



## ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ ТРУБ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Е. А. ПАНТЕЛЕЙМОНОВ, Л. И. НЫРКОВА

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследовано влияние индукционной термообработки токами частотой 2,4 кГц на коррозионную стойкость сварных труб диаметром 85,6×0,6 и 142,9×0,9 мм из хромоникелевой нержавеющей стали 1.4301 при различном соотношении температуры термообработки, скорости нагрева, продолжительности выдержки при температуре термообработки, условий охлаждения. Использовали образцы труб после нагрева в одновитковых индукторах и образцы длинномерных труб, прошедшие под током всю длину проходных многовитковых индукторов. Параметры термообработки выбраны на основании их возможной реализации в линиях производства сварных тонкостенных труб, при скоростях сварки до 0,063 м/с. Показано, что термообработка сварных труб в диапазоне температур 700...770 °С, при скоростях нагрева до 47,7 °С/с и скоростях охлаждения до 12,5 °С/с, способствует повышению их стойкости против коррозионного растрескивания и не ухудшает стойкость против межкристаллитной и питтинговой коррозии. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* сварные трубы, коррозионностойкая сталь, термообработка труб, коррозионное растрескивание

Сварные трубы малого и среднего диаметра из коррозионностойких сталей аустенитного класса широко применяются в нефтяной и газовой промышленности, в сетях отопления и горячего водоснабжения. Низкое содержание углерода в сталях снижает их восприимчивость к питтинговой (ПК) и межкристаллитной (МКК) коррозии под действием окружающей среды [1]. Стали характеризуются удовлетворительными показателями прочности, вязкости и хорошей свариваемостью. Однако характерные для производства сварных труб технологические операции формовки исходной ленты в трубную заготовку, локальный нагрев кромок при сварке, нанесение элементов жесткости приводят к изменению структуры и свойств металла труб. Появление ферритной и мартенситной фаз, дополнительно к аустениту, вызывает опасность МКК или коррозионного растрескивания (КР) под напряжением [2].

Для получения максимальной вязкости, коррозионной стойкости и устранения физической неоднородности труб применяется термообработка (ТО). Трубы нагревают в печах с контролируемой атмосферой или в обычной атмосфере с последующим удалением окалины. В частности, нагрев труб из стали 08X18H10 в диапазоне температур 750...900 °С при низкой выдержке и сокращении продолжительности нагрева не приводит к заметному изменению структуры стали и способствует повышению стойкости против КР [3, 4]. В то же время для достижения наибольшей

стойкости труб против МКК необходимо исключить температуру начала интенсивного окисления стали. Для стали 08X18H10 это температура 800...870 °С [5].

Сократить продолжительность нагрева труб позволяет технология индукционного нагрева токами высокой частоты. Генерирование энергии непосредственно в металл трубы обеспечивает высокую скорость нагрева в области температур фазовых превращений, предотвращающих рост зерна аустенита. При оптимальном соотношении частоты тока и толщины стенки труб можно создать условия для исключения неоднородности объемных изменений. Одним из преимуществ технологии является возможность ее реализации непрерывно-последовательным методом в линиях производства сварных труб [6–8]. Тонкий слой оксидов, который образуется на поверхности труб при высоких скоростях нагрева, легко удаляется. Применяемые для реализации процесса нагрева индукционное оборудование и средства автоматизации позволяют с высокой точностью поддерживать заданные режимы ТО.

В настоящей работе исследовали влияние индукционной ТО токами частотой 2,4 кГц на стойкость сварных труб диаметром 85,6×0,6 и 142,9×0,9 мм из хромоникелевой нержавеющей стали 1.4301 против коррозии. Эффективность ТО оценивали по результатам испытания образцов труб на склонность к КР, МКК и ПК.

Сталь 1.4301, близкий аналог стали 08X18H10, относится к неферромагнитным материалам, у ко-



торых относительная магнитная проницаемость  $\mu = 1$ . Для сквозного нагрева полых цилиндрических заготовок с наружным диаметром до 150 мм, толщиной стенки до 1 мм из материалов с  $\mu = 1$ , рекомендуется частота тока в пределах 0,5...8,0 кГц [9, 10]. При частоте тока 2,4 кГц глубина проникновения тока в сталь превышает толщину стенки труб. Можно считать, что мощность по толщине стенки труб распределяется равномерно, что способствует снижению внутренних напряжений.

Исследовали образцы труб после нагрева в одновитковых индукторах и образцы длинномерных труб, которые прошли под током всю длину проходных многовитковых индукторов. В качестве источника индукционного нагрева использовали преобразователь частоты мощностью 160 кВт, номинальной частотой 2,4 кГц и трансформаторную схему согласования преобразователя с нагрузкой. Характеристики индукторов и пределы изменения параметров ТО образцов труб приведены в таблице. Оценивали влияние температуры ТО в диапазоне 440...150 °С, скорости нагрева, продолжительности выдержки при температуре ТО, условий охлаждения, скорости движения труб в проходных индукторах. Рабочая частота источника

нагрева находилась в пределах 1,95...2,3 кГц. Параметры ТО образцов труб в одновитковых индукторах, указанные в таблице, позволяют определить предполагаемые параметры ТО длинномерных труб в проходных индукторах. В частности, при температуре 750 °С, длине проходных индукторов 1 м и скоростях нагрева 18,5...47,5 °С/с, предполагаемая скорость движения труб диаметром 85,6×0,6 и 142,9×0,9 мм в проходных индукторах будет составлять, соответственно, 1,6...3,8 и 1,5...2,6 м/мин.

В процессе нагрева коротких образцов в одновитковых индукторах комплексное сопротивление индукторов изменяется незначительно. Некоторое различие наблюдается в динамике нагрева образцов в одновитковых и проходных индукторах. После выхода источника нагрева на заданную мощность скорость нагрева образца в одновитковом индукторе сохраняла свое значение в течение всего времени нагрева (рис. 1). Изменение скорости нагрева достигали изменением заданной мощности источника нагрева. После выключения источника нагрева при достижении температуры ТО, естественная выдержка образцов при температуре ТО не превышала 3...5 с. Для формирования более продолжительной выдержки применяли регулирование мощности источника нагрева.

**Характеристики индукторов и пределы изменения параметров ТО образцов труб**

Исполнение индуктора	Параметр	Диаметр труб, мм	
		85,6×0,6	142,9×0,9
Одновитковый	Длина токопровода, мм	95	120
	Диаметр токопровода (внутренний), мм	100	160
	Частота тока, кГц	2,1...2,3	2,0...2,2
	Коэффициент трансформации согласующего трансформатора	22/1	22/1
	Компенсирующая емкость, мкФ	85,6	116
	Температура ТО, °С	440...950	500...1150
	Скорость нагрева, °С/с	20,0...47,5	18,5...32,8
	Скорость охлаждения, °С/с	1,75...4,81	1,54...12,5
	Выдержка при температуре ТО, с	0...60	0...60
	Скорость движения труб (предполагаемая), м/с	0,026...0,063	0,025...0,043
Многовитковый проходной	Длина токопровода, мм	640	620
	Диаметр токопровода (внутренний), мм	120	170
	Количество витков токопровода	22	21
	Частота тока, кГц	1,95...2,1	1,92...2,05
	Коэффициент трансформации согласующего трансформатора	13/4	13/4
	Компенсирующая емкость, мкФ	66	52,3
	Температура ТО, °С	540...850	500...780
	Скорость нагрева, °С/с	7,2...10,0	8,1...11,3
	Скорость охлаждения, °С/с	1,59...3,9	1,2...4,8
	Выдержка при температуре ТО, с	10...20	15...20
Скорость движения труб, м/с	0,0092	0,0083...0,014	

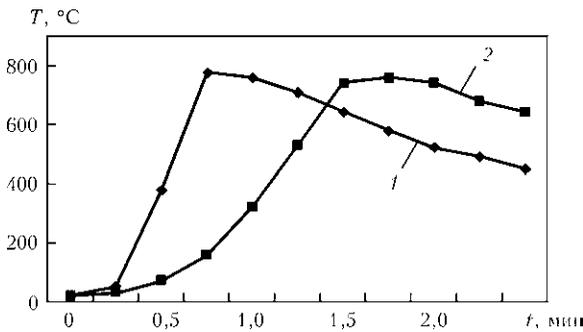


Рис. 1. Динамика изменения температуры образцов труб при нагреве в одновитковых (1) и проходных (2) индукторах

В процессе нагрева длинномерных труб при постоянной скорости движения скорость нагрева исследуемых образцов увеличивалась по мере движения труб в проходных индукторах. Изменение температуры ТО достигали изменением соотношения скорости движения труб и мощности источника нагрева. После выхода исследуемых образцов труб из зоны действия индукторов продолжительность естественной выдержки при температуре ТО достигала 20 с. Для уменьшения выдержки использовали воздушное принудительное охлаждение труб (производительность вентилятора 2700 м<sup>3</sup>/ч) на выходе из проходных индукторов. В частности, при нагреве труб диаметром 85,6×0,6 мм до температуры 650...660 °С и скорости движения 0,0092 м/с принудительный обдув труб привел к уменьшению выдержки от 20 до 10 с.

Испытания образцов труб на стойкость против КР проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 26294–84 «Соединения сварные. Методы испытаний на коррозионное растрескивание». Образцы труб в исходном состоянии и после ТО выдерживали в 42%-м растворе MgCl<sub>2</sub> при температуре кипения 154 °С. Появление коррозионных трещин контролировали каждые 4...5 ч. Критерием стойкости против КР служило время до появления первой коррозионной трещины.

Коррозионные трещины не появились за время испытаний 80 ч после ТО в одновитковом индукторе (рис. 2) образцов труб диаметром 85,6×0,6 мм, при температуре 770...1070 °С, скорости нагрева 41,0...56,3 °С/с и скорости естественного охлаждения 3,91...4,96 °С/с. Коррозионные трещины образовались через 10...66 ч после ТО образцов труб в диапазоне температур 440...640 °С, скорости нагрева 20,0...39,2 °С/с, без выдержки, скорости естественного охлаждения 1,75...2,83 °С/с. На образцах труб диаметром 142,9×0,9 мм коррозионные трещины не обнаружены при следующих параметрах ТО:

температура 650...1100 °С, скорость нагрева 7,1...27,7 °С/с, без выдержки, скорость естественного охлаждения 2,3...6,6 °С/с;

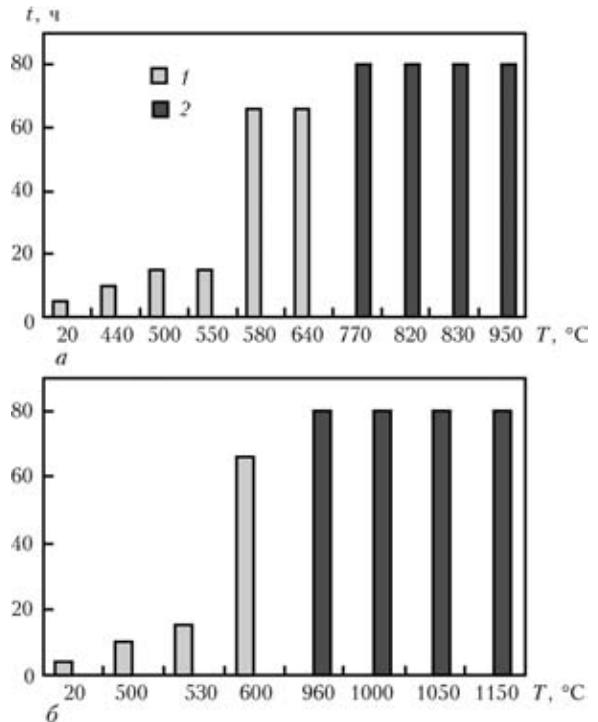


Рис. 2. Зависимость времени до появления коррозионных трещин от температуры ТО образцов труб диаметром 85,6×0,6 (а) и 142,9×0,9 мм (б), нагретых в одновитковых индукторах: 1 — наличие трещин; 2 — отсутствие

температура 1000 °С, скорость нагрева 6,4 °С/с, без выдержки, скорость воздушного принудительного охлаждения 9,3...12,5 °С/с;

температура 960...1050 °С, скорость нагрева 6,7 и 29,1 °С/с, выдержка 60 с, скорость естественного охлаждения 5,36...5,5 °С/с;

температура 1100...1150 °С, скорость нагрева 7,1 и 32,8 °С/с, выдержка 60 с, скорость воздушного принудительного охлаждения 10,7...12,1 °С/с.

Следует отметить, что на образцах труб диаметром 142,9×0,9 мм коррозионные трещины не обнаружены при изменении скоростей нагрева в пределах 6,4...7,1 и 18,5...32,8 °С/с, температуры 960...1150 °С, скоростей охлаждения 2,3...12,5 °С/с и выдержки 60 с, в условиях естественного или воздушного принудительного охлаждения. Режимы ТО образцов таких труб в одновитковых индукторах (температура 960...1000 °С, скорость нагрева 23,8...29,1 °С/с, скорость естественного охлаждения 5,18...5,5 °С/с) соответствуют режимам ТО длинномерных труб в проходных индукторах, длиной 650 мм, при скорости движения около 0,025 м/с.

На образцах труб диаметром 142,9×0,9 мм (рис. 2) коррозионные трещины образовались через 10...66 ч, после ТО в диапазоне температур 500...600 °С, при скоростях нагрева 21,7...25,0 °С/с, без выдержки и скоростях естественного охлаждения 1,54...2,0 °С/с.

На образцах труб диаметром 85,6×0,6 и 142,9×0,9 мм, не прошедших ТО, коррозионные

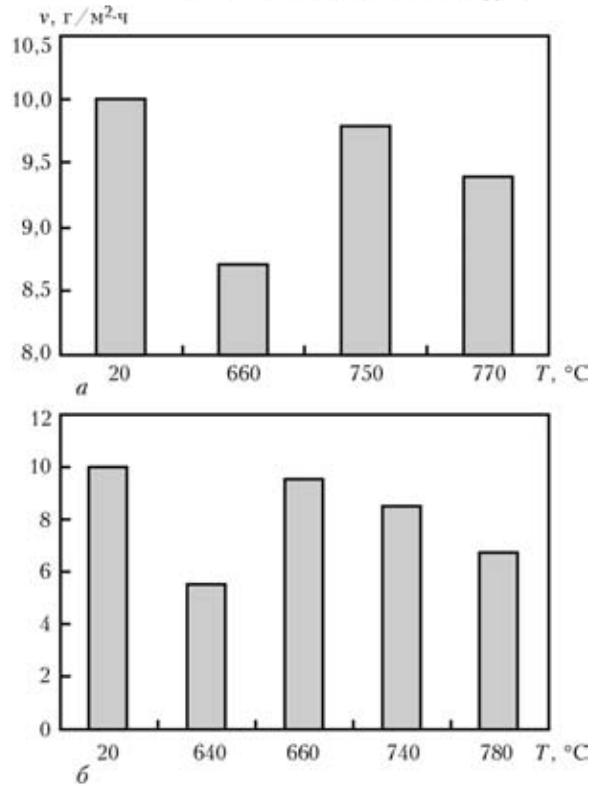
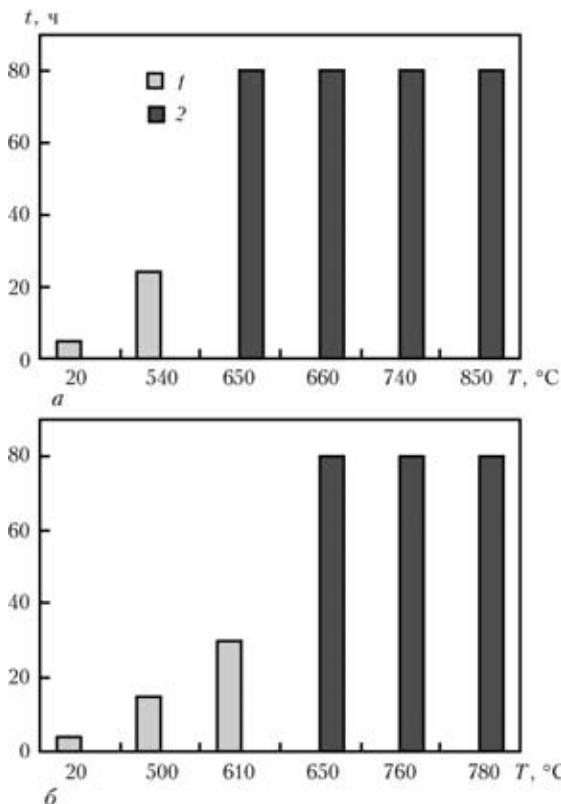


Рис. 3. Зависимость времени до появления коррозионных трещин от температуры ТО образцов длинномерных труб диаметром 85,6×0,6 (а) и 142,9×0,9 мм (б), нагретых в проходных индукторах: 1 — наличие трещины; 2 — отсутствие

Рис. 4. Влияние температуры ТО на условную среднюю скорость ПК образцов труб диаметром 85,6×0,6 (а) и 142,9×0,9 мм (б)

трещины появились, соответственно, через 5 и 4 ч. Таким образом, минимальная температура ТО образцов труб диаметром 85,6×0,6 и 142,9×0,9 мм после нагрева в одновитковых индукторах, выше которой коррозионные трещины не образовались, составляет, соответственно, 770 и 650 °С.

На образцах длинномерных труб диаметром 85,6×0,6 мм, после ТО в проходном индукторе до температуры 540 °С, скорости нагрева 7,2 °С/с, скорости естественного охлаждения 1,85 °С/с и скорости движения труб 0,0092 м/с коррозионные трещины образовались через 24 ч (рис. 3). Коррозионные трещины не образовались после ТО при температуре выше 650 °С. На образцах длинномерных труб диаметром 142,9×0,9 мм коррозионные трещины образовались через 15...30 ч после ТО при температурах 500 и 610 °С, скоростях нагрева 8,7 и 8,1 °С/с, скоростях воздушного принудительного охлаждения 1,2 и 2,7 °С/с, скорости движения труб 0,014 м/с. Трещина, как правило, зарождалась при отсутствии питтингов. Таким образом, коррозионные трещины не образовались после нагрева образцов длинномерных труб диаметром 142,9×0,9 мм выше температуры 650 °С.

Коррозионные испытания на склонность к МКК проводили согласно ГОСТ 6032–89 «Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испыта-

ний на стойкость против межкристаллитной коррозии» (п. 3). Критерием стойкости против МКК служило отсутствие разрушения границ зерен на глубину более 10 мкм. Образцы труб выдерживали в кипящем водном растворе 13 % CuSO<sub>4</sub> + 12 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в присутствии металлической меди. Продолжительность выдержки составляла 24±0,25 ч. Установлено, что на образцах труб после ТО в одновитковых и проходных индукторах, в основном металле и в зоне сварного шва разрушений по границам зерен не обнаружено. Это свидетельствует о стойкости образцов труб против МКК. Испытание образцов труб на стойкость к ПК проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9.912–89 «Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии». С учетом суммарной потери массы трех одинаковых образцов труб после выдержки в 10%-м растворе FeCl<sub>3</sub> в течение 24 ч условная средняя скорость ПК образцов труб, не прошедших ТО, составила  $v = 10 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$  (рис. 4). Питтинги распространились по основному металлу. Единичные питтинги имели сквозной характер. В сварном шве наблюдались единичные несквозные питтинги. Образцы труб после ТО в одновитковых и проходных индукторах при температуре до 780 °С имели  $v = 5,2 \dots 9,8 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$ . Уменьшилось количества питтингов на основном металле и в сварном шве. Преимущественно ПК подвергся сварной шов.



Можно считать, что проведение ТО не ухудшило питтингостойкость исследованных образцов труб.

#### Выводы

1. Проведение ТО сварных труб диаметром до 150 мм, толщиной стенки до 1 мм из хромоникелевой нержавеющей стали 1.4301 в диапазоне температур 700...770 °С, при скоростях нагрева до 47,7 °С/с, скоростях охлаждения до 12,5 °С/с и скоростях движения до 0,063 м/с способствует повышению стойкости труб против КР и не ухудшает стойкость против МКК и ПК.

2. Рекомендуется использовать индукционный нагрев токами частотой 2,4 кГц при проведении ТО тонкостенных труб из коррозионностойких сталей, в линиях изготовления труб способами аргонодуговой, электронно-лучевой, лазерной сварки.

1. Земзин В. Н., Шрон Р. З. Термическая обработка и свойства сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1978. — 367 с.

2. Гуляев Г. И., Войцеленок С. Л. Качество электросварных труб. — М.: Металлургия, 1978. — 256 с.
3. Структура и коррозия металлов и сплавов. Атлас. Справ. изд. / И. Я. Сокол, Е. А. Ульянов, Э. Г. Фельдгандлер и др. — М.: Металлургия, 1989. — 400 с.
4. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Оборонгиз, 1963. — 464 с.
5. Бородулин Г. М., Мошкевич Е. И. Нержавеющая сталь. — М.: Металлургия, 1973. — 320 с.
6. Разработка технологии и оборудования для индукционной термообработки стальных гофрированных труб из нержавеющей стали / О. В. Кроткова, В. И. Червинский, А. И. Ратникова и др. // Индукционный нагрев. — 2010. — № 3. — С. 27–34.
7. Головин Г. Ф., Зимин Н. В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1979. — 120 с.
8. Влияние индукционного нагрева на коррозионную стойкость тонкостенных труб из хромоникелевой стали / О. В. Кроткова, С. Г. Поляков, А. С. Письменный и др. // Сталь. — 2011. — № 3. — С. 57–60.
9. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
10. Электротермическое оборудование. Справочник / Под ред. А. П. Альтагузена. — М.: Энергия, 1980. — 416 с.

Поступила в редакцию 01.04.2013

## Херсонский судостроительный завод спустил на воду второй полнокомплектный танкер

Судно предназначено для морской и смешанной («река–море») транспортировки сырой нефти и нефтепродуктов, в том числе бензина, без ограничения по температуре вспышки, с обеспечением перевозки груза с поддержанием температуры 60 °С. Обеспечивается одновременная перевозка двух сортов груза.

Совладелец компании SVL Артемий Осипьян выразил благодарность коллективу завода за высокое качество выполнения судостроительных работ: «Качественное выполнение нашим предприятием заказа на строительство серии танкеров проекта RST 27 с опережением контрактных сроков дает заводу уверенность в получении новых масштабных контрактов. Уже в ближайшее время мы рассчитываем значительно расширить наш портфель. При этом полнокомплектное судостроение остается приоритетным направлением деятельности предприятия», — отметил в ходе торжественного митинга, посвященного спуску судна, генеральный директор ХСЗ Олег Федак.

Справка. Контракт на строительство трех полнокомплектных танкеров «река–море» был подписан между ХСЗ и мальтийской компанией SVL в 2011 г. Проект разработан Морским инженерным бюро (МИБ, г. Одесса). Габаритная длина судна — 140,85 м, ширина — 16,86 м, высота борта — 6 м. Вместимость шести грузовых танков и двух отстойных танков 8100 куб. м, дедейт в море — 6980 т при осадке 4,20 м, в реке при осадке 3,60 м — 5378 т, скорость в эксплуатации — 10 узлов.

При проектировании танкера учтены специальные требования нефтяных компаний, а также соблюдены дополнительные экологические ограничения класса Российского морского Регистра судоходства «ЭКО Проект» (ЕСО-S). Танкеры удовлетворяют габаритам Волго-Донского судоходного канала и Волго-Балтийского пути. Судна полностью соответствуют новым международным требованиям.

