

2.4. IMPROVEMENT OF THE DEFORMED STATE OF FLIGHT BEAMS OF BRIDGE CRANES

В кранах мостового типа с повышенной несущей способностью пролетные предварительно-напряженные главные балки получают выгиб, противоположный направлению прогиба от нагрузки. Такие балки, как правило, имеют меньшую площадь сечения и, соответственно, меньший момент инерции²². Жесткость конструкции при этом уменьшается, вследствие чего она более деформирована, чем обычные крановые мосты и имеют ряд существенных недостатков²³. Так, например, усилие, которое разгружает крановый мост, не зависит от положения внешней нагрузки и её величины²⁴. Поэтому, существенным недостатком будет случай, когда подвижная тележка с грузом находится над опорой или возле неё. В связи с этим обратные выгибы предварительно-напряженного моста могут существенно возрастать и превышать допустимые рабочие прогибы балки²⁵. Таким образом, уменьшение величины выгиба значительно улучшило бы условия работы пролётной балки и крана в целом. Поэтому вопросы, связанные с исследованием деформированного состояния кранового моста, применительно к реальным условиям эксплуатации, являются актуальными.

Так как на крановую балку одновременно действуют эксцентрично продольные и поперечные силы, то деформированное состояние кранового моста необходимо рассматривать с помощью кривой прогибов самой балки²⁶. Величина же выгиба главной балки должна регламентироваться в зависимости от положения и закона изменения внешней нагрузки.

Проведенный анализ публикаций показывает, что в конструктивных и расчётных схемах мостовых кранов с предварительно напряженными главными балками продольные внецентренно приложенные силы S всегда расположены на одной линии действия – линии размещения затяжки²⁷. Вследствие чего, в местах крепления анкерных устройств на балку действуют изгибающие моменты одной величины, что негативно влияет на её деформированное поведение и приводит к значительным выгибам при известных случаях расположения подвижной рабочей нагрузки. Следует также отметить, что в существующих методах расчётный прогиб главной балки определяется как разница прогибов от действия поперечных сил и прогибом (выгибом) балки от действия продольных усилий предварительного напряжения и самонапряжения в затяжке. Обратим внимание, что предварительно напряженные балки относятся к системам, которые не подчиняются принципу суперпозиции. Поэтому такой подход для определения прогибов (выгибов) не всегда будет корректным, а расчет деформаций может дать только приблизительные результаты, которые невозможно использовать при исследовании.

Следовательно существует необходимость в применении и обоснование новых конструктивных решений по разгрузке предварительно напряженных крановых мостов, которые уменьшают прогибы пролётных балок в зависимости от характера действия

²² Беленя Є.І. Металеві конструкції / Є.І. Беленя, Н.Н. Стрелецький, Г.С. Веденіков, Л.В. Клепиков, Т.Н. Морачевський. – М.: Стройиздат, 1991. – 687 с.

²³ Баженов В.А. Будівельна механіка та металеві конструкції / Баженов В.А., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В., Ухов О.В. – Одеса: Астропринт, 2001. – 432 с.

²⁴ Ухов О.В. Конструктивно-технологические способы разгрузки пролётних строений кранов мостового типа / О.В. Ухов, В.Ф. Семенюк, Б.С. Номерованний, А.В. Ткачов; Одес. гос.политехн.ун-т. – Одесса, 1994. – 16 с. – Деп. в ГНТБ Украины 20.07.94, №1367-Ук 94.

²⁵ Ткачов А.В. Использование малых кратностей стяжных полиспастов при многоступенчатой разгрузке кранового моста / А.В. Ткачов, О.В. Ухов. Праці Одеського політехнічного університету. 1996. Вип.1. С. 40-43.

²⁶ Ухов О.В., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В. Розрахунок і проектування металокопструкцій мобільних машин і механізмів: У 4-х кн. – Кн.1. Будівельна механіка машинобудівних конструкцій. – Одеса: Астропринт, 1998. – 145 с.

²⁷ Ухов О.В., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В. Розрахунок і проектування металокопструкцій мобільних машин і механізмів: У 4-х кн. – Кн.2. Основи проектування кранових металокопструкцій. – Одеса: Астропринт, 1998. – 148 с.

внешней нагрузки. При этом, научный интерес будет иметь решение следующих научно-прикладных задач: создание, на основе предложенного принципиально нового конструкционного решения, математической модели мостового крана с предварительно напряженными главными балками; определение влияния эксцентрично-продольной силы на деформированное поведение главной балки при предложенном новом конструкционном решении; исследование деформированного состояния кранового моста в соответствии с условиями его работы на основе нового конструкционного решения.

Введение предварительного напряжения в конструкцию пролётной балки, для обеспечения повышения её несущей способности, требует изменений её традиционной конструктивной схемы путем создания новых конструктивных и расчетных схем. Для проведения исследования, предложена новая конструктивная и соответствующая ей расчетная схемы кранового моста (рис. 1).

Анкерные блоки с запасованным на них грузовым канатом расположены на разных расстояниях h_1 и h_2 от линии приложения продольной силы S до нейтральной оси изгиба балки. Вследствие чего в местах крепления анкерных устройств, соответственно, на левом и на правом концах балки, действуют сосредоточенные, противоположные по знаку от рабочей нагрузки F моменты M_1 и M_2

$$M_1 = Sh_1; M_2 = Sh_2;$$

Поскольку $h_1 > h_2$, то $M_1 > M_2$. Это условие позволяет, при минимальных конструктивных изменениях, уменьшить величину изгибающего момента. Вследствие этого, при положении нагрузки над опорой изгибы кранового моста будут уменьшены.

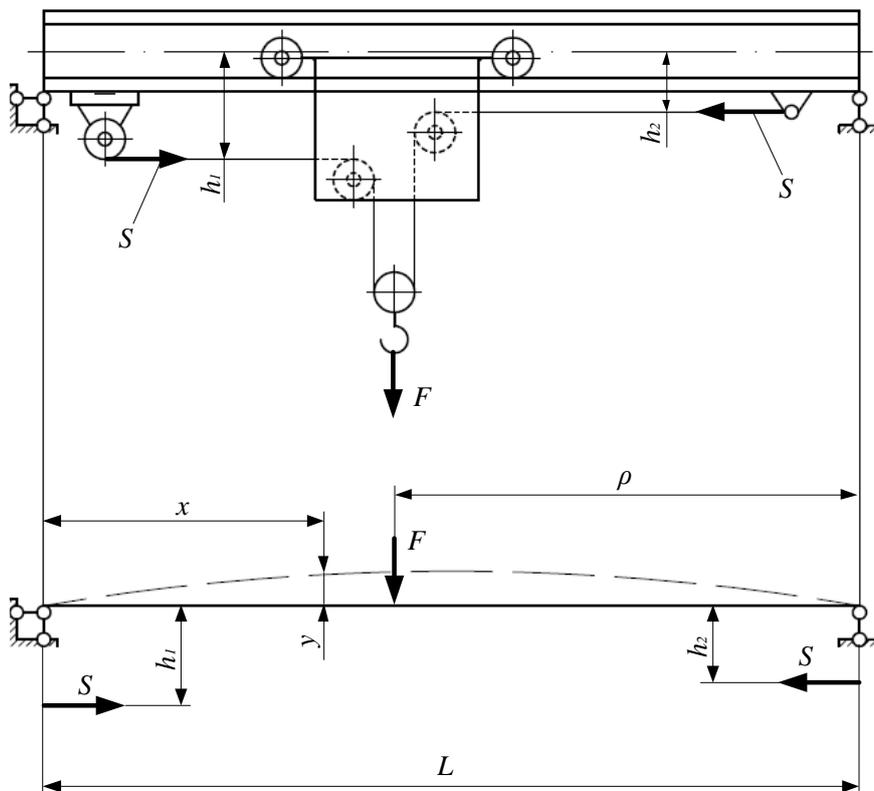


Рис. 1. Конструктивная и расчетная схемы кранового моста

Однако, при работе грузовой тележки в пролётной части крана прогибы главной балки увеличиваются²⁸. Позитивным решением этой схемы можно было бы считать, когда деформации указанной балки не выходили бы за границы прогибов от рабочей нагрузки обычного моста крана²⁹.

Этот вопрос может быть исследован путём рассмотрения математического моделирования пролётной балки с помощью уравнений её кривых деформаций³⁰. При построении математической модели считаем, что все элементы крана твёрдые тела, балка работает в упругой стадии, опирается на идеальные шарниры, изгиб её осуществляется в площади подвеса груза³¹. Тогда, учитывая известные из теории устойчивости упругих систем³² выражения кривых деформаций балки при продольно-поперечном изгибе, получаем дифференциальные уравнения стрелки прогибов для левой части балки³³, при $0 \leq x \leq (L - \rho)$

$$EI \frac{d^2 f_1}{dx^2} = -\frac{F\rho}{L}x - f_1 S + M_1$$

Аналогично, для правой части балки, при $L \geq x \geq (L - \rho)$, соответствующее дифференциальное уравнение будет иметь вид

$$EI \frac{d^2 f_2}{dx^2} = -\frac{F(L-\rho)(L-x)}{L} - f_2 S + M_2,$$

где EI – изгибная жесткость пролётного моста в площади подвеса груза; L – длина балки; x – текущая координата места определения прогибов или выгибов f_1 и f_2 ; ρ – расстояние от правой опоры балки до места действия поперечной нагрузки F ; S – продольная, внецентренно приложенная, сила.

Для упрощения обозначим

$$z^2 = \frac{S}{EI}$$

Тогда, приведенные выше дифференциальные уравнения будут иметь вид, для участка $0 \leq x \leq (L - \rho)$

$$\frac{d^2 f_1}{dx^2} + z^2 f_1 = -\frac{F\rho}{L}x + z^2 h_1.$$

Для участка $L \geq x \geq (L - \rho)$

$$\frac{d^2 f_2}{dx^2} + z^2 f_2 = -\frac{F(L-\rho)}{L}(L-x) + z^2 h_2.$$

Полные интегралы этих уравнений имеют вид, соответственно

²⁸ Ухов О.В., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В. Розрахунок і проектування металокопструкцій мобільних машин і механізмів: У 4-х кн. – Кн.3. Розрахунок металевих копструкцій мостових і копсольних кранів. – Одеса: Астропринт, 1998. – 108 с.

²⁹ Ухов О.В., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В. Розрахунок і проектування металокопструкцій мобільних машин і механізмів: У 4-х кн. – Кн.4. Розрахунок металевих копструкцій козлових та баштових кранів. – Одеса: Астропринт, 1998. – 108 с.

³⁰ Чебровський, А. А. Напряженно-деформированное состояние балок, предварительно напряженных изгибом тавра / А. А. Чебровський // Ученые заметки ТОГУ : электронное науч. изд. / Тихоокеанский государственный университет. – Хабаровск, 2013. – Т. 4, № 4. – с. 1593-1601.

³¹ Ткачов А.В. Уточнений розрахунок жорсткості заздалегідь-напружених балок мостових кранів. / А.В. Ткачов, О.В. Ухов, О.Т. Озернюк. Праці Одеського політехнічного університету. 1997. Вип.1. – С. 92-93.

³² Ухов О.В. Підвищення жорсткості кранових балок / О.В. Ухов, А.В. Ткачов, Б.С. Номерованний. Праці Одеського політехнічного університету. 1998. Вип.1 (5). – С. 98-101.

³³ Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. – М., ГИТТЛ, 2005. – 567 с.

$$f_1 = C_1 \cos zx + C_2 \sin zx + f_1^*$$

$$f_2 = C_3 \cos zx + C_4 \sin zx + f_2^*,$$

где f_1^*, f_2^* - частные решения дифференциальных уравнений

$$f_1^* = -\frac{F\rho x}{SL} + h_1, \quad f_2^* = -\frac{F(L-\rho)(L-x)}{SL} + h_2.$$

Постоянные интегрирования C_1, C_3 определены из условий на концах балки, где прогибы (выгибы) равны нулю

$$(f_1)_{x=0} = 0, \text{ тогда } C_1 = -h_1,$$

$$(f_2)_{x=L} = 0, \text{ тогда } C_3 = -C_4 \operatorname{tg} zL - h_2 \cdot \sec zL.$$

Постоянная интегрирования C_2 определена из следующего условия – в месте действия силы F оба участка кривой деформации балки имеют одинаковый прогиб (выгиб)

$$(f_1)_{x=L-\rho} = (f_2)_{x=L-\rho}.$$

Тогда,

$$C_1 \cos z(L-\rho) + C_2 \sin z(L-\rho) - \frac{F\rho}{SL}(L-\rho) + h_1 = C_3 \cos z(L-\rho) +$$

$$+ C_4 \sin z(L-\rho) - \frac{F\rho}{SL}(L-\rho) + h_2$$

откуда получено

$$C_2 = \frac{1}{\sin z(L-\rho)} ((\sin z(L-\rho) - \operatorname{tg} zL \cdot \cos z(L-\rho)) C_4 +$$

$$+ h_2 (1 - \frac{\cos z(L-\rho)}{\cos zL}) + h_1 (\cos z(L-\rho) - 1))$$

С целью упрощения математических преобразований обозначим

$$A = \sin z(L-\rho) - \operatorname{tg} zL \cdot \cos z(L-\rho),$$

$$B = h_2 (1 - \frac{\cos z(L-\rho)}{\cos zL}) + h_1 (\cos z(L-\rho) - 1).$$

Тогда, выражение для определения постоянной интегрирования C_2 будет иметь следующий окончательный вид

$$C_2 = (C_4 A + B) \cdot \operatorname{cosec}((L-\rho)z)$$

Постоянная интегрирования C_4 найдена из условия, что оба участка кривой деформации кранового моста имеют общую касательную

$$(f_1)'_{x=L-\rho} = (f_2)'_{x=L-\rho}$$

Тогда

$$-zC_1 \sin z(L-\rho) + zC_2 \cos z(L-\rho) - \frac{F\rho}{SL} = -zC_3 \sin z(L-\rho) + zC_4 \cos z(L-\rho) + \frac{F(L-\rho)}{SL}$$

откуда получено

$$C_4 = \frac{\sin z(L-\rho)\left(\frac{h_2}{\cos zL} - h_1\right) - B \operatorname{ctg} z(L-\rho) + \frac{F}{zS}}{\operatorname{Actg} z(L-\rho) - \operatorname{tg} zL \sin z(L-\rho) - \cos z(L-\rho)}$$

После подстановки постоянных интегрирования $C_1 - C_4$ в соответствующие уравнения получаем следующие соответствующие выражения для двух участков кривой прогибов кранового моста.

Для участка $0 \leq x \leq (L-\rho)$

$$f_1 = A \left(\frac{\sin z(L-\rho)(h_2 \cdot \sec zL - h_1) - B \operatorname{ctg} z(L-\rho) + \frac{F}{zS}}{\operatorname{Actg} z(L-\rho) - \operatorname{tg} zL \sin z(L-\rho) - \cos z(L-\rho)} + B \right) (\sin zx \operatorname{cosec}((L-\rho)z) + h_1(1 - \cos zx) - \frac{F\rho}{SL}), \quad (1)$$

для участка $L \geq x \geq (L-\rho)$

$$f_2 = \frac{(\sin z(L-\rho)\left(\frac{h_2}{\cos zL} - h_1\right) - B \operatorname{ctg} z(L-\rho) + \frac{F}{zS})(\sin zx - \operatorname{tg} zL \cos zx)}{\operatorname{Actg} z(L-\rho) - \operatorname{tg} zL \sin z(L-\rho) - \cos z(L-\rho)} + h_2 \left(1 - \frac{\cos zx}{\cos zL}\right) - \frac{F(L-\rho)(L-x)}{SL}. \quad (2)$$

По полученным выражениям были проведены математические исследования деформированного состояния главной балки³⁴, геометрические характеристики сечения которой соответствуют двутавру №24М, ДСТ 19425³⁵. Пролёт балки – $L=10,5$ м, действующие продольные нагрузки – $0,5$ т; $0,63$ т; $1,0$ т, которые рекомендованы для данного пролёта грузоподъёмностям мостовых кранов. Получены результаты расчета в виде условных прогибов $f/[f]$ главной балки для группы режима работы 4К, которые сравнены с допустимым значением условных прогибов – $[f/L] = 2 \cdot 10^{-3}$ (Таблица 1).

Анализ полученных результатов установил, что при соотношении действующих на балку сил $F/S \geq 1,5$ применение предложенного схемного решения позволяет до минимума уменьшить прогибы пролётной балки при положении тележки с грузом над опорой.

³⁴ Мартовицкий Л.М., Глушко В.И. Курсове проектування металоконструкцій: навч. посібник / Л.М. Мартовицкий, В.И. Глушко. – Запоріжжя: Кругозір, 2016.- 418 с.

³⁵ Справочник по кранам: В 2т. Т.1. Характеристика материалов и загрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций/В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин и др.; Под общ. ред. М.М. Гохберг. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.

Таблица 1. Условные прогибы главной балки

$\frac{F_i}{S_i}$	Место действия F_i $\rho = L$	Грузоподъемность $F_{i,T}$					
		$F_1 = 0,5$		$F_2 = 0,63$		$F_3 = 1,0$	
		$h_1 = h_2$	$h_1 \neq h_2$	$h_1 = h_2$	$h_1 \neq h_2$	$h_1 = h_2$	$h_1 \neq h_2$
$L=10,5$ м							
$\frac{F_i}{1}$	$0,5L$	0,38	0,44	0,58	0,6	0,96	0,99
	L	-0,12	-0,06	-0,12	-0,06	-0,12	-0,06
$\frac{F_i}{1,25}$	$0,5L$	0,36	0,41	0,55	0,58	0,92	0,96
	L	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12
$\frac{F_i}{1,5}$	$0,5L$	0,35	0,39	0,52	0,56	0,88	0,94
	L	-0,20	-0,16	-0,20	-0,16	-0,20	-0,16
$\frac{F_i}{1,75}$	$0,5L$	0,29	0,34	0,45	0,52	0,85	0,9
	L	-0,25	-0,18	-0,25	-0,18	-0,25	-0,18
$\frac{F_i}{2}$	$0,5L$	0,28	0,33	0,4	0,48	0,8	0,85

Анализ графической интерпритации результатов расчета прогиба балки показывает, что при приложении эксцентрично-сжимающих сил S_1, S_2 на разных расстояниях ($h_1 \neq h_2$) от нейтральной оси, прогибы балки уменьшаются на 50–70% в сравнении с конструкциями, в которых эти же силы приложены на одной линии действия ($h_1 = h_2$), что положительно влияет на деформированное состояние пролётного моста (рис.2).

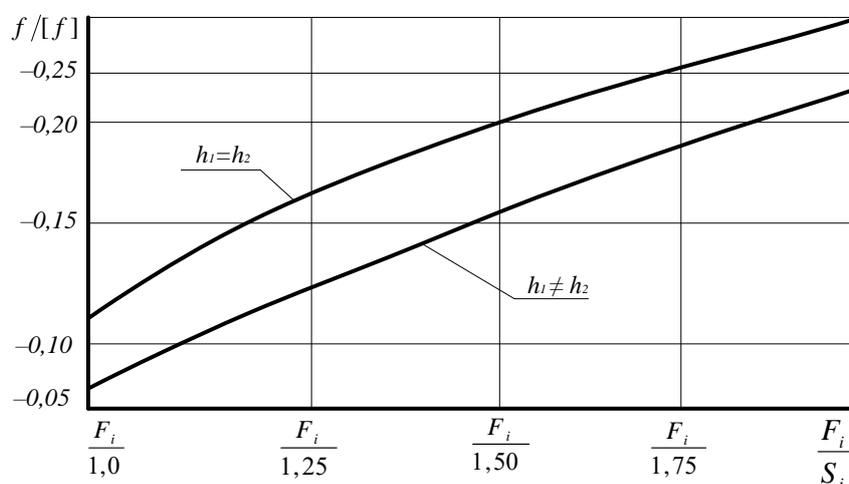


Рис. 2. Расчетные прогибы балки при приложении эксцентрично-сжимающих сил S_1, S_2 на разных расстояниях ($h_1 \neq h_2$) от нейтральной оси изгиба

Анализ графической интерпритации еще одних результатов проведенных расчетов прогиба балки показывает, что при размещении сжимающих сил S_1, S_2 на разных расстояниях ($h_1 \neq h_2$) от нейтральной оси изгиба, прогибы балки увеличиваются на 15...25% по сравнению со схемным решением, где $h_1 = h_2$ (рис.3). В то же время эти деформации балки не выходят за границы прогибов от временной нагрузки F обычного моста, что в свою очередь также положительно влияет на деформированное состояние главной балки и крана в целом.

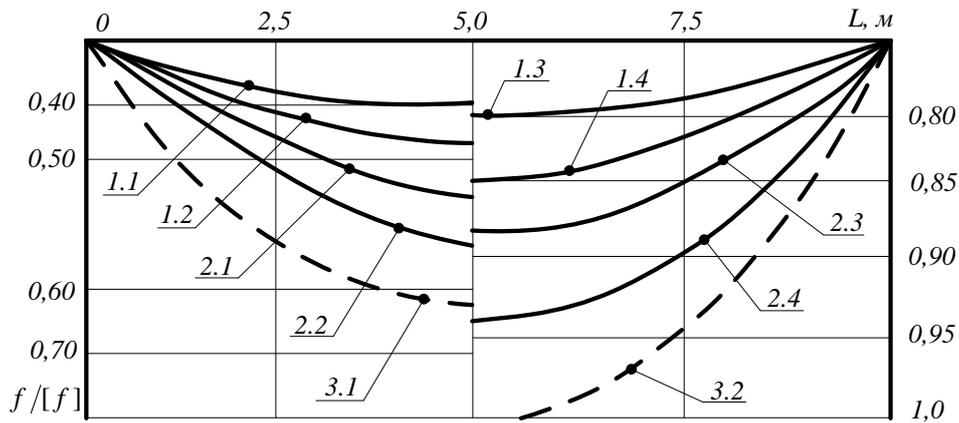


Рис. 3. Расчетные прогибы балки при изменении расстояния от нейтральной оси прогиба и грузоподъемности: 1.1 – $F/S = 1,25$, ($h_1 = h_2$), $F = 0,63$ т.; 1.2 – $F/S = 1,25$, ($h_1 \neq h_2$), $F = 0,63$ т., 1.3 – $F/S = 1,25$, ($h_1 = h_2$), $F = 1,0$ т.; 1.4 – $F/S = 1,25$, ($h_1 \neq h_2$), $F = 1,0$ т.; 2.1 – $F/S = 1,5$, ($h_1 = h_2$), $F = 0,63$ т.; 2.2 – $F/S = 1,5$, ($h_1 \neq h_2$), $F = 0,63$ т., 2.3 – $F/S = 1,5$, ($h_1 = h_2$), $F = 1,0$ т.; 2.4 – $F/S = 1,5$, ($h_1 \neq h_2$), $F = 1,0$ т.; 3.1, 3.2 – прогибы обычной пролётной балки без разгрузочных устройств, соответственно для $F = 0,63$ т. и $F = 1,0$ т.

Полученные выражения (1) и (2) можно использовать и при решении других задач. Например, при использовании при расчетах напряженного состояния кранового моста. Для этого достаточно их дважды продифференцировать для получения уравнений изгибающих моментов

$$M_{зс,1} = -EI \frac{d^2 f_1}{dx^2}, \quad M_{зс,2} = -EI \frac{d^2 f_2}{dx^2}.$$

Таким образом, предложено и исследовано новое конструктивное решение по разгрузке предварительно напряженных крановых мостов. Его использование позволяет значительно уменьшить деформации пролётных балок по сравнению с обычными предварительно напряженными мостами и улучшить условия работы крана. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для модернизации кранов с целью повышения их грузоподъёмности, увеличения срока службы без демонтажа, а также для усовершенствования существующих конструкций и инженерных методов их расчёта как при проектировании, так и в условиях реальной эксплуатации.

References:

1. Белея Є.І. Металеві конструкції / Є.І. Белея, Н.Н. Стрелецький, Г.С. Веденіков, Л.В. Клепиков, Т.Н. Морачевський. – М.: Стройиздат, 1991. – 687 с.
2. Баженов В.А. Будівельна механіка та металеві конструкції / Баженов В.А., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В., Ухов О.В. – Одеса: Астропринт, 2001. – 432 с.
3. Ухов О.В. Конструктивно-технологические способы разгрузки пролётних строений кранов мостового типа / О.В. Ухов, В.Ф. Семенюк, Б.С. Номерованний, А.В. Ткачов; Одес. гос.политехн.ун-т. – Одесса, 1994. – 16 с. – Деп. в ГНТБ Украины 20.07.94, №1367-Ук 94.
4. Ткачов А.В. Использование малых кратностей стяжных полиспастов при многоступенчатой разгрузке кранового моста / А.В. Ткачов, О.В. Ухов. Праці Одеського політехнічного університету. 1996. Вип.1. С. 40–43.
5. Ухов О.В., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В. Розрахунок і проектування металокопункцій мобільних машин і механізмів: У 4-х кн. – Кн.1. Будівельна механіка машинобудівних конструкцій. – Одеса: Астропринт, 1998. – 145 с.

6. Ухов О.В., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В. Розрахунок і проектування металоконструкцій мобільних машин і механізмів: У 4-х кн. – Кн.2. Основи проектування кранових металоконструкцій. – Одеса: Астропринт, 1998. – 148 с.
7. Ухов О.В., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В. Розрахунок і проектування металоконструкцій мобільних машин і механізмів: У 4-х кн. – Кн.3. Розрахунок металевих конструкцій мостових і консольних кранів. – Одеса: Астропринт, 1998. – 108 с.
8. Ухов О.В., Дашенко О.Ф., Коломієць Л.В. Розрахунок і проектування металоконструкцій мобільних машин і механізмів: У 4-х кн. – Кн.4. Розрахунок металевих конструкцій козлових та баштових кранів. – Одеса: Астропринт, 1998. – 108 с.
9. Чебровский, А. А. Напряженно-деформированное состояние балок, предварительно напряженных изгибом тавра / А. А. Чебровский // Ученые заметки ТОГУ : электронное науч. изд. / Тихоокеанский государственный университет. – Хабаровск, 2013. – Т. 4, № 4. – С. 1593–1601.
10. Ткачов А.В. Уточнений розрахунок жорсткості заздалегідь-напружених балок мостових кранів. / А.В. Ткачов, О.В. Ухов, О.Т. Озернюк. Праці Одеського політехнічного університету. 1997. Вип.1. С. 92-93.
11. Ухов О.В. Підвищення жорсткості кранових балок / О.В. Ухов, А.В. Ткачов, Б.С. Номерованний. Праці Одеського політехнічного університету. 1998. Вип.1 (5). С. 98-101.
12. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. – М., ГИТТЛ, 2005. – 567 с.
13. Мартовицький Л.М., Глушко В.І. Курсове проектування металоконструкцій: навч. посібник / Л.М. Мартовицький, В.І. Глушко. – Запоріжжя: Кругозір, 2016. – 418 с.
14. Справочник по кранам: В 2т. Т.1. Характеристика материалов и грузов. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций/В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин и др.; Под общ. ред. М.М. Гохберг. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.