

УДК 669.162.213

Проблемы обеспечения надежности кожухов доменных печей и воздухонагревателей

Любин А.Е., к.т.н.

Корпорация «Промстальконструкция», Украина

Анотація. Розглянуті питання міцності кожухів доменних печей і повітрянагрівачів та її зв'язок із технологічними процесами. Наголошується визначальний вплив параметрів роботи на всіх стадіях експлуатації, особливо на пусковому етапі, на міцність футерування і напружений-деформований стан кожухів. Наведені рекомендації щодо оптимізації умов уведення в експлуатацію агрегатів, що мінімізують дії на кожухи і забезпечують їх тривалу надійну експлуатацію.

Аннотация. Рассмотрены вопросы прочности кожухов доменных печей и воздухонагревателей и ее связь с технологическими процессами. Отмечается определяющее влияние параметров работы на всех стадиях эксплуатации, особенно на пусковом этапе, на прочность футеровки и напряженно-деформированное состояние кожухов. Приведены рекомендации по оптимизации условий ввода в эксплуатацию агрегатов, минимизирующие воздействия на кожухи и обеспечивающие их длительную надежную эксплуатацию.

Abstract. The problems concerning the durability of casings of blast-furnaces and air-heaters are considered in connection with the engineering processes. Defining influence of the operation parameters on the durability of the brick-lining and deflected mode of casings is marked at all stages of the service life, especially on the running-in stage. Recommendations are made concerning optimization of commissioning terms for aggregates to minimize affecting the casings and to provide their long-life reliable performance.

Ключевые слова: доменная печь, воздухонагреватель, кожух, футеровка, прочность, пусковой период, длительная эксплуатация, промышленная безопасность.

Одной из главных характеристик служебной надежности и промышленной безопасности сооружений доменного комплекса является прочность кожухов доменных печей и воздухонагревателей. Именно на них в большинстве случаев сказываются изменения эксплуатационных параметров, нарушения технологических процессов, различного рода нештатные ситуации и пр.

Значительное количество простоев доменных цехов происходит по причинам, связанным с повреждением кожухов агрегатов. Так, по данным [1], количество аварий, связанных с кожухами доменных печей, составляет 6 % от общего числа простоев и 8 %, связанных с кожухами воздухонагревателей, а по данным [2] увеличение частоты простоев на 5 % снижают удельную производительность печи на 25–30 %.

Поэтому, проблема надежности кожухов доменных печей и воздухо-нагревателей является приоритетной, в связи с чем большое внимание должно быть обращено на критерии, обеспечивающие их надежную работу, главные из которых следующие:

- качество стали;
- температура в период эксплуатации;
- уровень напряженно-деформированного состояния в период эксплуатации.

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

Большое влияние на надежность кожухов оказывают параметры и характер ведения технологического процесса. Имея в виду недостаточную формализацию действующих нагрузок, их, в большинстве случаев, случайный по величине и другим параметрам характер связи с технологическим процессом, его нарушение приводит к нестабильности напряженного состояния этих конструкций.

Для кожуха доменной печи это, в первую очередь, относится к работе системы охлаждения, когда выход из строя холодильников приводит к «прогарам» футеровки, дополнительным напряжениям в кожухе из-за его местных перегревов или локального охлаждения наружным поливом, периферийному или канальному ходу печи, «обрывам» зависшей шихты, и т. п.

В связи с этим очевидно, что собственно оболочки кожухов не в состоянии сами обеспечить надежную работу агрегатов. Не менее важна при этом роль сопутствующих элементов и процессов – системы охлаждения печи, футеровки, движения потока газов и пр.

По выводам [3] обеспечение надежности кожуха доменной печи является задачей многофакторной, решение которой связано с материалом кожуха, технологическими параметрами дутья, уровнем обогащения его кислородом, свойствами загружаемых в печь материалов, физико-механическими характеристиками материалов футеровки, типами примененных холодильников, работой системы охлаждения, стабильностью технологического режима и т. п.

Надежная эксплуатация и долговечность кожухов доменной печи и воздухонагревателей зависят не только от соответствия проекту технологических параметров и условий работы агрегатов, но и от эксплуатационных мероприятий, проводимых по результатам систематического наблюдения за конструкциями и контроля их технического и напряженного состояния.

Все эти факторы не носят стабильного характера и весьма трудно поддаются учету и теоретическому и расчетному анализу. Поэтому важнейшим направлением, обеспечивающим достаточную надежность конструкций, является контролируемая правильная эксплуатация всего агрегата. В сочетании с упомянутыми выше критериями она позволяет вести нормальный технологический процесс и исключить нештатные ситуации.

Проблема необходимости обеспечения надежности кожухов обостряется тем, что, кроме прямых затрат на ремонты, предприятия несут убытки от простоев агрегатов, а возможные аварии чреваты большими разрушениями с тяжелыми последствиями. Поэтому срок надежной эксплуатации связан с убытками предприятия вследствие аварийных ремонтов. Если учесть непрерывный характер доменного производства, то убытки в данном случае будут особенно велики.

В связи с прогрессирующим развитием технологических процессов доменного производства длительность эксплуатации агрегатов связана также с проблемой значительной разницы в сроках физической и моральной долговечности сооружений. И если срок физической долговечности кожухов определяется в среднем 50–60 лет, то моральная долговечность, как правило, не превышает 10–20 лет.

Для кожухов доменных агрегатов характерны следующие основные причины, влияющие на снижение физической долговечности конструкций:

- старение металла по причине образования свободного цементита при рекристаллизации, возникающей при нагреве конструкций до температуры 100–200 °С и более, возникающем в процессе эксплуатации. При этом происходит сильный рост зерен, снижающий механические характеристики стали, в том числе, и возникновение тепловой хрупкости;
- повреждения кожухов в процессе эксплуатации.

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

Обобщенный 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 основных 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 повышение эксплуатационных параметров работы агрегата – температуры и внутреннего давления – происходило последовательно, одновременно с реализацией этих деформаций футеровкой и выгорающими материалами заполнения кольцевых зазоров.

Несоблюдение этой последовательности может привести к появлению чрезмерных нагрузок на кожух агрегата, высокому уровню напряжения, трещинообразованию и ограничению в дальнейшем технологических параметров эксплуатации.

Такой принцип оптимизации нагрузок на кожухи характерен и для кожуха доменной печи и для кожуха воздухонагревателя.

В безопасности кожухов большую роль играет своевременность корректировки технологических параметров при задувке доменных печей, вводимых в эксплуатацию после капитального ремонта, особенно после капитального ремонта, выполненного без предварительного слива чугуна из ямы разгара лещади. Характер динамики напряженно-деформированного состояния кожуха лещади в этом случае зависит от сроков простоя печи на ремонте и объема оставшегося в яме разгара лещади печи не слитого чугуна.

В случае, если простой печи продолжался длительное время, достаточное для застывания оставшегося в яме разгара лещади чугуна (образования «козла»), и объем его велик, при повторной задувке печи после ремонта на кожух лещади будут действовать дополнительные нагрузки значительной величины, связанные с расплавлением и температурным расширением этого чугуна. Эти нагрузки действуют на протяжении всего периода до полного расплавления «козла» и без соответствующей контролируемой корректировки параметров технологического процесса задувки могут привести к превышению напряжениями в кожухе лещади предела текучести стали, что опасно возможным возникновением нештатных ситуаций, вплоть до разрушения кожуха и прорыва жидкого чугуна.

Соответствующее ведение технологического процесса с применением управляющих мер, направленных на исключение воздействий «пиковых» нагрузок на кожух, позволяет в такой ситуации обеспечить его надежность и долговечность, в том числе, и при будущей длительной эксплуатации.

Что касается кожухов воздухонагревателей, то здесь условия разогрева и ввода в эксплуатацию агрегатов в большой степени определяют их общую надежность и долговечность эксплуатации.

В частности, разогрев воздухонагревателя, характеризуемый 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 возможность возникновения начальных повреждений футеровки. Эти повреждения при дальнейшей эксплуатации прогрессируют и приводят к сокращению сроков межремонтных периодов и снижению надежности и долговечности агрегата.

При термическом расширении футеровки в период разогрева, когда выгорающие материалы, заполняющие кольцевые компенсационные 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.

В связи с этим, в случае наблюдаемого нарастания напряжений в кожухе, следует обеспечить возможность температурного расширения кладки путем создания условий для ускоренного выгорания прокладок, заполняющих компенсационные зазоры [4]. Для этого целесообразно прекратить дальнейший подъем температуры и поставить аппарат на так называемый «поддув», что приводит к быстрому выгоранию прокладок и, соответственно, снижает уровень напряженного состояния кожуха.

Корректировка хода разогрева воздухонагревателя с целью снижения уровня первоначальных напряжений в кожухе и футеровке и, тем самым, исключения начальных повреждений позволяет обеспечить более высокую стойкость конструкций в процессе эксплуатации.

Взаимосвязь условий ввода воздухонагревателей в эксплуатацию с их общей надежностью говорит о целесообразности и необходимости управления взаимодействием кладки и кожуха, что позволяет предотвратить разрушения футеровки и кожуха, увеличить рабочие параметры дутья, сократить время пуска агрегата и обеспечить его дальнейшую безаварийную эксплуатацию.

Надежность работы кожухов доменных печей и воздухонагревателей, как отмечалось, связана не только с нагрузками и воздействиями, но и, в значительной степени, с эксплуатационными параметрами технологического процесса, влияющими, как по их совокупности, так и отдельно, на напряженно-деформированное состояние кожухов. К ним следует отнести:

- параметры технологического процесса;
- параметры конструктивной формы;
- параметры технического состояния.

Прочность и долговечность кожуха доменной печи в большой степени зависит от физико-механических характеристик материалов систем «кожух-холодильники-компенсационный слой-футеровка», а кожуха воздухонагревателя – «кожух-компенсационный слой-футеровка» и также температурного режима работы.

Все это определяет уровень напряженно-деформированного состояния кожухов, распределение напряжений по высоте, в сечениях и во времени. В ряде случаев, при определенном сочетании различных параметров влияния, напряжения могут достигать запредельных значений, при которых возникают трещины и разрывы кожуха.

Высокие температуры, при которых протекают технологические процессы в доменной печи, оказывают значительное влияние на прочность и долговечность системы «кожух-холодильники-компенсационный слой-футеровка». Они создают не только изменяемые во времени термические воздействия, но и приводят к связанным с ними значительным механическим нагрузкам от распора футеровки. Проблема воздействия температуры осложняется тем, что ее распределение внутри печи нестабильно и зависит от многих технологических факторов – качества шихтовых материалов, движения газовых потоков, количества и температуры дутья и пр.

Картина температурных полей внутри доменной печи показывает весьма сложное распределение изотерм, которое в процессе эксплуатации печи может меняться. Температура по сечению печи и ее равномерность определяются качеством шихтовых материалов и их распределением на колошнике. При нормальной работе печи максимальная температура возникает у оси печи, а у стен печи она несколько ниже, и изменение температуры описывается плавной кривой. При нарушениях в распределении материалов и газов изменяется и характер распределения температур по сечению печи. При периферийном ходе газов температура кладки еще более увеличивается.

Изменение температуры, как материалов, так и газов по высоте печи, вызываемое теплопередачей от двигающихся вверх газов к опускающимся вниз материалам, происходит также неравномерно, что, соответственно, приводит к неравномерному полю нагрузок на футеровку и кожух. В нижней части печи при температуре выше 1400–1500 °С теплообмен между газами и материалами происходит наиболее интенсивно. В этой зоне тепло расходуется не только на нагрев материалов, но и на процессы, идущие с поглощением тепла, но без изменения температуры материалов (расплавление шихты, прямое восстановление элементов). В результате в этой области происходит резкое падение температуры газов и материалов

до 500 °С, что, в свою очередь, вызывает изменение напряженного состояния. В верхней части печи теплообмен между газами и шихтой снова усиливается, что связано с загрузкой в печь холодных материалов.

Велико влияние технологических параметров в зоне лещади доменной печи. Здесь в начале кампании печи происходит разгар лещади – «вымывание» футеровки, образование полости, постепенно заполняющейся жидким чугуном, который вызывает дополнительное давление на кожух.

При таком разгаре кладки лещади и образовании ямы, заполненной жидким чугуном, потери тепла через холодильники возрастают, увеличивая тепловые воздействия на кладку и, тем самым, увеличивая ее износ.

Отсюда очевидно, что характерной особенностью кожуха доменной печи является его работа при специфических нагрузках и воздействиях, вызванных особенностями технологического процесса и значительно усложняющими и ухудшающими условия эксплуатации.

К основным, наиболее важным технологическим воздействиям и состояниям, отличающим работу кожухов от работы строительных конструкций и влияющим на их прочность и надежность, следует отнести взаимосвязь между параметрами технологического процесса и температурных полей внутри агрегата, затрудняющую формализацию их учета при оценке прочности и надежности конструкций, которая, в свою очередь, зависит от многих неформализованных воздействий, в том числе, для доменной печи:

- термических воздействий, определяемых технологическим процессом, а также возможным нарушением работы системы охлаждения печи, вызывающим перегрев кожуха и связанное с этим снижение прочностных характеристик стали, неравномерные деформации конструкций и изменение физико-механических характеристик материалов.
- давления газовой среды и возможности его резкого повышения при нарушениях режимов технологических процессов;
- механического воздействия футеровки, с учетом неформализованного поведения всей системы «кожух-холодильники-компенсационный слой-футеровка» в процессе эксплуатации при ее термическом расширении;
- постепенного разрушения и, тем самым, неформализованного изменения давления на кожух (например: температурный рост чугунных холодильников доменной печи при их недостаточном охлаждении, разрушение кладки лещади доменной печи и скопление в ней затвердевшего чугуна, распор кладки шахты доменной печи под воздействием отложений чугуна в ее швах и порах, особенно

- при работе на цинкосодержащих рудах, что приводит к увеличению давления на кожух, его деформациям, образованию трещин и т. п.);
- активной коррозии кожуха под влиянием постоянно действующей агрессивной газовой среды, колошниковой пыли и воды;
 - абразивного износа футеровки под воздействием сыпучих материалов и взвешенных в газовом потоке частиц колошниковой пыли;
 - нестабильности технологических процессов, связанной с изменением состава шихты, состоянием конструкций, выплавкой чугуна разных марок и т. п., приводящей к резкому увеличению нагрузок, возможности возникновения аварийных ситуаций при перегревах кожуха доменной печи, прорывам чугуна через кожух доменной печи, выходу из строя приборов автоматического управления и контроля работы оборудования и т. п.;
 - динамических воздействий при осадке шихты в доменной печи, грузоподъемных средств, динамических ударов оборудования и пр.;
 - трудностей в обеспечении непрерывности технологического процесса и необходимости бесперебойной эксплуатации всех технологических агрегатов и сведения к минимуму остановок, связанных с ремонтами и заменой оборудования.

Нагрузки и воздействия на кожух воздухонагревателя более стабильны и формализованы, однако вызываемое ими напряженное состояние кожуха также неоднородно по периметру кольцевого сечения и по высоте.

Кожух воздухонагревателя, как и кожух доменной печи, работает в условиях двухосного (и на отдельных участках в районах концентраторов напряжений трехосного) напряженного состояния под воздействием внутреннего давления газовой среды и термического расширения футеровки. Наиболее напряженная часть кожуха расположена в районе верхней высокотемпературной зоны, где футеровка подвергается интенсивному термическому воздействию.

Внутреннее давление газовой среды действует циклически, что технологически связано с работой воздухонагревателя в режимах «нагрев-дутье», и что, с точки зрения воздействия на кожух, вызывает знакопеременные усилия в нем, которые могут привести к развитию малоциклового усталости материала кожуха, снижающей его длительную прочность.

При эксплуатации воздухонагревателя возможно также пульсирующее воздействие горения газа в горелках с критическим значением режима, после которого может произойти обрушение футеровки камеры горения. По этой или иной причине целостность футеровки может нарушаться, кожух в этих случаях перегревается и работает в условиях тепловых ударов.

Несимметричность в горизонтальном сечении воздухонагревателя со встроенной камерой горения является причиной возникновения значительных термических напряжений в огнеупорной кладке и кожухе. Известное явление наклона внутренней камеры горения в сторону насадки на величину до 400 мм приводит к разрушению верхней части насадки и дополнительному воздействию на кожух.

К технологическим параметрам, влияющим на напряженно-деформированное состояние кожухов воздухонагревателей, можно отнести также непостоянство температуры дутья в начальный и конечный периоды работы воздухонагревателя «на дутье». В начальный период, сразу же после нагрева, насадка еще не охладилась, и воздух нагревается до более высокой температуры, чем через некоторый интервал времени, когда температура насадки понизилась.

К другим, достаточно важным технологическим воздействиям и состояниям, влияющим на прочность и надежность кожуха воздухонагревателя, следует также отнести:

- давление газовой среды и возможность его резкого повышения при нарушениях технологических процессов;
- воздействие футеровки при ее термическом расширении, с учетом ее постепенного разрушения и, тем самым, неформализованного изменения механического давления на кожух и возможного его перегрева.

Распределение температуры внутри воздухонагревателя находится в зависимости от того, в каком режиме работает агрегат – «на дутье» или «на нагреве».

Так, при работе в дутьевом режиме температура купола достигает 1300–1450 °С, а отходящих газов в поднасадочном устройстве – 400 °С. В конце этого режима температура воздуха под куполом снижается на 200–300 °С, а отходящих газов – на 100 °С.

Различные конструктивные формы футеровки, кожухов и систем охлаждения также отличаются между собой и создают различный уровень напряженно-деформированного состояния.

Конструктивно неоднородная форма кожуха доменной печи в виде сопряженных соосных цилиндрических и конических оболочек различной толщины, ослабленных большим числом отверстий различного размера и конфигурации, предназначенных для ведения процесса и крепления оборудования, приводит появлению локальных возмущающих усилий краевого эффекта, повышающих общий уровень напряженно-деформированного состояния. При этом значительную роль в обеспечении

прочности кожуха доменной печи играют характер проемов и отверстий в кожухе. Их форма и способ образования, в ряде случаев, могут существенно влиять на длительную прочность кожуха печи.

Значительное влияние на величину давления, передаваемого футеровкой на кожух, оказывают также способ компенсации вертикального роста кладки на колошнике, компенсация радиального роста кладки шахты и конструкция ее охлаждения, компенсация роста лещади и стенок горна, конструкция охлаждающих устройств. Все эти конструктивные решения и применяемые материалы во многом определяют напряженно-деформированное состояние кожуха.

Кожух воздухонагревателя состоит также из сопряженных между собой соосных цилиндрических и конических оболочек различной толщины, ослабленных отверстиями большого диаметра, предназначенных для присоединения газоздухопроводов, что приводит к появлению локальных возмущающих усилий краевого эффекта, повышающих общий уровень напряженно-деформированного состояния.

На прочность кожуха воздухонагревателя существенно влияют конструктивные формы узлов сопряжения оболочек разных диаметров, а также узел опирания кожуха на фундамент. Эти узлы характеризуются появлением значительных усилий краевого эффекта и подверженностью влияния циклической составляющей при эксплуатации агрегата.

История эксплуатации, в том числе, история нагружения и техническое состояние кожухов агрегатов также является одним из значимых параметров, влияющих на их прочность и долговечность.

За время работы кожухи испытывают большой комплекс сложных нагрузок и воздействий, которые могут привести к ряду необратимых изменений в конструкциях и физико-механических свойствах материалов футеровки. Они также могут быть причиной повреждений кожухов, последующий ремонт которых в определенной степени снижает их общую длительную прочность.

Как отмечалось, одним из основных факторов, оказывающих существенное влияние на прочностные характеристики, является термическое воздействие, его продолжительность и цикличность.

При достаточно длительном воздействии температуры возможно появление тепловой ползучести и нарастание деформаций. Оно связано с тем, что в процессе работы при определенных величинах нагрузки и температуры в металлоконструкциях возникают пластические деформации, которые с течением времени оказывают разупрочняющее влияние на сталь.

Ползучесть появляется при температуре, характерной для данной марки стали: для малоуглеродистой – при 250–300 °С, для стали повышенной прочности – при 350–400 °С, для нержавеющей стали типа Х18Н9Т – при 500–600 °С.

Воздействие высоких температур на сталь вызывает также изменение ее структуры и приводит к повышению предела хладноломкости, вызывая так называемую тепловую хрупкость металла [5].

Наращение деформаций может ограничить работу конструкций. Такие случаи встречаются при перегревах кожухов доменных печей, в результате чего часть кожуха, теряя устойчивость, превращается местами в гофрированную оболочку, наклоняется, «просаживается» и, соответственно, приводит к сбоям в работе загрузочного оборудования.

Переменное или внезапное воздействие высокой температуры на кожух вызывает, кроме того, напряжения тепловой усталости, а при внезапных однократных изменениях с высоким градиентом – напряжения теплового удара. При этом резко снижаются пластические свойства стали, что может привести к хрупкому разрушению.

Следует иметь в виду, что термическая усталость, в отличие от механической, характеризуется значительно меньшим числом циклов и относится к категории малоциклового усталости.

Усталостные разрушения происходят по-разному в конструкциях, нагруженных только термическими напряжениями, и в конструкциях, подвергаемых, кроме термического, механическому нагружению. Следует отметить, что, чем выше прочностные характеристики материала, тем меньшее влияние оказывает механическая нагрузка на число циклов изменения температур, приводящих к появлению трещин.

Исследования [6] показали, что весьма опасен локальный перегрев кожуха, вызывающий появление сжимающих радиальных добавок к фоновым напряжениям, затухающим по мере удаления от центра теплового пятна. В зоне пятна добавки сжимающие, но за его пределами может иметь место смена знака усилий.

Анализ зависимости максимальных добавок к фоновому напряженному состоянию от радиуса горячего пятна показал, что с увеличением этого радиуса указанные добавки монотонно возрастают. При постоянстве условий теплообмена более высоким фоновым температурам соответствует меньший уровень добавок к фоновым напряжениям.

Уровень температурных добавок и добавок к напряжениям значительно падает с увеличением толщины кожуха. Этот результат отражает особенности локального перегрева, а именно: увеличение толщины приводит к росту потерь тепловой энергии на теплопередачу в тангенциальном направлении. При этом, начиная с некоторой толщины, интенсивность роста становится малой, а добавки к температурам и напряжениям стабилизируются.

Таким образом, опасность образования хрупких трещин в перегретой зоне возрастает с увеличением радиуса горячего пятна и уменьшением толщины кожуха. При этом следует иметь в виду, что нижний предел напряжений, при которых распространение трещины невозможно, составляет 35–56 МПа, поскольку при этих напряжениях величины высвобождающейся потенциальной энергии недостаточно для распространения трещины.

Аналогично с изменением свойств металла кожуха за время его эксплуатации могут существенно меняться и другие характеристики. Так, наличие ремонтных вставок в кожухе, трещин, заваренных с одной стороны, накладок на неиспользуемых отверстиях и проемах вносят значительную корректировку в напряженное состояние кожуха.

Отдельно следует отметить изменение за время эксплуатации состояния конструкций и физико-механических свойств огнеупорных материалов футеровки.

Как известно, существует два состояния футеровки кожуха доменной печи: первое – вся футеровка цела и второе – вся футеровка или какая-то ее часть выгорела, и кожух в этом районе защищается только холодильными плитами и образовавшимся гарнисажем. Второе состояние связано с технологическим процессом и появляется после некоторого времени эксплуатации, продолжительность которого весьма неопределенна и зависит от многих факторов. Тепловая защита кожуха футеровкой в двух ее состояниях, естественно, различна, как и ее механическое воздействие на кожух.

Для кожухов воздухонагревателей следует также отметить зависимость физико-механических свойств огнеупоров от остановок агрегатов с остыванием огнеупоров футеровки и последующих повторных разогревов, в том числе, и от их режимов. Эти процессы существенно изменяют свойства огнеупоров, особенно динасовых, снижая деформационные возможности компенсационных зазоров и, зачастую, практически полностью исключая повторную компенсационную роль зазоров с выгорающими прокладками.

Приведенные основные параметры и условия работы агрегатов подтверждают достаточно сложную зависимость длительной прочности и надежности кожухов от конструктивных форм, истории их нагружения, режимов запуска и эксплуатации, а также от взаимодействия всех элементов, входящих в систему.

Выводы

Из изложенного видно, что обеспечение промышленной безопасности кожухов доменных печей и воздухонагревателей является комплексной задачей, включающей в себя не только взаимосвязь с характером и величиной нагрузок и воздействий, но и с целым рядом других, технологически зависимых факторов, радикально влияющих на общее напряженное состояние конструкций.

Литература

- [1] Большаков В. И. Проблемы промышленной безопасности при эксплуатации доменных печей / [В. И. Большаков, Л. Г. Тубольцев, Н. М. Можаренко, Г. Н. Голубых] // Проблемы доменного производства : научно-практич. конф., Днепропетровск, 14–16 мая 2008 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2008. – С. 39.
- [2] Можаренко Н. М. Комплимент: Параметры промышленной безопасности работы доменных печей / Н. М. Можаренко, Л. Г. Тубольцев, Г. Н. Голубых // Труды Института черной металлургии. – Днепропетровск, 2007 – Вып. 14 : Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – С. 398–413. - Библиогр.: с. 413.
- [3] Большаков В. И. Комплимент: Проблема повышения прочности и надежности кожухов доменных печей в работах ИЧМ / В. И. Большаков // Труды Института черной металлургии. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 11 : Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – С. 237–246. – Библиогр.: с. 246.
- [4] Любин А. Е. Работа воздухонагревателей в оптимизированном режиме / А. Е. Любин, Б. Я. Шаломов // Сталь — 1977 – № 1. – С. 25–27. – Библиогр.: с.27.
- [5] Горицкий В. М. Причины трещинообразования в куполе воздухонагревателя доменной печи / В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров, В. П. Малов // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 11 – С. 21–22. – Библиогр.: с. 22.
- [6] Медведенко А. А. Исследование состояния кожуха воздухонагревателя в зоне местного перегрева / А. А. Медведенко, А. Е. Любин, Б. Я. Шаломов // Проблемы прочности. – 1988 – № 3 – С. 118–119.

Надійшла до редколегії 16.04.2013 р.