

Received: 30.06.2023

Revised: 15.08.2023



Accepted: 25.08.2023



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.047-059

CAPABILITIES OF EDDY CURRENT NDT OF SOLDERED CURRENT-CARRYING JOINTS IN SUBMERSIBLE ELECTRICAL EQUIPMENT FOR OIL AND GAS INDUSTRY

L. Kh. Kogan^{a)},* and A. N. Stashkov^{b)}

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0003-2725-3748>  lhkogan@e1.ru;

^{b)}  <https://orcid.org/0000-0003-2169-274X>  stashkov@imp.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: lhkogan@e1.ru

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia
Tel.: 8 (912) 632-6522

The paper shows the possibility to test the quality of soldering of small current-carrying non-ferromagnetic joints in submersible electrical equipment for oil and gas systems by the amplitude eddy current method using a highly sensitive primary transducer with a U-shaped core. The sensitivity of soldering quality testing under different conditions of generating an exciting signal is compared. It has been found that the sensitivity of NDT in the case of current amplitude stabilized in the excitation coil (current generator) is significantly higher than that in case of voltage amplitude stabilized in it (voltage generator). Possible errors in determining the level of soldering of the joints due to the variation of their cross section within the limits of tolerance according to the technology of their manufacture have been detected. Circuit solutions and software have been developed to test the level of soldering of such joins. Approbation of soldering quality testing was carried out on products manufactured under production conditions.

Keywords: eddy current method, submersible electrical equipment for oil and gas industry, current-carrying joints, soldering quality testing, eddy current transducer with a U-shaped core

Acknowledgment

The reported study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme Diagnostics, No. 122021000030-1).

References

1. Rozenfeld, E.V., Nichipuruk, A.P., Kogan, L.Kh., and Khudyakov, B.A. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. I. General principles. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, 46 (4), 281–291. DOI: 10.1134/S1061830910040066.
2. Khromchenko, G.E. *Soedinenie i Okontsevanie Mednykh i Aluminiyevykh Provodov i Kabeley* [Connection and Termination of Copper and Aluminum Wires and Cables]. Gosenergoizdat Publ., Moscow–Leningrad, 1962, 49 p. (In Russian).
3. Principe, R., Vallejo, L.M., Bailey, J., Berthet, R., Favier, L., Grand-Clement, L., and Savary, F. Phased array ultrasonic nondestructive tests of soldered current-carrying bus-bar splices of superconducting magnets. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, June 1–8, 2018, IEEE, 2018, 28 (4), 9000708. DOI: 10.1109/TASC.2018.2800735.

4. Malyy, V.V., Kostyukhin, A.S., and Kinzhagulov, I.Y. Development of technology for non-destructive quality control of heat exchanger brazed joints and determination of the principles of its automation. *Tekhniko-Tekhnologicheskie Problemy Servisa*, 2022, 3 (61), 11–17. (In Russian).
5. Maierhofer, Ch., Röllig, M., Steinfurth, H., Ziegler, M., Kreutzbruck, M., Scheuerlein, Ch., and Heck, S. Non-destructive testing of Cu solder connections using active thermography. *NDT & E International*, 2012, 52, 103–111. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.07.010.
6. Kogan, L.Kh., Nichipuruk, A.P., Rozenfeld, E.V., and Khudyakov, B.A. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. II. Experiment. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, 46 (4), 292–301. DOI: 10.1134/S1061830910040078.
7. Syasko, V.A., Roitgarts, M.B., Koroteev, M.Yu., and Solomenchuk, P.V. Quality testing of soldered joints of turbogenerator stator winding cores at the “Elektrosila” plant. *V Mire Nerazrushayushchego Kontroya*, 2010, 2 (56), 40–43. (In Russian).
8. Koroteev, M.Yu. Calculation of eddy current probe parameters for quality control of turbine generators rods winding soldering. *Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki*, 2014, 2, 195–204. (In Russian).
9. Potapov, A.I., Syasko, V.A., Koroteev, M.Yu., and Solomenchuk, P.V. A Finite-element modeling of a probe of eddy-current quality testing of soldered joints in turbogenerator windings. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, 50 (5), 264–273. DOI: 10.1134/S1061830914050064.
10. Fedosenko, Yu.K., Shkatov, P.N., and Efimov, A.G. *Vikhretokovyy Kontrol* [Eddy Current Testing: Educational Book]. Spektr Publ., Moscow, 2011, 224 p. (In Russian).
11. Dorofeev, A.L. *Elektro-Induktivnaya Defektoskopiya* [Electroinductive (Induction) Flaw Detection]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1967, 231 p. (In Russian).
12. Syasko, V.A. and Chertov, D.N. Lamination detection in carbon fiber reinforced plastics with the use of tangential eddy current transducers. *V Mire Nerazrushayushchego Kontroya*, 2012, 2 (56), 19–21. (In Russian).
13. Ge, J., Yusa, N., and Fan, M. Frequency component mixing of pulsed or multi-frequency eddy current testing for nonferromagnetic plate thickness measurement using a multi-gene genetic programming algorithm. *NDT & E International*, 2021, 120, 102423. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102423.
14. Sidi-Ahmed, K., Maouche, B., Gabi, Y., Alloui, L., Straß, B., Wolter, B., and Feliachi, M. Numerical simulations and experimental investigation of laser hardening depth investigation via 3MA-eddy current technique. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 550, 169046. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169046.
15. Reutov, Yu.Ya. On joint application of permanent and alternating fields in magnetic detection of defects in thick-walled steel products. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, 58 (12), 1129–1141. DOI: 10.1134/S1061830922700139.

Подана в журнал: 30.06.2023





УДК 620.179.14

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.047-059

ВОЗМОЖНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЙКИ ТОКОВЕДУЩИХ СОЕДИНЕНИЙ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ СИСТЕМ

Л. Х. Коган^{a)}, *, А. Н. Сташков^{b)}

*Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0003-2725-3748>  lhkogan@e1.ru;
^{b)}  <https://orcid.org/0000-0003-2169-274X>  stashkov@imp.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: lhkogan@e1.ru
Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия
Тел.: 8 (912) 632–65–22

Показана возможность контроля качества пайки токоведущих малогабаритных ферромагнитных соединений погружного электрооборудования для нефтегазовых систем амплитудным вихретоковым методом с использованием высокочувствительного первичного преобразователя с П-образным сердечником. Проведено сравнение чувствительности контроля качества пайки при различных условиях генерации возбуждающего сигнала. Установлено, что чувствительность контроля при условии стабилизации амплитуды тока в возбуждающей обмотке вихретокового преобразователя (генератор тока) существенно выше, чем при стабилизации амплитуды напряжения в ней (генератор напряжения). Установлены возможные погрешности определения уровня пропаянности контролируемых соединений за счет вариации их сечения в пределах допуска по технологии их изготовления. Разработаны схмотехнические решения и программное обеспечение для контроля уровня пропаянности таких соединений. Проведена апробация контроля качества пайки на изделиях, изготовленных в производственных условиях.

Ключевые слова: вихретоковый метод, погружное электрооборудование для нефтегазовых систем, токоведущие соединения, контроль качества пайки, вихретоковый преобразователь с П-образным сердечником

1. Введение

При изготовлении токоведущих соединений погружного электрооборудования для нефтегазовых систем, состоящих из латунных или медных наконечников и выводного медного многожильного кабеля, требуется проверять качество пайки такого соединения. В реальных условиях из-за неудачной подготовки поверхностей, возникновения воздушных пузырей, частичного вытекания припоя заполнение припоем зазоров внутри наконечника оказывается неполным. Качество спая принято считать удовлетворительным, если не менее 60 % объема пустот внутри наконечника заполнено припоем [1, 2].

В случае некачественной пайки ухудшается электрический контакт в соединении, что приводит к существенному увеличению его электросопротивления. Это ведет к локальному увеличению плотности тока и температуры контакта, что может вызвать преждевременный выход его из строя. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо проводить неразрушающий контроль паяных соединений до момента ввода их в эксплуатацию. Так как требуется проводить 100 %-й контроль качества, то применение физических методов неразрушающего контроля является единственным, безальтернативным вариантом.

Для контроля качества пайки элементов энергетического оборудования применяются термографические, акустические и вихретоковые методы. Например, в работе [3] показана возможность выявления дефектов в виде отсутствия связующего при пайке соединений шин сверхпроводящих магнитов в ЦЕРН ультразвуковым методом с применением антенных фазированных решеток. В статье [4] приведены сведения о возможности контроля качества паяных соединений теплообменных аппаратов с помощью автоматизированного ультразвукового контроля. Результаты контроля медных паяных соединений с помощью импульсной термографии приведены в работе [5].

Наиболее перспективными и широко применяемыми методами неразрушающего контроля качества паяных соединений являются вихретоковые [1, 6–15]. В работах [1, 6] приведены теоретические и практические сведения о вихретоковом контроле качества пайки токоведущих соединений электрических машин с применением П-образного трансформаторного преобразователя. Преобразователь данного типа не имеет аналогов. Его отличительной особенностью является высокая однородность магнитного поля в межполюсном пространстве, что положительно сказывается на результатах контроля паяных соединений. Такой контроль применяется для контроля элементов машин для выработки электроэнергии.

Вихретоковый контроль деталей энергетического оборудования описан и в работах [7–9], но в качестве первичного преобразователя использовался преобразователь экранного типа [10].

Для контроля качества пайки токоведущих соединений электрических машин в ИФМ УрО РАН была разработана и внедрена в производство методика и универсальное вихретоковое устройство ДПС-6, а также более поздняя его модификация ДПС-8 [1, 6].

Однако до настоящего времени вихретоковые методы применялись для контроля качества пайки соединений с достаточно большим сечением – от 310 до 1200 мм². В случае если сечение контролируемых соединений мало, изменения уровня пропаянности, влекущие за собой изменение электропроводности соединения в целом, незначительны. Поэтому для контроля необходимо использовать высокочувствительную аппаратуру вихретокового контроля.

Целью данной работы является определение возможности контроля качества пайки малогабаритных токоведущих соединений погружного электрооборудования для нефтегазовых систем амплитудным вихретоковым методом с использованием высокочувствительного трансформаторного преобразователя с сердечником П-образного типа.

2. Образцы и методики измерений

Токоведущие соединения погружного электрооборудования для нефтегазовых систем состоят из наконечников разной конфигурации (изготовленных из латуни марки Л63 или ЛС59 и меди марки М1) и выводного кабеля, изготовленного из многожильного медного провода. Латунные наконечники могут иметь внешний диаметр от 5,5 до 9,0 мм, внутренний диаметр от 4,2 до 6,2 мм и длину внутреннего пространства наконечника, в которую впаивается с использованием свинцово-оловянного припоя с добавлением серебра выводной кабель, равную 10,5 мм. Медные наконечники имеют внешний диаметр 9,0 мм, внутренний диаметр 6,2 мм и такую же длину (10,5 мм).

Исследования проводились на соединениях, имеющих наконечники из латуни (марки Л63) с внешним диаметром 5,5 мм и меди марки М1 с внешним диаметром 9 мм.

На рис. 1 приведен внешний вид таких соединений и сплошных образцов, имитирующих их пропаянность величиной 100 %.

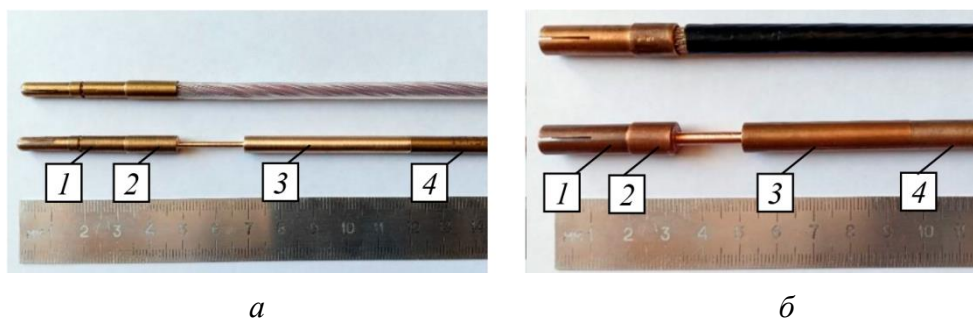


Рис. 1. Внешний вид токоведущих соединений наконечников из латуни (а) и меди (б) с выводным кабелем и сплошных образцов, имитирующих пропаянность 100 %

Исследования проводились:

- а) на образцах соединений с пропаянностью 0 %, у которых выводной кабель вклеивался в наконечник на полную длину его внутреннего пространства;
- б) на сплошных образцах, имитирующих наконечник со 100 %-й пропаянностью;
- в) на сплошных образцах, имитирующих наконечник, во внутреннее пространство которого (длиной 2 мм) впаивался выводной кабель;
- г) на пропаянных в условиях производства соединениях с неизвестным уровнем пропаянности.

Параметры образцов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Параметры соединений с латунными наконечниками

Образец №	Внешний диаметр наконечника, мм	Длина наконечника (часть 2 на рис. 1 а), мм	Пропаянность, %	Примечание
1	5,48	15,0	0	Выводной кабель вклеен в наконечник
2	5,47	15,0	Сплошной 100	–
3	5,47	15,0	Сплошной	Выводной кабель впаиван в наконечник на 2 мм
4	5,45	15,0	Неизвестна	Пайка в условиях предприятия-изготовителя
5	5,43	15,0	Неизвестна	Пайка в условиях предприятия-изготовителя

Для определения влияния внешнего диаметра латунного наконечника (часть 2 на рис. 1 а) на результаты контроля часть сплошного образца № 2 (часть 3 на рис. 1 а) длиной 50 мм была обточена до диаметра 5,33 мм, что на 0,12 мм меньше, чем диаметр части 4 (такой же длины) этого же образца (рис. 1 а), равный 5,45 мм.

Аналогично часть сплошного медного образца № 2 (часть 4 на рис. 1 б) длиной 50 мм была обточена до диаметра 7,95 мм, что составило 0,15 мм по отношению к части этого же образца 3 (рис. 1 б) диаметром 8,10 мм такой же длины.

Для создания однородного электромагнитного поля в зоне контроля использовали вихретоковый трансформаторный преобразователь с П-образным сердечником [6] размерами 10×20×36 мм. Так как исследуемые соединения имели малый диаметр и небольшую зону контроля, для увеличения чувствительности был изготовлен вихретоковый преобразователь (ВТП) с коэффициентом трансформации около 16.

Для исследования описанных выше образцов соединений с разным уровнем пропаянности использовалась компьютеризированная лабораторная установка для вихретокового контроля (ВТК), структурная схема которой приведена на рис. 2.

Таблица 2

Параметры соединений с медными наконечниками

Образец №	Внешний диаметр наконечника, мм	Длина наконечника (часть 2 на рис. 1 б), мм	Пропаянность, %	Примечание
1	8,95	11,0	0	Выводной кабель вклеен в наконечник
2	8,97	11,0	Сплошной 100	–
3	8,94	11,0	Сплошной	Выводной кабель впаян в наконечник на 2 мм
4	8,96	11,0	Неизвестна	Пайка в условиях предприятия-изготовителя
5	8,94	11,0	Неизвестна	Пайка в условиях предприятия-изготовителя

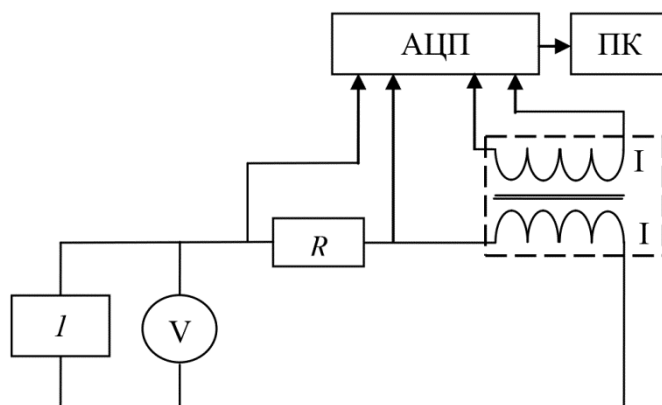


Рис. 2. Компьютеризированная лабораторная установка для вихретокового контроля: I – источник напряжения (тока), V – вольтметр, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер; пунктирной линией обозначен ВТП с возбуждающей (I) и измерительной (II) обмотками

В установке (рис. 2) роль фазометра и вольтметра выполнял АЦП NI USB-6361. С помощью написанного в среде графического программирования LabView программного обеспечения (ПО) измерялась разность фаз сигналов между возбуждающей и измерительной обмотками ВТП. С помощью ПО были записаны годографы вносимых напряжений для образцов соединений с разным уровнем пропаянности. После проведения калибровки на образцах

с пропаянностью 0 и 100 % может быть произведен расчет уровня пропаянности испытуемых соединений.

Недостаток компьютеризированной лабораторной установки (рис. 2) состоял в том, что она не позволяла проводить измерения при токах в обмотке возбуждения ВТП больше 7 мА (амплитуда электромагнитного поля в межполюсном пространстве H не более 1,43 А/см), что ограничивало ее чувствительность.

Основные исследования проводились с использованием лабораторной вихретоковой установки, позволявшей увеличить ток в обмотке ВТП до 30 мА, при этом амплитуда электромагнитного поля в межполюсном пространстве составляла около 4,70 А/см. Структурная схема такой лабораторной установки приведена на рис. 3. Усилитель 2 (рис. 3) включался как в режиме источника тока, так и в режиме источника напряжения.

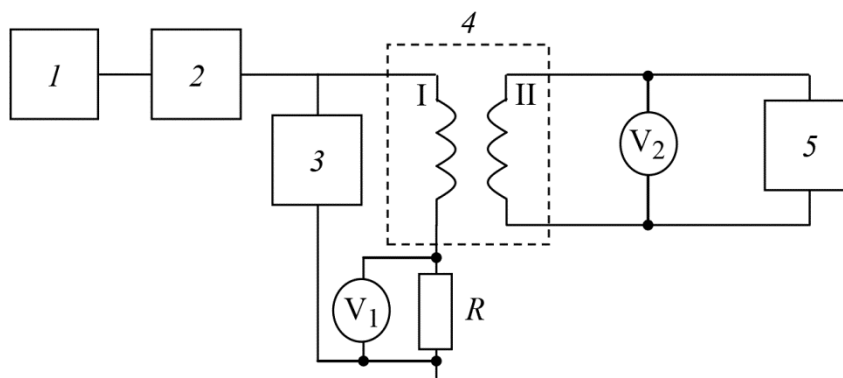


Рис. 3. Структурная схема лабораторной вихретоковой установки: 1 – генератор АКПП-3409/3; 2 – источник тока или напряжения; 3 – частотомер; 4 – трансформаторный ВТП с П-образным сердечником; 5 – осциллограф; V_1 – вольтметр В7-34А (предназначен для определения величин тока в обмотке возбуждения ВТП); V_2 – вольтметр DMM 4040; пунктирной линией обозначен ВТП с возбуждающей (I) и измерительной (II) обмотками

В качестве источника тока или напряжения 2 (рис. 3) применялись схемы, представленные на рис. 4.

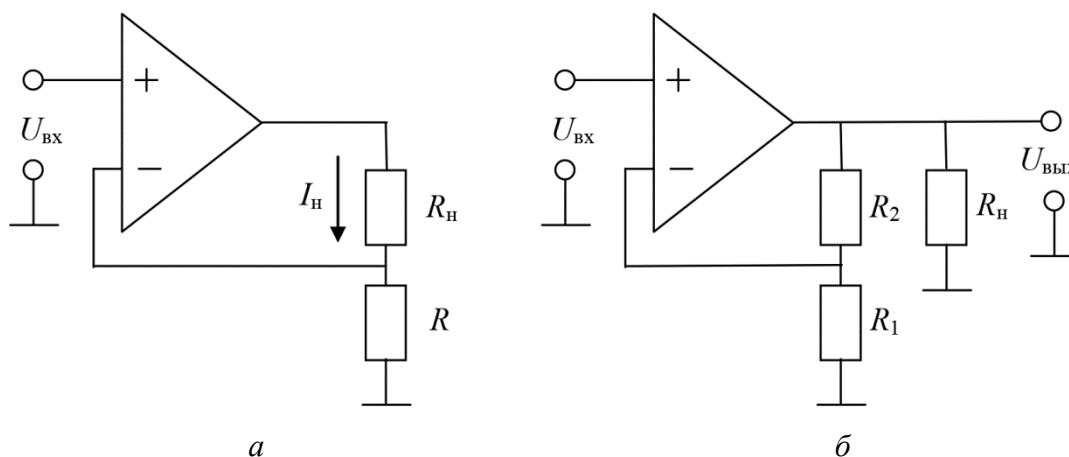


Рис. 4. Схемы источника тока (а) и источника напряжения (б), управляемых напряжением

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Сравнение чувствительности контроля качества пайки при различных условиях генерации возбуждающего сигнала

С использованием компьютеризированной лабораторной установки (рис. 2) при варьировании частот от 1 до 6 кГц были записаны годографы вносимых напряжений для образцов соединений с латунными наконечниками диаметром 5,5 мм с уровнями пропаянности 0 и 100 %. При этом в одном случае (рис. 5 а) на возбуждающую обмотку ВТП подавалось напряжение постоянной величины равной 300 мВ (источник напряжения, управляемый напряжением), в другом (рис. 5 б) – напряжение при постоянной амплитуде тока, равной 7 мА (источник тока, управляемый напряжением).

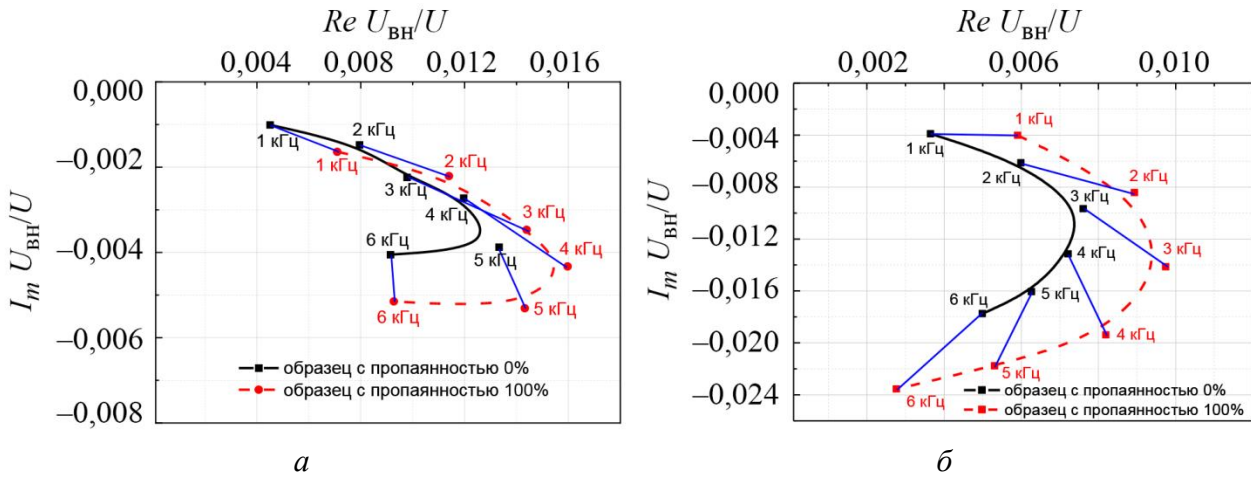


Рис. 5. Годографы вносимого напряжения, измеренные при постоянной амплитуде напряжения (а) и тока (б) в возбуждающей обмотке ВТП

Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что максимальная чувствительность контроля (расстояние между точками на комплексной плоскости для образцов со степенями пропаянности 0 и 100 % на одинаковых частотах) получается на частотах от 3 до 4 кГц. Кроме того, предпочтительнее проведение контроля при стабилизации амплитуды возбуждающего тока.

Для более точного сравнения чувствительности контроля при использовании стабилизации напряжения (генератор напряжения) или тока (генератор тока), а также для определения оптимальной для контроля уровня пропаянности соединений частоты дальнейшие исследования проводились с использованием лабораторной вихретоковой установки, структурная схема которой приведена на рис. 3.

Оказалось, что оптимальная частота для контроля соединений с латунными наконечниками диаметром 5,5 мм составляет 2,9 кГц, а для соединений с медными наконечниками диаметром 9,0 мм – 930 Гц.

В таблице 3 приведены результаты измерений на соединениях с латунными наконечниками диаметром 5,5 мм с пропаянностью 0 % (образец 1, табл. 1) и 100 % (образец 2, табл. 1) на частоте 2,9 кГц при стабилизации напряжения (генератор напряжения) или тока (генератор тока). Напряжение и ток в обмотке возбуждения в обоих случаях составляли $U_{\text{возб}} = 2,103 \text{ В}$ и $I_{\text{возб}} = 30 \text{ мА}$ ($H = 4,70 \text{ А/см}$) соответственно.

Таблица 3

Результаты измерений сигнала ВТП на соединениях с латунными наконечниками и разными схемами возбуждения (режимы генератора напряжения и тока)

Образец №	Пропаянность %	Генератор напряжения		Генератор тока	
		$U_{\text{изм}}, \text{ В}$	$\Delta U_{\text{изм}}, \text{ В}$	$U_{\text{изм}}, \text{ В}$	$\Delta U_{\text{изм}}, \text{ В}$
1	0	33,596	0,024	33,396	0,209
2	100	33,572		33,187	

Приведенные данные показывают, что при постоянной амплитуде тока в возбуждающей обмотке ВТП (режим генератора тока) чувствительность контроля описанных выше соединений возрастает в 8,7 раза по сравнению с режимом генератора напряжения.

Аналогичные измерения были проведены на соединениях с медными наконечниками диаметром 9,0 мм с пропаянностью 0 (образец 1, табл. 2) и 100 % (образец 2, табл. 2) на частоте 930 Гц при стабилизации напряжения (генератор напряжения) или тока (генератор тока). Напряжение и ток в обмотке возбуждения в обоих случаях составляли $U_{\text{возб}} = 0,680$ В и $I_{\text{возб}} = 30$ мА ($H = 4,78$ А/см) соответственно. Результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты измерений сигнала ВТП на соединениях с медными наконечниками и разными схемами возбуждения (режимы генератора напряжения и тока)

Образец №	Пропаянность %	Генератор напряжения		Генератор тока	
		$U_{\text{изм}}$, В	$\Delta U_{\text{изм}}$, В	$U_{\text{изм}}$, В	$\Delta U_{\text{изм}}$, В
1	0	10,636	0,116	10,651	0,628
2	100	10,520		10,023	

Данные таблицы 4 показывают, что в случае контроля соединений с медными наконечниками диаметром 9,0 мм чувствительность контроля при стабилизации тока генератора в 5,4 раза выше, чем при стабилизации его напряжения.

Это происходит вследствие того, что изменение амплитуды тока, вызванное действием вихревых токов, компенсируется путем уменьшения амплитуды напряжения. При этом, независимо от образцов, амплитуда тока в возбуждающей обмотке ВТП поддерживается постоянной.

3.2. Результаты исследований для наконечников из латуни

Исследованы токоведущие соединения наконечников из латуни диаметром 5,5 мм с выводным кабелем с использованием лабораторной вихретоковой установки, работающей в режиме источника тока (рис. 4 а).

При проведении измерений на оптимальной частоте $f = 2,9$ кГц при стабилизации тока в обмотке ВТП (при отсутствии образцов в его межполюсном пространстве) на уровне $I_{\text{возб}} = 30$ мА ($H = 4,70$ А/см) и $U_{\text{возб}} = 2,102$ В контролируемые соединения фиксировались в межполюсном пространстве ВТП определенным образом. Результаты измерений напряжений на измерительной обмотке ВТП ($U_{\text{изм}}$) приведены в таблице 5.

Ранее уже указывалось (см. стр. 4), что электромагнитное поле в межполюсном пространстве П-образного сердечника ВТП, имеющего длину 20 мм и расстояние между полюсами 10 мм, достаточно однородно [6]. Тем не менее, необходимо было определить, как изменяется величина $U_{\text{изм}}$ при перемещении контролируемого соединения в межполюсном пространстве ВТП. Оказалось, что изменение $U_{\text{изм}}$ при перемещении наконечника соединения № 3 (табл. 1) длиной 15 мм (часть 2, рис. 1 а), расположенного симметрично в межполюсном пространстве, от одного полюса к другому составляет 6 мВ (2,9 % по сравнению со значением $\Delta U_{\text{изм}}$, полученным при измерении на соединениях с пропаянностью 0 и 100 %), а при перемещении продольно относительно полюсов – 56 мВ (26,8 %). Поэтому при контроле необходима фиксация контролируемого соединения в межполюсном пространстве ВТП.

Важным вопросом является установление влияния возможных вариаций по техническим условиям внешних диаметров наконечников (в пределах 0,12 мм) на погрешность определения уровня пропаянности описанных выше соединений.

При этом необходимо было учесть два важных обстоятельства.

Во-первых, поскольку выводной кабель состоит из многожильного медного провода, диаметр жил которого составляет 1–2 мм, уровень вихревых токов, возникающих в них, пренебрежимо мал. Как показал эксперимент, напряжение измерительной обмотки не изменяется при помещении кабеля в ВТП и удалении из него.

Таблица 5

Результаты измерений напряжений на измерительной обмотке ВТП ($U_{изм}$)

Образец, №	Внешний диаметр наконечника, мм	Пропаянность, %	$U_{изм}$, В	$\Delta U_{изм}$, мВ	$\Delta U_{изм}$, %
1	5,48	0	33,396	209	100
2	5,47	100	33,187		
3	5,47	Кабель впаян в наконечник на 2 мм	33,189	207	99,0
4	5,45	Пропаянность неизвестна	33,241	155	72,4
5	5,43	Пропаянность неизвестна	33,264	132	63,2
2 (часть 3)	–	Сплошной $\varnothing = 5,33$ мм длина 50 мм	33,105	55	26,3
2 (часть 4)	–	Сплошной $\varnothing = 5,45$ мм длина 50 мм	33,050		

Во-вторых, электромагнитное поле, имеющее в центре межполюсного пространства величину $H = 4,70$ А/см, на его краю равно $H = 4,22$ А/см, а на расстоянии 7,5 мм от края полюса ВТП уменьшается в e раз и составляет величину 1,51 А/см. Учитывая, что ширина полюса ВТП составляет 20 мм, изменения диаметра контролируемого соединения будут значительно влиять на сигнал ВТП, если они происходят в пределах 35 мм зоны контроля (17,5 мм в обе стороны от центра ВТП).

Для определения влияния вариаций внешних диаметров наконечников на результаты контроля часть 3 сплошного образца № 2 (рис. 1 а) была обточена на длине 50 мм до диаметра 5,33 мм и величина $U_{изм}$, измеренная на этой части образца, сравнивалась с $U_{изм}$ на соседней части этого же образца 4, имеющего диаметр 5,45 мм и длину 50 мм (табл. 5).

Из данных табл. 5 следует, что при изменении диаметра на 0,12 мм эта разница составляет 26,2 % по сравнению с величиной $\Delta U_{изм}$, полученной при измерении на соединениях с пропаянностью 0 и 100 %. При этом средний объем частей 3 и 4 образца № 2 длиной 35 мм равен $V_{спл} = 1 \cdot (\pi D^2/4) = 35 \cdot [3,14 \cdot (5,39)^2/4] = 798,21$ мм³.

Объем наконечника, находящегося в зоне контроля, складывается из объема части 2 длиной 15 мм и объема части 1 длиной 10,0 мм (рис. 1 а): $V_{нак} = V_1 + V_2 = 15 \cdot [3,14 \cdot (5,47)^2/4] + 10,0 \cdot [3,14 \cdot (4,93)^2/4] = 544,62$ мм³.

Таким образом, если учесть соотношение этих объемов, равное $V_{нак}/V_{спл} = 544,62$ мм³ / $798,21$ мм³ = 0,68, то погрешность определения уровня пропаянности соединений с латунным наконечником диаметром 5,5 мм при вариации его внешнего диаметра 0,12 мм составит $26,2 \% \cdot 0,68 = 17,9$ %. Изменение диаметра предоставленных предприятием-изготовителем соединений составило 0,05 мм, что соответствует погрешности определения уровня их пропаянности, равной $17,9 \% \cdot 0,05/0,12 = 7,5$ %.

Можно ожидать, что погрешность определения уровня пропаянности соединений с латунными наконечниками диаметрами 6,5; 7,0; 8,0; и 9,0 мм при вариации внешнего диаметра на 0,12 мм будет меньше 17,9 %.

3.3. Результаты исследований для наконечников из меди

Исследованы токоведущие соединения наконечников из меди диаметром 9,0 мм с выводным кабелем с использованием лабораторной вихретоковой установки, работающей в режиме источника тока (рис. 4 а).

Измерения проводились на оптимальной частоте $f = 930$ Гц при стабилизации тока в обмотке ВТП (при отсутствии образцов в его межполюсном пространстве) на уровне $I_{\text{возб}} = 30$ мА ($H = 4,78$ А/см) и $U_{\text{возб}} = 0,680$ В. Результаты измерений напряжений на измерительной обмотке ВТП ($U_{\text{изм}}$) приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты измерений напряжений на измерительной обмотке ВТП ($U_{\text{изм}}$)

Образец, №	Внешний диаметр наконечника, мм	Пропаянность, %	$U_{\text{изм}}$, В	$\Delta U_{\text{изм}}$, мВ	$\Delta U_{\text{изм}}$, %
1	8,95	0	10,651	628	100
2	8,97	100	10,023		
3	8,94	Кабель впаян в наконечник на 2 мм	10,054	597	95,0
4	8,96	Полностью пропаянный	10,180	471	75,0
5	8,94	Не полностью пропаянный	10,299	352	56,0
2 (часть 3)	–	Сплошной $\varnothing = 8,10$ мм длина 50 мм	9,806	48	7,6
2 (часть 4)	–	Сплошной $\varnothing = 7,95$ мм длина 50 мм	9,854		

Результаты измерений, аналогичные приведенным в п. 3.2, по перемещению медного наконечника соединения № 3 (табл. 6) в межполюсном пространстве ВТП показали, что при перемещении от полюса к полюсу $U_{\text{изм}}$ не изменяется, а при перемещении продольно относительно полюсов изменяется на $\Delta U_{\text{изм}} = 12$ мВ (1,8 % от шкалы). Поэтому фиксация контролируемых медных соединений в межполюсном пространстве ВТП также необходима.

Электромагнитное поле, измеренное на $f = 930$ Гц, имеющее в центре межполюсного пространства величину $H = 4,78$ А/см, на его краю равно $H = 4,46$ А/см, а затем на расстоянии 7,5 мм от края уменьшается в e раз и составляет величину 1,59 А/см. Аналогично результатам для латунных наконечников, с учетом того что ширина полюса ВТП составляет 20 мм, изменения диаметра контролируемого соединения будут значительно влиять на сигнал ВТП, если они происходят в пределах 35 мм его зоны контроля (17,5 мм в обе стороны от центра ВТП).

Для определения влияния вариаций внешних диаметров медных наконечников на результаты контроля часть 4 сплошного образца № 2 (рис. 1 б) была обточена на длине 50 мм до диаметра 7,95 мм и величина $U_{\text{изм}}$, полученная при измерении на этой части образца, сравнивалась с $U_{\text{изм}}$, полученной на части 3 этого же образца (диаметром 8,1 мм и длиной 50 мм), что показано в табл. 6.

Из данных табл. 6 следует, что при изменении внешнего диаметра на 0,15 мм эта разница составляет 7,6 % по сравнению с величиной $\Delta U_{\text{изм}}$, полученной при измерении на соединениях с пропаянностью 0 и 100 %. При этом средний объем частей 3 и 4 образца № 2, находящихся в пределах 35 мм зоны контроля ВТП, равен $V_{\text{спл}} = 1 \cdot (\pi D^2/4) = 35 \cdot [3,14 \cdot (8,02)^2/4] = 1767,2$ мм³.

Объем медного наконечника, находящегося в пределах 35 мм зоны контроля ВТП, складывается из собственно длины 2 (рис. 1 б) наконечника, равной 11 мм (V_1), части 1 (рис. 1 б), состоящей из сплошного цилиндра диаметром 8,0 мм и длиной 3,0 мм (V_2), а также полый части такого же диаметра длиной 7,5 мм и толщиной 1,4 мм с разрезом (V_3). Очевидно, что вихревые токи, возникающие в этой полый части, будут давать существенно меньший вклад в величину $U_{изм}$. Будем условно считать, что этот вклад будет в четыре раза меньше, чем если бы эта часть длиной 7,5 мм была сплошной. Тогда общий объем медного наконечника, находящегося в пределах 35 мм зоны контроля ВТП, будет равен $V_{нак} = V_1 + V_2 + V_3 = 11 \cdot (3,14 \cdot 8,95^2/4) + 3,0 \cdot (3,14 \cdot 8,0^2/4) + 7,5 \cdot (3,14 \cdot 8,0^2/4)/4 = 936,6 \text{ мм}^3$.

Таким образом, если учесть соотношение этих объемов, равное $V_{нак}/V_{спл} = 936,6 \text{ мм}^3 / 1767,2 \text{ мм}^3 = 0,53$, то погрешность определения уровня пропаянности соединений с медным наконечником диаметром 9,0 мм при вариации его внешнего диаметра 0,15 мм составит $7,6 \% \cdot 0,53 = 4,03 \%$. Соответственно, при изменении внешнего диаметра на 0,1 мм погрешность определения уровня пропаянности составит 2,69 %.

По техническим условиям внешний диаметр медного наконечника может быть меньше номинального (9,0 мм) на 0,2 мм, а внутренний диаметр на 0,2 мм больше номинального (6,2 мм). Если учесть, что изменение внутреннего диаметра будет несколько меньше влиять на $U_{изм}$, чем аналогичное изменение внешнего диаметра, то общая погрешность определения уровня пропаянности такого соединения за счет вариации его диаметров, допустимых по ТУ, не будет превышать 10,7 %.

4. Заключение

Показана возможность контроля качества пайки токоведущих малогабаритных соединений погружного электрооборудования для нефтегазовых систем с латунными или медными наконечниками амплитудным вихретоковым методом с использованием высокочувствительного первичного преобразователя с П-образным сердечником. Проведено сравнение чувствительности контроля качества пайки при различных условиях генерации возбуждающего сигнала. Установлено, что чувствительность контроля при использовании источника тока для возбуждающей обмотки ВТП (режим генератора тока) повышается в 5–9 раз (при частотах контроля от 930 Гц до 2,9 кГц) по сравнению с использованием источника напряжения. Погрешность определения уровня пропаянности контролируемых соединений погружного электрооборудования из-за вариации их сечения в пределах допуска по технологии изготовления для токоведущих соединений с латунными наконечниками диаметром 5,5 мм составила 17,9 %, а для соединений с медными наконечниками диаметром 9,0 мм – 10,7 %.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

Литература

1. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. I. General principles / E. V. Rozenfeld, A. P. Nichipuruk, L. Kh. Kogan, B. A. Khudyakov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46, iss. 4. – P. 281–291. – DOI: 10.1134/S1061830910040066.
2. Хромченко Г. Е. Соединение и оконцевание медных и алюминиевых проводов и кабелей. – 2-е изд. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1962. – 49 с.
3. Phased array ultrasonic nondestructive tests of soldered current-carrying bus-bar splices of superconducting magnets / R. Principe, L. M. Vallejo, J. Bailey, R. Berthet, L. Favier, L. Grand-

- Clement, F. Savary // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, June 1–8, 2018. – IEEE, 2018. – Vol. 28, No. 4. – 9000708. – DOI: 10.1109/TASC.2018.2800735.
4. Малый В. В., Костюхин А. С., Кинжагулов И. Ю. Разработка технологии неразрушающего контроля качества паяных соединений теплообменных аппаратов и определение принципов ее автоматизации // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2022. – № 3 (61). – С. 11–17.
 5. Non-destructive testing of Cu solder connections using active thermography / Ch. Maierhofer, M. Röllig, H. Steinfurth, M. Ziegler, M. Kreutzbruck, Ch. Scheuerlein, S. Heck // NDT & E International. – 2012. – Vol. 52. – P. 103–111. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.07.010.
 6. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. II. Experiment / L. Kh. Kogan, A. P. Nichipuruk, E. V. Rozenfeld, B. A. Khudyakov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46, iss. 4. – 292–301. – DOI: 10.1134/S1061830910040078.
 7. Контроль качества паяных соединений стержней статорных обмоток турбогенераторов на заводе «Электросила» / В. А. Сясько, М. Б. Ройтгарц, М. Ю. Коротеев, П. В. Соломенчук // В мире неразрушающего контроля. – 2010. – № 2 (56). – С. 40–43.
 8. Коротеев М. Ю. Расчет параметров вихретоковых преобразователей для контроля качества пайки стержней статорной обмотки турбогенераторов // Естественные и технические науки. – 2014. – № 2. – С. 195–204.
 9. A Finite-element modeling of a probe of eddy-current quality testing of soldered joints in turbogenerator windings / A. I. Potapov, V. A. Syasko, M. Yu. Koroteev, P. V. Solomenchuk // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50, iss. 5. – P. 264–273. – DOI: 10.1134/S1061830914050064.
 10. Федосенко Ю. К., Шкатов П. Н., Ефимов А. Г. Вихретоковый контроль : учебное пособие / под общ. ред. В. В. Ключева. – М. : Издательский дом «Спектр». – 2011. – 224 с.
 11. Дорофеев А. Л. Электро-индуктивная дефектоскопия. – М. : Машиностроение, 1967. – 231 с.
 12. Сясько В. А., Чертов Д. Н. Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей // В мире неразрушающего контроля. – 2012. – № 2 (56). – С. 19–21.
 13. Ge J., Yusa N., Fan M. Frequency component mixing of pulsed or multi-frequency eddy current testing for nonferromagnetic plate thickness measurement using a multi-gene genetic programming algorithm // NDT & E International. – 2021. – Vol. 120. – P. 102423. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102423.
 14. Numerical simulations and experimental investigation of laser hardening depth investigation via 3MA-eddy current technique / K. Sidi-Ahmed, B. Maouche, Y. Gabi, L. Alloui, B. Straß, B. Wolter, M. Feliachi // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, – 2022. – Vol. 550. – P. 169046 – DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169046.
 15. Reutov Yu. Ya. On joint application of permanent and alternating fields in magnetic detection of defects in thick-walled steel products // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, iss. 12. – P. 1129–1141. – DOI: 10.1134/S1061830922700139.