

## Индукционный нагрев при сварке кольцевых швов труб

С. С. Адох<sup>1</sup>✉, С. В. Дзлиев<sup>1</sup>, В. В. Ткач<sup>1</sup>, К. Е. Пищалев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> «ООО «Научно-исследовательский, образовательный и производственный центр высокочастотных электротехнологий „ИНТЕРМ“», Санкт-Петербург, Россия

adocylle@gmail.com✉

**Аннотация.** Индукционный нагрев при кольцевой сварке стальных труб широко применяется для предварительного подогрева зоны сварки до температуры 150...200 °С и высокого отпуска сварного шва при температуре 700...750 °С непосредственно после сварки. Рассмотрены индукторы спирального и накладного типов, исследованы их параметры и даны рекомендации по применению. Исследована зависимость устойчивости замкнутой системы с обратной связью по температуре от положения датчика температуры относительно индуктора.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, нагрев перед сваркой, отпуск сварных швов, накладной индуктор, управление по температуре нагрева

**Для цитирования:** Индукционный нагрев при сварке кольцевых швов труб / С. С. Адох, С. В. Дзлиев, В. В. Ткач, К. Е. Пищалев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 4. С. 56–62. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-56-62.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Induction Heating during Welding of Annular Pipe Seams

S. S. Adoh<sup>1</sup>✉, S. V. Dzljev<sup>1</sup>, V. V. Tkach<sup>1</sup>, K. E. Pishchalev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> LLC «INTERM», Saint Petersburg, Russia

adocylle@gmail.com✉

**Abstract.** Induction heating in ring welding of steel pipes is widely used for pre-heating the welding zone to a temperature of 150... 200 °C and a high weld seam annealing at a temperature of 700...750 °C immediately after welding. Inductors of spiral and waybill types were considered, their parameters were investigated and recommendations for application were given. Dependence of the stability of the closed system with temperature closed-loop is investigated depending on the position of the temperature sensor relative to the inductor.

**Keywords:** induction heating, prewelding heating, welding, lay-over inductor, heating temperature control

**For citation:** Induction Heating during Welding of Annular Pipe Seams / S. S. Adoh, S. V. Dzljev, V. V. Tkach, K. E. Pishchalev // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 4. P. 56–62. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-56-62.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Нагрев деталей перед сваркой позволяет снизить усадочные напряжения в сварной конструкции, что особенно важно для крупнога-

баритных и ответственных металлоконструкций. Частично эта проблема может быть решена последующим отпуском сварных швов, но лучше

изначально снизить риск холодного излома и образования трещин благодаря более вязкому материалу на стыке [1]. Это особенно важно для конструкций, к которым предъявляются повышенные требования, например для магистральных трубопроводов.

Важными особенностями предварительного нагрева перед кольцевой сваркой труб индукционным способом являются отсутствие полноценного электрического и теплового контакта между свариваемыми частями, что практически блокирует передачу тепла и перетекание тока между ними. В то же время, детали из магнитной углеродистой стали обуславливают хорошую магнитную связь между индукторами по обе стороны сварного шва.

В общем случае детали с разных сторон сварного шва могут иметь разную начальную температуру, значительный разброс по массе и, следовательно, по теплоемкости (например, труба и фланец), поэтому для обеспечения симметричных условий предварительного индукционного нагрева перед сваркой целесообразно использовать два индукционных нагревателя, каждый со своим управлением с замкнутой обратной связью по температуре. При этом близко расположенные индукторы по сторонам сварного шва за счет магнитной связи могут оказывать друг на друга влияние в виде наведенной ЭДС, которая ведет к нестабильной работе источников питания.

Цель данного исследования заключается в оценке наиболее приемлемой конструкции индуктора для нагрева кольцевых швов как перед, так и после

сварки, а также определение условий устойчивой работы замкнутой системы регулирования температуры нагрева в зависимости от положения датчика измерения температуры по отношению к индуктору.

**Сравнение индукторов разных конструкций.** Сравним традиционный спиральный индуктор для нагрева цилиндрических тел с индуктором накладного типа, предложенным в [2]. На рис. 1 показано расположение двух индукторов накладного типа (рис. 1, а) и спирального типа (рис. 1, б) на нагреваемой трубе и обозначены их основные параметры.

Индуктор накладного типа имеет ряд преимуществ за счет своей конструкции:

1. Наличие прямой и обратной полуобмоток снижает внешнюю напряженность магнитного поля индуктора, что ведет к меньшему уровню наведенной на соседнем индукторе ЭДС помехи и повышает стабильность работы источников питания.

2. Более простой монтаж и демонтаж по сравнению с навивкой спирального индуктора сокращает время выполнения операции нагрева, а также продлевает срок службы индуктора.

Исследования влияния параметров индукторов проводились путем моделирования в двумерной осесимметричной постановке с решением связанных электромагнитной и тепловой задач. Геометрические параметры модели: внешний диаметр трубы  $D = 1640$  мм, толщина стенки трубы 16 мм, два индуктора установлены с двух сторон от сварного шва на расстоянии  $dL = 50$  мм [2], сталь магнитная.

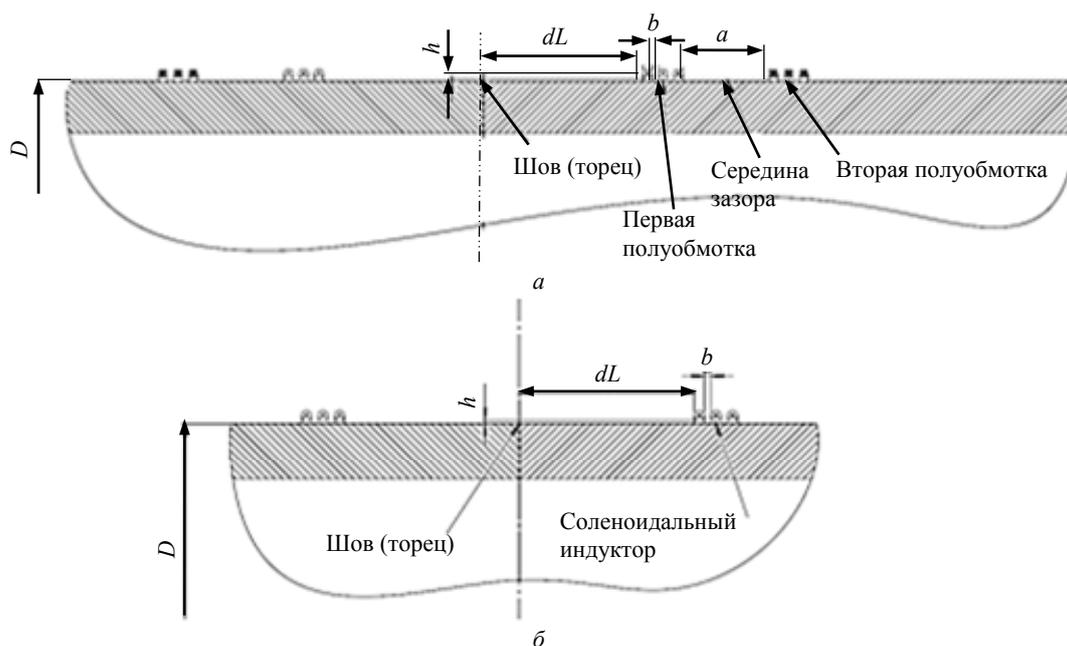


Рис. 1. Схемы расположения и параметры индукторов: а – накладного типа; б – спирального типа  
Fig. 1. Location of test points and general dimensions in systems: a – lay-over type; б – solenoidal inductors

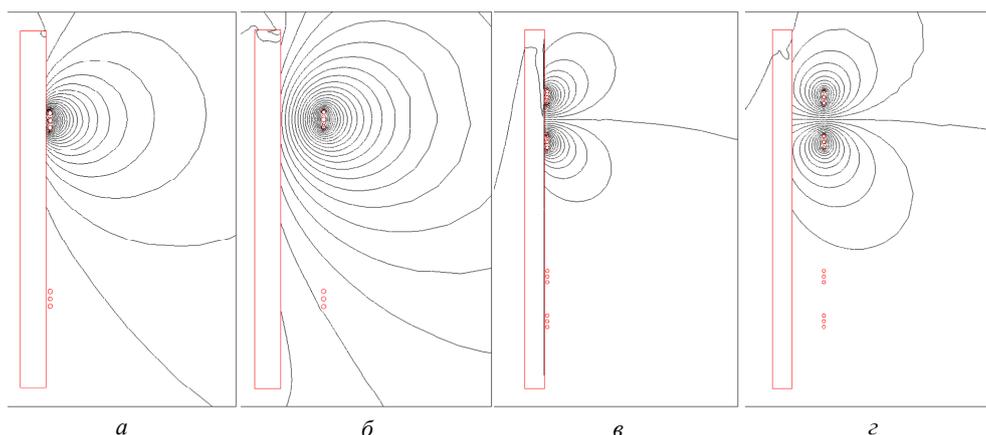


Рис. 2. Взаимные наводки в близко расположенных индукторах спирального (а, б) и накладного (в, з) типов при зазоре между индуктором и деталью  $h = 1$  мм (а, в) и  $h = 25$  мм (б, з)

Fig. 2. Mutual induction pick-ups in Coiled Inductors (а, б) and lay-over type inductor (в, з) with gap between inductor and pipe  $h = 1$  mm (а, в) and  $h = 25$  mm (б, з)

При использовании спиральных индукторов с зазором индуктор–деталь  $h = 1$  мм ЭДС помехи, наведенная на соседний индуктор при протекании по индуктору тока силой 100 А на частоте 66 кГц (рис. 2, а) (такой ток соответствует выходному току транзисторного генератора ТГИ-40/100 производства ООО «ИНТЕРМ» [3]), составляет 7.5 % от напряжения на запитанном индукторе, а при увеличении зазора  $h$  до 25 мм (например, при использовании футеровки) – наведенная ЭДС возрастает до 34.8 % (картина поля – рис. 2, б), что представляет собой серьезную помеху для источников питания. Это явление связано с ухудшением связи индуктора с деталью из-за возросшего рассеяния и увеличением взаимной связи индукторов.

При использовании для нагрева этой же трубы индуктора накладного типа с расстоянием между полуобмотками  $a = 25$  мм за счет наличия обратной полуобмотки и концентрации поля между полуобмотками наведенная ЭДС существенно ниже, коэффициент связи  $K_{св}$  равен 1.0 и 7.9 % соответственно (рис. 2, в и з) при приемлемом значении около 10 % [4]–[6].

Из рисунков видно, что индуктор накладного типа позволяет обеспечить более стабильную работу при использовании двух источников питания для индукционного нагрева сварных деталей как с целью предварительного подогрева, когда зазор мал (индуктирующий провод может лежать непосредственно на поверхности нагреваемых деталей), так и при отпуске сварных швов, когда зазор велик (требуется футеровка для снижения тепловых потерь и для недопущения перегрева индуктирующего провода).

В силу наличия двух полуобмоток с противоположным направлением тока при увеличении зазора связь между индуктором и деталью ослабляется, а связь между полуобмотками усиливается, что ведет к снижению КПД. Таким образом, при проектировании индуктора накладного типа для повышения КПД необходимо стремиться к минимизации зазора между обмоткой индуктора и деталью.

Повышение КПД накладного индуктора также происходит при увеличении расстояния между полуобмотками, однако это изменяет ширину области нагрева, т. е. изменяет температурное поле вдоль оси трубы. Формирования нужного температурного поля с сохранением высокого КПД можно добиться увеличением межвиткового зазора удаленной от шва полуобмотки. Однако при разнесении полуобмоток и использовании двух индукторов растет связь между индукторами, что снижает стабильность работы, а при использовании несимметричных индукторов сложно добиться их унификации.

Так как взаимное влияние индукторов накладного типа мало, то для оценки эффективности в зависимости от конфигурации индуктора рассмотрены характеристики одиночного индуктора.

На рис. 3 показана зависимость КПД индукционной системы с накладным индуктором от расстояния между полуобмотками при различных межвитковом зазоре и зазоре между индуктором и деталью.

При малом зазоре между индуктором и деталью сопротивление индуктора и КПД почти не зависят от расстояния между полуобмотками при практически реализуемом значении этого параметра не менее 50 мм. При увеличении зазора магнитная связь между полуобмотками возрастает, что ведет к снижению сопротивления и КПД.

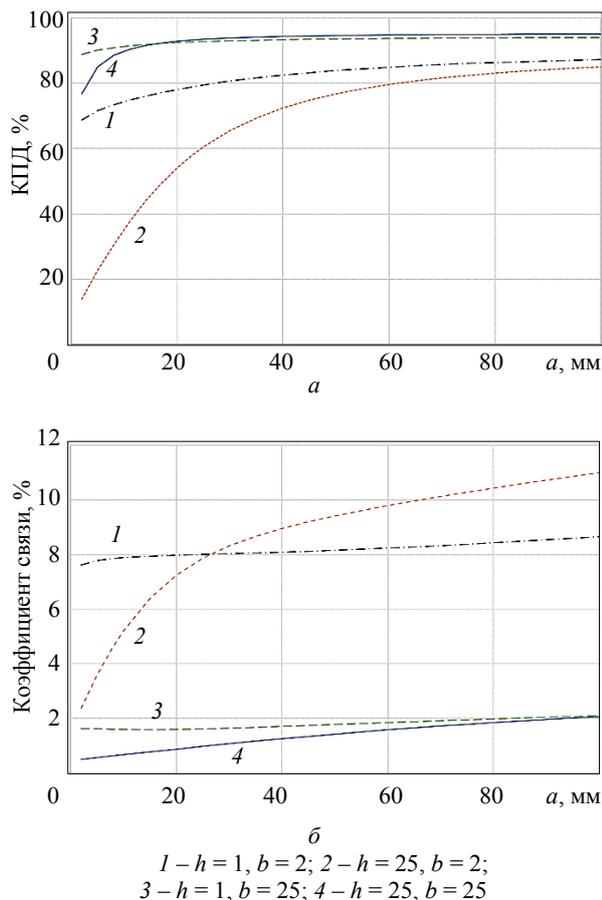


Рис. 3. Зависимость КПД (а) и коэффициента связи (б) накладного индуктора от расстояния между полуобмотками  $a$  при различном зазоре  $h$  и межвитковом шаге  $b$

Fig. 3. Dependence of the electric efficiency (а) and coupling ratio (б) of the lay-over inductor from the distance between the half-coils with different gap to the detail  $h$  and the winding step  $b$

Спиральный индуктор, эквивалентный по ширине самому узкому накладному из рассмотренных (3 витка с межвитковым зазором  $b = 20.6$  мм), имеет КПД 95.14 % при зазоре  $h = 1$  мм и 90.67 % при зазоре  $h = 25$  мм, что существенно выше, чем у накладного индуктора. Однако, как было ранее показано, при одновременной работе двух источников питания спиральный индуктор не может в полной мере обеспечить стабильной работы, поэтому менее эффективен без принятия дополнительных мер, например разнесения резонансных частот нагрузочных контуров и снижения потребляемой мощности.

Сравнить КПД и коэффициент связи индукторов двух типов удобно по рис. 4, где в части  $a$  показаны зависимости КПД и  $K_{св}$  от  $h$  в большом диапазоне вариации  $h$ , а в части  $b$  – эти же зависимости, только при малых, реально возможных значениях  $h = (1...40)$  мм.

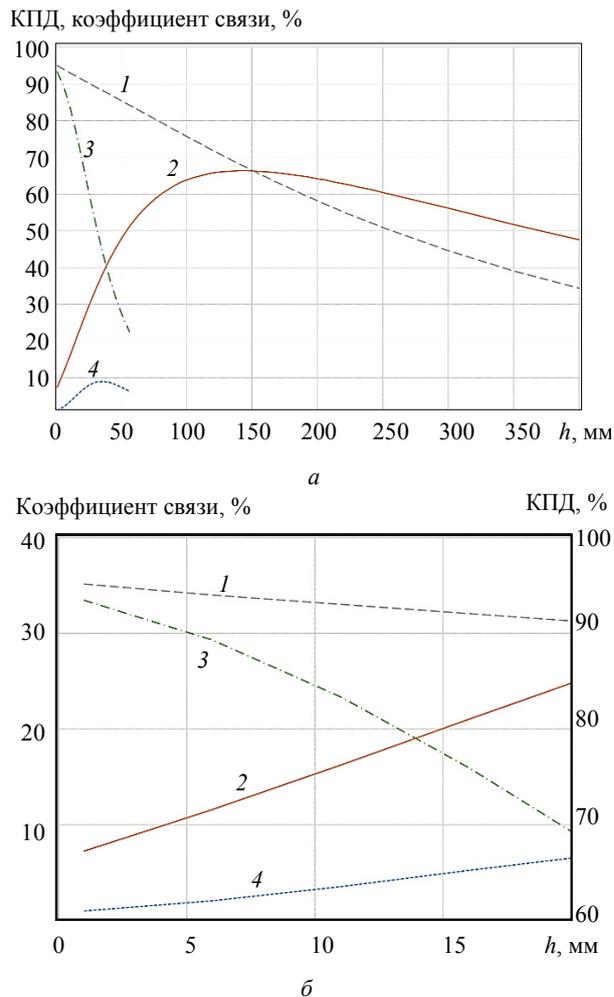


Рис. 4. Сравнение зависимостей КПД (1, 3) и  $K_{св}$  (2, 4) индукторов спирального (а) и накладного типов (б) соответственно от зазора между индуктором и поверхностью трубы

Fig. 4. Comparison of the electrical efficiency (1, 3) and the coupling ratio (2, 4) dependencies from the gap between inductor and the pipe surface for spiral (а) and lay-over (б) inductors respectively

Спиральные индукторы на трубе из магнитной стали имеют сильную магнитную связь, так как труба представляет собой магнитопровод. Зависимость  $K_{св}$  от зазора между индуктором и трубой (рис. 4, а) имеет максимум  $K_{св, max} = 67\%$  при зазоре, соизмеримом с расстоянием между катушками.

Для индукторов накладного типа картина имеет качественно подобный характер (рис. 4, а), но из-за концентрации поля между полуобмотками коэффициент связи изначально ниже и максимум коэффициента связи  $K_{св, max} = 9\%$  приходится на меньший зазор; КПД также убывает гораздо быстрее.

Из этих графиков можно сделать вывод, что для надежной работы двух источников питания на два близко расположенных индуктора по обе

стороны сварного шва целесообразно использовать индуктор накладного типа из провода в термостойкой изоляции без принудительного водяного охлаждения, если толщина тепловой изоляции не превышает 10 мм ( $K_{ПД} = 85\%$ ,  $K_{св} = 3\%$ ). Это значение выбрано из соображений энергетической эффективности для накладного индуктора. Статический тепловой одномерный расчет для теплоизоляционного материала с теплопроводностью  $0.055 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  при температуре на поверхности трубы  $750^\circ\text{C}$  и теплоотдаче в окружающую среду с поверхности футеровки с коэффициентом  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$  показал, что уже толщины изоляции 10 мм достаточно, чтобы температура провода индуктора не превышала допустимое значение  $400^\circ\text{C}$ .

Предварительный нагрев перед сваркой до  $300\text{--}400^\circ\text{C}$  можно осуществлять индуктором-проводом в термостойкой изоляции, наложенным непосредственно на поверхность трубы. Однако для унификации футеровки может быть установлена на индуктор сразу, и такой индуктор может

использоваться как для операции предварительного подогрева, так и при отпуске готовых швов; при таком варианте параметры схемы замещения индуктора в обоих случаях будут одинаковы, что облегчит задачу согласования с источником питания.

**Управление нагревом.** Для обеспечения качественной термообработки требуется управление нагревом по обратной связи. При этом, как было экспериментально показано в [2], [7], использование для контроля температуры измерений непосредственно на сварном шве может привести к значительным автоколебаниям.

На рис. 5 показаны графики мощности нагрева и температуры в трех точках – на шве, под первой полуобмоткой накладного индуктора (ближе к шву) и под второй полуобмоткой при установке датчика температуры на шве (рис. 5, а); между полуобмотками накладного индуктора (рис. 5, б); под первой полуобмоткой (рис. 5, в) и под второй полуобмоткой (рис. 5, г). Оба случая измерения температуры в точках, удаленных от

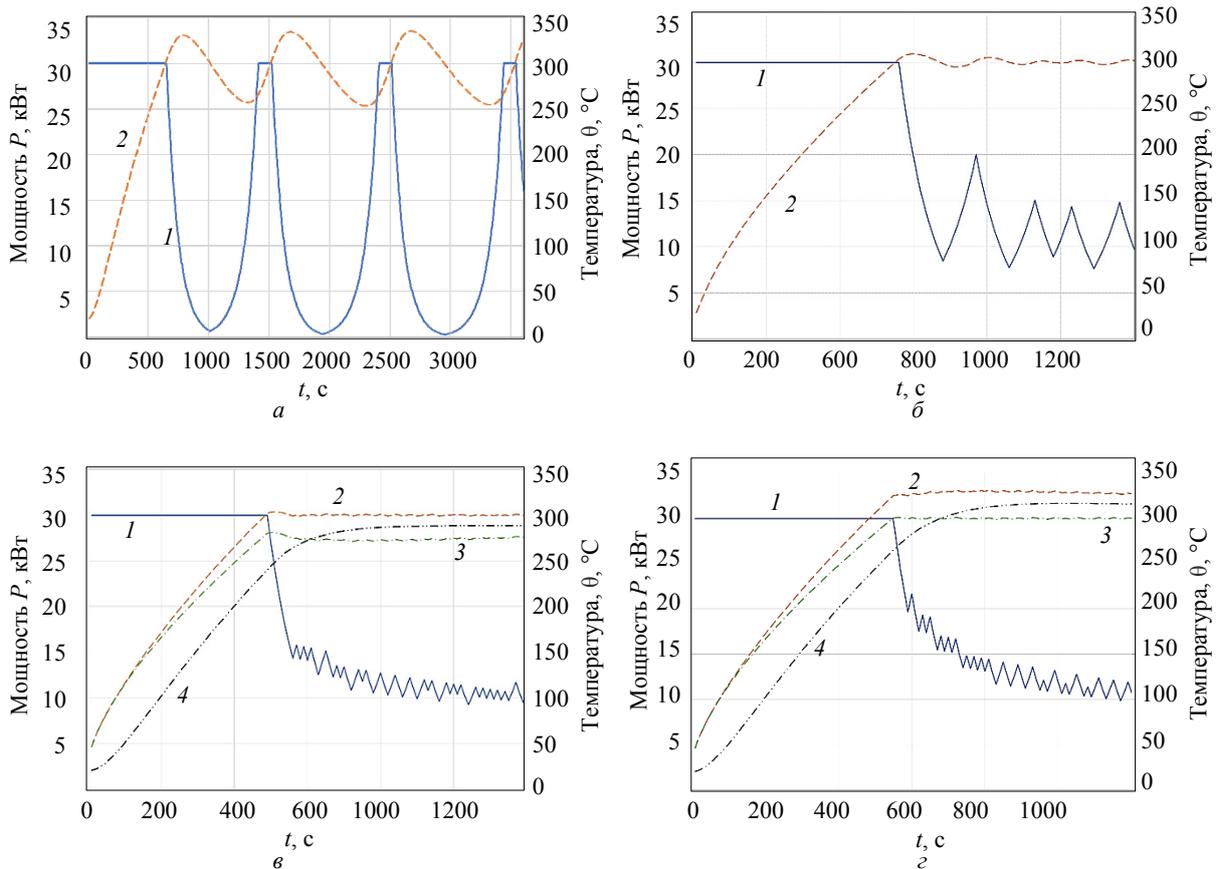


Рис. 5. Процесс нагрева накладным индуктором с обратной связью по температуре при расположении датчика температуры: а – на сварном шве; б – между полуобмотками; в – под ближней полуобмоткой; г – под дальней полуобмоткой (1 – мощность; 2 – температура под первой полуобмоткой; 3 – температура под второй полуобмоткой; 4 – температура на шве)

Fig. 5. Lay-over inductor heating with temperature feedback picked: а – from the weld seam; б – between the half-coils; в – under near half-coil; г – under the far half-coil

обмотки индуктора (рис. 5, а и б), характеризуются возбуждением недопустимых автоколебаний в замкнутой системе регулирования.

При установке датчика температуры непосредственно под обмоткой индуктора (рис. 5, в и г) автоколебания в замкнутой системе практически не возникают.

При датчике температуры под первой полуобмоткой (рис. 5, в) температура на шве и под другой полуобмоткой ниже, чем в точке стабилизации, а во втором случае (рис. 5, г) – выше. Предпочтение нужно отдать варианту установки датчика температуры под первую полуобмотку (ближе к сварному шву), так как при этом невозможен неконтролируемый локальный перегрев участков трубы.

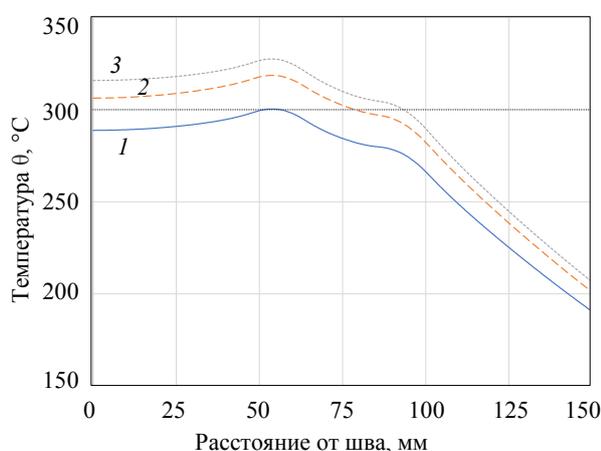


Рис. 6. Распределение температуры вдоль трубы при использовании для контроля различных точек:

1 – под первой полуобмоткой; 2 – между полуобмотками; 3 – под второй полуобмоткой накладного индуктора

Fig. 6. Temperature distribution along the pipe with different stabilization points used: 1 – under first half-coil; 2 – between half-coils; 3 – under second half-coil

При необходимости более точной стабилизации температуры на шве может быть введена поправка к установке температуры стабилизации. Для этого после выхода на стационарный режим по измерению фактической температуры на шве может быть определена поправка установки, необходимая для получения требуемой температуры

на шве для текущих условий нагрева. При схожих условиях в серии нагревов достаточно однократного определения этой поправки.

На рис. 6 показаны графики распределения температуры поверхности вдоль оси трубы при стабилизации температуры на уровне 300 °С в различных точках.

В данном примере для точной стабилизации температуры на шве на уровне 300 °С необходимо установить датчик температуры под первую полуобмотку накладного индуктора и ввести поправку к уставке температуры нагрева +10 °С (определено по кривой 1, как разность температуры уставки 300 °С и температуры на шве 290 °С), т. е. задать уставку температуры 310 °С в замкнутой системе регулирования.

**Выводы.** Индукторы накладного типа могут быть рекомендованы как для нагрева труб перед сваркой, так и для отпуска сварных швов после сварки в силу следующих причин:

1. Быстрый и простой монтаж и демонтаж, что может быть важно в полевых условиях и, кроме того, долгий срок службы индуктора (нет необходимости сматывания индуктора на хранение в бухту). Индуктор может быть изготовлен сразу с футеровкой и использоваться как для предварительного нагрева, так и для отпуска.

2. Минимальные внешние поля, т. е. минимальные взаимные помехи двух высокочастотных источников питания близко расположенных индукторов, а также более благоприятные условия труда.

3. Датчик температуры нагрева, установленный непосредственно под первую полуобмотку накладного индуктора, обеспечивает устойчивость замкнутой системы стабилизации температуры, отсутствие локальных перегревов и позволяет обеспечить требуемую точность нагрева при эмпирически вводимой поправке на уставку стабилизации по результатам термообработки первого шва в конкретных условиях или после выхода режима нагрева на стационар.

#### Список литературы

1. Свод правил СП 406.1325800.2018 «Трубопроводы магистральные и промышленные стальные для нефти и газа. Монтажные работы. Сварка и контроль ее выполнения» / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. М.: Стандартинформ, 2019.

2. Induction Annealing of Pipe Weld Seams with Layed Over Inductor / S. V. Dzliev, D. N. Bondarenko,

S. Adoh, M. S. Golubev // 2019 Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019. P. 1–3. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934150.

3. ООО «ИНТЕРМ»: сайт производителя оборудования индукционного нагрева. URL: <http://interm.su/> (дата обращения 12.02.2022).

4. Абдулхаков И. Ю. Повышение помехоустойчивости транзисторных генераторов с инверторами напряжения при сильной магнитной связи индукционных систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 1. С. 55–62.

5. Абдулхаков И. Ю., Дзлиев С. В. Исследование магнитной связи двух близкорасположенных индукторов при нагреве стальных заготовок // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 1. С. 52–59.

6. Пат. 2747198 (RU). Устройство индукционного нагрева: / И. Ю. Абдулхаков, С. В. Дзлиев. Заявл. 29.08.19; опубл. 29.04.21. Бюл. № 13. 2 с.

7. Perevalov Y., Demidovich V. Induction heat treatment of large rolls with two independent power sources // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. T. 950, № 1. C. 012013.

---

#### Информация об авторах

**Адох Суру Сирилл** – аспирант СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: adocylle@gmail.com

**Дзлиев Сослан Владимирович** – д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», почетный работник высшего профессионального образования РФ.

E-mail: dzlsv@mail.ru

**Ткач Виталий Викторович** – старший преподаватель кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ.

E-mail: tkacvitalij@mail.ru

**Пищалев Константин Евгеньевич** – старший научный сотрудник ООО «ИНТЕРМ», Санкт-Петербург.

E-mail: pischalev@mail.ru

#### References

1. Svod pravil SP 406.1325800.2018 «Truboprovody magistral'nye i promyslovye stal'nye dlya nefti i gaza. Montazhnye raboty. Svarka i kontrol' ee vypolneniya» / Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva RF. M.: Standartinform, 2019. (In Russ.).

2. Induction Annealing of Pipe Weld Seams with Layed Over Inductor / S. V. Dzljev, D. N. Bondarenko, S. Adoh, M. S. Golubev // 2019 Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019. C. 1–3. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934150.

3. ООО «ИНТЕРМ»: сайт производителя оборудования индукционного нагрева. URL: <http://interm.su/> (data obrashcheniya 12.02.2022). (In Russ.).

4. Abdulhakov I. YU. Povyshenie pomekhoustojchivosti tranzistornyh generatorov s invertorami napryazheniya pri sil'noj magnitnoj svyazi indukcionnyh sistem // Izv. SPbGETU «LETI». 2018. № 1. S. 55–62. (In Russ.).

5. Abdulhakov I. YU., Dzljev S. V. Issledovanie magnitnoj svyazi dvuh blizkoraspolozhennyh induktorov pri nagreve stal'nyh zagotovok // Izv. SPbGETU «LETI». 2019. № 1. S. 52–59. (In Russ.).

6. Pat. 2747198 (RU). Ustrojstvo indukcionnogo nagreva: / I. YU. Abdulhakov, S. V. Dzljev. Zayavl. 29.08.19; opubl. 29.04.21, Byul. № 13. 2 s. (In Russ.).

7. Perevalov Y., Demidovich V. Induction heat treatment of large rolls with two independent power sources // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. T. 950, № 1. C. 012013.

---

#### Information about the authors

**Suru S. Adoh** – Postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: adocylle@gmail.com

**Soslan V. Dzljev** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: dzlsv@mail.ru

**Vitaly V. Tkach** – senior lecturer of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: tkacvitalij@mail.ru

**Konstantin E. Pishchalev** – senior research associate, LLC «ИНТЕРМ», St. Petersburg.

E-mail: pischalev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.02.2022; принята к публикации после рецензирования 28.03.2022; опубликована онлайн 28.04.2022.

Submitted 08.02.2022; accepted 28.03.2022; published online 28.04.2022.

---