соответственно.

Новая система возбуждения устроена как показано на рис. 7а. Две катушки возбуждения подключены к двум источникам питания. Измерительная катушка подключена к осциллографу для отображения сигналов выходного напряжения. Осциллограф модели Le Croy HDO6054 использовался для отображения измеряемых сигналов. Два биполярных источника питания BP4610 и BPZ40-10 были задействованы в качестве источников питания для обеспечения сигнала-

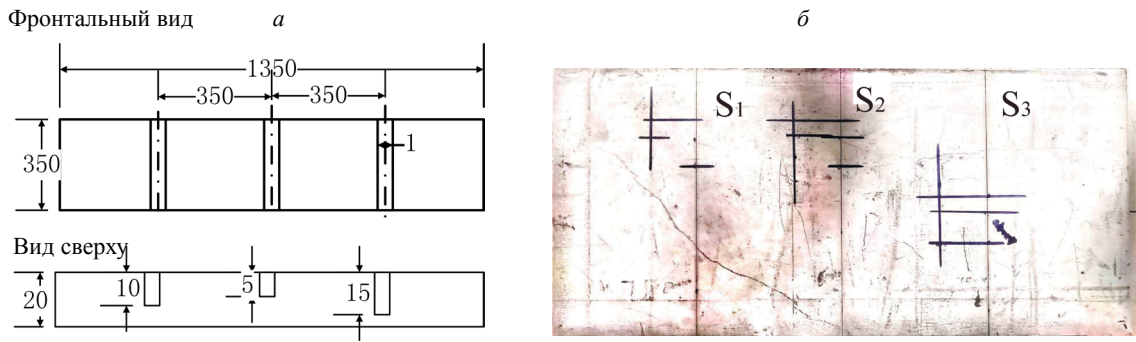


Рис. 6. Объект контроля:
а — чертеж; б — образец.

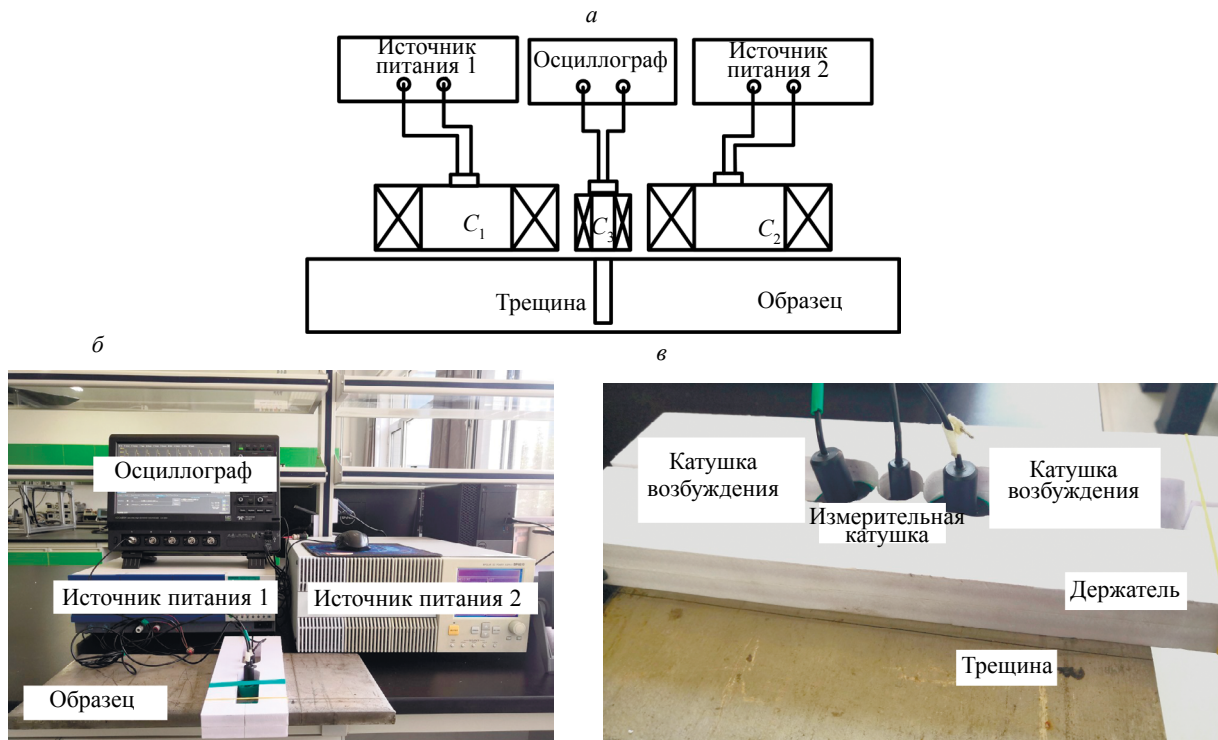


Рис. 7. Экспериментальная установка:
а — схема соединения; б — новая система возбуждения; в — схема расположения катушек в датчике.

лами возбуждения на частотах 5 и 20 кГц соответственно. Чтобы обеспечить равные фактические выходы источников питания, токи возбуждения регулируются перед экспериментом. Отношение токов возбуждения составляет 0,7 (5А и 7,14А); рис. 7б — новая система возбуждения. На рис. 7в показано расположение катушек датчика. Левая и правая — катушки возбуждения, средняя — измерительная катушка. Три катушки удерживаются на определенном расстоянии и закреплены.

4.2. Результаты эксперимента

Как упоминалось выше, на две катушки возбуждения одновременно подается переменный ток 5 А (20 кГц) и 7,14 А (5 кГц). Датчик используется в первую очередь для регистрации сигналов с трещинами и без них. А затем, чтобы судить о размере трещины, определяют изменение напряжения в катушке. На рис. 8 показаны исходные сигналы. Чтобы устранить шум в исходных сигналах, к сигналам на рис. 9а применяется метод фильтрации, а рис. 9б показывает результат фильтрации. Как упоминалось в разделе 2.1, соответственно извлекаются сигналы от трещин V_1 ,

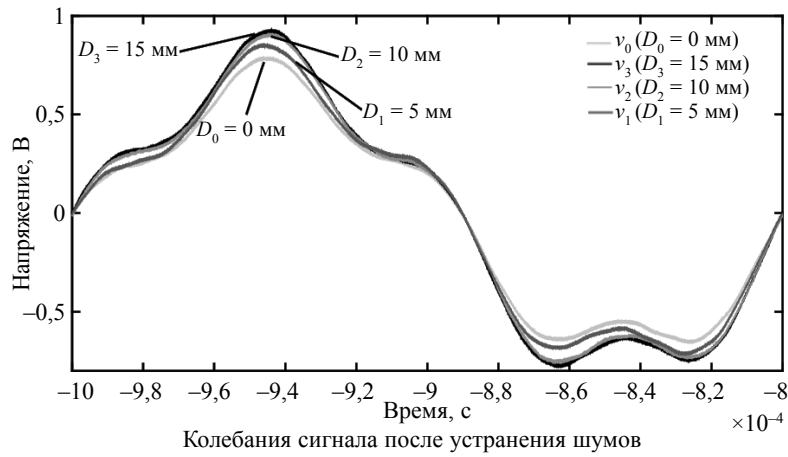


Рис. 8. Исходные сигналы.

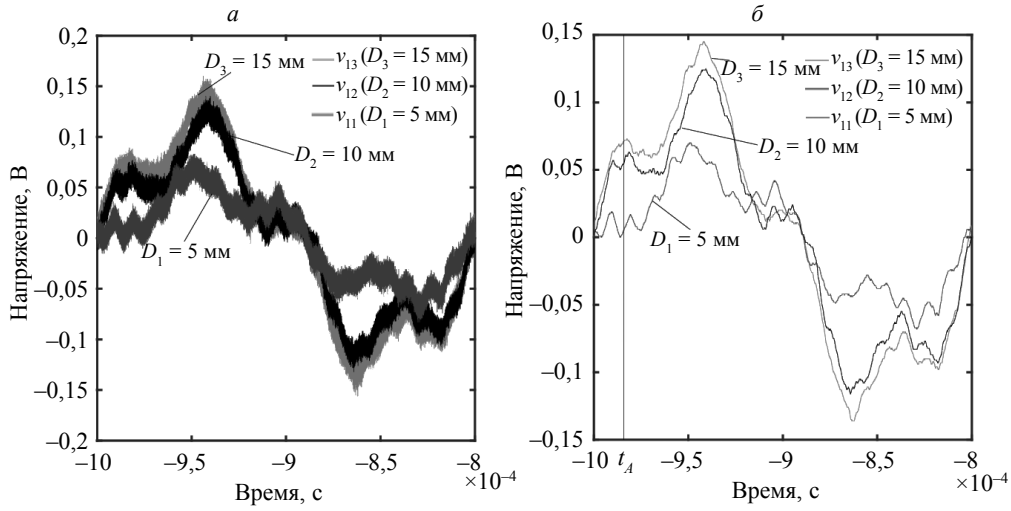
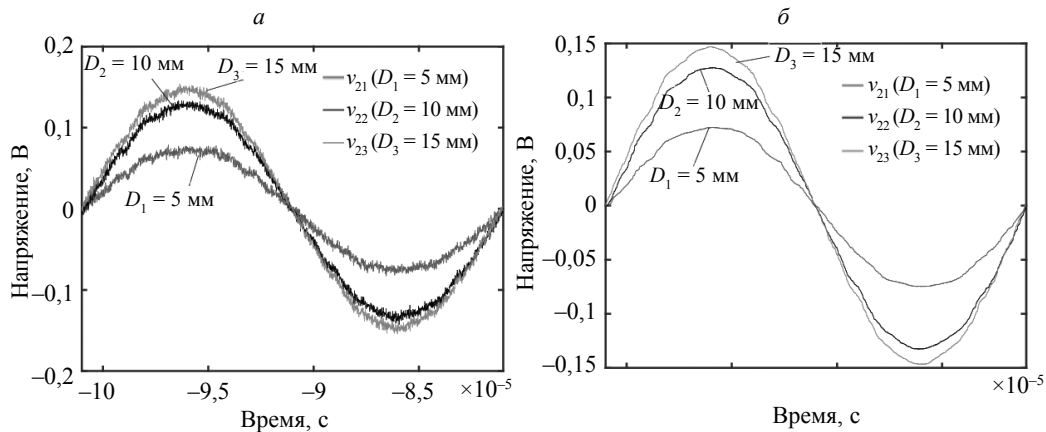
Рис. 9. Устранение шума в исходных сигналах от трещины (новый датчик):
а — колебания сигнала до устранения шумов; б — колебания сигнала после устранения шумов.Рис. 10. Устранение шума в исходных сигналах от трещины (традиционный датчик):
а — колебания сигнала до устранения шумов; б — колебания сигнала после устранения шумов.

Таблица 2

Экспериментальные результаты

Глубина трещины	Новый датчик		Традиционный датчик	
	Суперпозиция вихревых токов		Максимум напряжения сигнала	
	$\Delta V_i/V$	$\Delta V_i/\Delta V_1$	$\Delta V_i/V$	$\Delta V_i/\Delta V_1$
5 мм (ΔV_1)	0,0006	1	0,073	1
10 мм (ΔV_2)	0,056	9,33	0,127	1,74
15 мм (ΔV_3)	0,07	11,67	0,146	2

V_2 и V_3 в точке A . Затем определяются изменения напряжений в катушке $\Delta V_1 = V_1 - V_0$, $\Delta V_2 = V_2 - V_0$ и $\Delta V_3 = V_3 - V_0$ (табл. 2), а после также и отношение сигналов на 5-миллиметровой трещине $\Delta V_2/\Delta V_1$, $\Delta V_3/\Delta V_1$. Результаты показывают, что сигналы от трещин глубиной 10 и 15 мм, полученные в точке A , в 4 и 4,47 раза превышают сигнал от трещины глубиной 5 мм. Для сравнения: при измерении трещин используется традиционный вихретоковый датчик (с возбуждающей катушкой и измерительной катушкой), как показано на рис. 10. Также рассчитываются ΔV_1 , ΔV_2 , ΔV_3 и $\Delta V_i/\Delta V_1$ при максимальном значении сигналов от трещин. Результаты показаны в табл. 2. Видно, что по сравнению с обычным датчиком относительная величина изменения сигналов при использовании нового датчика больше. Новый вихретоковый датчик более эффективен для определения глубоких трещин.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе двухчастотного возбуждения предложен и разработан новый тип вихретокового датчика, который может использоваться для обнаружения глубоких трещин. Его эффективность подтверждена экспериментально. Используя датчик, можно уменьшить скин-эффект, а значит, можно обнаруживать и глубокие трещины. Результаты показывают, что сигнала от трещины глубиной 10 и 15 мм, измеренные новым датчиком, в 9,33 и 11,67 раз превышают сигнал от трещины глубиной 5 мм. Новый зонд более чувствителен к глубоким трещинам в образце.

Работа частично поддержана национальным фондом естественных наук Китая (№ гранта 51667001), Ключевыми научно-исследовательскими проектами Северного университета Минзу (№ гранта 2019KJ36) и Общими исследовательскими проектами ведущей лаборатории фонда химического инжиниринга и технологии государственной комиссии по этническим вопросам (№ гранта 2017HG06).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maouche B., Alkama R, Feliachi M. Semi-analytical calculation of the impedance of a differential sensor for eddy current non-destructive testing // *Ndt & E International*. 2009. V. 42 (7). P. 573—580.
2. Huang P., Wu Z., Zheng J. et al. Inversion algorithms for multi-layered thickness measurement in eddy current testing // *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2005. No. 4. P. 428—432.
3. Xu X., Liu M., Zhang Z. et al. A novel high sensitivity sensor for remote field eddy current non-destructive testing based on orthogonal magnetic field // *Sensors*. 2014. V. 14. No.12. P. 24098—24115.
4. Marchand B., Vacher F., Gillespascaud C. et al. High Resolution Eddy Current Probes for Non Destructive Testing. 2008. V. 975. No. 1. P. 313—320.
5. Hu S.W., Hu X., Lu J. Study on eddy current principle-based nondestructive testing method for broken wire of PCCP // *Water Resources & Hydropower Engineering*. 2016. V. 47. No. 2. P. 101—114.
6. Thollon F., Lebrun B., Burais N. et al. Numerical and experimental study of eddy current probes in NDT of structures with deep flaws // *Ndt & E International*. 1995. V. 28. No. 2. P. 97—102.
7. Zhang H., Tian G., He Y. et al. Defect depth effects in Pulsed Eddy Current thermography // *International Conference on Automation and Computing IEEE*. 2011. P. 251—254.
8. Wang C., Wang K., Cong Z. et al. Eddy current testing on weld defect based on the dual frequency independent component analysis // *Instrumentation and Measurement Technology Conference. IEEE*. 2017. P. 1—5.
9. Fulton J.P., Hedengren K.H., Young J.D. et al. Optimizing the Design of Multilayer Eddy Current Probes — A Theoretical and Experimental Study / *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Springer US, 1997. P. 973—980.

10. *Raich A.M., Liskai T.R.* Multi-objective Optimization of Sensor and Excitation Layouts for Frequency Response Function-Based Structural Damage Identification // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012. V. 27. No. 2. P. 95—117.

11. *Liskai T.R.* Multi-objective Optimization of Sensor and Excitation Layouts for Frequency Response Function-Based Structural Damage Identification // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012. V. 27. No. 2. P. 95—117.

12. *Alikeyhani Ardekani B.* Identification of non-linear systems using the exponential Fourier series // *International Journal of Control*. 1989. V. 50. No. 4. P. 1553—1558.

13. *He Y.F., Pan F.F.* Fourier series development and application of signal // *Education: higher education study*. 2013. No. 9. P. 86—87.

14. *Janousek L., Chen Z., Yusa N.* et al. Excitation with phase shifted fields-enhancing evaluation of deep cracks in eddy-current testing // *Ndt & E International*. 2005. V. 38. No. 6. P. 508—515.