

тивный показатель.

Таким образом, методы ресурсной механики дают возможность разрабатывать диагностические модели, обеспечивающие при мониторинге увеличение межремонтных периодов примерно в 3,5 раза [5]. Экономическая эффективность от продления срока эксплуатации наиболее существенна для дорогостоящего оборудования. Эта тенденция развита в энергетическом и транспортном машиностроении. Очевидно, не менее эффективно это и в ГМК. Но здесь этот процесс происходит стихийно, без обоснования продления сроков службы, что оборачивается высокими рисками эксплуатации.

Заключение (Практические аспекты перехода к ОТС)

Чтобы успешно осуществить переход к новой системе ТОиР целесообразно придерживаться ряда рекомендаций:

1. Следует создавать многоцелевую систему, обрабатывающую показания различных источников информации, в которую на уровне подсистемы входит функция оценки остаточного ресурса базовых узлов.

2. Менеджмент предприятий и обслуживающий персонал должен понимать, что рекламные заявления производителей и поставщиков средств диагностики не решают проблему перехода на ОТС без диагностических алгоритмов. Поэтому необходимо сосредоточить усилия на разработке диагностических моделей и алгоритмов, доведя процедуру оценки технического состояния до технологии, доступной инженерному составу.

3. Диагностические алгоритмы должны обеспечивать точность, достоверность и пошаговую заблаговременность прогнозирования.

Чтобы отвечать этим требованиям, необходимо придерживаться принципа поэтапного назначения ресурса, а также использовать аппарат ресурсной механики для построения деградационных моделей.

Переход к ОТС также должен быть поэтапным. На первом этапе необходимо наладить информационную систему по истории эксплуатации сменных узлов и сплошной контроль наработки базовых узлов. Он может осуществляться от естественных (штатных) источников информации. Второй этап связан с использованием специализированных средств диагностики. Причем для оценки остаточного ресурса основная информация идет от сплошного контроля, а периодический контроль специализированными средствами позволяет идентифицировать условия эксплуатации, отражающиеся на интенсивности процесса накопления повреждений.

Освоению и внедрению автоматизированной системы мониторинга предшествуют исследования нагруженности узлов, которые также являются многоэтапными. Но эффект от полного перехода на ОТС значительно превосходит затраты на реорганизацию системы ТОиР.

Библиографический список

1. Большаков В.И., Гринберг С.Д. Технологическое оборудование в системе металлургического производства // Теория и практика металлургии. - 2002. - № 5-6. - С. 26-31.
2. Костюков В.А. Мониторинг безопасности производства. - М.: Машиностроение, 2002. - 224 с.
3. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: Учебник. - М.: Лигос, 2001. - 208 с.
4. Ключев В.В., Фурсов А.С., Филиппов М.В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов // Контроль. Диагностика. - 2007. - № 3. - С. 18-23.
5. Белодеденко С.В. Оценка безопасной долговечности элементов конструкций при проектировании и эксплуатации технологического оборудования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2005. - № 6. - С. 40-46.

Поступила 27.09.07

УДК 624.954

Банников Д.О./к.т.н./, Казакевич М.И./д.т.н./

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

Рабер Л.М./к.т.н./

Национальная металлургическая академия Украины

Новая конструкция бункерной емкости из стальных панелей

Показана целесообразность совершенствования существующих конструкций бункерных емкостей, эксплуатирующихся в условиях металлургических предприятий. Одним из путей решения этой проблемы является использование разработанной авторами принципиально новой конструктивной схемы, включающей панели с применением современных синтетических материалов и гофрированных стальных листов. Соединение панелей между собой осуществляется высокопрочными болтами. Такое техническое решение обладает рядом технологических и конструктивных преимуществ по сравнению с традиционной схемой и в то же время лишено большинства ее недостатков. Ил. 4. Библиогр.: 8 назв.

© Банников Д.О., Казакевич М.И., Рабер Л.М., 2007 г.

бункерная емкость, панельная конструктивная схема, сыпучие материалы, высокопрочные болты

Одним из широко распространенных видов конструкций, применяемых в настоящее время в ряде отраслей промышленности, являются бункерные емкости (бункера). Они предназначены для временного или длительного хранения различных объемов разнообразных сыпучих веществ.

В металлургической и горнорудной отраслях промышленности практически невозможно указать



Рис. 1. Традиционная конструктивная схема с ребрами

технологический процесс, в котором бы не использовались какие-либо сыпучие материалы. Это различные руды, угли, шлаки, а также множество сыпучих добавок, используемых для получения чугуна и стали. Поэтому в этих отраслях бункера являются неотъемлемым элементом практически любого завода или предприятия. Соответственно, сложности, характерные для эксплуатации бункерных конструкций, также являются типичными для подобных организаций.

Традиционная конструктивная схема

Отмеченные проблемы обусловлены тем, что, несмотря на достаточно большое разнообразие видов сыпучих веществ, загружаемых в бункера, бункерные емкости в конструктивном отношении достаточно однотипны. К настоящему времени все они выполняются по традиционной конструктивной схеме с усиливающими ребрами жесткости, которая в окончательном виде сформировалась примерно в середине прошлого века.

Такая конструктивная схема представляет собой конструкцию бункерной емкости из стальных листов относительно небольшой толщины (6-14 мм), соединяемых между собой с помощью сварки для придания емкости требуемой геометрической формы (рис. 1). Чаще всего емкость выполняется в виде вертикальной призматической верхней части и наклонной пирамидальной нижней части, обеспечивающей при верном выборе угла наклона самотечную разгрузку бункера. Для возможности восприятия давления хранимого сыпучего материала в стенки бункера подкрепляются горизонтальными ребрами жесткости, выполняемыми из прокатных или сварных профилей в форме уголка, швеллера, тавра либо двутавра жестко соединяемых в углах.

Опираение всей конструкции на основание осуществляется через колонны, располагаемые, как правило, в углах конструкции. Размеры бункерных емкостей в настоящее время могут достигать 20 м в плане при общей высоте конструкции до 10 м и полезном объеме свыше 1000 м³. Подробное описание традиционной конструктивной схемы приведено во многих пособиях и справочниках [1].

Подобная конструктивная схема применяется в настоящее время достаточно широко, что связано с относительной простотой ее внешней геометрической формы и необходимостью выполнения при изготовлении емкости только несложных технологических операций по прикреплению ребер жесткости и стыковке стенок в углах конструкции. Накопленный опыт эксплуатации бункерных емкостей свидетельствует о том, что до 50 % всех аварийных ситуаций обусловлены несовершенством применяемой конструктивной схемы [2]. При этом к ее основным недостаткам относятся:

- высокая неравномерность напряженно-деформированного состояния в различных зонах конструкции. Данный вопрос был исследован авторами и достаточно подробно изложен в монографии [3]. В ней, в частности, выделяется ряд зон концентрации напряжений (места сопряжения ребер со стенкой и между собой, места сопряжения стенок), в которых напряжения могут на порядок превышать значения в иных участках конструкции. На практике это означает возникновение опасности малоциклового усталостного разрушения и ускоренный коррозийный износ этих зон;

- повышенный расход материала и повышенная деформативность конструкции, что обусловлено стремлением при проектировании уменьшить уровень напряжений в указанных зонах за счет увеличения поперечных сечений несущих элементов по всей конструкции. При этом деформативность конструкции изначально высокая, как показывают результаты выполненных исследований, снижается незначительно [3];

- большая протяженность сварных швов, ведущая к повышенной трудоемкости изготовления и пониженной надежности конструкции. Согласно имеющимся статистическим данным, разрушение сварных конструкций, к которым относятся и бункерные емкости, в 80 % случаев происходит по сварным швам;

- низкая ремонтпригодность конструкции, обусловленная необходимостью в случае повреждения проводить вырезку отдельного участка конструкции и приварку на его место (если имеется возможность!) нового. При этом достаточно сложной оказывается задача ремонта и замены изношенной футеровки;

- затрудненность монтажа при значительных размерах конструкции. Это справедливо по отношению к емкостям размером в плане более 6-7 м, собираемых из отдельных укрупненных элементов. Наличие технологических допусков приводит к тому, что несоосность элементов может достигать 20 см и при этом она носит пространственный характер;

- расположение и пространственная ориентация узлов и соединений несущих элементов, способствующая появлению и развитию очагов интенсивной коррозии. Данные многочисленных обследований технического состояния конструкций, проводимые в последнее время, свидетельствуют о доминирующей роли коррозионных повреждений (до 40 %) [4].

Кроме этого, анализируя известные выражения для индикаторов механического подобия из теории подобия применительно к оребренным бункерным емкостям, можно прийти к важному заключению: при увеличении размеров конструкции в n раз напряжения в ней также возрастают в n раз, а прогибы в n^2 раз

$$F_r \cdot L_r^{-2} = \sigma_r = E_r, \quad L_r = w_r,$$

где F_r – масштаб сил, L_r – масштаб линейных размеров, σ_r – масштаб напряжений, E_r – масштаб модуля упругости, w_r – масштаб перемещений.

Это означает, что с увеличением размеров бункерной емкости необходимо уменьшать шаг расположения ребер жесткости по высоте, что в свою очередь приводит как к еще более неравномерному распределению напряжений в конструкции, так и к увеличению общей протяженности сварных швов. При этом необходимо устанавливать дополнительные ребра жесткости, являющиеся лишними с точки зрения обеспечения прочностных качеств конструкции и ведущие к дополнительным затратам стали на их выполнение.

Таким образом, проблема совершенствования существующей конструктивной схемы стальных бункерных емкостей для сыпучих материалов в направлении повышения их эксплуатационных качеств и надежности является в настоящее время достаточно актуальной. Ее решение позволило бы создавать как более экономичные по расходу материала сооружения, так и снизить эксплуатационные затраты на их обслуживание.

Улучшенные конструктивные схемы

Указанные выше недостатки применяемого конструктивного решения, постепенно выявляемые в ходе эксплуатации емкостных конструкций для сыпучих материалов, заставляли инженеров искать возможные пути улучшения ситуации. Однако этот процесс развивался недостаточно эффективно, что обусловлено рядом объективных сложностей, связанных с проектированием бункерных сооружений. К их числу, в первую очередь, относится сложность аналитического расчета такой конструкции, представляющей собой складчатую пространственную систему. Также не последнюю роль сыграли в этом и известные сложности, связанные с прогнозированием поведения сыпучей среды в замкнутых сосудах.

Тем не менее, специалистами Ленинградского отделения ЦНИИ Проектстальконструкция была обоснована возможность уменьшения материалоемкости конструкции за счет учета упругопластической работы ее несущих элементов [5]. Однако широкого распространения данное решение к настоящему времени не получило.

Специалистами проектного института Днепр-проектстальконструкция был высказан ряд идей, имевших отношение к ориентации подкрепляющих ребер жесткости относительно стенок конструкции. В частности, предлагалось ориентировать ребра жесткости нормально к стенкам емкости и не состыковывать их в углах, а также располагать их независимо на каждой стенке. Проведенные авторами исследования позволили установить, что устранения всех перечисленных выше недостатков существующей конструктивной схемы таким способом добиться не удастся [3].

В России одним из современных ученых в области бункеростроения Х. Ягофаровым предложено располагать ребра жесткости не горизонтально, а вертикально с более активным включением в работу нижней наклонной части конструкции [6]. Однако, как указывает сам автор, подобное решение может быть с успехом применено к емкостям относительно небольшого размера, приблизительно до 4-5 м в плане. К тому же, проведенные авторами исследования позволили заключить, что и подобное конструктивное решение не позволяет устранить недостатки, характерные для традиционной схемы [3].

Из рассмотренного анализа ясно, что фактически все подобные варианты являются частичной модернизацией исходной реберной конструктивной схемы и, соответственно, им присущи практически те же самые недостатки, что и традиционной схеме. Поэтому, проблема улучшения конструктивной схемы к настоящему моменту не может считаться решенной и требует, по-видимому, внесения каких-либо принципиальных изменений в конструктивную схему.

Панельная конструктивная схема

В результате детального анализа особенностей работы и эксплуатации бункерных емкостей авторами предложено принципиально иное конструктивное решение. Его суть заключается в формировании конструкции емкости из отдельных панелей.

Конструкция панели приведена на рис. 2. Каж-

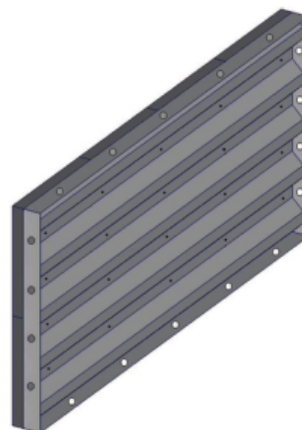


Рис. 2. Конструкция панели бункерной емкости: 1 - футеровочный слой, 2 - внутренний усиливающий лист, 3 - обвязочные планки, 4 - наружный профилированный лист

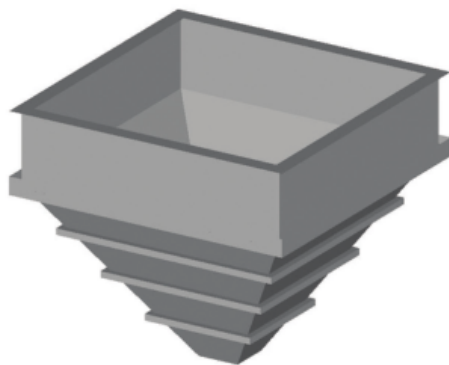


Рис. 3. Общий вид плоской панели для бункерной емкости

дая отдельная панель представляет собой составной двухслойный элемент. Наружный слой является профилированным и предназначен для восприятия нагрузки от давления сыпучих материалов. Конструктивно он представляет собой стальной лист с усиливающими элементами. Наиболее технологичным решением в данном случае является использование цельных гофрированных стальных листов, хорошо зарекомендовавших себя в практике эксплуатации [7]. По результатам предварительного теоретического анализа, выполненного авторами, достаточной оказывается толщина такого листа, равная 4–5 мм.

Заметим также, что в качестве внешнего слоя панели могут применяться и традиционные, но менее технологичные решения. Так, можно выполнять внешний слой из обычных плоских стальных листов, к которым прикрепляются сваркой (или болтами) ребра жесткости в виде замкнутых профилей или обычных прокатных профилей. При этом шаг ребер устанавливается расчетом. В этом случае панельная схема приближается к традиционной конструктивной схеме с ребрами жесткости.

Внутренний слой панели представляет собой плоский стальной лист также небольшой толщины, порядка 3–4 мм. Необходимость его постановки обусловлена тем, что только наружного слоя может оказаться недостаточно для восприятия внешних нагрузок и обеспечения жесткости сооружения. Это особенно справедливо для бункерных емкостей, предназначенных для работы с тяжелыми рудными материалами. И, наоборот, в случае относительно легких сыпучих материалов внутренний слой может и не потребоваться. В таком случае конструкция панели упрощается и становится однослойной. Между собой наружный и внутренний слои панели соединяются с помощью промежуточных болтовых креплений, количество и несущую способность которых устанавливают соответствующим расчетом.

С внутренней стороны к панели прикрепляется футеровочный слой. Он может быть выполнен из современных полимерных материалов со сроком беспрерывной эксплуатации до 7–8 лет, например, рези-

новых футеровочных плит (РФП) небольших размеров, разработанных и успешно применяемых в практике предприятием УНИКТИ «ДИНТЕМ». В качестве футеровки могут применяться также и традиционные конструктивные решения, например, в виде прикрепления стальных лент. Болтовые крепления, служащие для соединения внешнего и внутреннего слоев панели, одновременно могут быть использованы и для крепления футеровочного слоя. При этом в случае применения РФП головка болта оказывается запрессованной в толщине плиты и не подвергается непосредственному контакту с сыпучим материалом. По внешнему периметру панель усиливается обвязочными элементами, представляющими собой стальные полосы толщиной 6–12 мм. Они прикрепляются на сварке к элементам панели и создают жесткий каркас, снижающий, согласно исследованиям авторов, сдвиговые напряжения по контуру. Кроме этого, обвязочные элементы являются одновременно и усиливающими конструкцией ребрами жесткости.

Окончательно сформированная панель имеет вид, приведенный на рис. 3. Размеры отдельной панели зависят от многих факторов, среди которых можно назвать вид хранимого сыпучего материала, геометрическую форму и размеры емкости, положение панели в конструкции, и определяются соответствующими расчетами. Так, например, в малых емкостях (до 3 – 3,5 м в плане), применяемых, в основном, для перегрузочных бункеров, вся боковая стенка конструкции может представлять собой отдельную панель; в более крупных емкостях, используемых в доменном производстве, может потребоваться установка нескольких панелей по высоте сооружения. Заметим также, что при этом появляется возможность выполнять нижнюю пирамидальную часть емкости в виде ломаных очертаний, изменяя тем самым угол наклона к горизонту отдельных панелей. Это позволяет улучшать условия истечения материала из емкости и создает дополнительные жесткие контуры, заметно улучшающие работу конструкции. Обвязочные элементы при этом располагают повернутыми на необходимый угол, равно как и при стыковке панелей соседних стенок в углах бункерной конструкции. Форма панели может быть принята прямоугольной для формирования вертикальной части конструкции бункера (как приведено на рис. 3) или трапециевидной – для нижней пирамидальной части емкости. Однако, конструктивно они тождественны.

Соединение панелей между собой выполняется на высокопрочных болтах, диаметр которых на 3–4 мм меньше диаметра отверстий в обвязочных элементах панелей. Поскольку отличительная особенность этих соединений состоит в том, что оно основано на трении, возникающем между соприкасающимися поверхностями собранных элементов в результате сильного контролируемого сжатия их болтами, ослабление деталей отверстиями не имеет практического значения. Создается монолитность соединения, которая сохраняется, как свидетельствует опыт [8], на протяжении всего периода эксплуата-

ции конструкций.

Разработанная авторами панельная конструктивная схема для стальных бункерных емкостей приведена на рис. 4 (компьютерная модель). Такая схема оказывается лишенной большинства недостатков, присущих традиционной конструктивной схеме и, кроме этого, имеет ряд существенных преимуществ, среди которых следует отметить:

- возможность изготовления панелей в условиях завода, что существенно повышает их качество и позволяет снизить вероятность ошибок при монтаже;
- упрощение сборки бункерных емкостей на монтажной площадке;
- существенное уменьшение общей протяженности сварных швов в конструкции, особенно в случае применения цельных гофрированных листов;
- повышение ремонтопригодности конструкции, за счет возможности в короткие сроки и технологически несложно произвести замену поврежденной панели;
- возможность предварительной проработки конструктивного решения панели под различные виды сыпучих материалов и условий работы, включая наличие агрессивной внешней среды;
- возможность ориентации элементов внешнего слоя панели под углом к горизонту, что затрудняет скопление на его поверхности производственной пыли и снижает вероятность возникновения и развития коррозионных повреждений;
- повышение эстетических качеств конструкции емкости.

Кроме этого, для емкости, выполненной по панельной схеме, распределение напряжений в конструкции оказывается гораздо более равномерным, практически отсутствуют зоны их резкой концентрации, характерные для традиционной конструктивной схемы.

Основные выводы

Изложенный метод совершенствования конструкции бункерных емкостей путем использования стальных панелей, соединенных между собой высокопрочными болтами, свидетельствует о возможности существенного повышения уровня надежности и ремонтопригодности бункеров.

При этом, масса такой емкости не превышает массу бункера, выполненного по традиционной конструктивной схеме с ребрами жесткости. Более того, как показывают проведенные авторами исследования, имеются резервы для уменьшения массы конструкции на 30-35 %, однако, этот вопрос требует более детального исследования и связан с обоснованием возможности использования в практике стальных листов толщиной 2-3 мм.

Предложенное авторами техническое решение защищено патентом Украины (декларационный патент 69817 А від 15.09.2004) и, по их мнению, может

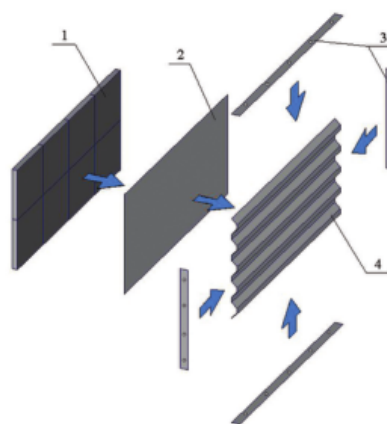


Рис. 4. Бункерная емкость из стальных панелей

уже сейчас с успехом применяться для создания более экономичных со всех точек зрения, более надежных и долговечных стальных бункерных емкостей для сыпучих материалов.

Библиографический список

1. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: В 3 т. / Под ред. В.В. Кузнецова. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 526 с.
2. Банников Д.О., Казакевич М.И. Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов // *Металеві конструкції*. – 2002. – Т. 5. – № 1. – С. 59-66.
3. Банников Д.О., Казакевич М.И. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов. – Днепропетровск: Наука и образование, 2003. – 150 с.
4. Джур Ю.Ф., Павлык П.В. Коррозионный износ металлоконструкций и сборного железобетона объектов металлургических и горно-обогатительных комбинатов. Продление сроков эксплуатации // *Сб. трудов VIII Укр. науч.-практ. конференции «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее»*. – К.: Сталь. – С. 221-223.
5. Солодарь М.Б., Плишкин Ю.С., Кузнецова М.В. Металлические конструкции для строительства на севере. – Л.: Стройиздат, 1981. – 207 с.
6. Ягофаров Х., Собакин Н.Н. Основы теории проектирования листовых металлических конструкций. Пирамидально-призматический бункер. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 234 с.
7. Шестоперов В.Г. Строительство арочного моста из гофрированных металлических элементов // *Транспортное строительство*. – 2006. – № 2. – С. 16-17.
8. Рабер Л.М. Современное состояние и актуальные проблемы развития соединений на высокопрочных болтах // *Металлические конструкции*. – 2000. – Т. 3. – № 1. – С. 24-30.

Поступила 05.07.07