

## ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЙКИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОКОВЕДУЩИХ СОЕДИНЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИИ ИХ СЕЧЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ

© 2019 г. Л.Х. Коган<sup>1,\*</sup>, А.Н. Сташков<sup>1,\*\*</sup>, А.П. Ничипурук<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург,  
ул. С. Ковалевской, 18

E-mail: \*lhkogan@el.ru, \*\*stashkov@imp.uran.ru, \*\*\*nichip@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 30.05.2019; после доработки 07.06.2019

Принята к публикации 07.06.2019

Предложена двухчастотная вихретоковая методика контроля качества пайки сверхпроводящих токоведущих соединений электромагнитов. Ее преимуществом является независимость результата контроля от изменения сечения контролируемого соединения, неизбежно получающегося в результате его изготовления и технологии пайки. Измерения в предложенной методике проводят в два этапа с помощью вихретокового устройства, в котором используется преобразователь трансформаторного типа с П-образным сердечником. На первом этапе проводят измерения на высокой частоте, при этом показания вихретокового устройства зависят только от поперечного сечения контролируемого соединения и не зависят от степени пропаянности, на втором проводят измерения на низкой (основной) частоте, на которой показания вихретокового устройства зависят как от пропаянности сверхпроводящих кабелей между собой, так и от внешнего сечения медного стабилизатора. Рассчитывают степень пропаянности контролируемого соединения с учетом площади его поперечного сечения исходя из результатов измерения на двух частотах. Для предварительной настройки вихретокового устройства перед началом контроля используются три образца соединений: два с пропаянностью 100 %, имеющих одинаковую толщину и разную высоту, и один — с пропаянностью 0 %.

*Ключевые слова:* качество пайки, сверхпроводящее соединение, вихретоковый контроль, преобразователь трансформаторного типа, П-образный сердечник, двухчастотная схема.

DOI: 10.1134/S0130308219090033

### ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении и эксплуатации устройств, предназначенных для выработки (гидро- и турбогенераторы) и передачи (сверхпроводящие устройства для создания электрических полей большой мощности) электрической энергии, большое значение имеет достаточный уровень пропаянности токоведущих медных соединений обмоток статоров и качества пайки сверхпроводящих кабелей, заключенных в медный стабилизатор.

В [1—3] показано, что из-за конструкционных особенностей таких соединений единственно возможным является использование вихретокового метода контроля и разработаны методика и вихретоковое устройство ДПС-8 (дефектоскоп паяных соединений), в котором используется вихретоковый преобразователь трансформаторного типа с П-образным сердечником, набранным из пластин трансформаторного железа. Принцип работы устройства основан на определении интенсивности вихревых токов, возбуждаемых в контролируемом паяном соединении.

Поперечное сечение сверхпроводящих кабелей, заключенных в медный стабилизатор, и «боковых стенок» токоведущих соединений статоров гидро- и турбогенераторов [4] мало по сравнению с внешним сечением соединений. Поэтому чувствительность аппаратуры контроля качества пайки таких соединений должна быть достаточно высокой, вследствие чего возникает необходимость учитывать влияние возможных изменений их внешнего сечения на результаты контроля.

Таким образом, исследование влияния изменений внешних геометрических размеров этих соединений на определение качества их пайки и разработка методики, позволяющей учитывать влияние этого фактора на результаты контроля, являются актуальными задачами.

Известно применение двух частот для вихретоковой дефектоскопии в аэрокосмической промышленности [5] и определения толщины покрытий и их свойств с использованием многочастотной вихретоковой методики контроля [6—8].

В [9] предложен способ контроля качества пайки сверхпроводящих токоведущих соединений при возможных изменениях внешнего сечения медного стабилизатора, заключающийся в том, что снимаются две зависимости показаний вихретокового устройства при перемещении П-образного преобразователя по всей длине соединения: при низкой (влияние сечения минимально) и высокой чувствительности вихретокового устройства, при которой дефекты пайки явно видны на этой зависимости.

Однако недостатком этого способа контроля является то, что вследствие возможных колебаний сечения медного стабилизатора на конкретном соединении (высота в основном в пределах 0,04—0,06 мм) дефекты пайки могут быть не обнаружены, так как изменения показаний вихретокового устройства от дефекта и изменений сечения могут иметь сопоставимую величину. Так, при снятии зависимости показаний вихретокового устройства при перемещении П-образного преобразователя по всей длине образца D1 [3], имеющего искусственный дефект, уменьшение показаний вихретокового устройства составляет 5,2 мВ, а при изменении высоты образца на 0,04 мм — 2,4 мВ.

Целью данной работы является разработка двухчастотной вихретоковой методики, позволяющей контролировать качество пайки сверхпроводящих токоведущих соединений электромагнитов большого адронного коллайдера (ЦЕРН, Швейцария) при возможных изменениях внешнего сечения медного стабилизатора соединения.

### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Контролируемое паяное соединение содержит два сверхпроводящих кабеля (рис. 1), длина каждого в зоне пайки составляет 135 мм, ширина — 15,2, толщина — 1,5. Между сверхпроводящими кабелями, а также на их внешние поверхности укладываются пластины припоя (Sn/Ag — 96/4 %) толщиной 0,4 мм с температурой его плавления 220 °С.

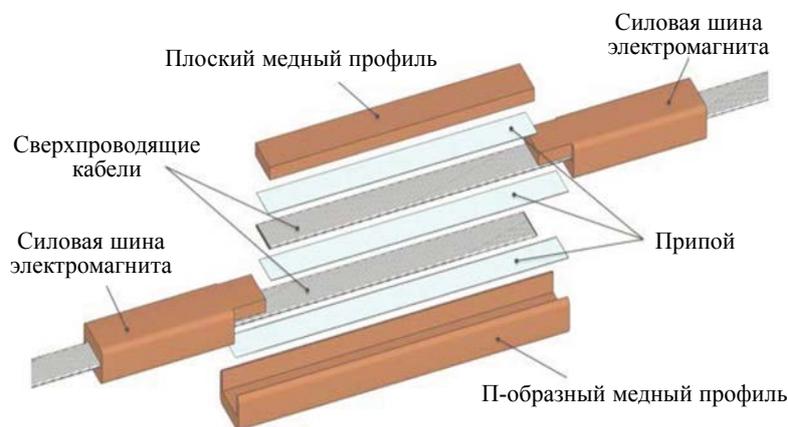


Рис. 1. Внешний вид контролируемого соединения.

Процесс пайки осуществляется с использованием специальной установки, которая оказывает давление ( $P = 23$  кН) на плоский медный профиль (рис. 2) при разогреве соединения до  $T = 250$  °С. При такой технологии пайки, как показывает практика, высота разных паяных соединений может колебаться в пределах 0,5—0,6 мм, а в пределах одного соединения достигать до 0,04—0,08 мм. Кроме того, внешнее сечение медного стабилизатора может не иметь правильную прямоугольную форму и иметь на поверхности некоторое количество припоя.

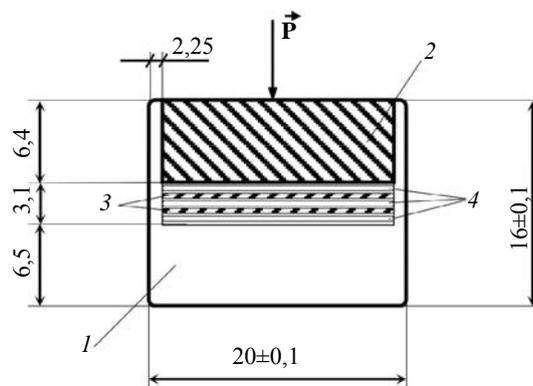


Рис. 2. Поперечное сечение контролируемого соединения:

1 — П-образный медный профиль; 2 — плоский медный профиль; 3 — сверхпроводящие кабели; 4 — пластины припоя.

Вихретоковая методика контроля качества пайки токоведущих соединений и разработанный вихретоковый преобразователь с сердечником П-образного типа, набранным из пластин трансформаторного железа, обеспечивающим достаточно высокую однородность поля в межполюсном пространстве, подробно описаны в [1—4].

Для исследований в данной работе использовался вихретоковый преобразователь с параметрами П-образного сердечника, аналогичными тем, которые были использованы в [3]: ширина полюса — 20 мм, расстояние между полюсами — 25 мм, высота полюса — 43 мм. Однако, благодаря проведенным в работе исследованиям, было определено оптимальное соотношение витков возбуждающей и измерительной обмоток вихретокового преобразователя, позволившее заметно повысить его чувствительность к изменению пропаянности контролируемых соединений.

На рис. 3 приведена блок-схема лабораторной установки, с использованием которой проводились измерения на исследуемых образцах.

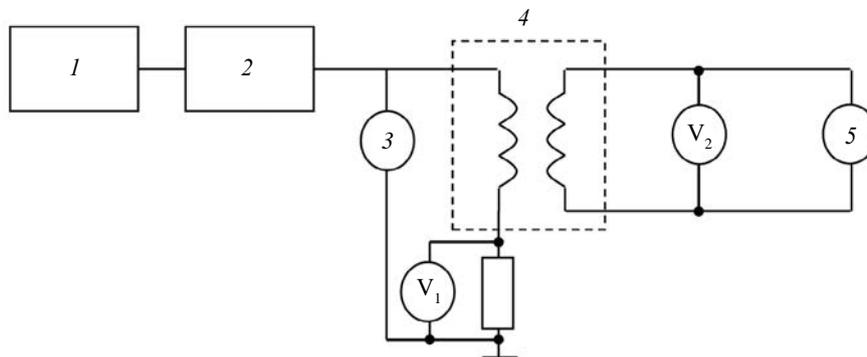


Рис. 3. Блок-схема лабораторной установки:

1 — генератор Agilent 33220A; 2 — усилитель тока; 3 — частотомер; 4 — трансформаторный вихретоковый преобразователь с П-образным сердечником; 5 — осциллограф;  $V_1$  — вольтметр В7-34А (предназначен для определения величин тока в обмотке возбуждения вихретокового преобразователя);  $V_2$  — вольтметр DMM 4040.

Известно [10], что глубина проникновения вихревых токов в контролируемое медное изделие зависит от его электропроводности и частоты тока, питающего обмотку возбуждения ВТП. Поэтому основная частота (40 Гц) была определена как оптимальная при толщине контролируемого соединения 20 мм, а  $f = 1400$  Гц — как достаточная для контроля внешних геометрических размеров медного стабилизатора.

Измерения на основной частоте (40 Гц) проводили при токе в обмотке возбуждения вихретокового преобразователя  $I = 200$  мА. При этом поле в его межполюсном пространстве, измеренное с использованием датчика Холла, было равно  $H = 26,3$  А/см.

На высокой частоте ( $f = 1400$  Гц), используемой для контроля геометрических размеров соединений, ток был выбран равным  $I = 36$  мА ( $H = 4,8$  А/см). При данном токе сигналы возбуждающей и измерительной обмоток не искажались.

Для изучения влияния изменения внешних геометрических размеров сверхпроводящих соединений на определение качества их пайки и разработки методики контроля использовались образцы таких соединений длиной 150 мм с пропаянностью 0 и 100 % [3] и два сплошных медных образца такой же длины, изготовленных из меди марки М1 (99,99 % Cu), сечение которых изменялось путем шлифования как по толщине, так и высоте. У образца с пропаянностью 0 % щели между П-образным и плоским профилями медного стабилизатора запаяны на определенную глубину (см. рис. 1 и 2). У образцов с пропаянностью 100 %, подвергнутых стандартной процедуре пайки, этот уровень пропаянности подтвержден данными рентгенографических исследований [3].

Кроме того, для экспериментального определения частоты, на которой показания вихретокового устройства зависят только от внешнего сечения соединения, использовался образец № 12 (силовая шина электромагнита, см. рис. 1), внутрь которого вместо сверхпроводящего кабеля вставлялась пластина из стали 3. Данные образцов приведены в табл. 1.

Величины высоты и толщины образцов представляют собой средние их значения, измеренные электронным микрометром ТЕХРИМ в центральной зоне образцов длиной 20 мм, в которой проводились измерения вихретоковым преобразователем.

Таблица 1

## Геометрические размеры сверхпроводящих и сплошных медных образцов

№ образца	Пропаянность, %	Высота, $h$ , мм	Толщина, $t$ , мм	Сечение, $S$ , мм <sup>2</sup>
7	0	15,850	19,956	316,303
4	0	16,220	19,970	323,913
6	100	16,200	20,080	325,296
5	100	15,690	19,980	313,486
9	100	16,070	20,010	321,561
10	Сплошной	15,997	20,135	321,690
11	Сплошной	15,971	20,089	320,850
12	Силовая шина	16,000	20,036	320,580

Измерения с использованием образца № 12 при установке внутрь его пластины из стали 3 и без нее показали, что на частоте 1400 Гц результаты измерений абсолютно одинаковые, то есть частота  $f = 1400$  Гц может быть использована для определения внешних геометрических размеров контролируемых соединений.

Из рис. 1 и 2 видно, что контролируемые соединения имеют щели между П-образным (1) и плоским (2) профилями медного стабилизатора, на который оказывается давление в процессе пайки. При этом вследствие оказываемого давления припой заполняет щели и часть его выходит на поверхность соединения.

В этой ситуации необходимо было установить, влияют ли параметры щелей разных соединений и их заполнение припоем на возможность определения внешних геометрических размеров контролируемых соединений.

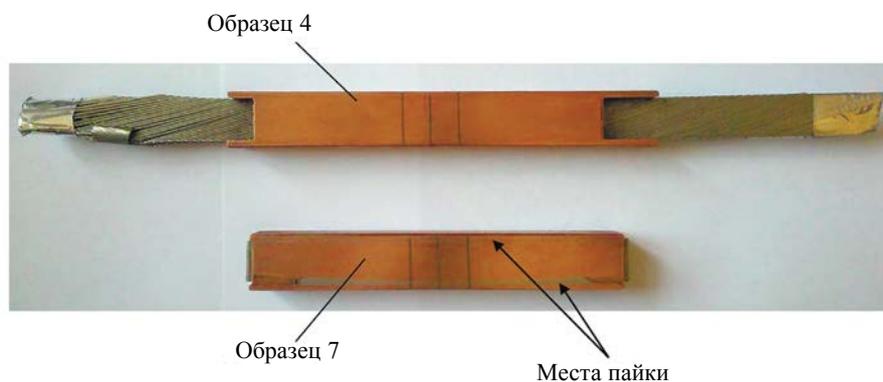


Рис. 4. Внешний вид образцов 4 и 7.

Для этого были использованы два образца (4 и 7, см. табл. 1) с пропаянностью 0 % (рис. 4), щели которых были запаяны в разное время и для образца 7 — обычным оловянно-свинцовым припоем, а для образца 4 — припоем Sn/Ag (96/4 %). Видно, что параметры щелей отличаются друг от друга. Внешнее сечение обоих образцов путем шлифования было доведено до их одинаковых значений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры образцов 4 и 7, а также результаты измерений на частотах 1400 и 40 Гц приведены в табл. 2.

Эти данные показывают, что по результатам измерений на частоте 40 Гц щели у образцов запаяны на разную глубину.

Несмотря на это, при измерении на высокой частоте сигналы вихретокового преобразователя ( $U_{\text{изм}}$ ) имеют одинаковую величину и таким образом по их значениям имеется возможность контролировать вариации внешних сечений контролируемых соединений.

Таблица 2

## Параметры образцов 4 и 7 (пропаянность 0 %) и результаты измерений на частотах 1400 и 40 Гц

№ образца	Высота, $h$ , мм	Толщина, $t$ , мм	Сечение, $S$ , мм <sup>2</sup>	Частота, 1400 Гц	Частота, 40 Гц
				$U_{изм}$ , В	$U_{изм}$ , В
4	15,423	19,815	305,610	43,623	8,074
7	15,423	19,815	305,610	43,623	8,073

Образцы 5, 6 и 9 были в [3] подвергнуты рентгеновским исследованиям, которые показали, что их пропаянность равна 100 %. Видно, что они имеют разную высоту и толщину (см. табл. 1).

В соответствии с поставленной целью исследований, для определения влияния высоты этих образцов на результаты измерений на частотах 1400 и 40 Гц их толщина путем шлифования была доведена до  $19,816 \pm 0,001$  мм (как и у образцов 4 и 7), а высота образца 9 — до 15,423 мм (минимально возможная высота соединений). Результаты измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Результаты измерений на образцах (100 % пропаянности) с одинаковой толщиной

№ образца	Высота, $h$ , мм	Толщина, $t$ , мм	Сечение, $S$ , мм <sup>2</sup>	Частота, 1400 Гц	Частота, 40 Гц
				$U_{изм}$ , В	$U_{изм}$ , В
9	15,423	19,815	305,610	43,608	8,061
5	15,665	19,817	311,01	43,518	8,057
6	16,194	19,815	320,88	43,337	8,048

Из приведенных в таблице данных следует, что при измерении на частотах 1400 и 40 Гц сигналы вихретокового преобразователя ( $U_{изм}$ ) связаны линейной зависимостью с высотой образцов.

Более подробно влияние изменения высоты и толщины на  $U_{изм}$  исследовано при их изменении путем шлифования сплошных медных образцов 10 и 11 (см. табл. 1). Стоит заметить, что влияние изменений толщины ( $t$ ) и высоты ( $h$ ) на сигналы вихретокового преобразователя неодинаково в силу того, что  $t > h$ . Это следует из выражения для индуцированного в контролируемом образце вихревого тока [3]

$$i = \varepsilon/R = -(t \cdot h) \cdot (dB/dt) / \rho \cdot 2(t + h), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — наводимая ЭДС;  $R$  — электрическое сопротивление;  $dB/dt$  — изменение магнитной индукции;  $\rho$  — удельное электросопротивление.

Допуск на толщину П-образного профиля медного стабилизатора (см. рис. 2), установленный заводом-изготовителем, составляет  $\pm 0,1$  мм и на практике не превышает сколько-нибудь заметно эту величину.

Поэтому в соответствии с целью исследований толщина сплошного медного образца 11 (см. табл. 1) за два раза шлифования была уменьшена до 19,935 мм, что составляет 0,2 мм по сравнению с толщиной образца 10 (20,135 мм). Затем последовательно высота обоих образцов путем шлифования уменьшалась с 19,98 до 19,35 мм ( $\Delta h = 0,63$  мм), что соответствует возможному изменению высоты контролируемых соединений при существующей технологии пайки.

На рис. 5 и 6 приведены зависимости сигналов вихретокового преобразователя ( $U_{изм}$ ) от высоты медных сплошных образцов 10 и 11, а также сверхпроводящих образцов 9, 5 и 6, полученные при измерении на частотах 1400 и 40 Гц.

Из данных рис. 5 следует, что при изменении высоты сплошных медных образцов на 0,1 мм (например, от 15,7 до 15,8 мм) разница сигнала измерительной обмотки ВТП составила  $\Delta U_{изм} = 42$  мВ, а из рис. 6 —  $\Delta U_{изм} = 2$  мВ (на частоте 40 Гц). При изменении толщины этих образцов на ту же величину  $\Delta U_{изм} = 15,5$  мВ при измерении на частоте 1400 Гц и  $\Delta U_{изм} = 0,75$  мВ — 40 Гц, то есть при измерении на этих частотах изменение высоты образцов на 0,1 мм примерно в 2,7 раза сильнее влияет на сигналы вихретокового преобразователя, чем аналогичное изменение их толщины. Результаты измерений на образцах сверхпроводящих соединений имеют некоторые отличия, связанные, очевидно, с влиянием содержащегося в них припоя на сигналы вихретокового преобразователя.

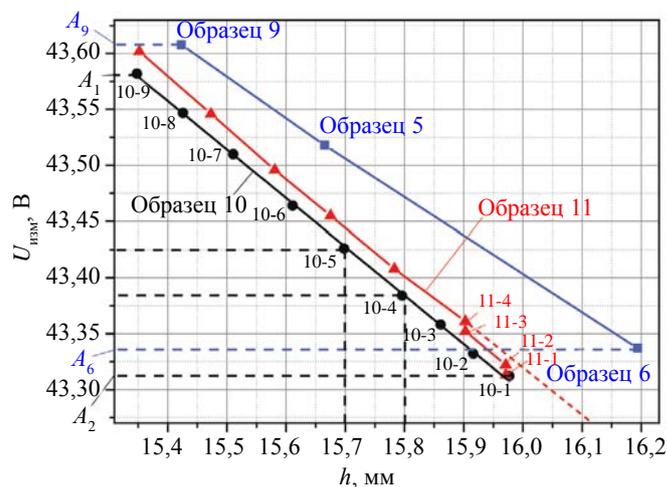


Рис. 5. Зависимости сигналов вихретокового преобразователя ( $U_{\text{изм}}$ ) от высоты сплошных медных образцов 10 (толщина  $t = 20,135$  мм) и 11 (толщина  $t = 19,935$  мм), а также сверхпроводящих образцов 9, 5 и 6 с толщиной  $t = 19,815$  мм. Точка 11-1 соответствует толщине  $t = 20,089$  мм; 11-2 —  $t = 19,986$ ; 11-3 —  $t = 19,986$ ; 11-4 —  $t = 19,935$ . Измерения на частоте 1400 Гц.

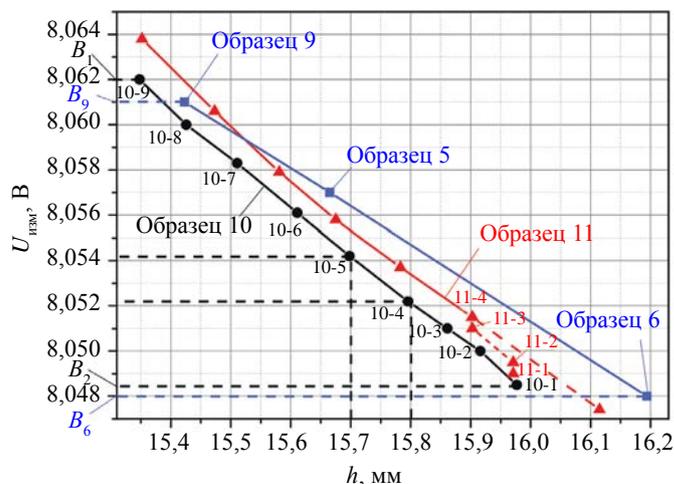


Рис. 6. Зависимости сигналов вихретокового преобразователя ( $U_{\text{изм}}$ ) от высоты образцов, аналогичные рис. 5. Измерения на частоте 40 Гц.

При измерении на основной частоте (40 Гц) на образцах с пропаянностью 0 % (7) и 100 % (9), имеющих одинаковое сечение, разность сигналов измерительной обмотки ВТП составила  $\Delta U_{\text{изм}} = 12$  мВ (см. табл. 2 и 3) и, соответственно, изменение высоты и толщины даже в пределах допуска ( $\pm 0,1$  мм) будет приводить к погрешности определения пропаянности на  $\pm 23$  %, что недопустимо много.

Таким образом, приведенные данные еще раз указывают, во-первых, на необходимость учета сечения тестируемых соединений при контроле качества их пайки и, во-вторых, на определенную сложность решения этой задачи из-за существенной разницы влияния высоты и толщины контролируемых соединений на сигналы вихретокового преобразователя.

На рис. 7 приведены зависимости сигналов измерительной обмотки ВТП ( $U_{\text{изм}}$ ) от поперечного сечения ( $S$ ) медных сплошных образцов 10 и 11, а также сверхпроводящих образцов 9, 5 и 6, полученные при измерении на частоте 1400 Гц. Видно, что для образцов 10 и 11 зависимости  $U_{\text{изм}}(S)$  представляют собой прямые, практически параллельные друг другу. Наклон прямой, проходящей через точки, соответствующие образцам 5, 6 и 9, несколько отличается от наклона прямых образцов 10 и 11. По-видимому, это связано с тем, что образцы 10 и 11 были изготовлены из цельного куска меди, а образцы 5, 6 и 9 — из составных частей с включением сверхпроводников.

Рассмотрим, каким образом можно решить поставленную задачу учета площади поперечного сечения соединений. Как было показано выше, на частоте 1400 Гц сигналы вихретокового преобра-

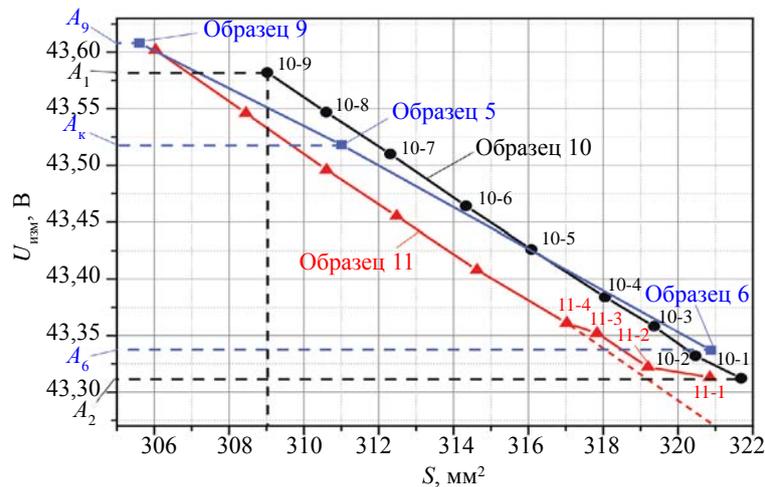


Рис. 7. Зависимости сигналов вихретокового преобразователя ( $U_{изм}$ ) от площади поперечного сечения сплошных медных образцов 10 ( $t = 20,135$  мм) и 11 ( $t = 19,935$  мм), а также сверхпроводящих образцов 9, 5 и 6 ( $t = 19,815$  мм). Точка 11-1 соответствует толщине  $t = 20,089$  мм, 11-2 —  $t = 19,986$ , 11-3 —  $t = 19,986$ , 11-4 —  $t = 19,935$ . Измерения на частоте 1400 Гц.

зователя зависят только от поперечного сечения образцов и не зависят от степени их пропаянности. Таким образом, можно считать, что сплошные медные образцы являются аналогами сверхпроводящих образцов с пропаянностью 100 %.

Пусть возможно изменение высоты контролируемых соединений, имеющих номинальную толщину  $t = 20,135$  мм (образец 10), от 15,977 (точка 10-1 на рис. 7) до 15,348 мм (точка 10-9), то есть  $\Delta h = 0,63$  мм. При этом разность напряжений измерительной обмотки ВТП составит  $\Delta A = A_{10-9} - A_{10-1} = 43,582 B - 43,312 B = 270$  мВ, а на частоте 40 Гц аналогичная разность составит  $\Delta B = B_{10-9} - B_{10-1} = 8,062 B - 8,049 B = 13,0$  мВ (см. рис. 5 и 6).

По результатам этих измерений можно рассчитать коэффициент  $C = \Delta B / \Delta A = 13 / 270$  мВ = 0,048, позволяющий учитывать влияние сечения контролируемого соединения при измерении на основной частоте 40 Гц.

При измерении на сверхпроводящих образцах 9 и 6, имеющих одинаковую толщину (19,815 мм) и разницу в высоте, равную  $\Delta h = 16,194$  мм – 15,423 мм = 0,77 мм, получаются аналогичные результаты:

$$\Delta A = A_9 - A_6 = 43,608 B - 43,337 B = 271 \text{ мВ при измерении на } f = 1400 \text{ Гц;}$$

$$\Delta B = B_9 - B_6 = 8,061 B - 8,048 B = 13,0 \text{ мВ — на } f = 40 \text{ Гц (см. рис. 5 и 6);}$$

$$C = \Delta B / \Delta A = 13 / 271 \text{ мВ} = 0,048.$$

Пусть контролируемое соединение имеет такое же сечение, как у образца 5 ( $S = 311,01$  мм<sup>2</sup>), и пропаянность 100 % (см. рис. 7). На частоте 1400 Гц сигнал вихретокового преобразователя будет равен  $A_k = 43,518$  В. Вычислим результат, равный разности показаний при измерении на образце 9 (толщина 19,815 мм) с минимально возможной высотой соединения 15,423 мм и контролируемом соединении ( $A_k$ ) при измерении на  $f = 1400$  Гц  $X_1 = A_9 - A_k = 43,608 B - 43,518 B = 90$  мВ.

Вычислим величину, равную  $X_1 \cdot C = 90 \text{ мВ} \cdot 0,048 = 4,32$  мВ, которая позволит учесть величину сечения контролируемого соединения при измерении на основной частоте 40 Гц.

При измерении на частоте 40 Гц за счет большего сечения (311,01 мм<sup>2</sup>), чем у образца 9 (305,61 мм<sup>2</sup>), сигнал вихретокового преобразователя при измерении на контролируемом соединении будет на 4,32 мВ меньше, чем при измерении на образце 9

$$X_2 = 8061 \text{ мВ} - 4,32 \text{ мВ} = 8056,7 \text{ мВ}.$$

По формуле  $X = X_2 + X_1 \cdot C$  (где  $X_2$  — сигнал вихретокового преобразователя при измерении на образце 9, полученный на  $f = 40$  Гц) вычисляем величину сигнала ВТП, позволяющего определить пропаянность этого соединения с учетом его сечения:  $X = 8056,7 \text{ мВ} + 4,32 \text{ мВ} = 8061$  мВ, то есть у этого соединения при его сечении, отличающемся от сечения калибровочных образцов 7 (0 %) и 9 (100 %), пропаянность равна 100 %, что и требовалось показать. При этом, поскольку на частоте 40 Гц разность показаний, полученная при измерении на образцах 7 (0 % пропаянности) и 9 (100 % пропаянности), равна 12 мВ, погрешность определения пропаянности на рассмотренном

соединении из-за его большего сечения составляет 38,4 % и может достигать 100 % при его сечении, как и у образца 6 (320,88 мм<sup>2</sup>).

Таким образом, предложенная двухчастотная вихретоковая методика контроля заключается в следующем: проводят измерения на высокой частоте ( $f = 1400$  Гц), на которой показания вихретокового устройства зависят только от внешнего сечения медного стабилизатора и не зависят от степени пропаянности сверхпроводящих кабелей между собой; проводят измерения на основной частоте ( $f = 40$  Гц), на которой показания вихретокового устройства зависят как от пропаянности сверхпроводящих кабелей между собой, так и от внешнего сечения медного стабилизатора; рассчитывают степень пропаянности соединения исходя из результатов измерения на двух частотах — высокой и основной.

Для осуществления предлагаемой методики контроля на этапе настройки необходимо использовать 3 образца соединений:

два образца с пропаянностью 100 %, имеющих номинальную толщину, рекомендованную заводом-изготовителем (20 мм), у одного из которых высота имеет минимально возможное (при данной технологии пайки) значение, у другого — номинальное  $\Delta h \approx 0,5-0,6$  мм;

образец с пропаянностью 0 % с номинальной толщиной и минимально возможной высотой.

Настройка аппаратуры производится следующим образом: сначала определяется разность показаний вихретокового устройства  $\Delta A = A_1 - A_2$  при измерении на описанных выше образцах с пропаянностью 100 % на высокой частоте, затем на этих же образцах проводят измерения на основной частоте и определяется разность показаний  $\Delta B = B_1 - B_2$ , вычисляется коэффициент  $C = \Delta B / \Delta A$ , далее проводятся измерения на основной частоте на образцах с пропаянностью 0 и 100 %, имеющих номинальную толщину и минимально возможную высоту. Разность полученных значений соответствует изменению пропаянности от 0 до 100 %. На этом операция настройки заканчивается.

Процедура определения пропаянности контролируемого соединения заключается в следующем:

1) проводят измерения на высокой частоте и определяют результат, равный разности показаний при измерении на образце 100 % пропаянности с номинальной толщиной и минимально возможной высотой соединения ( $A_1$ ) и на контролируемом соединении ( $A_k$ )  $X_1 = A_1 - A_k$ ;

2) проводят измерения на основной частоте и получают результат  $X_2$ ;

3) вычисляют результат, полученный при измерении на контролируемом соединении  $X$ , соответствующий его пропаянности с учетом площади его поперечного сечения:  $X = X_2 + X_1 \cdot C$ .

## ВЫВОДЫ

1. Погрешность определения качества пайки сверхпроводящих токоведущих соединений электромагнитов за счет изменения их сечения, неизбежно получающегося в результате их изготовления и технологии пайки, при использовании одночастотной методики контроля может достигать 100 %.

2. Разработана двухчастотная вихретоковая методика контроля качества пайки сверхпроводящих токоведущих соединений электромагнитов с использованием П-образного вихретокового преобразователя, позволяющая выявлять дефекты пайки при существенных вариациях сечений медного стабилизатора таких соединений.

3. Показано, что разработанная методика позволяет учитывать влияние изменения сечения медного стабилизатора на результаты контроля как за счет изменения его высоты и толщины, так и других факторов, влияющих на величину его сечения (неправильная прямоугольная форма и наличие на поверхности соединения некоторого количества припоя).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Диагностика», № г.р. АААА-А18-118020690196-3).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд Е.В., Ничипурук А.П., Коган Л.Х., Худяков Б.А. Вихретоковый контроль качества пайки токоведущих соединений электрических машин. I. Общие принципы // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 58—71.

2. Коган Л.Х., Ничипурук А.П., Розенфельд Е.В., Худяков Б.А. Вихретоковый контроль качества пайки соединений токоведущих соединений электрических машин. II. Эксперимент // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 72—82.

3. Kogan L., Nichipuruk A., Savary F., Principe R., Datskov V., Rozenfel'd E., Khudjakov B. Eddy Current Quality of Soldered Current-Carrying Bas-Bar Splices of Superconducting Magnets // Insight. 2015. V. 57. № 12, p. 697 (6 pp.).

4. *Kogan L. Kh., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P.* Improving the Reliability of Eddy-Current Quality Control of Soldering in Current-Carrying Copper Joints and Expanding the Nomenclature of Inspected Joints in Energy Equipment // Russian Journal of Nondestructive testing. 2018. V. 54. No. 11. P. 784—791. [*Коган Л.Х., Сташков А.Н., Ничипурук А.П.* Повышение достоверности вихретокового контроля качества пайки токоведущих медных соединений и расширение номенклатуры контролируемых соединений в энергетическом оборудовании // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 43—48.]
5. *Sasi B., Rao B.P.* Dual-frequency Eddy Current Non-destructive Detection of Fatigue Cracks in Compressor Discs of Aero Engines // Defence Science Journal. 2004. V. 54. P. 563—570.
6. *Yin W., Peyton A.J.* Thickness measurement of non magnetic plates using multi frequency eddy current sensors // NDT&E Int. 2007. V. 40. P. 43—48.
7. *Malikov V.N., Dmitriev S.F.* Research of Conductive Materials by Multifrequency Measuring System on the Basis of Eddy Current Transducers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 189. No. 1. P. 1—5.
8. *Реутов Ю.Я.* Обнаружители намагниченных предметов (теория и практика индукционного обнаружения). Екатеринбург, 2018. 336 с.
9. [19935] Способ неразрушающего контроля качества пайки токоведущих соединений, патент № 2567736. Л.Х. Коган, А.П. Ничипурук, Е.В. Розенфельд, Б.А. Худяков. 20.12.2015. Бюл. № 35 (2015).
10. *Дорофеев А.Л.* Электроиндуктивная дефектоскопия. М.: Машиностроение, 1967. 231 с.