

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ

1. Введение

Условием успешной модернизации производственного потенциала компании "Донецксталь" является концентрация финансовых, материально-технических ресурсов и научно-технического потенциала для обеспечения работоспособности и продления ресурса использования основных фондов. В современных условиях конкурентоспособность на мировых и национальных рынках определяется возможностями высвобождения финансовых ресурсов за счет реализации инновационных проектов в области ресурсосбережения, безопасности эксплуатации и защиты от коррозии объектов инфраструктуры и производственных фондов компании. В сложных экономических условиях развития последних лет компания много внимания уделяла проблеме обеспечения технологической безопасности при эксплуатации объектов повышенной опасности.

Задача оценки остаточного ресурса по критериям технологической безопасности определена в феврале 2004 года для объектов металлургической, коксохимической, горнорудной промышленности и реализуется в Программе работ по диагностике и мониторингу основных фондов, разработанной Донбасским центром технологической безопасности ООО "Укринсталькон им.В.Н.Шимановского" (ДонЦТБ) и компанией "Донецксталь".

Основные этапы разработки научно-методического обеспечения технологической безопасности конструкций зданий, сооружений и инженерных сетей определены Государственной научно-технической программой "Ресурс", утвержденной Постановлением Кабинета Министров № 1331 от 08.10.2004 г.

2. Организация системы управления технологической безопасностью

Организация вертикально интегрированной системы управления надежностью и безопасностью эксплуатации конструкций зданий и сооружений, предупреждение аварий и чрезвычайных ситуаций техногенного характера осуществлялась в соответствии с требованиями технического регулирования Директивы Совета ЕС №89/106/ЕЕС.

Технологическая безопасность характеризует степень защищенности человека, общества, объектов и окружающей среды от угроз, связанных с необоснованным созданием или не созданием технических систем, технологических процессов и материалов, обеспечивающих достижение основных национальных интересов государства. Технологическая безопасность представляет важную структурную составляющую безопасности предприятия, характеризующую систему мер для поддержания работоспособности, повышения эксплуатационных свойств конструкций зданий, сооружений и инженерных сетей, которые полностью или в значительной степени исчерпали свой нормативный ресурс. Такие объекты рассматриваются как источники потенциальной опасности при модернизации (техническом перевооружении), реконструкции и продлении срока их эксплуатации. Анализ отечественных нормативных документов, европейских и международных стандартов подтверждает, что обеспечение безопасности и ремонтпригодности конструкций связано с развитием подходов к управлению надежностью и качеством на основе ISO 9001.

Стратегия применения процессного подхода включает управление ресурсами путем построения системы учета и функционального контроллинга, анализа и регулирования технологической безопасности производственных фондов предприятий. Одной из задач данного проекта являлось обоснование рационального распределения инвестиционных ресурсов во избежание перерасхода или их нецелевого использования.

Реализация процессного подхода к управлению технологической безопасностью на объектном уровне позволила разработать и внедрить стандарты предприятий (технические регламенты), которые обеспечивают оценку рисков при продлении ресурса с учетом уровней уязвимости и угроз, ремонтпригодности при обслуживании объектов по фактическому состоянию. На предприятиях компании "Донецксталь" внедрена система мониторинга для предупреждения аварийных ситуаций на основе международных требований обеспечения профессиональной безопасности OHSAS 18001 с использованием автоматизированной аналитической базы данных "Ресурс". Произведена оценка технического состояния более 100 объектов, что позволило разработать программу обеспечения надежности и обосновать меры по их техническому обслуживанию и ремонтам. Результаты анализа показателей технологической безопасности явились основанием для формирования титульных списков по восстановлению, улучшению и капитальному ремонту основных фондов.

С учетом факторов неопределенности и риска, высокого уровня физического износа методология управления производственными фондами по фактическому состоянию позволяет получить количественные показатели технологической безопасности зданий и сооружений. Указанное обстоятельство имеет первостепенное значение для предупреждения аварийных ситуаций и обоснования мероприятий по усилению и реконструкции при модернизации и техническом переоснащении. Накопление и обработка данных эксплуатационного состояния производственных фондов с использованием базы данных «Ресурс» на предприятиях компании создало условия для повышения эффективности мониторинга показателей технологической безопасности. Систематизация признаков эксплуатационного состояния объектов выполняется в зависимости от уровня уязвимости и угроз, категорий ответственности по технологической безопасности [1-4]. Количественный показатель уровня уязвимости изменяется по шкале от 1 до 8 баллов и зависит от степени критичности повреждений. Группа конструкций по показателям ремонтпригодности определяет возможность и сроки восстановления технического ресурса в зависимости от режима функционирования объекта. Категория дефекта или повреждения определяется с учетом требований табл. 13 ДБН 362-92.

Целью статьи является выявление причин аварийного разрушения опорных конструкций, научно-методическое обоснование и разработка мер обеспечения технологической безопасности манипулятора для съема крышки коренного желоба доменной печи.

3. Экспертное обследование опорных конструкций манипулятора

Манипулятор съема крышки коренного желоба доменной печи предназначается для перемещения конструкций общей массой до 20 т [5]. На рис. 1 представлена схема конструкции манипулятора, разработанного по проекту института «Днепрогидромаш». Колонна манипулятора изготовлена методом центробежного литья МПО «Ника» LTD ПНЦ «Трубосталь» (г. Никополь). По требованиям стандарта [6] отливки 2-ой группы относятся к деталям ответственного назначения и рассчитываются на прочность. Материал - сталь марки 35Л. Изготовление конструкций и монтаж манипулятора в проектное положение осуществлен в 2002 г.

Разрушение узла опорной части колонны произошло при выполнении операций по съему и перемещению крышки коренного желоба доменной печи. Это привело к тому, что поворотная часть конструкции потеряла устойчивость и обрушилась, что привело к обрыву элемента крепления и падению крышки желоба (рис.2).

Программа работ по экспертному обследованию конструкций манипулятора после обрушения выполнена специалистами Донбасского центра технологической безопасности ООО «Укринсталькон им. В.Н.Шимановского» согласно требованиям норм [7].

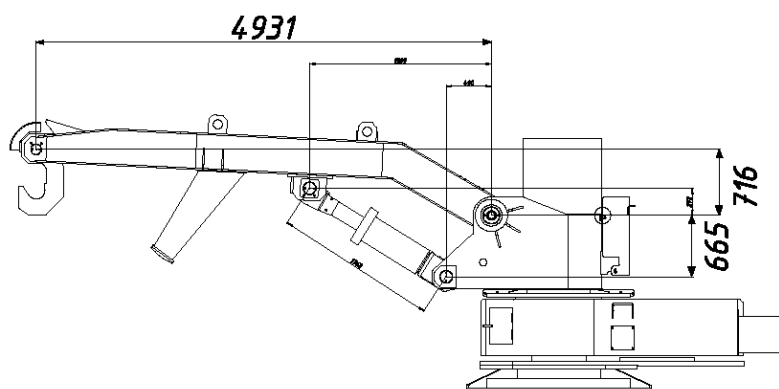


Рис.1. Конструктивная схема манипулятора



Рис.2. Общий вид аварийного обрушения манипулятора

В результате выполненного натурного обследования установлено:

1. Сохранившаяся часть неподвижной опоры манипулятора включает литой ствол колонны в виде трубы с элементами опорных ребер, расположенными по периметру.

2. Разрушение ребер имеет характерные особенности (рис.3):

- для двух ребер имеют место искривления краев разрыва, что свидетельствует о развитии пластических деформаций и вязком разрушении по основному металлу;

- для четырех ребер установлено хрупкое разрушение по границе сплавления угловых швов крепления к горизонтальной плите. При осмотре макроструктуры изломов выявлены дефекты сварных швов, вызванные недостаточной глубиной проплавления основного металла.

В результате аварийного обрушения произошел отрыв одного из ребер с частью основного металла ствола (размерами около 5 x 5 см и толщиной 8...15 мм). Характер излома основного металла ствола – хрупкий. Учитывая, что площадь излома основного металла значительно превышает площадь сварных швов, а поверхность излома значительно удалена от зоны термического влияния, можно сделать вывод о возможности наличия внутренних дефектов основного металла ствола манипулятора. Излом ствола имеет следующие характерные особенности: характер излома – хрупкий, без признаков пластических деформаций; на поверхности



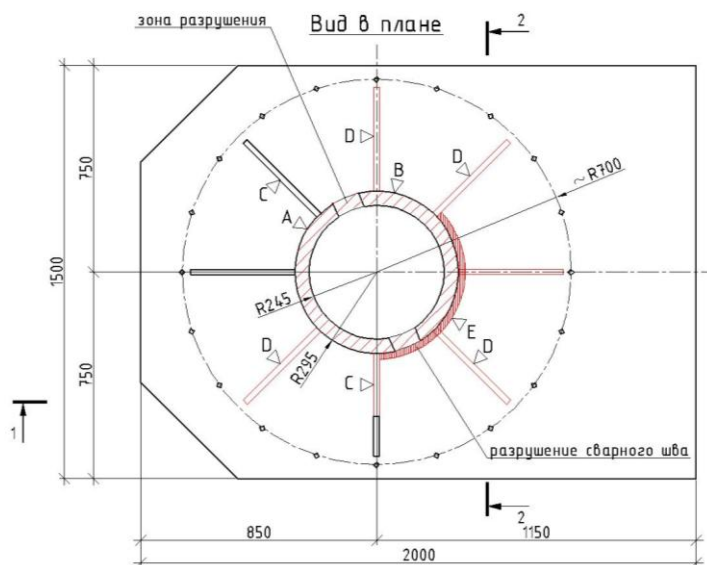
Рис.3. Характер разрушения на участке сопряжения колонны со станиной

излома имеются видимые проявления расслоения металла. Развитие участков разрушения ниже поверхности горизонтальной плиты свидетельствует о высокой концентрации напряжений в месте изменения диаметра ствола.

По результатам оценки дефектов и повреждений выполнено зонирование макроструктурных особенностей разрушения узла крепления колонны к станине (рис.4):

- $\nabla A, \nabla B$ – хрупкое разрушение при наличии дефектов макроструктуры;
- ∇C – вязкое разрушение с выходящей на поверхность поперечной трещиной;
- ∇D - хрупкое разрушение по сварному шву;
- ∇E - трещины в сварном шве (продольные в изломе).

Систематизация дефектов и повреждений по результатам обследования произведена в табл. 1.



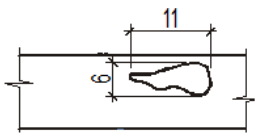
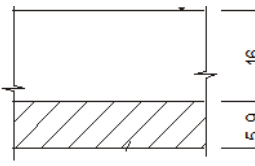
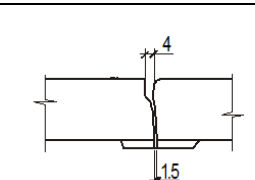
Условные обозначения

- разрушенные элементы
- характеристика разрушения

Рис. 4. Характерные зоны конструктивных элементов участка разрушения

Таблица 1

Диагностика причин возникновения дефектов и повреждений

№ п/п	Код дефекта на схеме	Эскиз дефекта	Описание дефекта	Причина возникновения дефекта
1	A, B		Усадочная раковина: глубина 5,0 мм	Металлургический дефект изготовления
2	D		Сварной шов: – непровар – корня шва; – наплывы; – шлаковые включения	Нарушена технология выполнения сварки
3	C		Трещина: поперечная, раскрытие наружное Δ=4,0 мм, раскрытие внутреннее Δ=1,5 мм	Повреждение при разрушении конструкции

Хрупкий характер разрушения по всему поперечному сечению колонны манипулятора свидетельствует о пониженных пластических свойствах основного металла конструкции, что не соответствует условиям работы при динамических воздействиях. Неметаллические включения, выявленные на поверхности излома поперечного сечения колонны, способствовали хрупкому характеру разрушения ствола колонны (участок ∇A, ∇B).

Конструктивное решение фасонки толщиной 20 мм, расположенных по периметру колонны, не обеспечивает требуемой прочности сопряжения колонны со станиной, о чем свидетельствует характер поверхности вязкого разрушения поперечного сечения фасонки (участок ∇C).

Сварные швы крепления фасонки к станине выполнены с нарушением технологии сварки, что послужило причиной отрыва фасонки по всему сварному шву (участок ∇D).

Следует отметить, что при диагностике характера и условий аварийного обрушения необходимо принимать во внимание наличие мест концентрации напряжений в технологических проемах ствола, изменение геометрических параметров ствола в узле сопряжения со станиной и сложное напряженно-деформированное состояние сварных швов.

4. Проверочный расчет несущей способности опорной конструкции манипулятора

Задание критериев предельных состояний по результатам оценки фактического состояния выполняется с помощью коэффициента обратной связи режима эксплуатации конструкций (ψ) на основании зависимостей:

$$N = \Phi / \Gamma - \psi, \quad (1)$$

$$\gamma_{sr} = \Gamma - \psi, \quad (2)$$

где N – наибольшее расчетное усилие в конструктивном элементе, кН; Φ – предельное усилие, кН, которое может воспринять элемент с характеристикой повреждаемости Θ_j ; Γ – отношение резерва надежности; γ_{sr} – коэффициент технологической безопасности.

Использование коэффициента обратной связи режима эксплуатации (ψ) обеспечивает реализацию аналитического подхода к управлению технологической безопасностью, формированию программ обеспечения надежности на основе решения задач анализа возможных причин, последствий отказов (FMEA) и оценки критичности отказов (FMCA). При этом критерий технологической безопасности конструкций γ_{sr} можно рассматривать как пропускную способность регулирования ресурса (η):

$$\eta = 1/\gamma_{sr} \quad (3)$$

При накоплении дефектов и повреждений Θ_j коэффициент обратной связи (ψ) характеризует снижение эксплуатационных показателей стальных конструкций при установленном проектном значении отношения резерва надежности (Γ). Возмущающие воздействия негативных нагрузок и воздействий вызывают появление признаков предельных состояний конструкций. Пропускная способность регулирования ресурса характеризует допустимое изменение проектного значения отношения резерва надежности (Γ) для обеспечения работоспособного состояния за счет конструктивно-технологических ограничений и восстановления послеремонтной несущей способности.

Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния стальных конструкций для оценки показателей ресурса (ψ, η) выполнено с использованием интегрированного расчетного комплекса SCAD 7.29. Для проверочного расчета принята модель стержня с жестким защемлением. Наличие опорной плиты учитывалось соответствующими опорными закреплениями ребер и трубы. При моделировании условий действительной эксплуатации манипулятора на этапе численных исследований напряженно-деформированного состояния трубы использованы математические модели, позволяющие учитывать возможные динамические силовые воздействия (во время отрыва, подъема и перемещения крышек желобов). Графическая модель, отражающая численные результаты проверочного расчета приведена на рис. 5.

Систематизация признаков эксплуатационного состояния конструкций выполняется с использованием классификационных признаков показателей базы данных "Ресурс" в зависимости от уровня уязвимости и угроз, категорий ответственности по технологической безопасности зданий и сооружений (табл. 2).

Таблица 2.

Категории ответственности сооружений по технологической безопасности

Характеристика уровня угроз	Приемлемый (0)	Низкий (I)	Средний (II)	Значительный (III)	Высокий (IV)	Недопустимый (X)
Сигнальный цвет опасности	Синий	Зеленый	Желтый	Оранжевый	Красный	Черный
Категории ответственности	R0	R1	R2	R3	R4	RX
Коэффициент технологической безопасности, γ_{sr}	Более 1,2	»1,15 » 1,2	»1,1 »1,15	»1,05 » 1,1	От 1 до 1,05	Менее 1,0

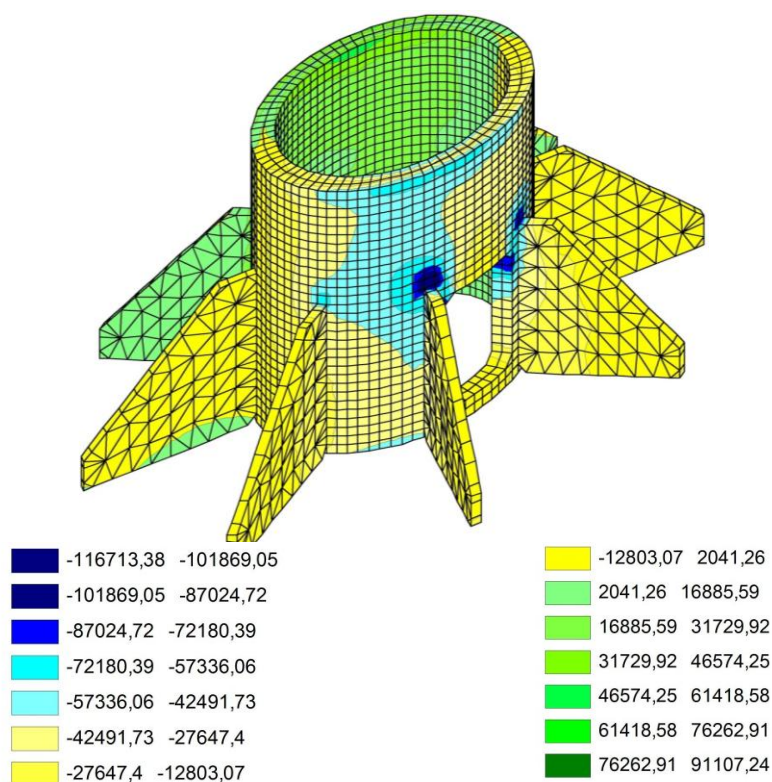


Рис. 5 Конечноэлементная модель опорной конструкции манипулятора без учета дефектов и повреждений. Напряжения в элементах модели σ , кН/м²

ВЫВОДЫ

1. Обоснована структура показателей технологической безопасности для анализа данных экспертного обследования аварийного обрушения опорной конструкции манипулятора для съема крышки коренного желоба доменной печи. Это позволило сформировать процессный подход к принятию решений оперативно-тактического (угрозы **0 - IV**) и стратегического (угроза **X**) значения, направленных на снижение рисков промышленных предприятий. Оперативно-тактические решения, по результатам диагностики технического состояния конструкций (коэффициент технологической безопасности $\gamma_{sr} > 0$), направлены на реализацию предупредительных мер для обеспечения работоспособности конструкций. Стратегические решения принимаются при расследовании причин аварийных ситуаций и катастроф (коэффициент $\gamma_{sr} \leq 0$), вызванных созданием или не созданием условий для реализации предупредительных мер.
2. В результате экспертного обследования, диагностики технического состояния после обрушения манипулятора установлено, что наиболее вероятной причиной отказа узла сопряжения колонны со станиной является наличие множественных дефектов в макроструктуре стальной трубы, выполненной методом центробежного литья, и сварных швах опорной конструкции. Опорная конструкция манипулятора работает в условиях динамических нагрузок, имеет сложное напряженно-деформированное состояние на участках сварных соединений трубы и соединительных ребер с опорной плитой. При отсутствии гарантий механических свойств и химического состава результаты прочностного расчета конечноэлементной модели не отражают действительного напряженно-деформированного состояния опорной конструкции манипулятора. Аварийное разрушение опорной конструкции подтверждает необходимость принятия дополнительных конструктивных и технологических мер для снижения рисков при эксплуатации манипулятора.

Перечень ссылок

1. *Филатов Ю.В.* Продление остаточного ресурса рудно-грейферного крана при конструктивно-технологических ограничениях *Филатов Ю.В., Рухович И.Р., Гибаленко А.Н.*/ Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее: сборник докладов VIII Украинской научно-технической конференции. -Часть II. - К.: Изд-во «Сталь», 2004. - С.417-428.
2. *Королёв В.П.* Оценка риска при техническом регулировании безопасности производственных зданий и сооружений *Королёв В.П., Филатов Ю.В.* /Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку: V міжн. наук.-техн. конф. (19-22 вересня 2006 р., Київ). - К.: Видавництво “Сталь”. - С.287-290.
3. *Шимановський О.В.* Концептуальні основи системи технічного регулювання надійності й безпечності будівельних конструкцій *Шимановський О.В. Корольов В.П.* // Промислове будівництво та інженерні споруди. - 2008. №1.- С. 4-9.
4. *Шимановский А.В.* Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений *Шимановский А.В., Гордеев В.Н., Королёв В.П., Оглобля А.И., Рухович И.Р., Филатов Ю.В.* /— К.: Изд-во “Сталь”-2008. 215 с.
5. ИСО 8402 – 1994 Краны и подъемные устройства. Классификация. Общие положения. Введ. 1987-12-24. - М.: ИПК Издательство стандартов, 1989. - 27 с.
6. ГОСТ 977-88.Отливки стальные. Общие технические условия. - Введ. 1990-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 33 с.
7. ДБН 362-92. Оценка технического состояния стальных конструкций эксплуатируемых производственных сооружений. – Введ. 1992-06-01. - К.: Укрархстройинформ, 1992. – 39 с.

Рецензент д.т.н., проф. Королёв В.П.

Статья поступила 30.12.2013.