

уменьшение движения невозможно. Следовательно, по необходимости должна существовать наибольшая и последняя степень холода, состоящая в полном отсутствии вращательного движения их". И далее: "Так как воздух всюду и везде наблюдается газообразным, т.е. теплым, то все тела, окруженные земной атмосферой, хотя бы и казались чувствами холодными, теплы и поэтому высшей степени холода на нашей планете не может быть".

Принцип недостижимости абсолютного нуля температур вытекает как одно из следствий тепловой теоремы Нернста (1906г.) и является, по современным представлениям, третьим законом термодинамики. Приведенные выше соображения

Ломоносова о "наибольшей и последней степени холода" высказаны им примерно за 160 лет до Нернста.

Самым крупным достижением М.В. Ломоносова было открытие и экспериментальное доказательство одного из фундаментальных законов природы - закона сохранения материи. В 1756г. он поставил классический опыт, в котором показал, что в запаянном сосуде при нагревании происходит окисление свинцовых пластинок, но при этом общий вес сосуда не изменяется. Данный эксперимент аналогичен знаменитому опыту Лавуазье, проведенному на 17 лет позже. В "Рассуждениях о твердости и жидкости тел" М.В. Ломоносов так сформулировал одно из этих положений: "Ежели где убудет

несколько материи, то умножится в другом месте... Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения, ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оные у себя теряют, сколько сообщают другому, которое от него движения получает".

В основе этого положения лежит представление о первом законе термодинамики, являющемся по современным воззрениям законом сохранения и превращения энергии - той общей меры различных форм движения материи, величина которой остается неизменной при любых взаимных ее превращениях.

(Продолжение в сл. номере)

СЕМЬ РАЗ ОТМЕРЬ...

АВАРИЯ БАШЕННОГО КРАНА КБ-674А ПО ПРИЧИНЕ СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС ПРОТИВОВЕСА



И.С. Гольдберг, начальник конструкторского бюро ОО "БОИМ"

На погрузочно-разгрузочной площадке строительно-кооперативной фирмы "Мозырьпромстрой" в г. Мозыре 20 июня 1996 года произошла авария башенного крана КБ-674А (выпуска 1991 года, грузоподъемностью 12,5 т, грузовой момент 200 тм) с травмированием крановщика.

Работы выполнялись по технологическим картам, с исправными стропами, обученным и аттестованным обслуживающим персоналом. Кран использовался с максимальной грузоподъемностью 3т.

В день аварии крановщик приступил к работе, не сделав записи в крановой журнал о результатах осмотра крана. После погрузки кирпича он повернул стрелу без груза к месту складирования поддонов. Раздался треск и началось падение с высоты 18 м поворотного оголовка в сторону противовесной консоли, которая ударилась о землю и переломилась. Затем началось скручивание и разворот стрелы. Произошел удар конца стрелы о землю и ее пе-

релом посередине. Переломанным оказался также выходной вал редуктора механизма вращения, расположенного со стороны стрелы крана.

Организационными и техническими причинами аварии в материалах расследования указаны:

- нарушение требований инструкции крановщиком;
- выполнение работ краном без записей в крановом журнале о результатах осмотра крана перед началом работы и недостаточный контроль за исправностью крана со стороны ответственных лиц;
- обрыв болтов опорно-поворотного устройства (ОПУ) по причине некачественного монтажа (подчеркнуто нами) и заводских дефектов редуктора механизма поворота.

Краны серии КБ оснащены унифицированными механизмами поворота кранов (рис. 1). В комплект механизма входят вертикально расположенный фланцевый электродвигатель 2, тормоз 1, планетарный редуктор со съемной крышкой и вертикально расположенными валами 3. На выходном валу редуктора, имеющего в плане овальную форму, закреплена шестерня 5, которая входит в зацепление с зубчатым венцом ОПУ 6. Механизмы поворота крепят к поворотной платформе крана 4 шарнирно: с помощью вертикального шкворня 7, входящего в отверстие прилива на корпусе редуктора, и натяжным болтом, служащим для фиксации механизма и регулировки зацепления. Такое крепление механизмов поворота позволяет их быстро и легко монтировать и демонтировать при ремонте, а также регулировать зацепление между выходной шестерней и зубчатым венцом ОПУ. При монтаже крана и при ремонте в процессе эксплуатации производится

регулировка зубчатого открытого зацепления известными способами. Смещение пятна соприкосновения зубчатой пары, заметное в процессе техни-

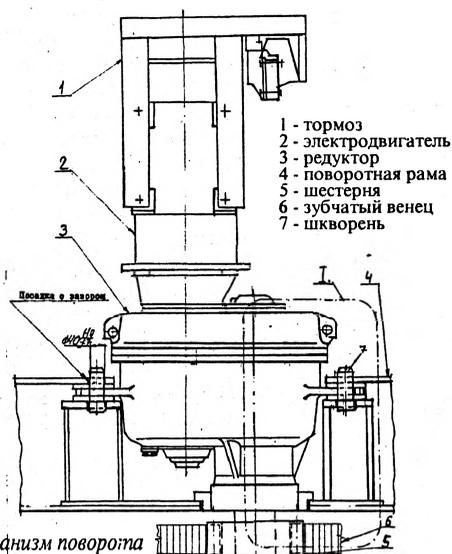


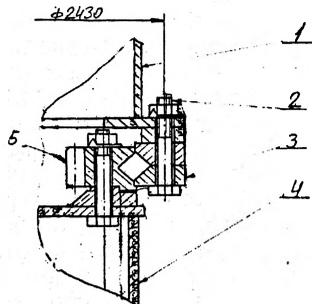
Рис. 1. Механизм поворота

ческого обслуживания крана, говорит об "ухудшении" шестерни, т.е. о нарушении нормального зацепления ее с венцом. Это ведет к частичной недогрузке одного механизма и перегрузке второго, следствием чего может стать постепенное разрушение выходного вала редуктора одного механизма поворота. Однако, нередки поломки на кранах валов не велики к падению кранов. Нарушение нормального зубчатого зацепления в течении длительного времени ведет к неравномерному и повышенному износу открытой зубчатой передачи и оно должно было быть замечено, а затем отрегулировано ремонтным персоналом. Видимо, для увода последнего от возможных неприятностей, связанных с данной аварией крана, привнесена версия о заводском дефекте вала редуктора. Кстати, в заключении, имеющемся в материалах расследования этой аварии, рассмотрен вопрос разрушения входного вала редуктора, но ни о каких заводских дефектах выходного вала ничего не говорится. И это правильно.

Конструктивной особенностью ОПУ (рис. 2) является его крепление чистыми болтами 2 к мощным по сечению рамам: поворотной 1 и неповоротной 4. ОПУ является, по существу, упорным подшипником качения большого диаметра. Его эксплуатация не допускает деформации колец рассчитанных на определенную нагрузку. Однако из-за больших размеров по диаметру и небольших в поперечном сечении собственная жесткость опорно-поворотных кругов мала. В кране КБ-674А имеется 48 болтов ОПУ. При наружном диаметре его круга 2500 мм и диаметре болтовой окружности 2430 мм эти болты нагружены неравномерно: в зонах примыканий к поворотной раме консоли противовеса и стрелы. Здесь чаще происходит обрыв болтов. Поэтому требуется их систематическая подтяжка определенным крутящим моментом. Недотянутые болты ослабляются и начинают в процессе работы крана разбивать болтовые отверстия и чистый болт начинает работать как черный, что ведет к последующему его обрыву. Замена оборванного болта новым чистым болтом при разбитом отверстии не дает требуемого эффекта. Поэтому в акте расследования аварии данного крана, где указано "Обрыв болтов ОПУ по причине некачественного монтажа" следовало бы дописать "и технической эксплуатации".

При проектировании поворотных кранов, в том

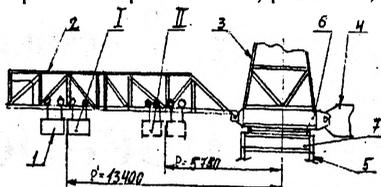
числе и башенных, стремятся подобрать такую величину произведения массы противовеса на его



- 1 - поворотная рама
- 2 - чистые болты крепления ОПУ
- 3 - опорно-поворотное устройство (ОПУ)
- 4 - неповоротная рама башни крана
- 5 - зубчатый венец

Рис. 2. Поперечный разрез крепления ОПУ

противовеса при отсутствии груза на крюке. Инstrukция Никопольского краностроительного завода изготовителя предусматривает для крана КБ-674А (рис. 3) расстояние Р от оси вращения крана до центра масс противовеса, равное 5,75 м. Изменение его



- 1 - место фактической установки противовеса
- II - место проектной установки противовеса
- 1 - тележка с противовесом
- 2 - противовесная консоль
- 3 - оголовок
- 4 - стрела
- 5 - башня
- 6 - поворотная рама
- 7 - неповоротная рама

Рис. 3. Установка противовеса на консоли

ведет к изменению и величины момента. Возросший момент передается через консоль противовеса на поворотную раму и далее на болты, которыми данная рама присоединена к ОПУ. Для всех типов поворотных кранов ОПУ выпускается в комплекте с механизмом поворота со своими болтами. Излишний запас прочности в них, как и в литом корпусе редуктора механизма поворота, не предусмотрен. Предельное рабочее усилие одного болта диаметром 30 мм из стали 40Х в многоболтовом соединении на растяжение составит около 14 т. При возрастающем моменте, созданном противовесом, резко возрастает нагрузка не только на болты ОПУ, но и на металлоконструкции поворотной и неповоротной рам крана, начинается перекос сначала поворотной рамы, а затем и дополнительное нагружение, скрепляющих ее с ОПУ болтов. При этом сидящие на деформируемой поворотной раме 1 (рис. 1) оба механизма поворота крана отклоняются от своего проектного положения, обе открытые шестерни постепенно выходят из нормального зацепления с зубчатым венцом 6 ОПУ. Далее нижний торец шестерни со стороны стрелы механизма поворота упирается в неповоротный круг башни. От данного контакта шестерни на неповоротном круге остался след - износ материала. Соответственно открытая шестерня второго механизма поворота, установленного со стороны противовесной консоли, начала отклоняться в сторону центра неповоротного круга, что видно по отпечаткам венца на зубьях данной приводной шестерни. Повторяем, видно по отпечаткам зубьев венца. Однако, технический персонал, длительное время обслуживающий этот кран почему-то не заметил ни ненормального зубчатого зацепления открытой передачи, ни ослабленных болтов ОПУ. Допускаем, что первоначально причину аварии - грубую ошибку монтажников, сместивших на 7,64 м противовес

по консоли от оси вращения крана (что резко увеличило момент от противовеса на поворотную раму и болты ОПУ, а также на другие механизмы и детали металлоконструкции крана) сразу могли и не заметить. Но повышенный и "неправильный" износ зубьев, обрыв болтов ОПУ своевременно не выявились при техническом обслуживании крана. В заключении отмечено, что из 48 болтов крепления ОПУ к поворотной раме 14 были оборваны до аварии, 9 – имели трещины. Следует иметь в виду, что часть болтов, расположенных вблизи нейтральной оси недогружена. Нагрузка на крайние болты ОПУ от момента противовеса пропорциональна плечам при нормальной эксплуатации крана составило: $5,75/2,43 \cdot 2 = 4,73$, где $2,43/2$ - радиус болтовой окружности крепления ОПУ к поворотной раме крана

При увеличении плеча противовеса до 13,4 м, что видно по отпечаткам опорных роликовых поверхностей катания по консоли имеем:

$$13,4/2,43 \cdot 2 = 11,03.$$

Значит увеличение нагрузки на крайние болты (на болты расположенные в зоне крепления консоли противовеса и в зоне крепления стрелы) ОПУ от роста плеча момента от противовеса составило:

$$11,03/4,73 = 2,3 \text{ раза, т. е. болт перегружен на } 130\% \text{ сверх предельного усилия.}$$

Если допустить, что крайние болты ОПУ были нагружены только от проектного момента противовеса на растяжение предельным усилием 14 т, то статическая нагрузка на болт возросла сверх предельной рабочей и составила фактически:

$$14 \cdot 2,3 = 32,2 \text{ т.}$$

Из этого прикидочного расчета видно, что от резко возросших статической плюс динамической нагрузок болты должны были обрываться. Это имело место в натуре, что в составленном заключении по данной аварии крана скрупулезно зафиксировано. В заключении также отражены и не очень влиявшие на причину аварии крана обстоятельства. Например, "На обоих механизмах поворота стрелы нижний торец шестерни находится ниже нижнего торца неподвижного зубчатого венца. При этом на механизме поворота, установленном со стороны стрелы, смещение торца ведущей шестерни, было на 5 мм больше, чем смещение торца ведущей шестерни, установленной со стороны противовесной консоли".

Такие случаи несовпадения торцов зубчатой передачи при ее сборке нередко имеют место. Поэтому при изготовлении зубчатых передач (например в редукторах) предусматривают ширину шестерни большей на несколько мм ширины зубчатого колеса, благодаря чему компенсируется возможная продольная неточность сборки.

Поэтому смещение торцов шестерен на 5 мм в двух механизмах поворота крана существенного влияния на причину аварии, видимо, не оказывало, хотя содействовало недогрузке одного и перегрузке второго.

Нельзя согласиться с тем, что: "При поворотах торец шестерни упирался в неповоротный круг и нагружал болты растягивающей нагрузкой, что привело к постепенному разрушению" (подчеркнуто нами). Не от этой дополнительной нагрузки болт разрушался.

Во многих поворотных кранах имеет место постепенное ослабление затяжки болтов по всему кругу, и если их не затянуть по диаметру по 4 болта подряд, то идет разрушение болтов ОПУ, хотя там и нет от упора торца шестерни в поворотный круг дополнительно растягивающей силы.

По оставленному следу видно, что торец шестерни упором нагружал дополнительно болты ОПУ, однако не мог их оборвать по следующей причине: для перекоса ОПУ нужно перекосить примыкающие к нему мощные рамы. Для этого требуется передать на них усилие, через болты кре-

пления механизма поворота, соединенные с литым корпусом редуктора.

Механизм поворота крана закреплен к его поворотной раме не жестко, а шарнирно к трем точкам в приливе корпуса редуктора. Причем, в зоне открытой шестерни редуктора находятся два болта из трех. Так может ли упор из двух черных болтов повредить многоболтовое соединение ОПУ на чистых болтах из стали 40х, при их одинаковых диаметрах? Ведь при работе на литой корпус редуктора нет вертикальной нагрузки.

Известно, что механические свойства стального литья ниже, чем металлопроката, из которого изготовлены болты. При значительных вертикальных усилиях, возникающих от упора торца шестерни редуктора (к приливу его корпуса закреплены три болта, соединяющих один поворотный механизм с поворотной рамой) в неповоротный круг ОПУ, в первую очередь начнут обрываться не болты, а прилив на корпусе редуктора, в отверстие которого вставлен болт. Значит болты ОПУ обрывались не от упора шестерни в неповоротный круг, а из-за резкого удлинения плеча противовеса.

При эксплуатации многих башенных кранов серии КБ, к сожалению, бывают случаи горизонтального перемещения на небольшую величину редуктора механизма поворота при включении этого механизма. Перемещение ликвидируют подтяжкой болтов и гаек.

Итак, вскоре после ввода в действие кран КБ-674А стал технически неисправным. У него из 48 болтов крепления ОПУ только 25 остались неповрежденными. В рабочей зоне данного болтового крепления ОПУ, не приближенной к нейтральной оси, 14 болтов были оборваны до аварии и 9 – имели трещины, т.е. в рабочей зоне почти все болты крепления ОПУ, как следует, не могли работать.

У крана шестерни двух механизмов поворота вышли из нормального зацепления с открытым зубчатым венцом ОПУ, что привело к недогрузке одного механизма поворота и перегрузке второго, у которого постепенно разрушается выходной вал редуктора (в момент аварии неразрушенной осталась только сердцевина вала диаметром 10 мм). Подтяжку болтов крепления ОПУ моментом затяжки 200 кгм не производилась. У крана длительное время поворотная часть (система консоль с противовесом - поворотная рама с ОПУ - стрела) была перекошена при отсутствии груза на крюке в сторону противовеса, в связи с резким удлинением его плеча при монтаже крана. Подъем грузов малого веса: до трех тонн не уравнивал моменты.

При повороте крана на массу противовеса действует горизонтальная сила инерции пуска или торможения крана, которая создает момент, воспринимаемый через консоль противовеса поворотной рамой, болтами ОПУ и остальными деталями конструкции крана. Эта горизонтальная инерционная сила, приложенная к центру масс противовеса, создает тем больший дополнительный момент на кран, чем длиннее ее плечо. При удлинении этого плеча с 5,76 м до 13,4 м в горизонтальной плоскости появился значительный дополнительный момент. Кран при повороте от сочетания действия как проектных эксплуатационных, так и дополнительных вышеуказанных нагрузок начал трещать и падать в сторону противовесной консоли.

