

Кондратенко Александр Николаевич, к.т.н.
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПАРОВЫХ КОТЛОВ И ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Аннотация. В работе рассмотрены условия работы и напряженное состояние элементов паровых котлов и теплообменных аппаратов. Рассмотренные условия работы оказывают активное влияние на элементы проточной части и способствуют снижению их прочности и надежности при эксплуатации паровых котлов и теплообменных аппаратов. Поэтому для оценки надежной работы отдельных элементов паровых котлов и теплообменных аппаратов необходимо рассматривать их напряженное состояние в процессе эксплуатации, что позволяет обеспечить надежность паровых котлов и теплообменных аппаратов в теплоэнергетике.

Ключевые слова: Паровые котлы, теплообменные аппараты, прочность, надежность.

Условия работы элементов паровых котлов и теплообменных аппаратов определяются многими факторами, воздействующими на них в процессе эксплуатации. На элементы паровых котлов действует разность наружного и внутреннего давлений, динамические силы потока рабочего тела, разнородные вибрационные нагрузки. Трубки и коллекторы котлов, а также трубки теплообменных аппаратов и другие детали обогрываются неравномерно, в результате чего возникают температурные напряжения. Эти напряжения растут с увеличением градиента температуры, который особенно сильно изменяется при работе паровых котлов и теплообменных аппаратов на переходных режимах.

Неравномерность температуры элементов может дополнительно быть вызвана:

- периодическим включением сажеобдувочного устройства, работа которого резко изменяет аэродинамику и температуру потока;
- возможностью пульсации потока в прямоточных котлах;
- подачей в паровой коллектор котла с естественной циркуляцией относительно холодной воды и др.

Все это приводит к появлению перепадов температур, которые являются причиной возникновения дополнительных температурных напряжений.

Наконец, длительная эксплуатация стали при высоких температурах может вызвать в ней структурные изменения, к которым относятся сфероидизация и графитизация. Это приводит к изменению свойств стали и, как следствие, к дисперсному твердению или разупрочнению.

Важным фактором, оказывающим активное влияние на прочностное состояние элементов паровых котлов и теплообменных аппаратов при эксплуатации, являются коррозионные процессы. Наиболее активно коррозионные процессы протекают в элементах паровых котлов, где их активизации способствуют высокая температура и давление рабочего тела. По условиям протекания коррозионных процессов их можно разделить на следующие виды:

- кислородная коррозия в электролитах (коррозия металла при соприкосновении с водой, содержащей кислород);
- газовая (коррозия под действием продуктов сгорания);
- коррозия под напряжением (разрушение металла при одновременном воздействии коррозионной среды и механических повреждений);
- стояночная или атмосферная коррозия – во время изготовления или хранения котлов и теплообменных аппаратов.

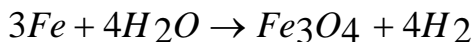


По месту протекания коррозионные процессы можно разделить на:

- коррозию внутренних поверхностей нагрева под действием воды и пара;
- коррозию внешних поверхностей нагрева со стороны газового потока.

Коррозия поверхностей нагрева под действием воды и пара может быть: водяная, кислородная, щелочная, межкристаллитная, подшламовая.

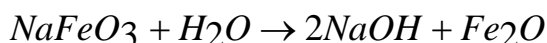
Водяная коррозия является результатом электрохимической реакции взаимодействия воды с металлом. Она протекает в соответствии с реакцией кислорода с железом:



Конечный продукт взаимодействия Fe_3O_4 (магнетит) образует на поверхности металла твердую, устойчивую, плохо-растворимую фазу в виде окисной пленки темного цвета. Эта пленка является в определенной степени защитной структурой, которая тормозит процесс коррозии стали.

Кислородная коррозия возникает при наличии в воде кислорода. Она проявляется в виде язв и питтингов на трубках. Главным образом, кислородная коррозия наблюдается в экономайзерах. При значительном содержании кислорода в воде кислородная коррозия может протекать в пароводяном коллекторе и опускных трубах парогенераторов с естественной циркуляцией. Величина кислородной коррозии пропорциональна содержанию в ней кислорода. Повышение давления, температуры и скорости циркуляции приводит к усилению процессов кислородной коррозии.

Щелочная коррозия возникает при высокой концентрации щелочи в воде, которая растворяет защитный слой магнетита (Fe_3O_4) и образует окись железа.



Кроме того, щелочь при высокой концентрации реагирует с железом



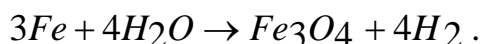
Межкристаллитная коррозия чаще всего проявляется в виде трещин, возникающих на развальцованных участках парообразующих труб и в трубных досках. Образующиеся трещины имеют разветвленную форму. Начальные участки трещин проходят между кристаллами. Появление межкристаллитной коррозии обусловлено содержанием концентрированного состава щелочи, а металл должен находиться под действием растягивающих напряжений, близких к пределу текучести. Механизм образования трещин можно объяснить следующим образом. Под действием высоких напряжений возникают коррозионные элементы (зерна кристаллов – катод, границы между ними – анод). Щелочной раствор разрушает границы зерен. Выделившийся водород реагирует с углеродом, сульфидами и другими включениями, образуя газообразные продукты. Последние слабо диффундируют в металл и создают дополнительные разрушающие напряжения, которые углубляют и расширяют трещины.

Борьба с межкристаллитной коррозией ведется по пути снижения напряжений и агрессивного действия воды (ведением фосфатно-нитратного режима обработки воды).

Подшламовая коррозия образуется в результате поступления продуктов коррозии питательного тракта в виде окислов железа и меди. Эти соединения отлагаются (прикипают) на наиболее напряженных участках парообразующих труб. Под прикипевшим шламом происходит разрушение защитной окисной пленки, и возникают анодные участки. Остальная часть трубы становится катодом. Повреждение металла труб носит вид раковин с резко очерченными краями. Поэтому подшламовую коррозию часто называют ракушечной. Для предотвращения подшламовой коррозии необходимо сокращать количество окислов железа и меди в воде.



Пароводяная коррозия наблюдается в пароперегревателе и парообразующих трубах при температуре стенки до 773 К. В этом случае сталь легко взаимодействует с парами воды с образованием водорода:

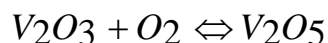
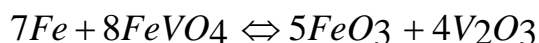
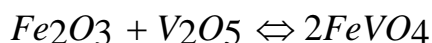
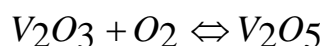
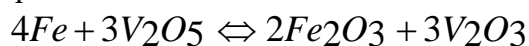


Часто этот процесс сопровождается обезуглероживанием, что снижает твердость и прочность поверхностных слоев. Для предупреждения подобных явлений необходимо обеспечить нормальную циркуляцию и отсутствие перегрева металла.

Коррозия поверхностей нагрева со стороны газового тракта высоко- и низкотемпературной.

Высокотемпературная коррозия свойственна поверхностям нагрева топки котла. В продуктах сгорания топлива котла содержится небольшое количество золы 0,1–0,15 %. Абсолютное ее значение, поступающее за сутки в газоход котла производительностью 70 тонн пара в час, составляет ≈ 120 кг. В состав золя мазутов входят около 30 различных солей и окислов металлов.

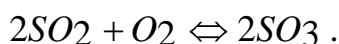
Среди них такие агрессивные как пятиокись ванадия, сернистые соединения, хлориды и соединения натрия. Эти вещества образуют сложные многокомпонентные системы с температурой плавления 800– 2300 К. Наиболее опасной составляющей является пятиокись ванадия, которая вступает в реакцию с железом:



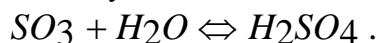
Таким образом, пятиокись ванадия окисляет металлы, а сама практически не расходуется (служит катализатором). При наличии V_2O_5 золотые отложения образуют на высокотемпературных поверхностях нагрева липкую пленку, на которой удерживаются твердые частицы, что приводит к быстрому заносу пароперегревателей.

Интенсивность ванадиевой коррозии усиливается при повышении начальной температуры газа, а также содержанием таких элементов как Na_2SO_4 и SO_2 .

Низкотемпературная коррозия протекает в газоходах или на экономайзерных поверхностях нагрева. Мазуты, сжигаемые в топке котла, содержат 0,5–4,5 % серы. При сжигании такого топлива происходит окисление серы и образование сернистого ангидрида SO_2 , часть которого (до 10 %) превращается в серный ангидрид вследствие дальнейшего окисления избыточным кислородом



Эта реакция протекает по всему газоходу. Взаимодействуя с парами воды, серный ангидрид превращается в серную кислоту



При охлаждении продуктов сгорания в газоходе или экономайзере происходит конденсация паров серной кислоты на относительно холодных поверхностях нагрева. Начало конденсации зависит от количества серы и коэффициента избытка воздуха. Серная кислота вступает в реакцию с металлом, и наступает процесс коррозии.

При остановке котла в полости коллекторов проникает кислород воздуха, который вступает в реакцию с металлом, образуя на поверхности язвы. Стояночная коррозия по размеру и скорости значительно превышает коррозию во время работы.



Все рассмотренные факторы (силовые, температурные, коррозионные) оказывают активное влияние на элементы проточной части и способствуют снижению их прочности и надежности при эксплуатации паровых котлов и теплообменных аппаратов. Поэтому для оценки надежной работы отдельных элементов паровых котлов и теплообменных аппаратов необходимо рассмотреть их напряженное состояние в процессе эксплуатации.

Напряженное состояние элементов паровых котлов и теплообменных аппаратов определяется многими факторами, к основным из которых относятся давление и температура.

Для определения напряженного состояния коллектора (труб) парового котла или корпуса теплообменного аппарата можно воспользоваться достаточно хорошо разработанной теорией тонких оболочек. Однако для приближенной оценки напряженного состояния коллектора (корпуса теплообменного аппарата) или определения толщины стенки по заданному напряжению можно использовать довольно простые формулы, полученные на основе методов «сопротивления материалов». Эти формулы дают возможность с достаточной степенью точности определить необходимую толщину стенки при заданных параметрах рабочего тела и геометрические размеры коллектора или корпуса теплообменного аппарата. Напряженное состояние цилиндрических сосудов под давлением может быть определено исходя из сил, действующих в осевом, тангенциальном и радиальном направлениях.

Список литературы:

1. Багров И. В. Надежность технических систем. - СПб.: СПГУТД, 1999. - 99 с. . – Текст: непосредственный.
2. Труханов В.М., Надежность в технике - М.: Машиностроение, 1999. - 597 с. – Текст: непосредственный.
3. ГОСТ 27.002-15. Надежность. Термины и определения. М., Стандартинформ, 2016. – Текст: непосредственный.

