

## РАСЧЕТ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СТРЕЛЫ КРАНА КС-5473В С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОБЩЕГО ИЗГИБА НА МЕСТНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

С. В. Ракша\*

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается стойкость телескопической стрелы грузо-подъемного крана КС-5473В с учётом взаимодействия общей и местной форм выпучивания. Разработанный алгоритм решений данной задачи позволяет определить значение критической нагрузки потери местной устойчивости и предельного нагружения, а также оценить действительные запасы конструкции.

Розглядається стійкість телескопічної стріли вантажопідіймального крана КС-5473В з урахуванням взаємодії загальної та локальної форм випучування. Розроблений алгоритм рішення даної задачі дозволяє визначити значення критичного навантаження локальної втрати стійкості і граничного навантаження, а також оцінити дійсні запаси конструкції.

The stability of the cargo crane telescopic gibbon КС-5473В with allowance for interactions of the common and local forms of a swelling are considered. The developed algorithm of the given task solution allows to define a value of a critical load of a stability local loss and ultimate load, and also to evaluate real stores of a construction.

Снижение массы конструкции остается главной проблемой при проектировании телескопических крановых стрел. Известны исследования [1,2], в которых основное внимание уделяется напряженному состоянию секций телескопических стрел в зонах сосредоточенных нагрузок от опорных узлов. Результаты свидетельствуют о том, что напряжения, возникающие под действием опорных элементов, не только соизмеримы с напряжениями от общего изгиба стрелы, но и могут их превосходить. Расчеты выполнялись численными методами, причем пояса и стенки секций стрелы рассматривались как отдельно, так и в виде совокупного сечения.

Вклад в напряженное состояние металлоконструкций стрелы от опорных нагрузок учитывается суммированием напряжений от давления опорных элементов и напряжений от внешних нагрузок [3]. При этом критическое состояние конструкции характеризуется деформированием наиболее нагруженного элемента сечения и достижением напряжений в этом элементе предела текучести. Отсюда следует, что несущая способность телескопических стрел тем выше, чем выше предел текучести стали, из которой изготавливаются стрелы, при прочих равных условиях. Однако, под воздействием внешних нагрузок может наблюдаться местная потеря устойчивости секций стрелы, под которой понимается продольное волнообразование элементов сечения. Несмотря на важность задачи о местной устойчивости телескопических стрел от действия внешних нагрузок (о чем свидетельствуют результаты экспериментов [1]), ее исследованию уделяется недостаточное внимание.

В данной работе изложена методика расчета местной устойчивости телескопической стрелы с учетом влияния общего изгиба, позволяющая также рассчитать предельную нагрузку, определяемую началом пластических деформаций. Телескопическая стрела крана (рис.1) рассматривается как тонкостенный сжато-изогнутый стержень коробчатого сечения, состоящий из отдельных секций. Нагрузки, действующие на стрелу, разделяются на внешние, вызывающие общий изгиб (сила тяжести груза  $Q_H$ , усилие в канате подъема  $S_Q$ , силы тяжести секций  $G_i$ ), и местные  $N_i$  (давление опорных элементов в местах соединения секций).

Разложив нагрузку от силы тяжести груза  $Q_H$  на

составляющие, рассматриваем стрелу как стержень, нагруженный сжимающей силой  $P$ , приложенной с эксцентриситетом  $e$ , и поперечной силой  $Q^0$ .

Дифференциальное уравнение изгиба запишем в виде

$$EIW_{,xxxx} = -PW_{,xx} \quad (1)$$

где

$I$  - момент инерции сечения относительно оси минимальной изгибной жесткости;

$W$  - прогиб в направлении оси.

Решение уравнения (1) получим по участкам.

Первый участок.

При граничных условиях

$$\left. \begin{aligned} x_1 = 0; W_1 = 0; W_{1,xx} = 0 \\ x_1 = l_1; W_1 = 0 \end{aligned} \right\}$$

получим решение для первого участка в виде:

$$W_1 = A_1 \sin kx_1 + A_2 x_1 \quad (2)$$

где

$$k = \sqrt{\frac{P}{EI}}; A_2 = -A_1 \frac{\sin kl_1}{l_1}$$

Второй участок.

При граничных условиях

$$\left. \begin{aligned} x_2 = 0; W_2 = 0 \\ x_2 = l_2; M_2 = -EIW_{2,xx} = -Pe \\ Q_2 = -EIW_{2,xxx} = Q^0 + PW_{2,x} \end{aligned} \right\}$$

решение для второго участка имеет вид:

$$W_2 = A_3 \sin kx_2 + A_4 \cos kx_2 + A_5 x_2 + A_6 \quad (3)$$

где  $A_4 = -\frac{e + A_3 \sin kl_2}{\cos kl_2}; A_5 = -\frac{Q^0}{P}; A_6 = \frac{e + A_3 \sin kl_2}{\cos kl_2}$

Неизвестные константы  $A_1$  и  $A_3$  определим, используя

условия сопряжения при  $x_2 = 0; M_1 = M_2; W_{1,x} = W_{2,x}$

$$A_1 = \frac{e - Q^0 \sin kl_2 / kP}{s + q}; A_3 = A_1 \left( \cos kl_1 - \frac{\sin kl_1}{kl_1} \right) + \frac{Q^0}{kP}$$

где  $s = \sin kl_1 \cos kl_2; q = \sin kl_2 \left( \cos kl_1 - \frac{\sin kl_1}{kl_1} \right)$

Максимальный изгибающий момент в сечении  $x_2=0$

\* к. т. н., Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта

$$M_{max} = -EIW_{2,xx} = -\frac{s}{s+q} \left( P \operatorname{seck} l_2 + Q^0 \cdot \frac{t g k l_2}{k} \right) \quad (4)$$

Данную задачу устойчивости при действии сил  $P$  и  $Q^0$  можем свести к задаче, изложенной в [4], и перейти к "эквивалентному" внецентренному сжатию шарнирно-опертого стержня силой  $P$  с эксцентриситетом  $e$ , при котором максимальный изгибающий момент равен

$$M_{max} = P \operatorname{seck} \cdot \frac{L}{2} \quad (5)$$

Определим эксцентриситет  $e$  из условия равенства максимальных напряжений в опасном сечении  $x_2=0$  и в сечении  $x=L/2$  "эквивалентной" схемы. Получим

$$e = \frac{s}{s+q} \left( e + \frac{Q^0 \operatorname{sink} l_2}{Pk} \right) \quad (6)$$

Расчет местной устойчивости и предельной нагрузки секций телескопической стрелы производим по методике, изложенной в [4,5].

Сущность подхода в следующем: стрела рассматривается как сочленение пластин, линии соединения которых остаются прямолинейными при местном выпучивании; решение задачи получается путем объединения решений дифференциальных уравнений устойчивости для каждой из пластин, составляющих сечение; элементы с переменными напряжениями по ширине разбиваются на продольные полосы, в пределах которых напряжения считаются постоянными.

Условия сопряжения элементов сечения приводят к системе однородных уравнений и характеристическому уравнению, которое решается численными методами.

Стрела крана КС-5473В представляет собой 4-х секционную телескопическую стрелу с прямоугольным поперечным сечением секций. Материал, из которого изготовлена стрела, - сталь 4ХГН2МДАФБ с пределом

текучности  $\sigma_{0,2}=700$  МПа, пределом прочности  $\sigma_B=800$  МПа.

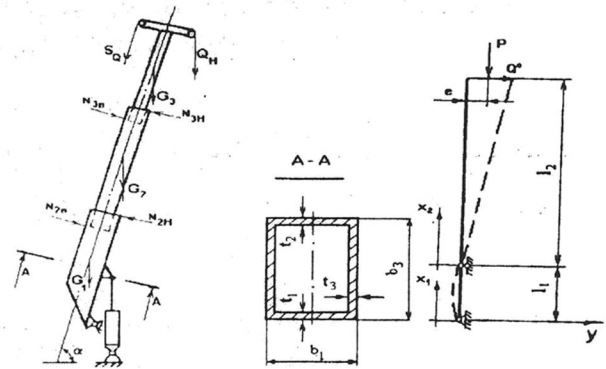


Рисунок 1 - Схема нагружения и расчетная схема телескопической стрелы.

За расчетное принимаем сечение в месте крепления шарнира гидроцилиндра подъема стрелы, в котором изгибающий момент будет наибольшим. Параметры расчетного сечения:

$$\begin{aligned} b1 &= 452 \text{ мм}, \quad t1 = 6 \text{ мм}, \\ b2 &= 452 \text{ мм}, \quad t2 = 7 \text{ мм}, \\ b3 &= 574 \text{ мм}, \quad t3 = 7 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Расчет ведем для двух расчетных случаев:

- I - максимальный груз массой 25 т на минимальном вылете 3,25 м при полностью сложенной стреле;
- II - груз массой 6,5 т на вылете 7,1 м при полностью выдвинутых секциях стрелы.

Были приняты следующие упрощения: расчет ведется только в плоскости подвеса груза; сечение стрелы считается постоянным по всей длине и равным расчетному; усилия от давления опорных элементов не учитываются; не учитываются инерционные и ветровые нагрузки. Нагрузки, действующие на стрелу, и геометрические характеристики приведены в таблице

Таблица - Исходные данные и результаты расчета стрелы

Расчетный случай	$Q_H$ , кН	$S_Q$ , кН	$G_{np}^C$ , кН	$L_C$ , мм	$\alpha$ , град.	$L$ , мм	$l_1$ , мм	$l_2$ , мм	$Q_M$ , кН	$Q_{np}$ , кН
I	250	45.48	8.03	9077	60.28	3250	4460	4617	217.4	453.6
II	65	12.58	8.03	27000	72.0	7100	4460	22540	74.1	153.0

Приняты следующие обозначения:  $Q_H$  - сила тяжести номинального груза на крюке крана;  $S_Q$  - усилие в канате механизма подъема груза;  $G_{np}^C$  - приведенная к оголовку сила тяжести секций стрелы;  $L$  - вылет груза от оси вращения поворотной части;  $\alpha$  - угол наклона стрелы;  $L_C$  - длина стрелы;  $l_1$  - расстояние от опорного шарнира стрелы до шарнира крепления гидроцилиндра подъема стрелы;  $l_2$  - расстояние от шарнира крепления гидроцилиндра подъема стрелы до оголовка стрелы.

Переходя к расчетной схеме, определяем продольную сжимающую силу  $P$  и поперечную силу  $Q^0$

$$P = (Q_H + G_{np}^C) \sin \alpha + S_Q;$$

$$Q^0 = (Q_H + G_{np}^C) \cos \alpha.$$

По формуле (6) определяем "эквивалентный" эксцентриситет  $e$  (принимая  $e=0$ ) и производим расчет устойчивости по методике [4,5]. Результаты расчетов, приведенные к нагрузке на крюке крана, представлены в табл., где  $Q_M$  - нагрузка местного выпучивания элементов сечения секций стрелы;  $Q_{np}$  - предельная нагрузка.

По I-му расчетному случаю ( $Q_H=250$  кН): местная потеря устойчивости элементов сечения наступает при нагрузке на крюке, меньше номинальной на 13%, однако несущая способность стрелы при этом не исчерпывается.

## Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні

Предельная нагрузка, определяемая началом пластического деформирования в наиболее нагруженном элементе сечения (в нижней полке), в 1,8 раза превышает номинальную грузоподъемность крана.

По II-му расчетному случаю ( $Q_H=65кН$ ): местное выпучивание элементов происходит при нагрузке на 14% больше номинальной. Предельная нагрузка превышает номинальную грузоподъемность крана в 2,35 раза.

Таким образом, при принятых условиях нагружения прочность телескопической стрелы крана КС-5473В обеспечивается. Однако, при испытательной нагрузке на крюке крана (1,25; 1,4 номинального груза), а в отдельных случаях и при номинальной нагрузке, возможно местное выпучивание элементов, составляющих сечение стрелы. При деформации поперечного сечения несущая способность конструкции сохраняется, но с точки зрения малоциклового усталости, требуется учет местного выпучивания при расчете на долговечность.

**Заключение.**

1. Использование изложенного подхода позволяет оценить реальные запасы конструкции по местной потере устойчивости и по наступлению пластических деформаций.

2. Предложенный алгоритм позволяет решать задачи о местной устойчивости телескопических стрел грузоподъемных кранов произвольного поперечного сечения (трапециевидного, шести - восьмигранного и др.).

**Литература**

1. Провести исследование влияния параметров и формы сечения на местные напряжения и жесткость при кручении и изгибе телескопических стрел гидравлических кранов г/п до 25 т с целью разработки перспективных конструкций стрел и методики расчета местных напряжений: Отчет о НИР/ВНИИСтройдормаш (рук. Улитенко И.П. - гр 01830065004) Инв. N 02850026714.- 176 с.
2. Ряхин В.А., Гривезирский Ю.В., Зайцев Л.В., Мошкарев Г.Н. Нагруженность крановых телескопических стрел // Строит. и дорожные машины.-1984.- N 6.- С.9-11.
3. Ряхин В.А., Мошкарев Г.Н. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин.- М.: Машиностроение, 1984.- 232 с.
4. Маневич А., Ракша С. Зв'язана втрата стійкості тонкостінних елементів при позацентровому стиску/ Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Праці/ За заг. ред. В.Палаша, Б.Кіндрацького.- Штабар, 1996, С.26-28.
5. Ракша С.В. Расчет местной устойчивости внецентренно сжатых тонкостенных элементов металлоконструкций с учетом общего изгиба. В сб: Научные основы строительства.- К.: ИСДО, 1993, С.152-159.