

УДК 536.212.2

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПАТРУБКОВЫХ ЗОНАХ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ*Романов А.Н., Тутукин А.В., Огнерубов Д.А. (ОАО «НИКИЭТ», г. Москва)*

Основной причиной развития дефектов в околошовной зоне сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 контура многократной принудительной циркуляции РБМК-1000 является склонность металла к межкристаллитному коррозионному растрескиванию под напряжением. Дефекты по этому механизму развиваются, в основном, вдоль линии сплавления, где остаточные растягивающие напряжения достигают предела текучести и возможна сенсibilизация металла околошовной зоны. Высокотемпературная термическая обработка позволяет уменьшить остаточные напряжения и устранить сенсibilизацию металла околошовной зоны. Ее возможно применять на сварных соединениях типа труба—патрубок. Возникающие при высокотемпературной термической обработке температурные поля могут оказать негативное воздействие на соседние элементы конструкции, такие, как гибы, разнородные сварные соединения, внутрикорпусные сварные соединения и детали.

В настоящей статье рассмотрено распределение температуры в месте приварки трубопроводов Ду300 к патрубковым зонам оборудования и арматуры при высокотемпературной термической обработке сварных соединений при 900 °С, выдержке 1 ч.

Трубопроводы Ду300 изготовлены согласно ТУ14-ЗР-197—2001 из стали марки 08Х18Н10Т и имеют следующие габаритные размеры: внешний диаметр 325 мм, условный 293 мм, толщина стенки 16 мм. Патрубковые зоны оборудования состоят из патрубка оборудования, переходного патрубка и рубашки. Патрубок оборудования изготовлен из стали марки 22К и имеет следующие габаритные размеры: внешний диаметр 350 мм, условный 298 мм, толщина стенки 26 мм. Переходный патрубок из стали марки 08Х18Н10Т имеет сложную геометрию перехода с внешнего диаметра 350 мм на 325 мм и постоянный условный диаметр 293 мм. Рубашка толщиной 2,5 мм из стали марки 08Х18Н10Т

вставляется в патрубок оборудования, после данной операции условный диаметр патрубка оборудования составляет 293 мм. Патрубок оборудования и переходный патрубок образуют разнородное сварное соединение через переходный слой, выполненный электродом 309L-16. При температуре разнородного сварного соединения выше температуры эксплуатации возможны остаточные напряжения вследствие разных коэффициентов термического расширения основного и наплавленного металлов, усугубление коррозионной стойкости, сенсibilизация металла рубашки из-за разницы электрохимических потенциалов в контакте разнородной стали, образование вторичных фаз и обезуглероженного слоя в результате проходящих диффузионных процессов.

Трубопроводы Ду300 соединяются с поворотными участками (гибами), патрубковыми зонами оборудования (всасывающего и нагнетательного коллекторов, сепаратора пара) и арматурой (задвижками и обратными клапанами). Патрубковые зоны оборудования и арматуры на разных блоках имеют различную геометрию и размеры, не всегда изготовлены из стали аустенитного класса и могут иметь внутрикорпусные детали, которые крепятся сварным методом. На гйбах возможны растягивающие напряжения по большему и сжимающие по меньшему радиусу. При попадании металла гйба в температурный интервал 650—750 °С возможны сенсibilизация металла и развитие дефектов при эксплуатации по механизму межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением. При высокотемпературной термической обработке швов приварки трубопроводов Ду300 к патрубкам арматуры в результате разных коэффициентов термического расширения возможно заклинивание арматуры, помимо прочих вредных факторов, как у разнородного сварного соединения. Однородные сварные соединения, полученные посредством дуговой сварки, всегда имеют остаточные напряжения, и при их попа-

дании в температурный интервал 650—750 °C возможно приведение металла околошовной зоны сварного соединения в сенсibilизированное состояние. Таким образом, температура на разнородном сварном соединении (оно относится к оборудованию), как и в месте крепления внутрикорпусных деталей в арматуре, не должна превышать температуру эксплуатации, температура в местах гибов и однородных сварных соединений, в том числе внутрикорпусных (ограничительная вставка) — максимальную температуру эксплуатации.

Согласно действующим нормам и правилам максимальная температура оборудования не должна превышать 275 °C, арматуры — 285 °C, для стали марки 08X18H10T максимальная температура эксплуатации составляет 600 °C. Для случая превышения температуры на соседних элементах конструкции при высокотемпературной термической обработке при 900 °C, выдержке 1 ч выполнен расчет с дополнительным теплоотводом путем использования «холодильника».

Были выбраны случаи наиболее близкого расположения разнородного сварного соединения к шву приварки трубопровода Ду300 к переходному патрубку оборудования. Для расчета выбраны патрубковая зона всасывающего коллектора I-PO3-2056, II-PO3-2056, задвижка типа C23 201 0160-300, обратный клапан с фиксирующимся затвором типа 130.20.000 и обратный клапан типа C 20 401 0160. Распределение температуры при высокотемпературной термической обработке индукционным методом нагрева рассчитывали для двух случаев: нагрев 900 °C, выдержка 1 ч однородного аустенитного сварного соединения с захолаживанием металла смежного разнородного сварного соединения до температуры, не превышающей 275 °C, и без захолаживания. В первом случае использовали модель с установкой на разнородное сварное соединение устройства, обеспечивающего дополнительный теплоотвод. Корпус устройства выполнен из меди, дополнительный теплосъем обеспечивает проточная вода температурой не выше 50 °C. С учетом термического сопротивления в месте контакта устройства, обеспечивающего дополнительный теплоотвод, с патруб-

ком коэффициент теплопередачи к воде принимался равным 130 Вт/(м²·°C) при средней скорости течения воды в контуре устройства ~1 м/с.

Расчетное моделирование температурных полей в патрубковой зоне выполнено с помощью комплексов ANSYS CFX и ANSYS FLUENT [1]. Показано, что вблизи места расположения индукционного нагревателя наблюдается высокий градиент температуры [2, 3]. Распределение температуры под индуктором не моделировали.

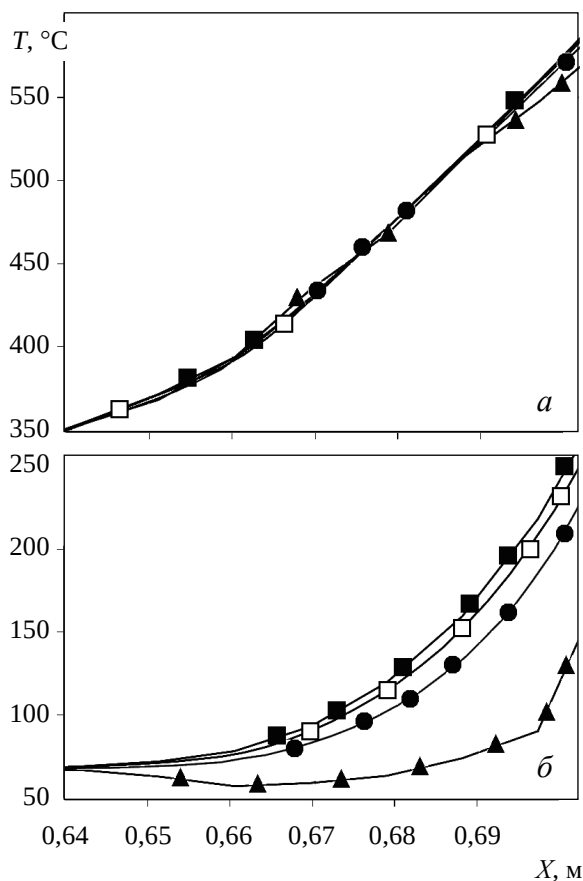
Была разработана пространственная геометрическая модель части патрубка и коллектора. При создании пространственной модели было сделано упрощение геометрии, поскольку условия теплоотвода и геометрия осесимметричны — расчетная сетка построена только для половины патрубка [4]. Устройство, обеспечивающее дополнительный теплоотвод, располагается на горизонтальной части переходного патрубка с внешним диаметром 350 мм над местом начала усиления разнородного сварного соединения. На наружной поверхности трубопровода и переходного патрубка выбраны условия, близкие к естественной конвекции. Коэффициент теплоотдачи 7 Вт/(м²·°C) рассчитан по числу Нуссельта для свободной конвекции на горизонтальной трубе $Nu = 0,48Ra^{0,25} \pm 15\%$, где Ra — число Релея [5].

Таким образом, принят повышенный коэффициент теплообмена на наружной поверхности по сравнению с расчетным при естественной конвекции без учета теплообмена излучением. В этих условиях наиболее консервативной оценкой условий теплообмена на наружной поверхности трубопровода Ду300 и переходного патрубка будут условия свободной конвекции. Эта оценка является консервативной, поскольку на коэффициент теплоотдачи будет влиять, помимо свободной конвекции, и теплообмен излучением. Это приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности, что и нашло отражение в немного повышенном — примерно на 25% по сравнению с расчетным коэффициентом теплоотдачи.

Распределение температуры в разнородном шве при высокотемпературной термической обработке в месте приварки трубопровода Ду300 к

переходному патрубку всасывающего коллектора по режиму нагрев до 900 °С, выдержка 1 ч показано на рис. 1. Термическая обработка шва приварки трубопровода Ду300 к переходному патрубку без дополнительного теплоотвода приводит к температуре разнородного сварного соединения до 580 °С. При дополнительном теплоотводе температура на наружной поверхности в зоне разнородного сварного соединения составляет 125 °С, на внутренней поверхности 247 °С.

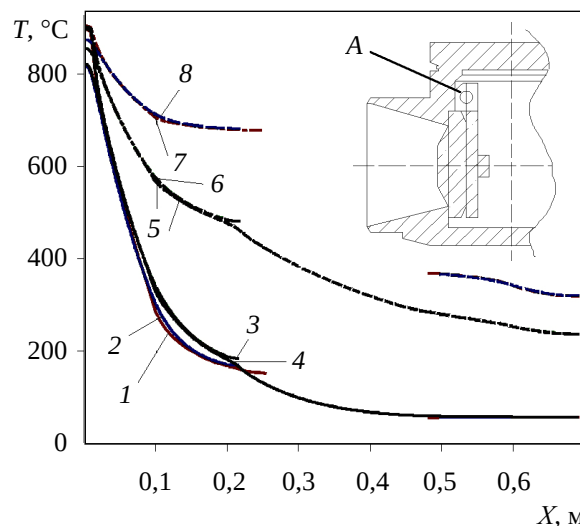
Для расчета распределения температуры шва приварки трубопровода Ду300 к патрубку арматуры использовались те же значения конвекции. Расчет для арматуры проводили для двух случаев: при нагреве 900 °С, выдержке 1 ч шва приварки трубопровода Ду300 к патрубку оборудования без дополнительного теплоотвода и в условиях естественной конвекции до достижения стационарного режима теплообмена.



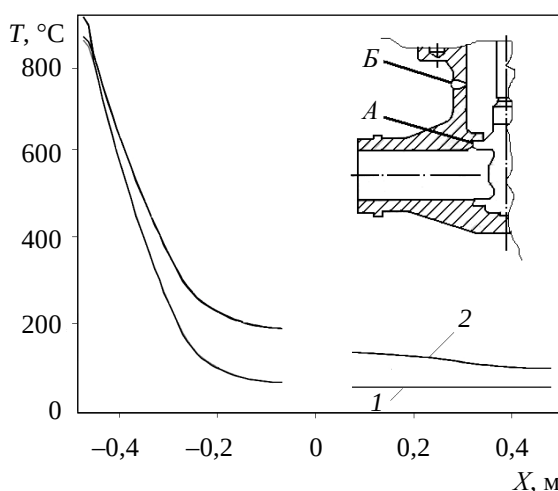
Р и с. 1. Температура шва приварки трубопровода Ду300 к переходному патрубку всасывающего коллектора при высокотемпературной термической обработке (а) и с дополнительным теплоотводом (б): ■, □, ●, ▲ — радиус от оси трубопровода 148, 155, 162, 175 мм соответственно

Для расчета распределения температуры в месте приварки трубопровода Ду300 к патрубку обратного клапана типа С 20 401 0160 была разработана двумерная модель с упрощенной геометрией. Поскольку длина патрубковых зон обратного клапана составляет ~95 мм, дополнительный теплоотвод посредством устройства, ширина которого предполагалась равной 150 мм, обеспечить нельзя, была определена возможность высокотемпературной термической обработки. Для этого крайне важно знать температуру в месте крепления внутрикорпусных деталей — она не должна превысить 285 °С. Точка А на рис. 2 соответствует месту крепления внутрикорпусных деталей. Температура в этой точке за 1 ч термической обработки в условиях теплообмена при свободной конвекции меньше температуры эксплуатации без дополнительного теплоотвода и составляет 156 °С. Однако при увеличении времени термической обработки или отклонении от соблюдения ее технологии она может составить 670 °С.

По размерам задвижки Ду300 типа С23 201 0160-300, смонтированной на 5-м энергоблоке Курской АЭС, была разработана упрощенная трехмерная модель — моделировался только ее корпус. Точка А на рис. 3 соответствует месту крепления внутрикорпусных деталей, точка В — сварному соединению. При теплообмене в условиях свободной конвекции за 1 ч



Р и с. 2. Распределение температуры на обратном клапане типа С 20 401 0160 при высокотемпературной термической обработке 1 ч (1—4) и неограниченное время (5—8): 1—8 — 166, 150, 150, 166, 166, 150, 166, 150 мм над осью обратного клапана соответственно



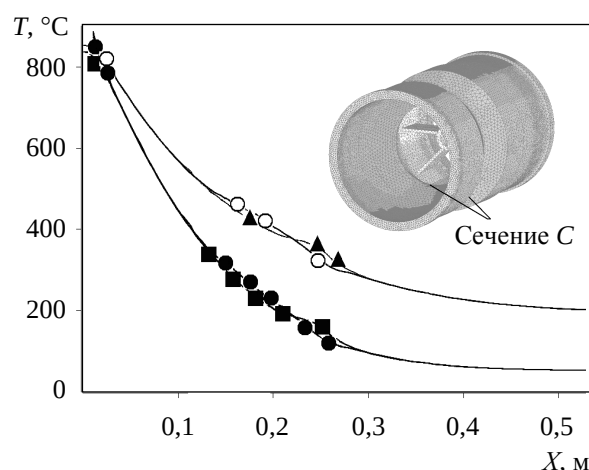
Р и с. 3. Распределение температуры на задвижке типа С23 201 0160-300 при высокотемпературной термической обработке 1 ч (1) и неограниченное время (2)

высокотемпературной термической обработки температура металла обратного клапана не превысит 285 °С в точках А и В. Расчет для условий естественной конвекции до достижения стационарного режима теплообмена задвижки также показал, что температура в этих точках не превысит температуру эксплуатации.

Для обратного клапана с фиксирующимся затвором типа 130.20.000 была построена упрощенная трехмерная модель — направляющее устройство представлено в упрощенном виде. Расчеты показали, что за 1 ч высокотемпературной термической обработки при теплообмене в условиях свободной конвекции температура металла обратного клапана не превысит 285 °С в сечении С — месте крепления к корпусу внутренних деталей (рис. 4). Для условий естественной конвекции до достижения стационарного режима теплообмена обратного клапана с фиксирующимся затвором расчет показал, что при необходимости можно вносить значительные изменения в режим высокотемпературной термической обработки.

Расчеты позволили разработать опытный образец устройства для дополнительного теплоотвода на участках патрубков оборудования.

В таблице приведена характерная температура в контрольных точках рассмотренных моделей: двух обратных клапанов и задвижки. Расчетами определены сварные соединения, высокотемпературная термическая обработка которых возможна и невозможна без дополнительного теплоотвода.



Р и с. 4. Распределение температуры на обратном клапане с фиксирующимся затвором типа 130.20.000 при высокотемпературной термической обработке в течение 1 ч наружной (■) и внутренней поверхности (●), неограниченного времени наружной (○) и внутренней поверхности (▲)

Расчетная температура в контрольных точках арматуры

Арматура	Контрольная точка	Температура, °С	
		$\tau = \infty$ с	$\tau = 3600$ с
Задвижка типа С23 201 0160-300	Точка А (рис. 3)	186,2	62
	Точка В (рис. 3)	159	52,5
Обратный клапан с фиксирующимся затвором типа 130.20.000	Поперечное сечение С (рис. 4)	370	179,6
Обратный клапан типа С 20 401 0160	Точка А (рис. 2)	672,5	156

Выполненные расчеты позволяют оценить возможность высокотемпературной термической обработки отремонтированных сварных соединений, где расстояние между элементами конструкции отличается от требований нормативно-технической документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSYS Help 14.5 к ANSYS CFX и ANSYS FLUENT, 2013.
2. Петухов Б.С., Поляков А.Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. М.: Наука, 1986.
3. Махеев М.А. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977.
4. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2001.

Поступила в Редакцию 21.10.13