

- симп., провод. в рамках 13-й междунар. выставки «Порошковая металлургия-2011», 22–25 марта 2011: в 2 ч. Ч. 2.: — Минск, 2011. — С. 62–69.
8. Упрочнение ножей кормоуборочных комбайнов высокоскоростным газопламенным напылением покрытий из самофлюсующихся никелевых сплавов с карбидом вольфрама / Е.Д. Манойло [и др.] // Сварка и родственные технологии: Республ. межведомств. сб. науч. трудов. — № 10. — Минск, 2008. — С. 104–111.
9. Патент РБ №14178 С1. 2011.04.30. МПК (2009). С 23С 4/06, С 22С 9/01. Порошок для высокоскоростного газопламенного напыления покрытий / Е.Д. Манойло, Ф.Е. Онащенко, А.П. Корженевский (ВУ) // ГНУ «Институт порошковой металлургии» (ВУ).
11. Патент РБ №14389 С1. 2011.06.30. МПК (2009). С 23С 4/04. Композиционный порошкообразный материал для газопламенного напыления покрытий / Е.Д. Манойло, Ф.Е. Онащенко (ВУ) // ГНУ «Институт порошковой металлургии» (ВУ).

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ БАШЕННЫХ КРАНОВ С НИЖНИМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ОПУ

*К.т.н. Наталевич А.Н., к.т.н. Нестеренко Н.Л.,
к.т.н. Горбащ В.Г., к.т.н. Делендик М.Н.*

В 2010 г. строительными организациями г. Гомеля были отмечены неоднократные случаи преждевременного выхода из строя нижних секций башни башенных кранов, изготавливаемых РПУП «Могилевский завод «СТРОММАШИНА».

В частности, башенный кран КБМ-401П зав. № 102, рег. № 8624 (владелец ОАО «СМТ № 27» УМ-238), введенный в эксплуатацию 18.05.2009, был остановлен 21.09.2010 для демонтажа и изъятия вышедших из строя четырех нижних секций башни. Характерной особенностью крана является нижнее расположение ОПУ, что обуславливает массу поворотной части 100 т, т. е. 85 % от массы крана.

Возможными причинами выхода секций башни из строя, по мнению завода-изготовителя, являются многочисленная недопустимая перегрузка крана (на 21.09.2010 регистратором параметров ОНК-160Б зафиксировано 218 случаев перегрузки) и ветровая нагрузка.

Владелец крана считает, что возможными причинами может быть несоответствующее качество металла, сварных швов и (или) несоблюдение технологии при сборке и сварке.

Для определения причин преждевременного выхода секций крана из строя научными сотруд-

никами МИПК и ПК БНТУ была проведена работа по определению химического состава материала раскосов, микроструктуры стали, механических характеристик стали, проведены расчеты напряженного состояния и усталостной выносливости элементов башни крана.

Характер повреждения секций

Вышедшие из строя четыре нижние секции № 740, 748, 764, 779 имели один–два поврежденных раскоса, (труба 60×4 сталь 20В), причем установлено два вида повреждений: наличие усталостных трещин в околосшовной зоне и погнутости (изгибы), расположенные примерно посередине раскоса (рис. 1, 2). Погнутость раскосов различна при стрелке от 40 до 65 мм (рис. 1).

На 4 указанных секциях имеются 5 раскосов с трещинами на концах, находящимися в начальной стадии развития, но без изгиба. В то же время не обнаружено раскосов, которые имели бы изгиб, но не имели трещин в местах соединения с поясом. Это показывает, что первичным признаком разрушения является зарождение и развитие трещины (рис. 2, 3). Изгиб раскосов происходит после достаточной степени развития одной или двух трещин.



Рис.1. Вид погнутого раскоса



Рис.2. Зарождение усталостных трещин

Один из вышедших из строя раскосов секции № 748 имеет не один, а два изгиба, причем, если один изгиб расположен в вертикальной плоскости секции, то второй (ближе к концу раскоса) расположен в плоскости, перпендикулярной к вертикальной. Это свидетельствует о сжатии раскосов значительным усилием, когда раскос теряет устойчивость сначала в одной плоскости, а затем во второй.

Причины возникновения усталостных трещин в раскосах

Установлено, что возникновение усталостных трещин в околошовной зоне раскосов при имеющей место незначительной наработке крана, в первую очередь обусловлено тем, что в качестве материала раскосов использована сталь, значение предела текучести σ_T которой выше на 37 % предусмотренных ГОСТ 8731-87, ГОСТ 1050-88 и на 27 % выше указанных изготовителем в паспорте крана.

В то же время браковочные значения механических характеристик прокатной стали в соответствующих стандартах определяются (например, согласно СНиП II-23-81*) значением коэффициента надежности по материалу $\gamma_m = 1,025$. Иначе говоря, отклонение прочностных характеристик стали от стандартных значений, имея обеспеченность 95 %, должны соответствовать $\pm 2,5$ %.

Указанное превышение предела текучести выбранного материала для раскосов, уменьшая пластичность, снижает сопротивление усталости, тем самым ускоряя процесс возникновения трещин.

Отметим, что для сварных крановых конструкций используют пластичные низкоуглеродистые стали, у которых максимальное отношение величины предела текучести σ_T к пределу прочности не превышает 0,6, т. е. $\sigma_T / \sigma_B \leq 0,6$.

Вторым фактором, инициирующим появление усталостных трещин при выбранной стали для раскосов, является сплющивание концов раскосов, привариваемых к поясам, следствием которого являются следующие обстоятельства:

- ослабление жесткости раскосов в вертикальной плоскости ввиду уменьшения момента инерции сечения в местах сплющивания;
- концентрация напряжений в околошовной зоне из-за сплющивания (малый угол подхода сплюснутых концов раскосов к поясам усложняет наложение сварных швов, приводя к неравномерности катетов швов и повышает вероятность непроваров). Это является также причиной появления эксцентриситета при действии продольного усилия в раскосе и изгибающего момента в сварном соединении, увеличивающего рабочее напряжение до 10 % сверх допускаемых.

Зависимость рабочих напряжений, возникающих в раскосах от вида

укрепления концов раскосов к поясам

Устойчивость сжатых стержней в значительной мере определяется коэффициентом μ приведения геометрической длины к расчетной. Значение коэффициента μ различно для разных видов закрепления концов стержня (в нашем случае трубы 60×4).

При наличии сплюснутых концов, привариваемых к поясам, коэффициент $\mu_1 = 1$ (шарнирное закрепление).

Если отказаться от этого вида закрепления и заменить жестким с разделкой концов раскосов к поясу (труба 140×12) с последующей приваркой, то коэффициент $\mu_2 = 0,5$ (жесткое закрепление).



Рис.3. Развитие усталостной трещины, предшествующее разрушению сварного соединения

Во втором случае при $\mu_2 = 0,5$ гибкость λ раскоса будет в 2 раза меньше ввиду того, что $\lambda = l\mu$ (l — длина раскоса).

Напряжения в сжатом стержне определяются известной зависимостью

$$\sigma = \frac{Q}{\varphi \cdot A},$$

где Q , — продольное усилие; A — площадь сечения раскоса; φ — коэффициент продольного изгиба, выбираемый по таблицам в зависимости от гибкости λ и расчетного сопротивления R_y стали.

Согласно приведенной зависимости, для варианта жесткого закрепления концов раскосов получим снижение величины напряжения в 2 раза, т. к. величина коэффициентов φ_1 и φ_2 , выбранных по таблицам СНиП II-23-81*, составляет $\varphi_1 = 0,332$ и $\varphi_2 = 0,665$.

Соответственно этому получаем весьма существенное (в 3–5) раз повышение сопротивления усталости сварного соединения.

Оценка рабочих напряжений, возникающих в раскосах и поясах секций от действия вертикальных сил (масса крана и груза) и опрокидывающего момента

За время эксплуатации крана длительностью около года, соответствующей числу циклов нагружения $N = 2,5 \cdot 10^4$, регистратором зафиксировано 218 случаев перегрузки при загрузке крана от 105 до 255 %.

По мнению изготовителя эти перегрузки являются причиной преждевременного выхода секций башни из строя.

Для подтверждения или опровержения этого сравним значения рабочих напряжений в раскосах и поясах от действия вертикальных сил (масса крана и груза) и опрокидывающего момента.

Проведенные с использованием программного комплекса «ЛИРА» расчеты показывают, что при загрузке крана на 100 % напряжения в раскосах составляют 2–3 МПа, в поясах — 75 МПа.

При загрузке 255 % (максимальная перегрузка 155 %, имеющая место в 8 случаях за время эксплуатации) те же напряжения составляют: в раскосах — 10 МПа, в поясах — 183 МПа.

Сравнивая приведенные значения напряжений, можно видеть, что, во-первых, рабочие напряжения меньше $\sigma_T = 335$ МПа, предела текучести материала раскосов и поясов; во-вторых, напряжения в раскосах ничтожно малы.

С учетом приведенного следует считать, что вышеуказанные зафиксированные регистратором ОНК-160Б перегрузки не являются причиной выхода секций башни из строя.

Регистрируемый прибором опрокидывающий момент не вызывает существенного нагружения раскосов, а загружает пояса секций (труба 140×12). Пояса секций являются несущими элементами секций и не имеют повреждений.

Раскосы же, несмотря на то, что не являются несущими, выходят из строя при весьма незначительной наработке, что свидетельствует о силовом воздействии невыявленного фактора.

Причины появления остаточных изгибов раскосов и усталостного разрушения

Наличие остаточных изгибов вышедших из строя раскосов свидетельствует о действии продольного сжимающего усилия, величина которого достигает критической, когда раскосы теряют устойчивость.

В то же время выше было отмечено, что вертикальные силы от веса крана с грузом и опрокидывающий момент не являются причиной изгиба раскосов.

Следует считать, что единственной причиной возникновения критической величины сжимающего усилия в раскосах является действие крутящего инерционного момента, скручивающего башню при повороте крана.

При отсутствии соответствующего ограничения скорости поворота башни крана с учетом массы поворотной части крана 100 т и влияния ветровых нагрузок величина инерционного момента может достигнуть, как показали расчеты, значения 118 кНм (11,8 тм).

При таком значении момента знакопеременные усилия сжатия-растяжения будут равны 85 кН (8,5 т), что близко к критическому значению, когда раскосы теряют устойчивость.

Наличие остаточных выгибов в раскосах является реальным подтверждением действия указанного момента. Наличие не одного, а двух выгибов во взаимноперпендикулярных плоскостях на одном из вышедших из строя раскосов свидетельствует также о наличии изгибно-крутильной формы потери устойчивости, когда раскосы теряют устойчивость и работают не как центрально-сжатые, а как внецентренно-сжатые элементы.

Такой характер деформации раскосов, указывая на действие крутящего инерционного момента, показывает, что установленный на кране регистратор ОНК-160Б не выполняет функцию защиты от инерционного момента, контролируя только величину опрокидывающего момента.

Характеризуя процесс разрушения раскосов заметим, что одновременно с возрастающей деформацией изгиба раскосов от циклического действия продольных сил, сжимающих и растягивающих раскосы при каждом повороте крана, происходит усталостное разрушение металла в зоне примыкания раскосов к поясам.

Последнее начинается с момента возникновения трещин (рис. 2) в местах расположения концентраторов напряжений и сопровождается ростом трещины вплоть до отделения раскосов от поясов (рис. 4).



Рис. 4. Разрушение сварного соединения

Механизм разрушения раскосов

В результате проведения химанализа материала раскосов секций башни крана, испытаний образцов, вырезанных из раскосов, определения

механических параметров стали, проведенных расчетов напряженного состояния раскосов и усталостной выносливости установлен следующий механизм разрушения:

1) фактическое соотношение характеристик материала раскосов $\sigma_T / \sigma_B = 0,675 > 0,6$, снижая пластичность, повышает склонность стали к усталостному разрушению и чувствительность к концентрации напряжений;

2) ускорение усталостного разрушения происходит ввиду наличия концентраторов напряжений, которыми являются:

- местный наклеп в результате сплющивания концов раскосов (труба 60×4), когда сталь имеет пониженную пластичность;
- трещины, надрывы, образующиеся при сплющивании внутри раскосов в местах малых радиусов;
- дефекты сварки (подрезы, непровары) располагающиеся вдоль границ сварных швов;
- нарушение структуры стали в зоне термовлияния при сварке;

3) в результате возникновения и роста трещины имеет место снижение жесткости сварного соединения и при действии значительных по величине сжимающих сил от действия инерционного момента происходит постепенная потеря устойчивости раскосов;

4) по мере развития усталостных трещин и снижения жесткости соединения происходит отрыв раскосов от поясов и их изгиб до величины стрелки 65 мм.

Заключение

Повышение работоспособности секций башни крана КБМ-401П может быть достигнуто за счет следующего:

- использования для раскосов пластичной стали с соотношением $\sigma_T / \sigma_B \leq 0,6$;
- перехода на жесткое крепление раскосов с поясами с разделкой раскосов под пояса и последующей приваркой;
- настройки регистратора ОНК-160Б, изготавливаемого в РФ, на соответствующее ограничение скорости поворота башни;
- повышения качества исполнения сварных швов.