

Исследование и обоснование конструкции главной балки козлового крана

Гарост М.М., Шнаркевич А.А.

Белорусский национальный технический университет

Рассмотрены конструкции главной балки козлового крана. Предложен вариант рационального сечения главной балки с двумя штампованными полусферическими боковыми стенками, полученное на основании исследования и расчета в САД системе - КОМПАС 3D.

Козловой кран относится к подъёмно-транспортным машинам и предназначен для выполнения различного типа работ, которые связаны с подъёмом и транспортировкой грузов. Данный кран один из самых практичных и актуальных подъёмных механизмов [1, 2].

Козловой кран в отличие от мостового выполняет функции перегрузки, используется при строительстве объектов, ремонте и монтаже во всех отраслях промышленности, на машиностроительных заводах, железнодорожных станциях, кирпичных, металлургических, лесозаготовительных предприятиях, атомных и гидроэлектростанциях. Такая востребованность козловых кранов на производственных и стратегически важных объектах обуславливается экономической целесообразностью. Стоимость козловых кранов, за счет отсутствия необходимости возведения крановых эстакад, составляет на 40–60 % меньше стоимости мостовых кранов, выполняющих аналогичные эксплуатационные задачи.

В основном козловые краны применяются при:

- строительстве жилых и офисных зданий, промышленных объектов;
- монтаже зданий и сооружений из железобетона;
- предварительной сборке конструкций и выполнении основных монтажных работ при открытом способе строительства метрополитена;
- заготовке леса на лесозаготовительных и лесоперерабатывающих предприятиях;
- перегрузочных работах в помещениях складского типа;
- перегрузке крупнотоннажных контейнеров и длинномерных грузов в грузовых портах и контейнерных терминалах;
- обслуживании объектов гидротехнического типа;
- производственных цехах;

- проведении ремонтных работ промышленного оборудования, техники крупных размеров, а также для монтажа сборного оборудования на железнодорожных объектах или трамвайных депо;

- производстве железобетонных изделий.

Наиболее важным и сложным вопросом при проектировании козловых кранов является разработка металлоконструкций главных и ездовых балок. Эти элементы, кроме нагружения от собственного веса крана и веса груза, воспринимают нагрузки от неравномерного движения крановых опор или, так называемые, перекосные нагрузки.

Низкая надежность козловых кранов связана со спецификой их работы. Данные краны выполняют не столько работу по подъему-опусканию груза, сколько работу по его перемещению вдоль рельсового пути.

На практике для изготовления главных балок козловых кранов используют широкий диапазон профилей [3]. Основные виды профилей главных балок показаны на рисунке 1.

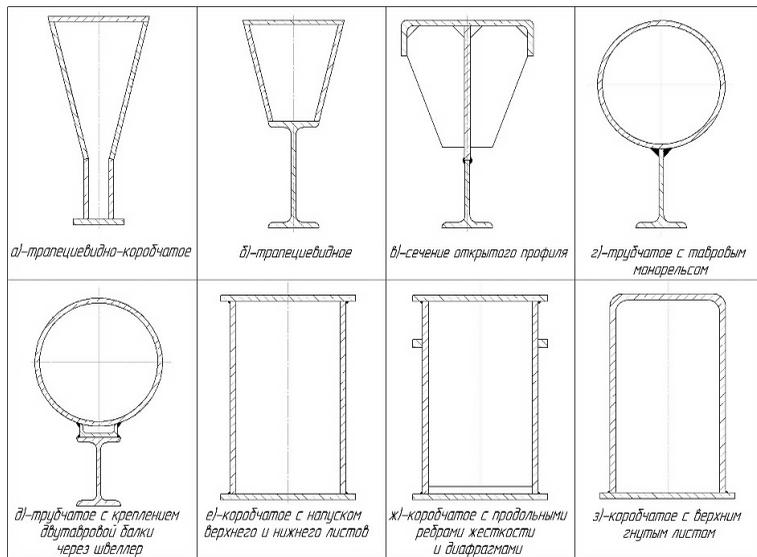


Рис. 1. Поперечные сечения главных балок из листовых и профильных элементов

Коробчатые балки трапециевидно-коробчатого и трапециевидного (рисунку 1, а-б) сечения сложны в изготовлении, однако они имеют более высокую пространственную жесткость. Сечение используют в кранах пролетом 10–12,5 м, где из-за относительно небольших ширины и высоты листов отсутствует необходимость в усилении их ребрами жесткости.

Для кранов грузоподъемностью 1–3,2 т и пролетами 8–12,5 м применяются сечения из двутавровой балки с усилением верхнего пояса листом или швеллером. Более совершенно сечение, показанное на рисунке 1, в, где верхний пояс образован гнутым листом корытного профиля, а нижний образован двутавровой балкой, разрезанной поперёк и приваренной к полосе.

Сечение, показанное на рисунке 1, г находит применение в кранах грузоподъемностью 3,2–5 т и пролетами 10–12,5 м. В частности, балка крана ККТ-5-12,5 изготовлена из трубы, к которой приварен стенкой по зигзагообразной линии тавровый профиль из разрезанного двутавра № 36М с усиливающей полосой. Для повышения горизонтальной жесткости стенку таврового профиля иногда укрепляют поперечными ребрами [3, 4].

Применяется также сечение, выполненное по схеме, показанной на рисунке 1, д, где между двутавровой балкой и трубой расположен промежуточный швеллер. Такая конструкция балки наиболее проста в изготовлении, однако расположение относительно больших масс металла (верхней полки балки и швеллера) вблизи нейтральной оси сечения несколько снижает их экономичность.

Для балок козловых кранов грузоподъемностью 1–3,2 т и пролетами 8–12,5 м самым частым решением являются коробчатые балки с прямолинейными стенками (рисунок 1, е), или с усилением продольными ребрами жесткости и диафрагмами (рисунок 1, ж). Верхний и нижний пояса коробчатых балок делают толще боковых стенок из условия оптимизации по массе [5]. При больших пролетах определяющим критерием обеспечения несущей способности становится не прочность $\sigma \leq [\sigma]$, а жесткость $fL \leq [fL]$, что заставляет увеличивать высоту сечения балки при относительно невысоких номинальных напряжениях. Местная устойчивость высоких стенок в сжатой зоне не обеспечивается. Поэтому их разделяют продольными и поперечными ребрами, а также диафрагмами. Это мало увеличивает массу, но более значительно увеличивает трудоемкость и себестоимость изготовления балок, а также при тяжелых режимах циклического нагружения снижает их сопротивление усталости. Последнее обстоятельство требует принятия конструктивно-технологических мер повышения выносливости или снижения номинальных напряжений в сечении увеличением толщины стенки [6].

Также встречается балка коробчатого сечения, состоящая из нижнего листа и верхнего гнутого листа, усиленная на протяжении всей длины диафрагмами (рисунок 1, з).

Элементы таких коробчатых балок являются технологичными по условиям изготовления и сборки, осуществляемой, как правило, при помощи сварки [4].

Зарубежные разработчики кранов заявляют, что балки, изготовленные из гнутых профилей, позволяют существенно уменьшить их массу (на 15–20 %), при этом увеличивается прочность балок и существенно увеличивается их местная устойчивость по сравнению с прямоугольным сечением [7].

В общем случае секция балки, изготовленная из гнутых профилей, представляет собой сварную конструкцию из двух гнутых частей, сваренных по горизонтальной оси симметрии. Такая конструкция позволяет исключить наличие углов и свести к минимуму количество и протяженность сварных швов [7].

Одним из способов сокращения количества дополнительных элементов в коробчатых балках является использование стенок с гофрами. Препятствием к их широкому внедрению является то, что такие листы изготавливаются прокаткой и экономически выгодны только при значительных объемах проката одного типоразмера. Места расположения гофр зависят от конкретных условий нагружения балок, их длины и высоты, что приводит к разным типоразмерам листов [4].

Другим способом сокращения количества дополнительных элементов в коробчатых балках является использование криволинейных или многогранных стенок. Такое конструкторское решение также позволяет сократить количество диафрагм и продольных ребер, вводимых для обеспечения местной устойчивости. Данный способ не является новым, но в настоящее время он не является широко распространенным по причине недоработанности технологии изготовления и отсутствия методов расчета местной устойчивости стенок [4].

Немаловажное значение также имеет применение современных методов расчета металлоконструкций козловых кранов.

Для выбора рационального сечения главной балки был произведен анализ литературных и патентов источников по конструкциям балок с криволинейными стенками коробчатого и близкому к нему сечения. Было выделено две основных группы балок:

1. Балки с многогранными стенками из прямых элементов;
2. Балки с криволинейными стенками.

Балки с многогранными стенками, состоящими из прямых элементов, можно охарактеризовать как промежуточный вариант между балками с прямолинейными и криволинейными стенками. Преимуществом данного типа конструкторских решений является создание многогранной стенки с помощью стандартных элементов (лист, уголок, труба, швеллер, двутавр) или с помощью операции гибки [4].

Одним из примеров такого типа конструктивных элементов являются балки, разработанные Чарльзом Ватсоном [8] и запатентованные в Соединённых Штатах Америки (рисунок 2). В основе конструкции лежит прокатный двутавр, пояса, которого прикреплены гнутыми листами.

Отметим неоправданное утяжеление сечения конструкции при незначительном увеличении жесткости, если нагрузки приложены по линии стенки. Возможный местный изгиб в месте сопряжения пояса со стенкой в данном случае нивелируется радиусным утолщением двутавра и требует такого подкрепления.

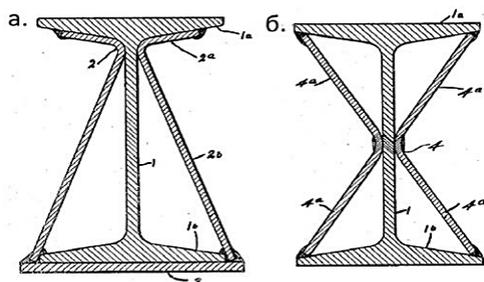


Рис. 2. Балки Чарльза Ватсона

Известна конструкция балки, разработанной немецкой компанией Шефер Машинен (рисунок 3). Стенки балки представляют собой металлические листы, согнутые симметрично в двух местах. Связующим компонентом является центральная прямоугольная труба. Соединение трубы и стенок производится уже не с помощью сварки, а с помощью винтовых соединений, что технологично, но требует толстой стенки трубы в месте нарезки резьбы [9].

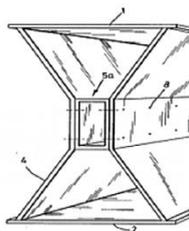


Рис. 3. Конструкция балки компании Шефер Машинен

Установка толстостенной трубы нецелесообразна по условиям прочности, а местное увеличение стенки в зоне резьбы можно обеспечить только наружными накладками, что нарушает условия прилегания.

Также известен Российский вариант многогранной балки, сконструированный в компании ЗАО Эркон (рисунок 4). Она изготавливается из обычных и гнутых листов металла [10]. Отличительной особенностью являются наружные ребра, назначение которых не совсем понятно, если балка подвергается изгибу в плоскости стенки. Сборка осуществляется с помощью сварки и болтовых соединений, которые существенно снижают эстетичность конструкции.

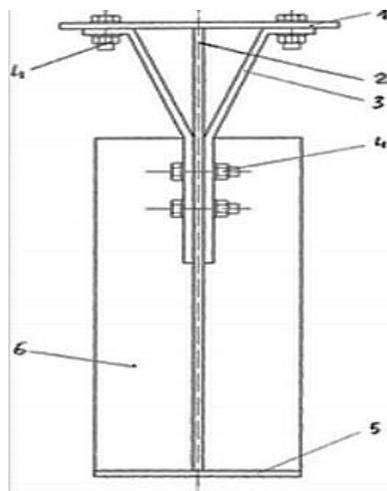


Рис. 4. Конструкция балки компании Эркон (РФ)

Рассмотрим конструкции балок с криволинейными стенками. Они имеют более привлекательный вид, по сравнению с балками, имеющими многогранные стенки, так как нет выступающих острых элементов и болтовых соединений.

Их преимущества заключается в использовании криволинейной формы стенок, обеспечивающих более высокие показатели местной устойчивости, сокращение числа или отсутствие продольных ребер жесткости и внутренних диафрагм.

Примерами таких балок являются изобретения вышеупомянутой компании Шефер Машинен [9]. Стенки конструктивных элементов выполнены из листов металла с постоянным радиусом кривизны. Отличия между двумя балками состоят в разных центральных элементах: уголке (рисунок 5, а) и прямоугольной трубе (рисунок 5, б).

Также есть отличие в способах крепления стенок к центральным элементам: сварка или винтовое соединение. Недостатки такого расположения центральных элементов те же, что были описаны в балке на рисунке 3.

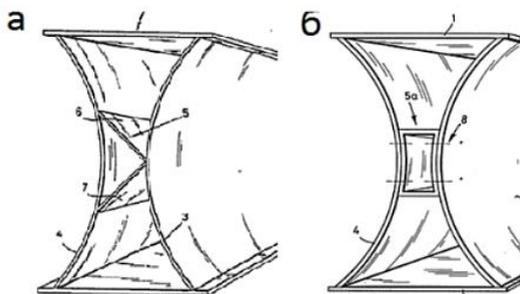


Рис. 5. Конструкции криволинейных балок компании Шефер Машинен

На рисунке 6 представлена разработка Пензенской государственной архитектурно-строительной академии. Все элементы балки сделаны из листов металла, скрепленных при помощи болтовых соединений. Данная конструкция балки больше похожа на классический двутавр, за исключением областей соединения полков со стенкой, однако реализовать на практике набор фасонных профилей разной высоты представляется достаточно сложным [11].

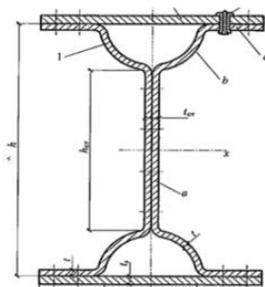


Рис. 6. Конструкция балки Пензенской АСА

Рассмотрев различные конструкции балок, описанных выше, нами предлагается конструкция сечения главной балки (рисунок 7, а) с двумя штампованными полусферическими боковыми стенками. Боковая стенка имеет 15 гибов. Такая форма главной балки (рисунок 7, б) позволяет сэкономить на элементах жесткости, значительно удешевить производство. Между собой боковые стенки соединяются через прокатную квадратную или прямоугольную трубу при помощи электрозаклепок. К верхней и нижней полке боковые стенки привариваются электросваркой.

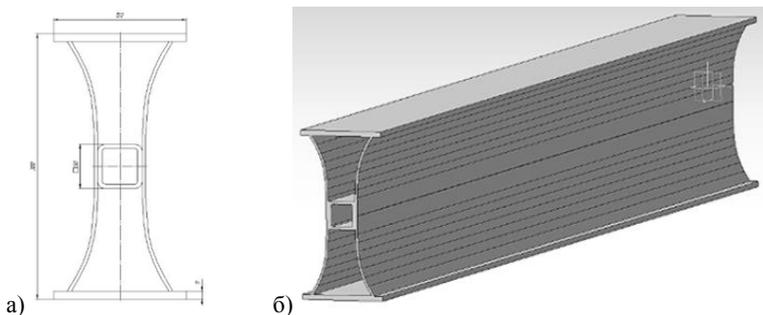


Рис. 7. Спроектированная конструкция главной балки с гнутыми боковыми стенками:
а) сечение; б) 3D-модель

В предлагаемой конструкции гибы боковых стенок выступают в качестве продольных ребер жесткости. За счет этого возможно уменьшение толщины листа, используемого для боковых стенок.

Спроектированная конструкция главной балки может использоваться для козловых кранов грузоподъемностью 1-3,2 т и пролетом до 10 м.

Масса 1 метра спроектированной главной балки составляет 46,59 кг.

При помощи программы КОМПАС 3D созданы 3D-модели главных балок одинаковых по длине, равной 1 метр. Для сравнения примем конструкции главной балки из двутавра (рисунок 8) и главной балки с криволинейными стенками (см. рисунок 5).

После построения 3D-моделей балок определены их массы:

- масса главной балки из двутавра №30 – 50,08 кг;
- главной балки с криволинейными стенками – 83,58 кг.

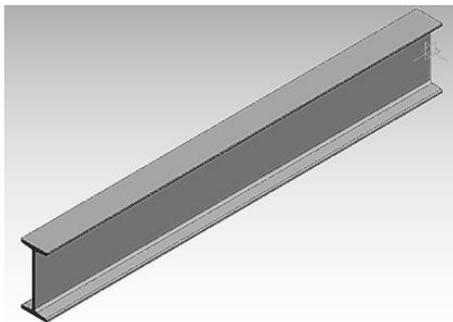


Рис. 8. 3D-модель ездовой балки из двутавра №30 Б2 ГОСТ 19281

Для того, чтобы подтвердить повышенную несущую способность балок с криволинейными стенками необходимо произвести прочностной расчёт.

При создании новых и совершенствовании конструкций различных изделий применяют получившие в последние годы существенное развитие программные средства, позволяющие генерировать решения с рациональной топологией, отличающиеся от существующих аналогов меньшей массой при обеспечении требуемой несущей способности [12].

Оптимизация топологии прежде всего востребована при проектировании подлежащих серийному изготовлению материалоемких изделий со сложной структурой, а ее применение целесообразно на начальных этапах проектирования. Она широко применяется при проектировании деталей, изготавливаемых посредством 3D-печати [12].

Приложения, позволяющие оптимизировать топологию изделий, имеют важное образовательное значение, поскольку их практическое применение позволяет весьма просто и наглядно наблюдать влияние направления и соотношения прикладываемых сил, опор и иных ограничений на оптимальную структуру исследуемых конструкций [12].

Расчёты крановых металлоконструкций проводятся по методу предельных состояний и методом конечных элементов (далее – МКЭ) [4]. Последний наиболее эффективен, так как возможно моделирование работы металлоконструкции под нагрузкой в условиях, приближенных к реальным с последующей корректировкой размеров поперечного сечения с целью получения наиболее оптимальной конструкции. Также исключается возможность возникновения многих дефектов металлоконструкции ещё на стадии её проектирования.

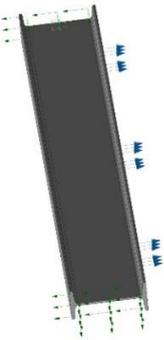
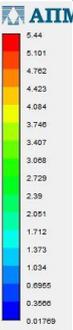
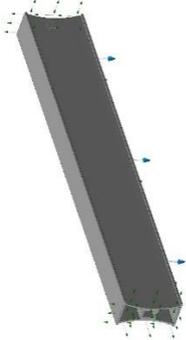
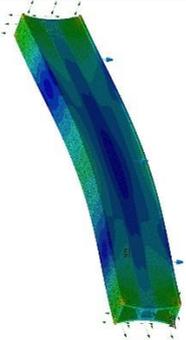
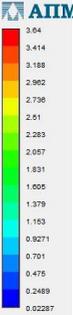
Сравнительные исследования моделей ездовых балок произведем в программе КОМПАС 3D при помощи библиотеки APM FEM, реализующей метод конечных элементов.

Программа КОМПАС 3D имеет большую библиотеку материалов. Однако часто бывает необходимо задать материал, не входящий в неё [13, 14].

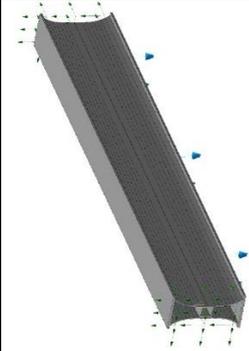
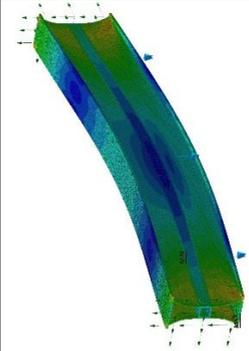
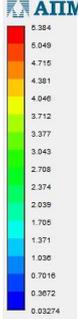
Для расчета главных балок принята условная нагрузка, равная 20 кН.

Результаты расчета главных балок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета главных балок

Конструкция	Масса 1 м.п. балки, кг	Модель балки для МКЭ-расчета с приложением нагрузки и закреплением	Карта распределения эквивалентных напряжений по Мизесу	Шкала напряжений, МПа	Макс. значение эквивалентных напряжений, МПа
1	2	3	4	5	6
Балка из двуглава №30 Б2	50,08				5,44
Балка с криволинейными стенками	83,58				3,64

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Спроектированная балка	46,59				5,38

Анализируя результаты расчетов можно сделать выводы, что спроектированная нами конструкция главной балки имеет меньшую массу по сравнению с известными конструкциями, а напряжения в балке не превышают напряжений в рассмотренных конструкциях.

По отношению к массе двутавровой балки масса снижена на 7 %, а по отношению к балке с криволинейными стенками – на 44 %.

Литература

1. Кузьяков Е.В. Козловой кран: увеличение грузоподъемности // Наука, техника и образование. 2016. № 8 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kozlovoy-kran-uvvelichenie-gruzopodyomnosti> (дата обращения: 15.10.2020).
2. Кузьяков Евгений Вадимович Расчет металлоконструкции козлового крана // Наука, техника и образование. 2017. № 1 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-metallokonstruktsii-kozlovogo-krana> (дата обращения: 15.10.2020).
3. Типы и конструкции мостов (пролетных строений) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stroy-technics.ru/article/typy-i-konstruktsii-mostov-proletnykh-stroenii/>. – Дата доступа: 15.10.2020.
4. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. Учебное пособие. - СПб.: Политехника, 2005. – 423 с.
5. Наумов А.В. Ездовые балки с криволинейными стенками / Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы Международной научно-технической конференции / под общ. ред. Ш.М. Мерданова. – Тюмень: ТИУ, 2015-346с., с. 195-200.

6. Манжула К.П. Прочность и долговечность конструкций при переменных нагрузках: учеб. пособие. / К.П. Манжула, С.В. Петин. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 76с.

7. Выбор оптимальной конструкции телескопической стрелы для перспективных грузоподъемных автомобильных кранов // Строительные и дорожные машины, 2017, №3, с. 34–40.

8. Пат 2478559, Россия. Подкрановая балка / Белый А.Г. опубл. 1.06.2011.

9. Пат EP 0293789 A1 Германия. Als Kastenträger ausgebildeter Krantrager / Richar Aust опубл. 10.10.2001.

10. Пат 2478557, Россия. Подкрановая балка / Белый Александр Григорьевич опубл. 1.06.2011.

11. Пат 2232125, Россия. Подкрановая балка / Нежданов К.К. опубл. 07.05.2002.

12. Гнездилов С.Г., Шубин А.Н. Принципы рационального проектирования элементов машин с использованием методов топологической оптимизации // Строительные и дорожные машины, 2016, № 2, с. 44–49.

13. Инженерные расчеты для машиностроения и строительства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://apm.ru/>. – Дата доступа: 15.10.2020.

14. Котельников А.А., Алпеева Е.В. Применение метода конечных элементов при выборе материала сварных конструкций // Сварочное производство, 2014, № 10, с. 3–5.

УДК 69.002.5-82

О выборе эффективных комплектов машин для устройства и укрепления обочин автомобильных дорог

Довидович А.А.

Белорусский национальный технический университет

Описана разработанная методика выбора эффективных комплектов машин для устройства и укрепления обочин автомобильных дорог.

На настоящий момент в Республике Беларусь для устройства и укрепления обочин автомобильных дорог используется комплект машин, состоя-