

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОЖУХА ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЕМ ПРОЦЕССА РАЗОГРЕВА

Одной из главных характеристик надежности и промышленной безопасности сооружений доменного комплекса является прочность кожухов технологических агрегатов, в т.ч., воздухонагревателей. Именно на них в первую очередь сказываются изменения эксплуатационных параметров, нарушения технологических процессов, различного рода нештатные ситуации и пр.

Значительное количество простоев доменных печей происходит по причине именно их повреждений. Так, согласно [1] количество простоев, связанных с кожухами воздухонагревателей, составляет 8 % от общего числа простоев, а по данным [2] увеличение частоты простоев на 5 % снижает удельную производительность печи на 25–30 %.

Это делает проблему длительной прочности кожухов воздухонагревателей одной из приоритетных, требующей большого внимания к критериям, обеспечивающим их надежную работу, главные из которых следующие:

- качество стали кожуха;
- температура кожуха в период эксплуатации;
- уровень напряженно-деформированного состояния кожуха как в период разогрева, так и во время эксплуатации.

Соответствие этих критериев требованиям прочности и надежности дает возможность кожухам нести разнообразную нагрузку во все периоды работы, включая пусковые и пиковые ситуации при нарушении эксплуатационных режимов.

Воздухонагреватель представляет собой цилиндрический сосуд, по периферии которого располагается огнеупорная кладка, а внутреннее пространство заполняется т.н. насадкой, состоящей из пустотных огнеупорных блоков, через которые проходит холодный воздух. Горение газового топлива происходит в отдельной камере, расположенной несимметрично в боковой части внутреннего объема агрегата (рис. 1).

Эта схема воздухонагревателя является классической и со многими усовершенствованиями широко применяется в промышленности.



А.Е. Любин
генеральный директор
корпорации «Промстальконструкция»
(г. Днепропетровск),
к.т.н.

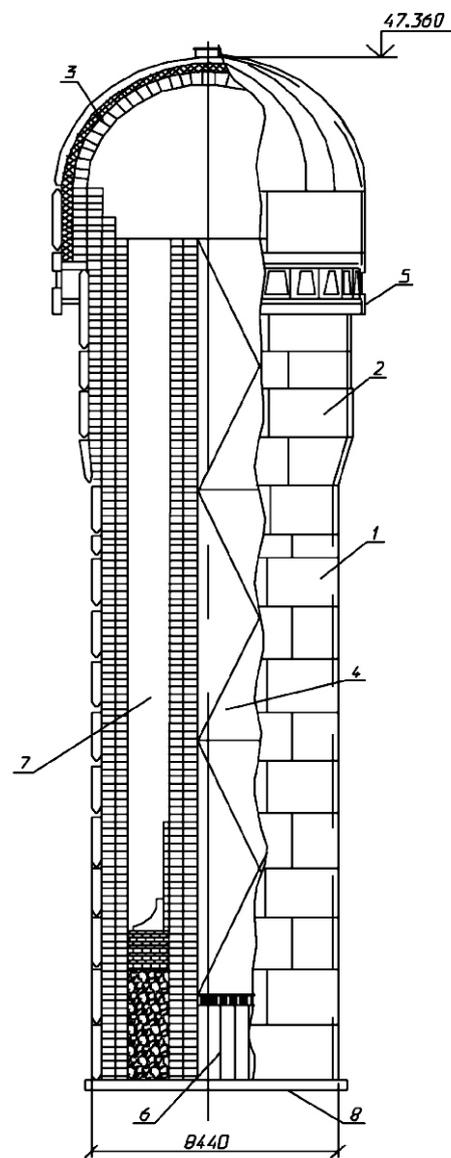


Рис. 1. Высокотемпературный воздухонагреватель:

1, 2 – кожух в низкотемпературной и высокотемпературной зонах соответственно; 3 – кладка купола; 4 – блоки насадки; 5 – кольцевая балка для опирания кладки купола; 6 – поднасадочное устройство для опирания блоков насадки; 7 – камера горения; 8 – днище

Воздухонагреватель решен в виде многослойной оболочки с неоднородными слоями – «кожух – компенсационный слой – футеровка», каждый из которых играет определенную роль:

- футеровка защищает кожух от воздействия высоких температур и, одновременно, создает одну из основных нагрузок на него, вызванную ее термическим расширением;
- компенсационный слой позволяет радиальное и вертикальное расширение футеровки, дает ей необходимую свободу, снижая тем самым ее механическое воздействие на кожух;
- кожух обеспечивает герметичность и воспринимает все виды нагрузок, основными из которых являются избыточное внутреннее давление и воздействие футеровки от ее термического расширения, а также создает в ней сжимающие усилия, необходимые для предотвращения ее преждевременного растрескивания.

Технологический процесс, происходящий в воздухонагревателе, создает весьма сложные специфические условия работы для кожуха и других элементов, входящих в состав этой многослойной конструкции.

Воздухонагреватель работает циклично. Цикл начинается с нагрева насадки горячими газами. Образующиеся нагретые продукты поднимаются вверх по камере горения, проходят подкупольное пространство и под действием тяги дымовой трубы устремляются вниз по каналам насадки, нагревая их. Охлажденные после прохода по каналам насадки продукты горения с максимальной температурой 400 °С выходят из воздухонагревателя через дымовые штуцера обычно в дымовой боров или в отдельный дымопровод, а затем через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

После достижения куполом заданной температуры нагрев заканчивается и воздухонагреватель ставится на «дутье». Прекращается горение газа и в каналы нагретой насадки подается холодный воздух. Поднимаясь по ним вверх, он нагревается, проходит наиболее нагретую зону – подкупольное пространство, где изменяет направление движения, опускается по камере горения, выходит из нее и направляется в доменную печь.

Футеровка периферийных стен при нагревании не может свободно расширяться, пос-

кольку ее многослойная конструкция уложена вплотную к стальному кожуху. Так как кожух в большой степени защищен от нагревания теплоизоляционным материалом и частично огнеупорной кладкой, при повышении температуры внутри воздухонагревателя его диаметр за счет теплового расширения увеличивается незначительно. Огнеупорная кладка нагревается до высокой температуры, и хотя она обладает меньшим, по сравнению с кожухом, коэффициентом теплового расширения, ее размеры существенно увеличиваются. Этому увеличению размеров футеровки препятствует кожух, вызывая радиальное силовое взаимодействие между кожухом и футеровкой по поверхности контакта, в результате чего кожух оказывается растянут, а футеровка сжата.

Одновременно с температурным радиальным увеличением размеров происходит расширение и в меридиональном (вертикальном) направлении. При этом перемещения футеровки препятствуют силы трения, возникающие на поверхности контакта футеровки и кожуха, которые увеличиваются по мере увеличения радиальных сил. В результате действия сил трения кожух в меридиональном направлении также растянут, а основная часть футеровки также сжата.

Величина и распределение сил трения, а, следовательно, и вызванные ими меридиональные напряжения зависят от тех же параметров, что и кольцевые (радиальные) усилия, а также от сил трения между элементами конструкции.

На величину напряжений также влияют свойства материалов футеровки – величина модуля упругой пластичности, коэффициент линейного расширения, величина усадки и ползучести кладки в функции от температуры, давления и времени.

Относительно кожухов воздухонагревателей серьезной проблемой является их локальный перегрев и возникновение «горячего пятна», приводящих к появлению трещин в растянутой зоне футеровки, проникновению через них горячего воздуха и снижения характеристик сопротивления кожуха хрупкому трещинообразованию – развитию в металле при температурах 300...500 °С тепловой хрупкости в процессе эксплуатации [3].

По мере увеличения степени охрупчивания стали резко уменьшается критический размер

(глубина) трещины, вызывающей хрупкое разрушение листовой футерованной конструкции. Так, для кожуха воздухонагревателя, изготовленного из стали марки 09Г2С, критический размер трещины в стыковом сварном соединении толщиной 14 мм равный 32 мм снижается до 2 мм после охрупчивания на 62 °С [4, 5, 6].

Если в применяемых конструкциях футеровки не обеспечивается обжатие всех ее окатов, то окаты, которые расположены ближе к кожуху, зачастую оказываются растянутыми, и в кладке, плохо воспринимающей растяжение, появляются неплотные швы, нарушающие ее целостность.

В период нормальной эксплуатации при циклической работе воздухонагревателя в режимах «дутье – нагрев» возможно дальнейшее раскрытие щелей. Это связано с тем, что при постановке воздухонагревателя на дутье и переводе на постоянный эксплуатационный режим холодный воздух, подаваемый в поднасадочное устройство, проходя через насадку и камеру горения, нагревается до 1200–1400 °С. К концу периода дутья температура купола снижается на 100–150 °С.

Вследствие изменения температуры внутренних окатов футеровки (а, следовательно, изменения величины их термического расширения) происходят периодические взаимные смещения растянутых частей футеровки. При неудачном выборе материалов или неоптимальном конструировании пакета чередующихся слоев футеровки под влиянием циклических периодов нагрева и дутья происходит измельчение и деградация свойств деформативных материалов и, соответственно, раскрытие щелей. Через образовавшиеся в кладке и компенсационном слое пустоты горячие газы и воздух проникают к кожуху.

Это приводит к местному повышению температуры кожуха в период нагрева и его охлаждению во время дутья, что вызывает циклические изменения напряжений, приводящие к малоцикловой усталости и возможным последующим разрушениям.

Таким образом, прочность и долговечность кожуха воздухонагревателя определяются двумя факторами:

- напряженно-деформированным состоянием кожуха и футеровки как в первоначальный период разогрева, так и в процессе эксплуатации;

- надежностью защиты кожуха от проникновения горячих газов, предотвращающей циклические изменения температуры кожуха и его перегревы.

Экспериментальные исследования работы воздухонагревателей позволили выделить две стадии их напряженно-деформированного состояния – период разогрева при вводе в эксплуатацию и период нормальной эксплуатации.

На *первой стадии* при разогреве холодного аппарата до рабочей температуры происходит постепенный нагрев слоев футеровки стен, насадки и купола, сопровождающийся их термическим расширением и соответствующим ростом напряжений в кожухе. Силы взаимодействия, распределенные по поверхности контакта периферийной футеровки стен и кожуха, сжимают футеровку и растягивают кожух.

Величина сил взаимодействия и возникающих напряжений в кожухе и футеровке зависят от материалов, примененных для кладки стен, температуры нагрева, конструкции и размеров всех элементов, образующих кожух и футеровку.

Продолжительность этой стадии связана со временем стабилизации температуры по высоте и толщины футеровки периферийных стен.

Вторая стадия характерна снижением уровня напряжений по сравнению с уровнем, достигнутым к концу первой стадии в результате их релаксации, вызванной заполнением зазоров и связанной с этим свободой расширения футеровки, а также пластическими деформациями и ползучестью ее материалов.

Анализ технических решений и имеющиеся результаты экспериментальных исследований действующих воздухонагревателей показали, что преобладающее влияние на уровень напряженно-деформированного состояния оказывает термическое расширение футеровки. При недостаточной его компенсации возникают недопустимо высокие усилия, значительно снижающие долговечность кожуха и футеровки.

В футеровке высокотемпературных воздухонагревателей, где широко применяется высокоплотный малоразрыхляющийся динасовый кирпич, сжимающие напряжения при начальном разогреве достигают 7 МПа, что в ряде случаев приводит к его растрескиванию и повреждению. С другой стороны, свободное деформирование нагретого кирпича приводит к тому, что отдельные слои футеровки оказываются не

обжаты кожухом, что вызывает невоспринимаемые ею растягивающие усилия и, как следствие, появление трещин.

Это способствует проникновению горячего воздуха к кожуху, его локальным перегревам и возникновению на кожухе «горячего пятна». При таких воздействиях даже большая толщина кожуха не предохраняет кожух воздухонагревателя от разрушения.

В связи с этим, определяющую роль в обеспечении уравновешенной взаимосвязи между кожухом и футеровкой, исключения растянутых зон футеровки, уровня напряженного состояния в кожухе играют компенсационные зазоры – их величина и физико-механические свойства материалов их заполнения, компенсирующие основную часть термического расширения.

В современных воздухонагревателях устраиваются зазоры, заполняемые деформативными материалами или выгорающими материалами – картоном, опилками, деревом и кольцевые воздушные зазоры. Слишком большие или неправильно расположенные компенсационные зазоры приводят к недостаточному обжатию футеровки, образованию щелей и ее расстройству, являющемуся причиной циклических перегревов кожуха, а иногда и обрушения футеровки.

Аналитические проработки вопросов прочности конструкций воздухонагревателей показывают, что могут быть осуществлены конструктивные решения кожуха и футеровки с обжатием всех ее слоев, обеспечивающие ее плотность как во время разогрева, так и дутья. При этом благодаря правильному подбору компенсационных слоев на кожух и кладку могут передаваться сравнительно небольшие нагрузки.

Здесь необходимо иметь в виду, что даже большая толщина кожуха воздухонагревателя не предохраняет его от разрушения, если возможны циклические местные нагревы кожуха горячим воздухом, проникающим через кладку.

Большую роль в решении проблемы компенсации термического расширения футеровки и, тем самым, снижения нагрузки на кожух сыграло широкое применение для заполнения кольцевых зазоров матов на каолиновой основе для высокотемпературной зоны и на асбестово-вермикулитовой – для низкотемпературной. По данным проведенных исследований [7], максимальные значения сжимаемости и коэффици-

енты возвратимости матов на каолиновой основе в виде термообработанных плит МКРП-340 равны соответственно 58 и 0,64 %. Это свидетельствует об удовлетворительных деформативных качествах плит, более эффективных по сравнению с материалами, ранее применявшимися для периферийной футеровки воздухонагревателей.

В воздухонагревателях с материалами низкой деформативности, заполняющими компенсационные зазоры, имела место и третья стадия, когда в каждом последующем межремонтном периоде наблюдалось новое повышение уровня напряженного состояния кожуха.

Объяснением этому могут быть свойства волокнистых материалов, заполняющих компенсационные зазоры до применения минеральных матов, осыпаться и уплотняться, снижая при этом собственную деформативность и, следовательно, способность компенсировать тепловое расширение огнеупорных окатов футеровки.

Кроме того уровень напряжений в кожухе зависит от его температуры как функции температуры наружного воздуха и от свойств компенсационного зазора. Так, известно, что в летнее время температурное давление кладки на кожух фактически отсутствовало и кожух работал только на давление дутья. С понижением температуры в зимнее время в кожухе возникали дополнительные напряжения, вызванные распором кладки, исчерпавшей, как и материал компенсационного зазора, свою деформативность.

В среднем, при понижении температуры кожуха на 15–20 °С кольцевые напряжения в нем увеличиваются на 25–35 МПа.

Одной из основных особенностей кожухов воздухонагревателей является зависимость их надежности и долговечности от условий ввода в эксплуатацию. Эта взаимосвязь просматривается как при пуске новых агрегатов, так и после их капитальных ремонтов.

Следует отметить также зависимость физико-механических свойств огнеупоров от остановок агрегатов с остыванием футеровки и последующими повторными разогревами, а также от режима разогрева. Эти процессы существенно изменяют свойства огнеупоров, особенно, динасовых, снижая деформационные возможности компенсационных зазоров и, зачастую, практически полностью исключая повторную работу зазоров с выгорающими прокладками.

Для таких воздухонагревателей, вводимых в эксплуатацию после остановки и остывания футеровки, выбор оптимального режима разогрева становится еще более важен.

При вводе в эксплуатацию воздухонагреватели с новой футеровкой первоначально подвергаются сушке, а затем разогреваются для перевода на постоянный эксплуатационный режим.

Разогрев воздухонагревателя, характеризующийся интенсивностью подъема температуры футеровки, составом носителей тепла и местом их ввода в воздухонагреватель, а также организацией отвода продуктов сушки, оказывает существенное влияние на возникновение начальных повреждений огнеупорных конструкций воздухонагревателя. В этот период происходит постепенный нагрев слоев футеровки стен, насадки и купола до высоких температур, сопровождающийся ее термическим расширением.

Для кожухов воздухонагревателей условия разогрева и ввода в эксплуатацию агрегатов во многом определяют их общую надежность и долговечность эксплуатации. Основным критерий оптимального ввода агрегата в эксплуатацию состоит в рациональном регулировании технологических параметров на этом этапе, с целью оптимизации нагрузок и воздействий на кожух от футеровки как главных составляющих в общем напряженном состоянии.

Поскольку снизить нагрузки на кожух от воздействия футеровки можно только путем обеспечения компенсации ее температурных деформаций, основная задача состоит в том, чтобы разогрев и повышение эксплуатационных параметров работы агрегата – температуры и внутреннего давления – происходили последовательно, после реализации этих температурных деформаций футеровкой за счет имеющихся зазоров. Несоблюдение этого положения может привести к появлению чрезмерных нагрузок на кожух агрегата, высокому уровню напряжения, трещинообразованию и ограничению в дальнейшем его технологических параметров.

Соответствующее ведение технологического процесса, применение управляющих мер, направленных на снижение технологических параметров, и, тем самым, на исключение воздействий «пиковых» нагрузок на кожух позволяют обеспечить его надежность и долговечность, в т.ч. и при длительной эксплуатации.

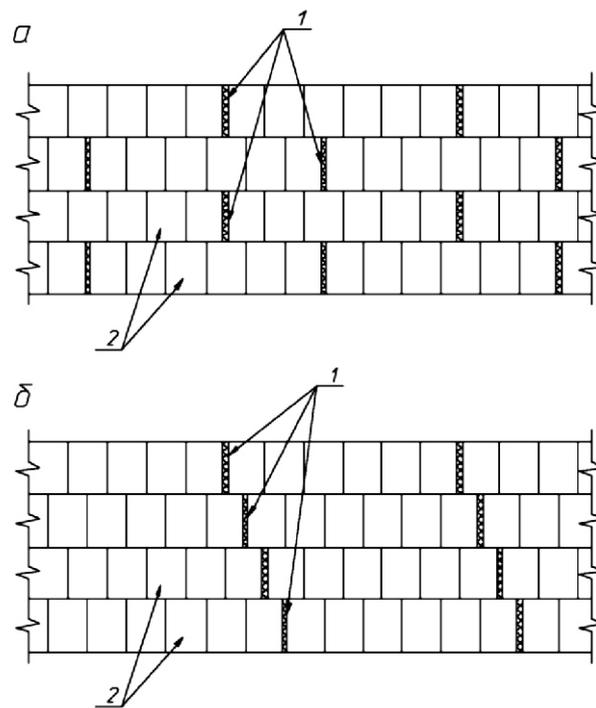


Рис. 2. Схема расположения выгорающих прокладок в зоне динасовых огнеупоров:
а – вариант I; б – вариант II;
1 – прокладки; 2 – огнеупорный кирпич

В частности, способ разогрева воздухонагревателя, характеризующийся интенсивностью подъема температуры футеровки, составом носителей тепла, местом ввода их в воздухонагреватель и организацией отвода продуктов сушки, оказывает существенное влияние на длительную прочность огнеупоров и возникновение начальных повреждений футеровки, которые при эксплуатации прогрессируют и приводят к сокращению сроков межремонтных периодов и снижению долговечности агрегата.

При термическом расширении футеровки в период разогрева, когда выгорающие материалы, заполняющие кольцевые зазоры, еще не выгорели и препятствуют этому расширению, появляются чрезмерные нагрузки на кожух и высокая степень сжатия кладки, что может привести к ее растрескиванию, последующему разрушению и, связанному с этим, проникновению горячего воздуха к кожуху.

С целью снижения нагрузок на кожух в период разогрева аппарата, в радиальные вертикальные швы кладки огнеупорной стены целесообразно устанавливать деревянные прокладки, которые в процессе разогрева выгорают, освобождая место для деформации кирпичей,

что позволяет снизить уровень напряжений в кладке. Так, при расчетных напряжениях, достигающих без установки прокладок 7 МПа, их применение позволяет снизить напряжения до 5 МПа (рис. 2), что в случае наблюдаемого нарастания напряжений в кожухе обеспечивает возможность температурного расширения кладки путем создания условий для ускоренного выгорания прокладок [8].

Для этого, при зафиксированном подъеме напряжений целесообразно прекратить дальнейший подъем температуры и поставить аппарат на «поддув». С этой целью при разогреве воздухонагревателя, футерованного в высокотемпературной зоне динасовыми огнеупорами, в графике разогрева, рассчитанном на 25 суток [9], после подъема температуры футеровки купола до 800 °С целесообразно предусмотреть выдержку не менее 48 часов с постановкой аппарата на «поддув».

Эти операции приводят к быстрому выгоранию прокладок и изменяют уровень напряженного состояния кожуха, существенно отличающегося от расчетного в меньшую сторону.

Остальная часть теплового расширения футеровки компенсируется деформацией кожуха и обжатием огнеупорных слоев футеровки.

Корректировка хода разогрева воздухонагревателя с целью снижения уровня первоначальных напряжений в кожухе и футеровке исключает начальные повреждения и позволяет обеспечить более высокую стойкость конструкций в процессе эксплуатации.

Аналогичная картина прослеживается и в поведении днища, уменьшение деформации которого позволяет повысить параметры дутьевого воздуха в процессе эксплуатации.

Приведенная взаимосвязь условий разогрева и ввода воздухонагревателей в эксплуатацию с их общей надежностью свидетельствует о целесообразности и возможности управления взаимодействием кладки и кожуха, что позволяет предотвратить разрушения футеровки и кожуха, увеличить рабочие параметры дутья, сократить время пуска агрегата и обеспечить его дальнейшую надежную эксплуатацию.

-
- [1] *Большаков В.И., Тубольцев Л.Г., Можаренко Н.М., Голубых Г.Н.* Проблемы промышленной безопасности при эксплуатации доменных печей. Материалы Научно-практической конференции в г. Днепропетровске. 14–16 мая 2008 г.
 - [2] *Н.М. Можаренко, Л.Г. Тубольцев, Г.Н. Голубых* Параметры промышленной безопасности работы доменных печей // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* – Вып. 16. – 2008. – С. 398–413.
 - [3] *Востров В.К.* Трещиностойкость и долговечность кожухов доменных печей и воздухонагревателей // *Пром. и гражд. стр-ство* – М.: Стройиздат. – 2007 – № 11.
 - [4] *Горицкий В.М., Шнейдеров Г.Р.* Особенности диагностирования технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей // *Пром. и гражд. стр-ство.* – М.: Стройиздат. – 1998. – № 5. – С. 11–13.
 - [5] *Грудев Т.Д., Востров В.К., Галыбин А.Н.* Трещинообразование в кожухах доменных печей и воздухонагревателей от локального нагрева // *Строительная механика и расчет сооружений.* – 1982. – № 1. – С. 21–22.
 - [6] *Любин А.Е., Иосилевич Е.С.* Современные тенденции развития конструктивных решений металлоконструкций доменной печи // *Тези доп. V міжнародна науково-технічна конференція «Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку»*, Киев, 19–22 вересня 2006 р. – 100 с.
 - [7] *Исследование свойств материалов. Разработка компоновочных решений и мероприятий по увеличению межремонтных периодов воздухонагревателей. Отчет о НИР № 4940.* Днепропетровск. ДнепроПСК. – 1990. – 173 с.
 - [8] *Любин А.Е., Шаломов Б.Я.* Работа воздухонагревателей в оптимизированном режиме. – М.: *Сталь. Металлургия.* – 1977. – № 1. – С. 25–27.
 - [9] *Инструкция по футеровке доменных печей и их вспомогательных устройств.* М.: «Металлургиздат», 1956. – 26 с.

Надійшла 10.07.2013 р.