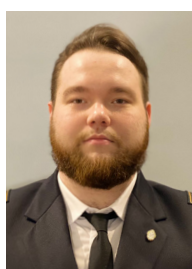


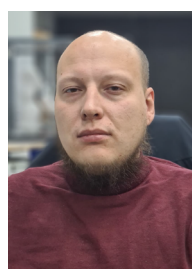
Соломенчук П.В.



Сясько В.А.



Горбунов А.Е.



Филиппов Г.А.

УДК 620.1.08

Pavel257@mail.ru

DOI: 10.52177/2071-5234_2021_06_43

Соломенчук П.В., канд. техн. наук,

Сясько В.А., д-р техн. наук,

Горбунов А.Е.

ООО «КОНСТАНТА»

Гурьева Т.М.

АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

Филиппов Г.А.

Томский политехнический институт

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ТОРЦЕВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОММУТИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ

В статье описан вихретоковый преобразователь с магнитным ярмом, предназначенный для неразрушающего контроля глубины проплавления сварных швов стальных пластин резистивных элементов коммутаторной аппаратуры ИТЭР. Приведены результаты исследования магнитных свойств стали в постоянном и переменном магнитном поле, необходимые для проведения моделирования процесса намагничивания сварного шва и работы вихретокового преобразователя и магнитного ярма. Показано, что для проведения контроля глубины проплавления сварного шва до 1,4 мм необходимо обеспечить намагничивание постоянным магнитным полем с индукцией 2,2 Тл. Описана конструкция контрольного образца и результаты испытания вихретокового преобразователя с магнитным ярмом на нем. Приведены сигналы вихретокового преобразователя и результаты его испытаний на контрольном образце.

Ключевые слова: торцевое сварное соединение, вихретоковый контроль, магнитное насыщение

The article describes an eddy current probe with a magnetic yoke designed to nondestructive testing the depth of penetration of welded seams of steel plates of resistive elements of ITER switching equipment. The results of the research of the magnetic properties of steel in a constant and alternating magnetic field are presented, which are necessary for modeling the process of magnetization of a weld and the operation of an eddy current probe and a magnetic yoke. It is shown that in order to control the penetration depth of a weld up to 1.4 mm, it is necessary to provide magnetization with a constant magnetic field with an induction of 2.2 Tesla. The design of the reference block and the test results of an eddy current probe with a magnetic yoke on it are described. The signals of an eddy current probe and the results of its tests on a reference block are given.

Keywords: edge joint weld, eddy current control, magnetic saturation

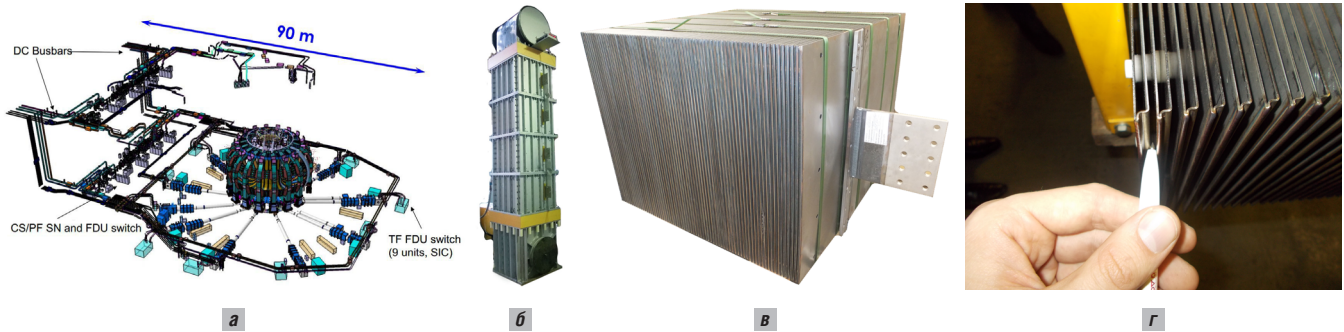
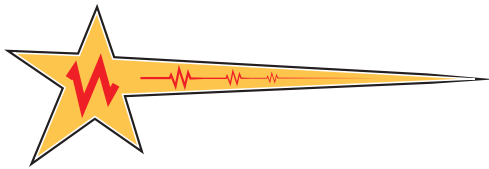


Рис. 1. План расположения коммутующего оборудования ИТЭР (а), модуль резистивной сборки ИТЭР (б), резистивный элемент ИТЭР (в), внешний вид сварных швов резистивного элемента ИТЭР (г)

Термоядерный синтез, ядерная реакция, которая питает Солнце и звезды, является потенциальным источником безопасной, неуглеродной и практически безграничной энергии. Использование мощности термоядерного синтеза является целью ITER, который был разработан в качестве ключевого экспериментального шага между сегодняшними исследовательскими машинами для термоядерного синтеза и завтрашними термоядерными электростанциями. Интернациональный термоядерный экспериментальный реактор (ИТЭР) финансируется и управляется семью участниками: Европейским союзом, Россией, США, Китаем, Индией, Японией и Южной Кореей. За выполнение обязательств российской стороны отвечает Госкорпорация «Росатом». АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова является единственным поставщиком в ИТЭР высокотехнологичных систем коммутующей аппаратуры. Для выполнения обязательств РФ в программе ИТЭР по поставкам коммутующей аппаратуры в соответствии с соглашением о поставках (Procurement Arrangement PA 4.1.P3 RF 01) необходимо обеспечение требований качества поставляемой продукции, в частности, сварные швы коммутующей аппаратуры подлежат 100% объемному неразрушающему контролю (НК).

В конструкции мощных резистивных элементов коммутующей аппаратуры [1] (рис. 1) используются стальные пластины, соединяемые между собой торцевым сварным соединением, выполняемым неплавящимся электродом в среде инертного газа. На основании требований конструкторской документации, с учетом характеристик надежности и нестандартной геометрии сварного шва резистивного элемента, разработана и утверждена в международной организации ИТЭР процедура неразрушающего контроля (IDM UID V2ENRW /26. Окт. 2018/1.1), регламентирующая критерий качества как оценку глубины проплава шва не менее 1 мм.

Стопроцентный контроль торцевых сварных швов предполагает автоматическое сканирование бесконтактным измерительным преобразователем и определение глубины проплавления (высоты шва) — расстояния, на котором свариваемые пластины представляют собой единое целое.

Для выполнения производственных программ 2021–2024 гг. поставок в ИТЭР, имеет место задача создания оборудования — инновационного автоматического (роботизированного) комплекса, позволяющего реализовать требуемую производительность и надежность обязательной контрольной операции в поставках продукции для ИТЭР. Целью работы является разработка и изготовление вихретокового преобразователя, как составной части роботизированного вихретокового комплекса, предназначенного для решения кон-

кретной задачи контроля, но с перспективой его возможной переориентации.

Пластины изготавливаются из аустенитной немагнитной стали AISI 321, приобретающей слабомагнитные свойства в зоне сплавления, или ферромагнитной стали 08Ю. Толщина свариваемых пластин — 1 мм, глубина проплавления торцевого сварного шва (высота шва) 1...1,5 мм. Конструкция резистивного элемента в зоне сварного шва представлена на рис. 2.

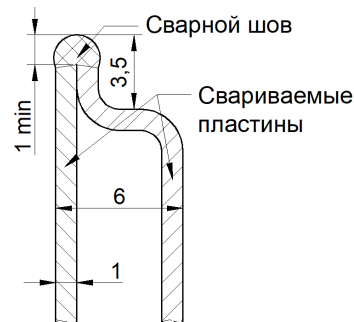
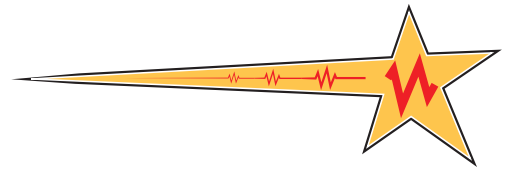


Рис. 2. Конструкция элемента в зоне сварного шва

Использование методов акустического и радиационного видов НК в данном случае представляет значительные технические и организационные проблемы. Перспективным представляется применение методов вихретокового НК.

В случае использования вихретокового фазового метода контроля [2] катушка возбуждения вихретокового преобразователя (ВТП), подключенная к источнику переменного гармонического напряжения, формирует переменное магнитное поле, которое наводит вихревые токи в объекте контроля (ОК). Магнитное поле вихревых токов в ОК противодействует магнитному полю катушки возбуждения. Результирующее магнитное поле воспринимается измерительной катушкой ВТП. Фаза сигнала (напряжения) измерительной катушки ВТП несет информацию о электромагнитных параметрах ОК, таких как удельная электропроводность σ , относительная комплексная магнитная проницаемость $|\mu|$ материала и о размерах несплошностей (дефектов) в объеме протекания вихревых токов.

Одной из основных проблем данной задачи является обеспечение необходимой глубины проникновения вихревых токов в ферромагнитном материале сварного шва из стали 08Ю и намагничивание до насыщения мартенситных включений для стали AISI 321. Глубина проникновения δ вихревых токов в ОК определяется формулой:



$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\sigma\mu_0|\mu|}},$$

где f — частота тока возбуждения ВТП, σ — удельная электропроводность материала ОК, μ_0 — магнитная постоянная, $|\mu|$ — модуль комплексного значения относительной магнитной проницаемости материала ОК, определяемый по формуле:

$$|\mu| = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2},$$

где μ_1 — действительная составляющая, характеризующая обратимые процессы в ферромагнитном материале, μ_2 — мнимая составляющая, характеризующая необратимое рассеяние энергии при перемагничивании (магнитные потери), комплексного значения магнитной проницаемости $\bar{\mu} = \mu_1 - j\mu_2$.

Обобщенный параметр вихретокового контроля (β), определяющий интенсивность взаимодействия ВТП и ОК, вычисляется по формуле [3]:

$$\beta = R\sqrt{2\pi f\sigma\mu_0|\mu|},$$

где R — эквивалентный радиус обмоток ВТП.

Для обеспечения достаточной для практического применения чувствительности ВТП к контролируемому параметру ОК необходимо обеспечить значение β в диапазоне от 2 до 40.

Ферромагнитные свойства стали 08Ю существенно уменьшают глубину проникновения вихревых токов, увеличивают значение β и, следовательно, уменьшают диапазон измерения глубины проплавления сварного шва. В [4] описан метод вихретокового контроля с использованием магнитного насыщения. При воздействии на ОК сильным постоянным магнитным полем, достаточным для намагничивания материала ОК до насыщения, значение $|\mu|$ может быть значительно снижено, приближаясь к значению 1, что обеспечивает возможность контроля глубины проплавления сварного шва в заданном диапазоне с применением ВТП у которого R соизмерим с размерами сварного шва.

Выполненные исследования магнитных свойств стали 08Ю на кольцевых и цилиндрических образцах в сильном постоянном магнитном поле по методикам [5, 6] позволили получить зависимость относительной магнитной проницаемости стали 08Ю от напряженности постоянного магнитного поля (идентично значению μ_1), приведенную на рис. 3.

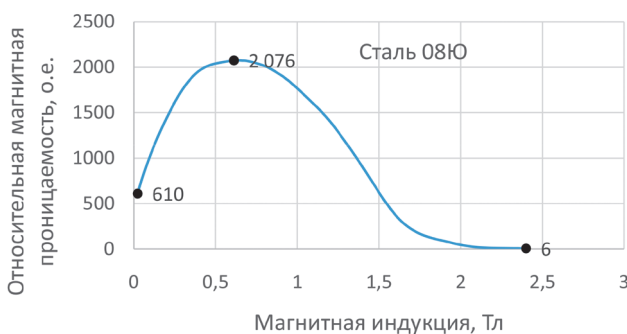


Рис. 3. Зависимость относительной магнитной проницаемости стали 08Ю от напряженности постоянного магнитного поля

В предлагаемом решении локальное намагничивание сварного шва в зоне контроля выполняется с использованием

электромагнита (магнитного ярма), совмещенного с ВТП. При контроле сварных швов из аустенитной стали AISI 321, в которой при сварке возникают ферромагнитные мартенситные включения, применение намагничивания постоянным магнитным полем уменьшает их влияние на сигналы ВТП [7].

На рис. 4 приведены результаты исследования частотной зависимости μ_1 и μ_2 аналогичной стали на кольцевых образцах с применением пермеаметра по оригинальной методике [8] и определено, что намагничивание необходимо осуществлять постоянным магнитным полем с индукцией 2,2 Тл. Сочетание уменьшения μ_1 до величины порядка 10 о.е. при намагничивании сильным постоянным магнитным полем электромагнита и уменьшения величины $|\mu|$ для слабого переменного магнитного поля ВТП с частотой 100 кГц обеспечивает глубину проникновения δ , позволяющую проводить вихретоковый НК сварного шва на глубину до 1,4 мм, что в дальнейшем было подтверждено на испытательном стенде.

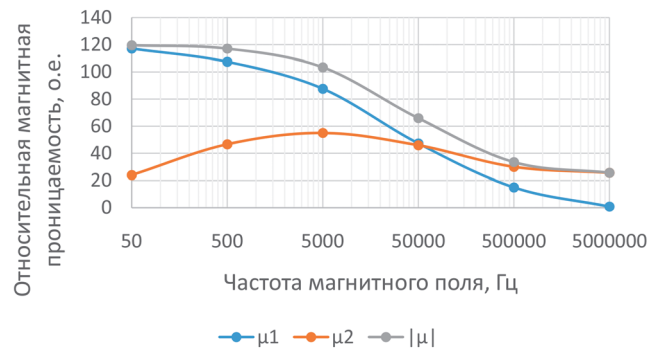


Рис. 4. Зависимость действительной и мнимой составляющих и модуля относительной магнитной проницаемости стали от частоты магнитного поля

Разработка и оптимизация конструкции магнитного ярма и ВТП проведена с использованием конечно-элементного моделирования. Разработанный ВТП с магнитным ярмом предназначен для работы в составе роботизированной установки с шести осевым манипулятором грузоподъемностью 3 кг, что обусловило необходимость оптимизации веса конструкции.

Графическое представление конечно-элементной модели ВТП с магнитным ярмом и объекта контроля представлено на рис. 5.

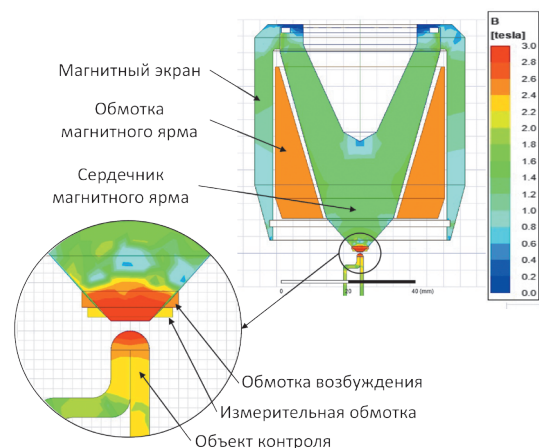
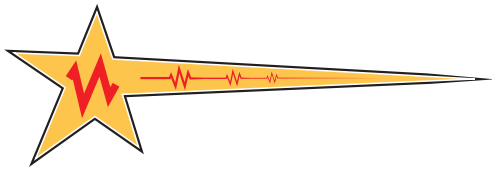


Рис. 5. Графическое представление конечно-элементной модели ВТП с магнитным ярмом и объекта контроля



Сердечник магнитного яра изготовлен из прецизионного сплава 49КФ, характеризующегося высокой магнитной индукцией технического насыщения. Магнитный экран предназначен для уменьшения сопротивления магнитной цепи электромагнита. Форма элементов магнитной цепи оптимизирована методом конечных элементов с применением алгоритмов автоматической оптимизации методом Ньютона, что обеспечило заданную магнитную индукцию, компактный размер и удобную для интеграции с манипулятором форму системы намагничивания.

Графическое представление конечно-элементной модели ВТП, намотанного на наконечнике магнитного яра, и объекта контроля с визуализацией траекторий протекания вихревых токов в объекте контроля с имитатором дефекта приведено на рис. 6, а. Обмотки ВТП намотаны на наконечник магнитного яра с применением самоспекаемого провода с двухслойной изоляцией, что позволяет делать их миниатюрными без использования каркаса. Для исключения влияния вихревых токов в сердечнике магнитного яра на сигналы ВТП, в нем возле катушек методом электроэрозии изготовлены узкие прорезы, рис. 6, б.

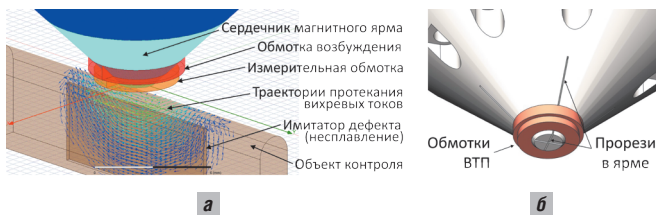


Рис. 6. Графическое представление конечно-элементной модели ВТП и объекта контроля (а) и конструкция обмоток ВТП (б)

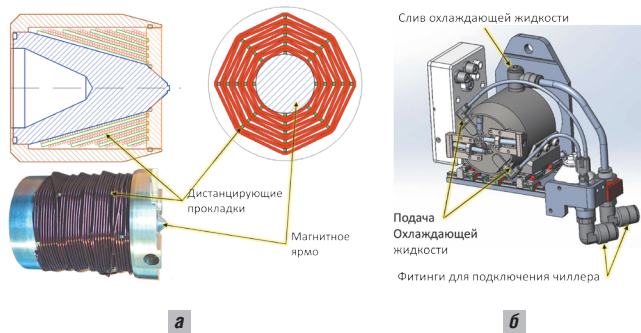


Рис. 7. Конструкция обмотки магнитного яра (а) и устройство для снабжения магнитного яра охлаждающей жидкостью (б)

Ввиду значительного влияния размагничивающего фактора, обусловленного формой контролируемого участка сварного шва, для создания магнитного поля в сварном шве с индукцией 2,2 Тл в данной конструкции требуется магнитодвижущая сила порядка 6000 АВ. При этом в диапазоне рабочих температур от + 20 до + 80 °С на обмотки магнитного яра выделяется до 970 Дж тепла, для отвода которого используется система жидкостного охлаждения. Охлаждающая жидкость — полидиметилсилоксан марки ПМС-5 прокачивается под давлением до 1,2 бар через обмотку с дистанцирующими прокладками, образующими каналы для охлаждающей жидкости. Отводимая теплота рассеивается чиллером с холодильной установкой с охлаждающей способностью 1,5 кВт. На рис. 8, а схематично изображена конструкция обмотки, расположение дистанциру-

ющих прокладок и фотография катушки магнитного яра, на рис. 7, б приведена 3Dмодель преобразователя, отображающая линии подачи охлаждающей жидкости.

Внешний вид преобразователя представлен на рис. 8. Слева расположен блок электроники с разъемами для подключения к системе, справа — кожух, защищающий провода и трубки. На наконечнике яра расположен ВТП, его защиту от повреждений дефектами сварного шва обеспечивает керамический защитный колпачок.

Шести осевой робот-манипулятор должен обеспечивать позиционирование и перемещение преобразователя по траектории, повторяющей контур сварного шва. Траектория движения робота-манипулятора строится динамически по данным, полученным с лазерного сканера. Точное позиционирование относительно шва, а также восприятие силы притяжения магнитного яра обеспечивают опорные валы. Компенсацию отклонений профиля сварного шва от нормируемой в двух плоскостях обеспечивает система микроперемещений, состоящая из линейных направляющих для продольного и поперечного перемещения.

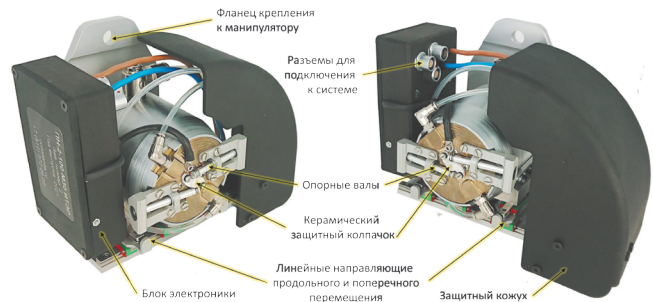


Рис. 8. Внешний вид преобразователя

Для проверки работоспособности, а также настройки чувствительности и браковочного порога используется контрольный образец, эскиз конструкции которого представлен на рис. 9. Контрольный образец представляет собой две пластины, сваренные вместе и разделенные на 4 фрагмента. В трех фрагментах методом электроэрозии выполнены искусственные дефекты в виде прорезей с обратной стороны облицовки сварного шва, имитирующие несплавление с заданными параметрами.

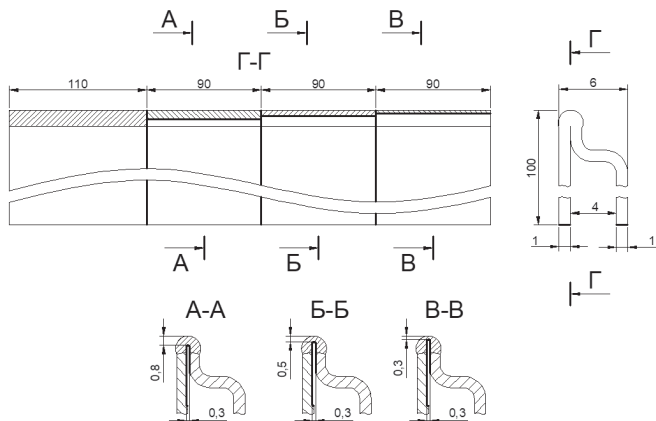


Рис. 9. Эскиз конструкции контрольного образца

Годографы сигналов ВТП, получаемые при сканировании контрольного образца, приведены на рис. 10.

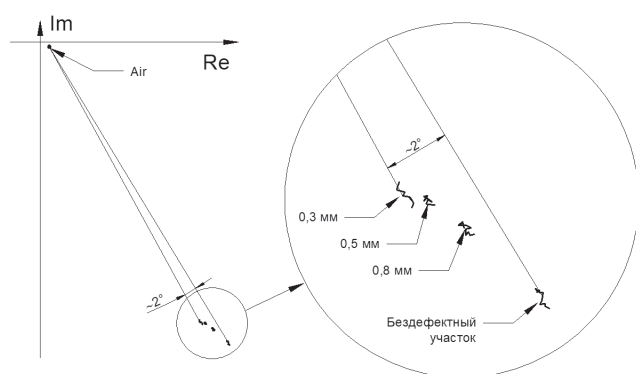
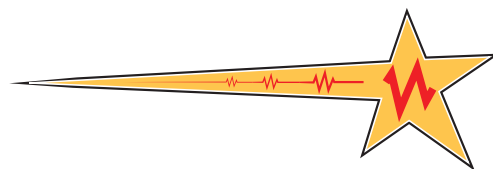


Рис. 10. Годографы сигналов ВТП на комплексной плоскости

В верхней части годографа отмечена точка Air, соответствующая сигналу ВТП, полученного без воздействия ОК на ВТП (ВТП отведен от ОК, находится в воздухе). В нижней части годографа отмечена область, в которой группируются сигналы ВТП, полученные при сканировании различных участков контрольного образца, соответственно, бездефектного участка и участков с искусственными дефектами, эквивалентными проплавлению на глубину 0,8 мм, 0,5 мм и 0,3 мм.

Выделение первичного информативного параметра, фазы φ сигнала ВТП, производится по следующей формуле:

$$\varphi = \text{atan} \left(\frac{Im - Im(Air)}{Re - Re(Air)} \right),$$

где Re и Im — действительная и мнимая составляющие сигнала ВТП, полученного при сканировании, $Re(Air)$ и $Im(Air)$ — действительная и мнимая составляющие сигнала ВТП, полученного без воздействия ОК на ВТП (ВТП отведен от ОК, находится в воздухе).

Диапазон изменения значений фазы сигнала при сканировании ВТП контрольного образца с искусственными дефектами составляет примерно 2° . Диаграмма, полученная при сканировании контрольного образца, приведена на рис. 11.

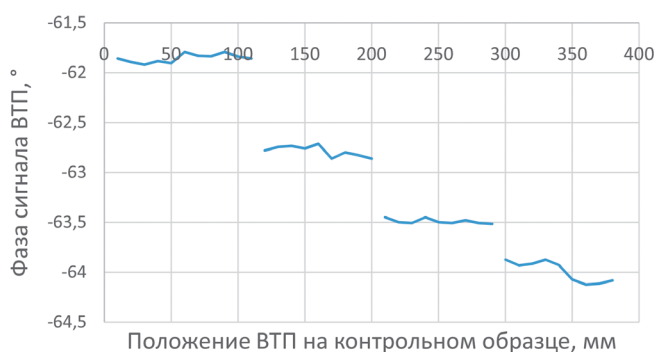


Рис. 11. Диаграмма сканирования контрольного образца

На диаграмме видны сигналы ВТП, отчетливо различающиеся на фоне шума при переходе с фрагмента на фрагмент. Анализ диаграммы производится с сопоставлением с эскизом контрольного образца, приведенного на рис. 9. Подавляющая доля шумов, видных на диаграмме, обусловлена наличием на поверхности сварного шва шероховатости, достигающей значений до 0,1 мм.

Заключение

Сформулированная в рамках описанной работы цель успешно достигнута, разработан вихретоковый преобразователь, объединенный с магнитным ярмом, обеспечивающий вихретоковый контроль глубины проплавления торцевого сварного шва стальных пластин мощных резистивных элементов коммутационной аппаратуры ИТЭР с использованием магнитного насыщения, имеющий следующие технические характеристики:

- Диапазон контроля глубины проплавления сварного шва: от 0 до 1,4 мм;
- Максимальная скорость сканирования: 100 мм/сек;
- Частота сэмплирования: 333 SPS;
- Частота тока возбуждения ВТП: 100 кГц;
- Сила тока магнитного ярма: 30 А;
- Габаритные размеры: 90 x 160 x 140 мм;
- Масса 1,9 кг.

Список литературы

1. *International Thermonuclear Experimental Reactor ITER* [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.iter.org/> (дата обращения 29.10.2021).
2. *Неразрушающий контроль*. Справочник в 8 томах под редакцией Ключева В.В. Том 2. М., «Машиностроение», 2006. 687 с.
3. *Потапов А.И., Сясько В.А.* Незарушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / Научное, методическое и справочное пособие. СПб., 2009. 904 с., илл.
4. *ASTM E309 — 16 Standard Practice for Eddy Current Examination of Steel Tubular Products Using Magnetic Saturation*.
5. *ГОСТ 8.377-80* ГСОЕИ Материалы магнитомякие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М: Издательство стандартов, 1980. 26 с. Введен с 01.07.1981
6. *ГОСТ 12119.1-98* Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Методы измерения магнитных и коэрцитивной силы в аппарате Эпштейна и на кольцевых образцах в постоянном магнитном поле. М: Стандартинформ, 2003. 9 с. Введен с 01.07.1999.
7. *А.В. Сухих, С.С. Сагалов* Результаты вихретоковых исследований магнитных свойств оболочек ТВЭЛов из стали ЧС-68, облученных в реакторах БОР-60 и БН-600. Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР, 2010. №1 С. 40–45.
8. *Сясько В.А., Голубев С.С., Смородинский Я.Г. и др.* Измерение магнитной проницаемости монолитных кольцевых мер в переменном магнитном поле. Дефектоскопия, 2019. № 11 С. 45–51.