

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. ДОМЕННЫЕ ПЕЧИ. ПРОФИЛЬ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ	6
Глава 2. КОНСТРУКЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ.....	9
Глава 3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	13
Глава 4. РАСЧЕТ КОЖУХА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ	19
Глава 5. УКАЗАНИЯ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ.....	36
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	39
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	40

ВВЕДЕНИЕ

В учебно-методическом пособии рассмотрены вопросы расчета листовых стальных конструкций специального сооружения — кожуха доменной печи.

Кожух доменной печи представляет собой стальную листовую замкнутую оболочку, герметично изолирующую внутреннее пространство печи.

Доменный цех — это комплекс сооружений, предназначенных для производства чугуна на металлургическом предприятии.

В состав комплекса доменного цеха обычно входят:

- доменная печь с фундаментом и колошниковым устройством;
- здание литейного двора и поддоменника с рабочей площадкой вокруг печи;
- наклонный мост для подачи скипов на загрузочное устройство печи;
- лифт для подъема обслуживающего персонала на площадки доменной печи;
- блок воздухонагревателей с воздухопроводами холодного и горячего дутья, дымовой трубой, фундаментами и зданием или открытой подкрановой эстакадой с рабочей площадкой;
- машинное здание скипового подъемника;
- здание управления печью и контрольно-измерительных приборов; пылеуловители с газопроводами грязного газа, опорами и фундаментами и газоочистка;
- скиповая яма;
- рудные дворы и бункерная эстакада для хранения и механизированной подачи к скипам шихтовых материалов; подъемник коксовой мелочи.

Сооружения доменного цеха относятся к категории особо опасных производственных объектов (Федеральный закон «Градостроительный кодекс РФ» от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (ст. 48.1, п. 116)). Класс сооружения в соответствии с ГОСТ 27751–2014 [8] — КС-3, с учетом этого коэффициент надежности по ответственности принимается не менее 1,1.

Глава 1

ДОМЕННЫЕ ПЕЧИ. ПРОФИЛЬ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Доменная печь — это непрерывно работающий агрегат шахтного типа, предназначенный для выплавки чугуна из железорудных материалов (рис. 1.1).

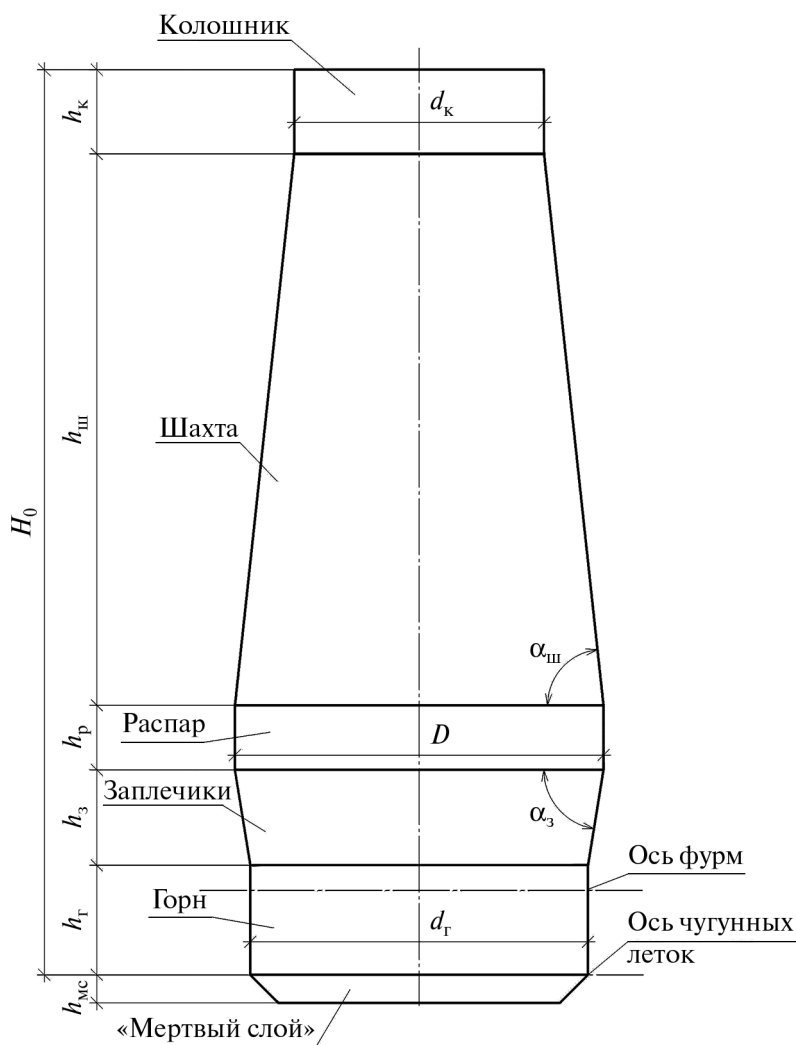


Рис. 1.1. Профиль доменной печи:

H_0 — полезная высота печи; h_k — высота колошника; $h_{ш}$ — высота шахты; h_p — высота распара; h_3 — высота запечки; h_r — высота горна; $h_{мс}$ — высота «мертвого слоя»; d_k — диаметр колошника; D — диаметр распара; d_r — диаметр горна; $\alpha_{ш}$ — угол наклона шахты; α_3 — угол наклона запечки

Доменная печь работает по принципу противотока: сверху в печь специальным засыпным аппаратом подаются шихтовые материалы (агломерат, окатыши, кокс), снизу поступает горячее дутье. В результате химических процессов, протекающих в печи, происходит восстановление и последующее науглероживание железа. На выходе из печи образуется жидкий сплав — чугун, который в последующем используется для производства стали, а также шлак.

Объемы современных доменных печей достигают 6000 м^3 . Такая печь ежедневно проплавляет около $25\,000 \text{ т}$ шихтовых материалов, потребляет $20\,000 \text{ т}$ воздуха, обогащенного кислородом, выплавляет $13\,000 \text{ т}$ чугуна и 4000 т шлака [5]. Для печей объемом от 1033 до 5000 м^3 полезная высота печи H_0 варьируется от 26 до $33,5 \text{ м}$.

Внутреннее очертание, ограниченное футеровкой, называется профилем доменной печи.

Профиль доменной печи состоит из следующих частей.

1. **Колошник** — верхняя часть рабочего пространства печи, предназначен для приема шихты.

Для печей объемом от 1033 до 5000 м³ высота колошника h_k варьируется от 2,8 до 3 м, диаметр колошника d_k — от 5,8 до 10,8 м.

Колошниковая часть печи выполняется из стальных литых плит, выдерживающих ударную нагрузку, возникающую при падении шихтовых материалов с засыпного аппарата. Бронева защита колошника устанавливается для сохранности огнеупорной кладки и размеров цилиндрической части колошника. Только в этом случае возможно направленное распределение материалов в печи и управление газовым потоком.

Колошниковое устройство представляет собой многоэтажную металлическую конструкцию (копер), предназначенную для поддержания комплекса механизмов для загрузки шихты в доменную печь, устройств для их монтажа и ремонта. В колошниковое устройство входят также газоотводы с системой клапанов.

Колошниковая площадка располагается на отметке верха кожуха печи и является основной рабочей и ремонтной площадкой колошникового устройства. Основой конструкции является кольцевая балка круглого или прямоугольного сечения. К кольцевой балке крепятся радиальные балки, направленные к оси печи. Необходимая жесткость площадки обеспечивается сплошным листовым настилом толщиной 10 мм.

Цилиндрическая часть колошника сверху закрывается куполом. Кожух купола обычно защищается стальными неохлаждаемыми плитами, покрытыми огнеупорным кирпичом. Купол сверху стягивается литым стальным фланцем, который является опорой для засыпного устройства и газоотводов печи.

В купол печи врезаются газоотводы. Они служат для равномерного отвода газа по сечению колошника. Обычно устанавливается четыре газоотвода, а для сверхмощных печей объемом более 5000 м³ — восемь. Суммарное сечение газоотводов составляет 40–50 % поперечного сечения колошника печи. Сечение газоотводов круглое. Во избежание зарастания их пылью угол наклона газоотводов, отходящих от печи, составляет не менее 50°.

Для примыкания газоотводов в куполе имеются симметричные вырезы круглого или овального сечения. Вырезы усиливают стальными амбразурами для придания жесткости.

2. **Шахта** — основной объем рабочего пространства печи, с учетом физических процессов, происходящих при работе печи, шахта выполняется в виде усеченного конуса, расширенного книзу.

Для печей объемом от 1033 до 5000 м³ высота шахты $h_{ш}$ варьируется от 15 до 20,7 м; угол наклона шахты $\alpha_{ш}$ составляет 82–85°.

Для защиты стального кожуха от высоких температур изнутри шахта футеруется огнеупорным материалом. Огнеупорная футеровка (кладка) доменной печи предназначена для уменьшения тепловых потерь и предохранения кожуха от воздействия высоких температур и от контакта с жидким металлом и шлаком. Для того чтобы продлить срок службы огнеупорной кладки и снизить влияние температуры на кожух во избежание его разрушения, применяется водяное или испарительное охлаждение.

Шахты доменных печей при современной интенсивности плавки являются наименее стойкой частью строения печи. Их состояние нередко обуславливает продолжительность работы печи и служит причиной частых капитальных ремонтов II разряда. При капитальном ремонте второго разряда заменяется кладка шахты. Часто одновременно заменяется кладка заплечиков и фурменной зоны. Осуществляется также полная или частичная замена холодильников шахты, заплечиков, фурменной зоны, а также производится частичная замена холодильников горна и их промывка. Если в этом есть необходимость, также ремонтируют оборудование и металлоконструкции.

В связи с этим создание надежной конструкции шахты — одна из важнейших проблем проектирования, строительства и эксплуатации мощных доменных агрегатов, работа которых протекает в условиях, способствующих быстрому износу футеровки.

В зависимости от толщины футеровки шахты разделяют на три типа:

1) толстостенная шахта имеет кладку толщиной 800—920 мм в верхней части и до 1300 мм в области распара. В первых типовых проектах доменных печей отечественных заводов этот тип шахты был единственным;

2) среднестенная шахта имеет кладку толщиной 575—900 мм в охлаждаемой части и около 700 мм в неохлаждаемой части;

3) тонкостенную шахту выполняют в двух вариантах: толщина кладки 230—345 мм с охлаждением шахты по всей высоте либо толщина кладки принимается 230—345 мм в охлаждаемой и 575—690 мм в неохлаждаемых частях.

3. **Распар** — самая широкая часть печи, там начинается размягчение и плавление шихты.

Высота распара h_p составляет около 2 м. Для печей объемом от 1033 до 5000 м³ диаметр распара D от 8,2 до 16,1 м.

4. **Запечки** — участок печи ниже распара, выполняются в виде усеченного конуса. В запечках происходят конечные стадии плавления шихты и восстановления.

Высота запечков h_3 составляет от 3 до 3,7 м; угол наклона запечков α_3 — около 81°.

Зона запечков футеруется огнеупорной кладкой и охлаждается.

Известны три основные конструкции запечков: тонкостенные с поверхностным охлаждением поливкой водой, толстостенные с горизонтальной системой охлаждения в металлическом кожухе и тонкостенные с вертикальной системой охлаждения чугунами или медными холодильниками в металлическом кожухе. На некоторых современных печах установлены тонкостенные запечки с горизонтальной системой охлаждения медными холодильниками.

5. **Горн** — самая нижняя часть рабочего пространства печи, имеет цилиндрическую форму. В пределах горна выделяют два участка: фурменный и металлоприемник.

В фурменной зоне горна, в самом его верху, располагаются воздушные фурмы для подачи дутья и вдуваемого топлива.

В металлоприемнике горна накапливаются жидкие продукты плавки — чугун и шлак, там же расположены шлаковые и чугунные летки. Летка — это канал в огнеупорной кладке и кожухе печи, через который из печи выпускают продукты плавки — чугун и шлак. Часть горна ниже леток называется зумпфом, эта часть всегда заполнена чугуном, образующим так называемый «мертвый слой». Высота «мертвого слоя» h_{mc} составляет от 0,5 до 1,8 м, в среднем — 1 м.

Для печей объемом от 1033 до 5000 м³ высота горна h_r варьируется от 3,2 до 4,4 м, диаметр горна d_r от 7,2 до 14,7 м.

6. **Лещадь** — нижняя часть доменной печи, предохраняющая фундамент от прогрева. Лещадь современных доменных печей выполняется из углеродистого и высокоглиноземистого материала.

Ремонт лещади возможен только во время капитального ремонта I разряда, т.е. через 10—15 и более лет эксплуатации. Капитальный ремонт I разряда предполагает полный выпуск жидких продуктов плавки из печи, освобождение рабочего пространства от шихтовых материалов, смену всей огнеупорной кладки, в том числе и лещади доменной печи. Производится полная ревизия, ремонт и смена оборудования, капитальный ремонт кожуха печи.

Лещадь доменной печи (за исключением малых доменных печей старой конструкции) выполняется с донным охлаждением.

Глава 2

КОНСТРУКЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Фундамент доменной печи. Назначение фундамента — передавать нагрузку от доменной печи и находящегося на ней оборудования на грунт с допустимым удельным давлением.

Фундамент должен давать минимальную и равномерную осадку. Большая и тем более неравномерная осадка может привести к появлению трещин как в самом фундаменте, так и в лещади. При образовании таких трещин может произойти одна из самых тяжелых аварий в доменном производстве — прорыв горна.

Осадка нарушает сопряжение агрегатов для подъема шихты на колошник (наклонного моста или ленточного транспортера) с верхом печи и центровку засыпного аппарата. Отклонение оси засыпного аппарата от оси печи отражается на равномерности распределения материалов, ровности хода печи и создает условия для искажения ее профиля.

Осадка фундамента не должна превышать 100 мм, а в некоторых случаях ее ограничивают 20–30 мм. Неравномерность осадки не должна превышать 0,001, т.е. допустимый перекос на 1 м длины фундамента — не более 1 мм.

При строительстве печи необходимо иметь в виду ряд особенностей доменного процесса, которые нужно учитывать при разработке конструкции фундамента. Так, в металлоприемнике доменной печи скапливаются чугун и шлак, температура которых достигает 1400–1500 °С. Из-за наличия зумпфа и неизбежного разгара кладки лещади ниже оси летки находится жидкий чугун, который нельзя выпустить через чугунную летку. Масса этого чугуна может достигать 1000 т и более. Наличие таких масс расплавов в непосредственной близости от фундамента предъявляет к нему особые требования по термостойкости.

Увеличение температуры фундамента приводит к постепенному разрушению бетона, так как гидроалюминат и гидроксид кальция, образующиеся при гидратации цемента, при высокой температуре теряют гидратную влагу. Выделяющийся при этом оксид кальция гасится влагой воздуха с увеличением объема фазы. Кроме того, разница коэффициентов линейного расширения цементного камня и заполнителя приводит к возникновению термических напряжений. При наличии фазовых и термических напряжений происходят образование трещин и постепенное разрушение фундамента.

В качестве заполнителя при изготовлении фундамента нельзя использовать кварцевые материалы и известняк, поскольку один из этих материалов (кварц) при нагреве испытывает ряд модификационных переходов с изменением объема, второй (известняк) при воздействии высоких температур разлагается, а затем может гаситься водой и разрушаться.

Применяемое в настоящее время охлаждение днища лещади воздухом или водой принципиально решает вопрос защиты фундамента от термического разрушения.

Попадание воды на фундамент и ее скопление вблизи фундамента не допускаются. С этой целью вокруг фундамента располагают водосборные желоба.

Кожух печи. Стальной кожух доменной печи воспринимает внутреннее давление газов, шихты и кладки, создает герметичность печи и является одной из самых ответственных ее конструкций. Любое местное разрушение кожуха или его перегрев нарушают нормальный режим работы печи и приводят к аварийным остановкам.

Прочность и способность кожуха противостоять деформациям рассчитываются с учетом веса шихты и происходящих с ней преобразований, а также нагрузки от крепящихся к нему различных площадок и устройств.

В современном исполнении кожух представляет собой сварную конструкцию, состоящую из конических и цилиндрических поясов — царг, изготовленных из карт (листов) низколегированных, нормализованных марок листовой стали (09Г2С, 09Г2МФБ, 06Г2МФБ, 10Г2С1, 14Г2АФ, 16Г2АФ, 15ХСРД и др.), характеризующихся высокой ударной вязкостью, большой прочностью, достаточной пластичностью и термостойкостью.

Толщина кожуха назначается по расчету разной по высоте печи.

Несущие металлоконструкции доменной печи. Существует несколько типов несущих конструкций доменных печей.

1. Шотландский тип — с опорой колошника через кожух и мараторное кольцо на основные колонны печи. Для удобства обслуживания фурм и равномерного распределения их по окружности горна число колонн обычно делают кратным числу фурм.

Значительным недостатком конструкции данного типа является передача вибрации от скипового подъемника и оборудования колошника непосредственно на печь. Кроме того, для проведения ремонтов и реконструкций доменных печей требуется демонтаж колошниковоу устройства или сооружение специальной опорной системы при смене кожуха.

2. Немецкий тип — с опорой колошника на четыре самостоятельные колонны.

Несмотря на улучшенное обслуживание горна, в этой конструкции не исключено наличие значительных напряжений, так как вес шахты передается полностью на заплечики и горн.

3. Комбинированный тип, в котором уменьшены указанные выше напряжения, но усложнено обслуживание горна. Данный тип конструкции обеспечивает достаточную прочность и работоспособность кожуха печи даже при появлении в нем больших трещин. Это особенно важно для печей, работающих на шихте со значительным содержанием цинка, который создает большие давления на кожух во всех направлениях.

4. Японский тип — с шестью колоннами, имеющими кронштейны (применяют на современных печах Японии). Колонны тяжелы из-за эксцентриситета нагрузок. Диаметр кольцевого воздухопровода, расположенного вне колонн, значительно больше, чем в других вариантах. Это увеличивает и утяжеляет детали фурменного устройства. Возможности организации напольного транспорта вокруг горна ограничены.

5. Американский тип — с четырьмя колоннами, разработанный в последние годы в США. В этом случае устраняются последствия вибрации, вызываемые загрузочными устройствами, и имеется широкий доступ для обслуживания леток и фурм горна.

6. Самонесущий кожух шахты без маратора. Эту конструкцию применили на доменных печах полезным объемом 2200, 3200, 5000 и 5500 м³.

На отечественных предприятиях в зависимости от полезного объема и года постройки печи применяются различные типы опорных металлоконструкций.

Рассмотрим, например, шотландский и комбинированный типы с опорой шахты и колошника через опорное кольцо (маратор) на горновые колонны. На доменных печах с полезным объемом 1513 и 1719 м³ устанавливают шесть колонн.

Колонны горна предназначены для восприятия нагрузок от колонн шахты, кожуха и футеровки шахты. Расстояние между колоннами горна и кожухом печи составляет обычно не менее 500 мм, что необходимо для нормального проведения ремонтов. Колонны ниже рабочей площадки облицовываются шамотным кирпичом или жароупорным бетоном и закрываются стальным кожухом. Как правило, используется только четыре колонны горна.

Колонны горна несут большие нагрузки и должны надежно опираться на фундамент. Базы колонн размещают ниже кладки лещади на 2–3 м для защиты в случае выхода чугуна на горизонте лещади.

Передача давления на колонны со стороны кладки шахты, ее холодильников, частично заплечиков и колошниковоу устройства (в зависимости от типа несущих конструкций) осуществляется через верхнее опорное кольцо — мараторное кольцо, представляющее собой мощную кольцевую балку. Кольцо состоит из горизонтальных листов и вертикального листа первого пояса (царги) кожуха шахты и соединяется с верхом колонн при помощи болтов через промежуточную опорную плиту. Мараторное кольцо является

основой для огнеупорной кладки шахты и допускает раздельное или одновременное выполнение футеровки низа и верха доменной печи.

Система с колоннами, воспринимающими нагрузку от засыпного аппарата и колошниковоустройства без мараторного кольца, применяется на доменных печах с полезным объемом до 3200 м³.

В печах объемом более 3200 м³ устанавливается кожух самонесущей конструкции, т.е. кожух шахты, колошника и купола, который опирается на кожух нижней части печи (мараторное кольцо отсутствует). Опора колошниковоустройства выполняется в двух вариантах в зависимости от типа литейного двора. При прямоугольной его форме опора состоит из шести колонн, связанных вокруг печи кольцевой балкой, передающих нагрузку на фундамент печи.

На печах с кольцевыми литейными дворами опорные колонны отсутствуют, и колошниковоустройство опирается на шатер литейного двора.

Для обслуживания холодильников, термопар, газоотборных устройств, осмотра кожуха на уровне распара и по высоте печи устанавливаются площадки. При их установке соблюдается принцип независимого вертикального перемещения кожуха печи и колонн. Площадки связаны между собой лестницами и лифтом.

Огнеупорная кладка доменной печи (футеровка). Одним из резервов повышения эффективности доменного производства является сокращение простоев доменных печей в связи с разработкой и применением более совершенных конструктивных форм и свойств материалов футеровки и кожуха. Причинами остановки доменных печей на капитальные ремонты становятся разгар кладки, износ оборудования, кожуха, моральный износ. В свою очередь разгар кладки, износ кожуха и оборудования зависят от конструкции и материала, степени интенсивности технологических процессов.

Конструкции доменных печей работают в условиях воздействия высоких и неравномерных температур, давления газа, жидкого чугуна, химических воздействий продуктов плавки и др. В работающей доменной печи происходит непрерывное движение двух потоков: твердые шихтовые материалы (агломерат, окатыши, кокс, флюсовые материалы) медленно опускаются и постепенно нагреваются; печные газы, образующиеся в фурменной зоне при горении кокса и вдуваемого топлива, с большой скоростью движутся вверх, температура их при этом снижается с 1800–2000 °С до 150–200 °С. Газовый поток неравномерно распределяется по сечению печи. Чугун и шлак, образовавшиеся в распаре печи, стекают вниз между кусками кокса коксовой насадки, омывая и стенки печи.

В фурменной зоне горна происходит горение кокса и вдуваемого топлива, распространяющееся вглубь печи (к центру) примерно на 1,5–2 м. Эта область характеризуется наивысшей температурой: теоретическая температура горения достигает 2100–2200 °С. В печи большого объема одновременно находится около 3000 т сырых материалов и до 1500 т продуктов плавки.

Температура кладки шахты печи изменяется от 1200 °С в нижней части до 300–400 °С в верхней. В порах кладки могут накапливаться сажистый углерод и цинк, способствующие росту кладки. В результате механического, термического и химического воздействия кладка шахты разрушается, что приводит к местным перегревам кожуха и нарушает нормальную работу печи. Износ кладки резко возрастает при неравномерном ходе (неравномерной засыпке) шихтовых материалов.

Особенно большие нагрузки приходятся на кладку горна и лещади. Кладка лещади постоянно находится под воздействием неравномерного нагрева (при длительных остановках печи) и ферростатического давления чугуна. Жидкий чугун проникает в швы между блоками кладки, вызывая их пластическую деформацию, в результате чего кладка лещади и стенок горна быстро разрушается.

Перечисленные особенности работы доменной печи предъявляют повышенные требования к конструкции огнеупорной кладки, свойствам огнеупорных материалов, вели-

чине зазоров между кожухом и кладкой, материалам их заполнения, конструкции кожуха и холодильников.

Охлаждение. Для того чтобы продлить срок службы огнеупорной кладки и снизить влияние температуры на кожух во избежание его разрушения, доменная печь имеет систему охлаждения на высоту от фундамента до верхней части шахты. Существует два вида охлаждения доменных печей:

1) водяное охлаждение — в качестве теплоносителя применяется холодная техническая вода. При водяном охлаждении на 1 м^3 полезного объема доменной печи расход воды составляет $1,0\text{--}1,3 \text{ м}^3/\text{ч}$;

2) испарительное охлаждение — в качестве охлаждающего фактора используется скрытая теплота парообразования. Расход воды при испарительном охлаждении в несколько раз меньше.

Глава 3

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Материалы. Для кожухов доменных печей следует применять следующие марки стали:

– для неохлаждаемых зон кожуха — сталь марки 09Г2С (класс прочности С345) в нормализованном состоянии при толщине от 10 до 60 мм при условии гарантии ударной вязкости на образцах типа Шарпи при температуре $-20\text{ }^\circ\text{C}$ по ГОСТ 19281–2014;

– для охлаждаемых зон кожуха — сталь марки 09Г2С в нормализованном состоянии при толщинах от 10 до 60 мм при условии гарантии ударной вязкости на образцах типа Шарпи при температуре $-40\text{ }^\circ\text{C}$ по ГОСТ 19281–2014;

– стали марки 14Г2АФ-12 (ГОСТ 19281–2014), класса прочности С375 и С390 или марки 16Г2АФ-12 (ГОСТ 19281–2014), класса прочности С390 в нормализованном состоянии при толщине от 20 до 50 мм (для кожухов доменных печей объемом 4500 м^3 и более).

Для сталей класса С390 толщиной от 15 до 70 мм рекомендуется дополнительно проводить оценку качества стали на образцах типа Шарпи при $-20\text{ }^\circ\text{C}$. Уровень ударной вязкости регламентируется требованиями 5-й категории качества стали по ГОСТ 19281–2014.

Расчетные характеристики стали. При двухосном напряженном состоянии стали ее расчетные сопротивления (вне зоны краевого эффекта) следует умножать на коэффициент K_m , определяемый по формуле:

$$K_m = \frac{1}{\sqrt{1-\eta+\eta^2}}, \quad (1)$$

где $\eta = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ — коэффициент, $-1 \leq \eta \leq 1$;

σ_1 и σ_2 — соответственно меньшее и большее (по абсолютному значению) главные напряжения, для плоско-напряженного состояния при отсутствии изгибных напряжений, равные осевым (меридиональным и кольцевым) напряжениям.

Значения коэффициента K_m приведены на графике на рис. 3.1 и в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения коэффициента K_m

K_m	η	K_m	η
0,577	-1	1,048	0,1
0,607	-0,9	1,091	0,2
0,640	-0,8	1,125	0,3
0,676	-0,7	1,147	0,4
0,714	-0,6	1,155	0,5
0,756	-0,5	1,147	0,6
0,801	-0,4	1,125	0,7
0,848	-0,3	1,091	0,8
0,898	-0,2	1,048	0,9
0,949	-0,1	1,000	1
1,000	0		

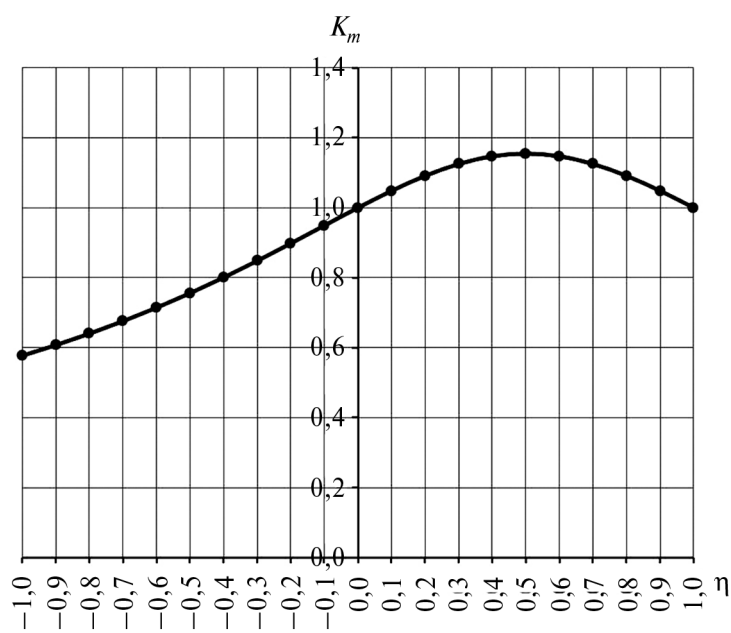


Рис. 3.1. График зависимости коэффициентов K_m и η

Нагрузки. Расчет конструкций выполняется по методу предельных состояний в соответствии с действующими нормами проектирования стальных конструкций [2], а также дополнительными требованиями, учитывающими особенности работы сооружений комплекса.

С учетом положений СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [3] все нагрузки, действующие на сооружения, классифицируются следующим образом.

1. Постоянные нагрузки.

2. Временные длительные нагрузки:

– вес стационарного оборудования;

– вес атмосферных осадков и отложений (пыль, ил, конденсат);

– рабочее давление газов, жидкостей и сыпучих тел при эксплуатации оборудования;

– технологические температурные нагрузки.

3. Кратковременные нагрузки:

– динамические нагрузки, возникающие при пуске оборудования;

– нагрузки при ремонте оборудования, включая нагрузку от веса складываемых при ремонте материалов на рабочих площадках.

4. Особые нагрузки:

– аварийные нагрузки от оборудования, включающие повышенное положительное/отрицательное давление газов, аварийное заполнение оборудования жидкостями или сыпучими материалами, засорение оборудования пылью, конденсатом и т.д.;

– взрывы;

– температурные нагрузки, возникающие в результате разрушения футеровки, холодильников и т.д.;

– сейсмические нагрузки.

При расчете по первому предельному состоянию расчетные нагрузки определяются с учетом коэффициентов надежности по нагрузке γ_f , приведенных в табл. П1 (см. Приложение).

Расчет листовых конструкций. Проверка прочности листовых конструкций без учета местных воздействий.

Проверка прочности оболочек вращения выполняется по формуле:

$$\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq \gamma_c \cdot R_y. \quad (2)$$

При этом должны соблюдаться условия: $\sigma_x \leq \gamma_c \cdot R_y$; $\sigma_y \leq \gamma_c \cdot R_y$; $\tau_{xy} \leq \gamma_c \cdot R_s$, где σ_x , σ_y — нормальные напряжения по двум взаимно перпендикулярным направлениям, МПа;

τ_{xy} — касательные напряжения, МПа;

γ_c — коэффициент условий работы (табл. П4, см. Приложение);

R_y — расчетное сопротивление растяжению и сжатию по пределу текучести, МПа;

R_s — расчетное сопротивление стали на срез, МПа.

Если задача осесимметричная, то

$$\sigma_x = \sigma_1 \leq \gamma_c \cdot R_y \cdot K_m, \quad \sigma_y = \sigma_2 \leq \gamma_c \cdot R_y \cdot K_m \quad (3)$$

и вместо (2) проверка выполняется по формуле:

$$\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \leq \gamma_c \cdot R_y, \quad (4)$$

где σ_1 , σ_2 — нормальные напряжения, соответственно меридиональные и кольцевые, МПа.

K_m — коэффициент, определяемый по формуле (1) (см. рис. 3.1 и табл. 3.1).

Проверки прочности замкнутых тонкостенных оболочек вращения, находящихся под внутренним равномерным давлением, выполняются по следующим формулам:

– круговая цилиндрическая оболочка:

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot r}{2t} \leq \gamma_c \cdot R_y \cdot K_m; \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot r}{t} \leq \gamma_c \cdot R_y \cdot K_m; \quad (6)$$

– круговая коническая оболочка (рис. 3.2):

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot r}{2t \cdot \cos \beta} \leq \gamma_c \cdot R_y \cdot K_m; \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot r}{t \cdot \cos \beta} \leq \gamma_c \cdot R_y \cdot K_m; \quad (8)$$

– сферическая оболочка:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{P \cdot r}{2t} \leq \gamma_c \cdot R_y; \quad (9)$$

– торовая оболочка (рис. 3.3):

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot r}{2t} \cdot \left(1 + \frac{r_0}{r_{\min}} \right) \leq \gamma_c \cdot R_y \cdot K_m; \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot r}{2t} \leq \gamma_c \cdot R_y \cdot K_m. \quad (11)$$

В формулах (5)–(11) приняты следующие обозначения:

P — расчетное внутреннее давление, МПа;

r — радиус оболочки (для конической оболочки — радиус оболочки в месте определения напряжений), м;

t — толщина оболочки, м;

r_{\min}, r_{\max} — внутренний и наружный радиус торовой оболочки, соответственно, м;

r_0 — радиус оси торовой оболочки, м.

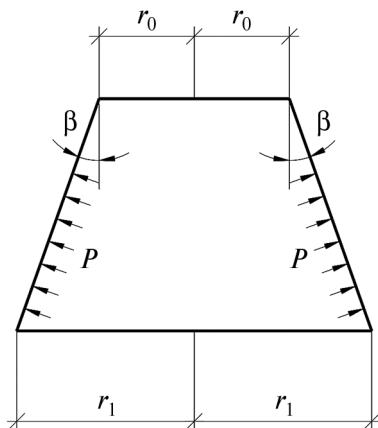


Рис. 3.2 Схема круговой конической оболочки

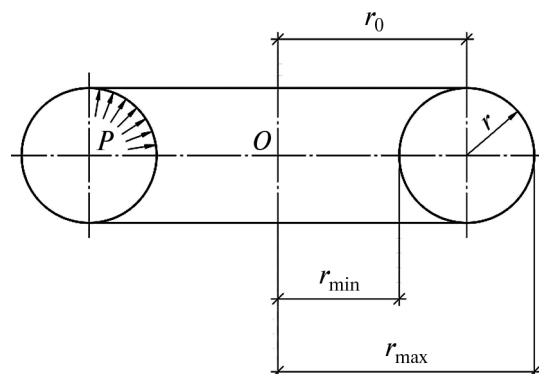


Рис. 3.3. Схема торовой оболочки

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru