

## РАСЧЁТЫ КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПО КРИТЕРИЮ ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Виктор Леопольдович ЛИФШИЦ, канд. техн. наук,  
заместитель генерального директора  
ООО «КТБ Кран», г. Москва

**Рассмотрено наличие в крановых металлоконструкциях пластических деформаций, не нарушающих нормальную работу крана в эксплуатации, возможности их расчета современными методами и приспособляемость к ним элементов кранов.**

**Ключевые слова:** краны грузоподъемные, металлоконструкции, пластические деформации, упругопластический расчет, приспособляемость.

Широкое распространение компьютеров стимулировало выполнение расчётов крановых металлоконструкций методом конечных элементов (МКЭ), как при упругой работе всех элементов конструкции («упругий расчёт»), так и с учётом возникающих пластических деформаций («упругопластический расчёт»).

Пластические деформации в крановых конструкциях возникают практически всегда. Обычной зоной их появления являются узлы решетчатых конструкций. Упругие расчёты МКЭ решетчатых конструкций – стрел, башен, мостов козловых кранов и др., с расчётными схемами без шарниров в узлах показали, что из-за изгибающих моментов в узлах максимальные напряжения в поясах и раскосах увеличиваются на 10...15% по сравнению с расчётами идеальной фермы. В элементах, где напряжения в шарнирной схеме близки к предельным, по бесшарнирной схеме они превышают предел текучести, т.е. там возникают пластические деформации. Однако все произведенные краны, как показывал опыт их эксплуатации, не требовали усиления упомянутых решётчатых конструкций. Поэтому расчёты таких конструкций производят по шарнирным схемам, при этом величину пластических деформаций в узлах не определяют, т.к. опыт эксплуатации показал, что они всегда в допустимых пределах.

В зонах смятия торцевых поверхно-

стей при расчётах по существующим нормам [1] пластические деформации неизбежны, т.к. расчётные сопротивления здесь определяются по временно-упругому сопротивлению стали, которое больше предела текучести.

В проушинах клиновых стыков поясов башни крана напряжения в зонах контакта с клином происходит обмятие кромок проушины, т.е. возникают большие пластические деформации. Аналогично обминаются участки крюков под действием стропов поднимаемого груза, края отверстий болтовых соединений при работе болтов на срез и другие места. Такие узлы имеются в давно работающих и вполне надежных кранах. Ранее большинству крановых КБ были доступны только упругие расчёты МКЭ, при этом во многих случаях в расчётах коробчатых конструкций рам и порталов фиксировались перенапряжения в зонах концентрации напряжений, что говорит о возникновении пластических деформаций в этих местах.

Выполненные в последнее время упругопластические расчёты МКЭ крановых конструкций подтвердили, что почти в каждом кране имеются области пластических деформаций. К этому оказались не готовы составители некоторых норм. Например, в ГОСТе 32579.1-2013 «Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчётных нагрузок и комбинаций нагрузок» появление пластических деформаций приравнивается к разрушению конструкции

и является признаком нарушения работоспособности крана. Чтобы все успешно эксплуатируемые в настоящее время краны удовлетворяли требованиям указанного ГОСТа, их нужно было бы капитально усилить во многих местах.

Напряжения в упомянутом ГОСТе предписывается вычислять с помощью «теории сопротивления материалов при условии упругого деформирования элементов конструкции», и только упомянуты «более точные методы (МКЭ)». Сложные конструкции, например, секции телескопических стрел, опорные рамы башенных кранов, порталы кранов-погрузчиков в зоне опорно-поворотного устройства и др. невозможно рассчитать методами сопромата. Но использование упругого расчета МКЭ также недостаточно для проектирования конструкций. Для примера на рис. 1 даны результаты упругого и упругопластического расчётов МКЭ опорной рамы башенного крана КБ-605. В упругом расчёте (рис. 1-а) максимальные напряжения в ребрах под опорно-поворотным устройством и в проушинах поворотных консолей достигают величины 455 МПа при расчетном сопротивлении  $R = 370$  МПа, т.е. превышают  $R$  на 23%. При этом недостаточная несущая способность этой рамы в эксплуатации не выявляется.

Такая ситуация возникает часто. После распространения МКЭ, позволяющего уточнить напряженное состояние конструкции, выяснилось, что во многих конструкциях при упругом расчёте имеются места концентрации напряжений, и возникают местные перенапряжения, т.е. конструкции требуют усиления! Возникает парадоксальная ситуация – уточнение расчёта ведёт к утяжелению конструкции. Поэтому расчётчики в упругих расчётах принимают меры, чтобы этих местных перенапряжений не было бы в тексте расчёта. Существует практика «избав-

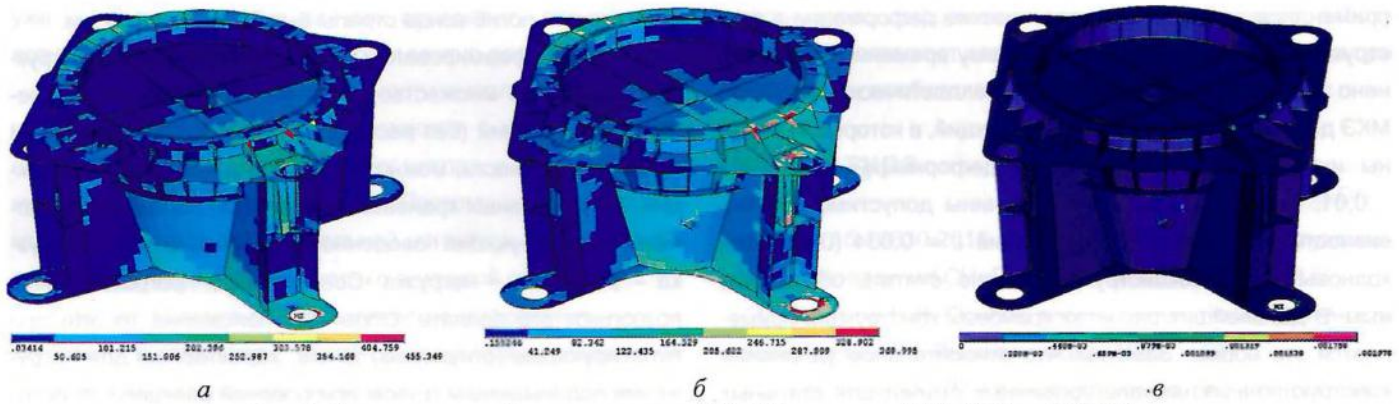


Рис. 1. Опорная рама башенного крана КБ-605 из стали 14Г2АФ R = 370 МПа:

а - упругий расчёт, эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа; б - упругопластический расчёт, эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа; в - упругопластический расчёт, интенсивность пластических деформаций

латься» от таких напряжений путем применения крупных конечных элементов. При этом напряжения усредняются по площади элемента, и перенапряжения исчезают. Вместо назначения размеров конструкции по результатам расчёта конструктор вначале интуитивно назначает толщины её листов, так чтобы конструкция «хорошо смотрелась», а потом расчётчик подбирает размеры конечных элементов в опасных зонах, подгоняя результаты расчёта под нужный итог. Бытует даже убеждение «В расчёте можно получить любые напряжения». При этом теряется смысл прочностного расчёта, а поскольку такая подгонка производится интуитивно, случаются ошибки. Был случай, когда рассчитанная рама стрелового крана развалилась на испытаниях. Однако чаще в результате такого интуитивного подхода к проектированию конструкции оказываются перетяжелёнными.

Почему конструкции часто не разрушаются там, где упругий расчёт показывает большие перенапряжения, понятно. В этих местах возникают ограниченные пластические деформации, и несущая способность конструкции сохраняется. Возникла необходимость в расчётах учитывать пластическую работу металла. На рис. 1-б-в показаны результаты упругопластического расчёта той же рамы. Напряжения в зонах, где при упругом расчёте были перенапряжения (см. рис. 1-а), при упругопластическом расчёте не превышают предела текучести, который в данном случае принят равным расчётному сопротивлению (рис. 1-б). В тех же зонах возникли пластические деформации (рис. 1-в). При упругопластических расчётах МКЭ используется условная диаграмма Прандтля, состоящая из наклонного и горизонтального участков, либо (что точнее) действительная диаграмма деформирования стали. Действительные диаграммы для трёх классов прочности стали 09Г2С, использовавшиеся в некоторых расчётах проушин стыков поясов башенного крана, приведены на рис. 2. Упругопластические расчёты показывают, что в зонах концентрации напряжений пики напряжений «срезаются», и вместо них при первом нагружении расчётной нагрузкой возникают пластические деформации.

Колоссальные возможности современных программ МКЭ позволяют выполнить расчёт конструкции с учётом всех видов нелинейности – физической, геометрической, конструктивной, – и определить картину напряжено-деформированного состояния с индексацией напряжений и интенсивности пластических деформаций.

Для использования результатов расчёта должны быть установлены нормы предельных пластических деформаций в элементах конструкции. Нормируется интенсивность пластических деформаций  $\varepsilon$ , определяемая в соответствии с теорией пластичности формулой [2]

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2},$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные пластические деформации. В 1985 г. Госстроем СССР были выпущены «Рекомендации по расчёту стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций» [3], где нормы предельных интенсивностей пластических деформаций варьируются от  $\varepsilon = 0,001$  для конструкций промышленных сооружений, непосредственно воспринимающих вибрационные или ударные нагрузки до максимальной величины  $\varepsilon = 0,004$  для конструкций, имеющих менее «жесткие» условия нагружения. В то время, когда эти рекомендации создавались, МКЭ еще не

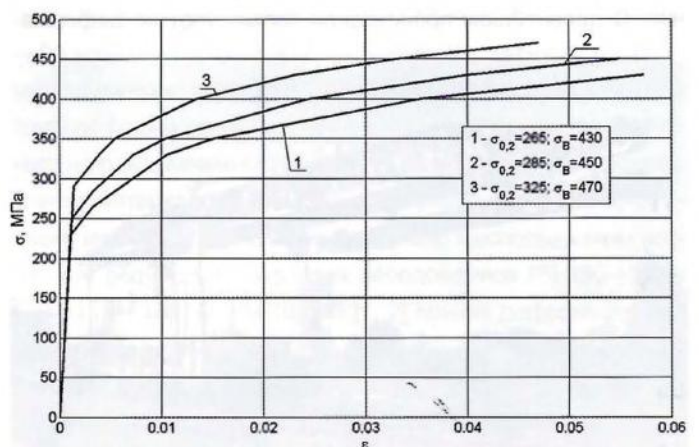


Рис. 2. Диаграммы деформирования стали 09Г2С (аппроксимация)

применялся, и вычислять пластические деформации в конструкциях было трудно. К настоящему времени уже выполнено значительное количество упругопластических расчётов МКЭ действующих крановых конструкций, в которых выявлены интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon = 0,008 \dots 0,01$ , поэтому применение величины допустимой интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon = 0,004$  (0,4%) для крановых металлоконструкций можно считать обоснованным. В дальнейших расчётах крановых конструкций применяется эта норма. Заметим, что относительное удлинение конструкционных низколегированных сталей для стальных конструкций при разрыве равно 18...20%.

В большинстве случаев после одного или нескольких первых циклов изменения нагрузки в элементе конструкции происходят пластические деформации, порождающие в нём такое поле остаточных напряжений, что его сумма с напряжениями, возникающими в элементе при заданной нагрузке, не превышает предела текучести. Если эта возможность реализуется, то говорят, что конструкция приспособилась к повторным нагрузкам данного типа. Она будет упруго сопротивляться нагрузке.

Приспособляемость конструкций наглядно проявилась при приемочных испытаниях крана-путьера (рис. 3). После первого подъёма испытательного груза, на 25% превышающего максимальную грузоподъемность, у стрелы остался остаточный прогиб, составивший на конце стрелы 150 мм. Это было неожиданно для авторов проекта, поскольку кран был рассчитан по допускаемым напряжениям, существенно меньшим предела текучести стали. Поэтому предполагалось, что стрела будет деформироваться упруго. После обнаружения остаточного прогиба при испытаниях возникли опасения, что прогиб будет возрастать после каждого подъёма испытательного груза. Однако, при последующих подъёмах того же груза остаточный прогиб конца стрелы не увеличивался. Очевидно, в узлах фермы из-за её «рамности» при первом подъёме возникли изгибающие моменты, все элементы слегка искривились и заняли «устойчивое» положение. В дальнейшем происходили только упругие деформа-



Рис. 3. Кран-путьера

ции. Упругий прогиб конца стрелы был примерно 500 мм.

Теории деформирования и приспособляемости конструкций посвящено множество работ [4], однако из теоретических соображений (без расчёта) установить, произойдет ли приспособляемость, можно лишь для простейших конструкций. Для реальных крановых конструкций необходимы расчёты, моделирующие поведение конструкции в цикле нагрузка – разгрузка – нагрузка. Современные программы МКЭ позволяют это сделать. Облегчает положение то, что при пульсирующем (отнулевом) цикле, характерном для нагружения поднимаемым грузом или опорной реакцией, приспособляемость возникает практически всегда. В других случаях проверку приспособляемости реально можно проверить прямыми расчётами МКЭ.

При таком расчёте рассматриваются 4 состояния конструкции: 0 – исходное; 1 – первое нагружение; 2 – полная разгрузка после первого нагружения; 3 – повторное нагружение той же нагрузкой. При первом нагружении (состояние 1) в конструкции возникают напряжения и пластические деформации. При разгрузке (состояние 2) в конструкции возникают остаточные напряжения и остаточные деформации. После повторного нагружения (состояние 3) в конструкции также имеются пластические деформации. Если интенсивности пластических деформаций состояний 1, 2 и 3 одинаковы, то состояние 2 можно рассматривать, как исходное с предварительными напряжениями и деформациями, и конструкция будет работать чисто упруго при нагрузке, не превышающей нагрузку в состоянии 1. Пример такого расчёта с целью проверки приспособляемости опорной рамы башенного крана приведен в [5].

Расчёты проушин клиновых стыков поясов башенных кранов показали, что при первом нагружении расчётной нагрузкой наиболее нагруженные края проушины, работающие на смятие, обминаются. В наиболее нагруженном растянуто-изогнутом сечении проушины (по линии действия силы)  $\varepsilon < 0,004$ . При дальнейших нагружениях форма проушины не изменяется, и она работает в упругой стадии. Аналогичные результаты – ограниченные пластические деформации с  $\varepsilon < 0,004$  при первом нагружении расчётной нагрузкой и упругая работа при последующих нагружениях, – получены для нескольких телескопических стрел с четырьмя и пятью секциями.

В настоящее время накоплен опыт проведения аналогичных расчётов для проушин стыков поясов башенных кранов, телескопических стрел, поворотных платформ и выдвигных опор стреловых кранов, опорных конструкций башенных кранов с центральной рамой и консолями. В результате проведенных расчётов можно считать установленным, что в перечисленных конструкциях приспособляемость возникает всегда, и расчётов для определения возможности приспособляемости этих конструкций производить

уже не нужно. В других случаях определить возможность возникновения приспособляемости можно расчётом.

Когда условие приспособляемости выполняется, пластические деформации не накапливаются с каждым циклом нагрузки, а возрастают лишь в тех циклах, у которых максимум нагрузки выше предыдущих. Поэтому если испытания крана проводятся с максимальной нагрузкой, то в дальнейшем конструкция работает только в упругой стадии.

Следует заметить, что пластические деформации нельзя допускать в элементах, на которые действует подвижная нагрузка, максимальная величина которой одинакова по всей длине ее перемещения (например, в подкрановых балках, в главных балках мостовых кранов и т.п.). В этом случае местные пластические деформации возникают в элементе во всей области приложения сосредоточенной нагрузки, а не в отдельных местах. При этом возможно накопление деформаций (нарастание остаточных прогибов балок).

Расчёты по критерию ограниченных пластических деформаций производятся только для элементов из одной марки стали (моностальных). Расчёты металлоконструкций на устойчивость, на выносливость, на жесткость и на хрупкое разрушение выполняются независимо от расчётов на прочность по критерию ограниченных пластических деформаций.

Расчёты металлоконструкций по критерию ограниченных

пластических деформаций правильно учитывают работу металла и позволяют создать экономичные конструкции при обеспечении необходимой их надёжности.

## Литература

1. СП 15.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. – М., 2011. – 172 с.
2. **Безухов Н.И.** Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М: Высшая школа, 1961. – 537 с.
3. Госстрой СССР, Рекомендации по расчёту стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций. – М., 1985. – 48 с.
4. **Чернявский О.Ф.** Теория приспособляемости и ее практическое применение (к 100-летию этого раздела механики и 50-летию его развития в ЧПИ-ЧГТУ-ЮУрГУ) // Вестн. Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – Т.13. – 2013. – № 2. – С. 4-18.
5. **Лифшиц В.Л., Соколов А.И., Шилович В.П.** Особенности расчёта крановых металлоконструкций // Подъёмно-транспортное дело. – 2015. – № 6. – С. 2-7.

*В.Л. Лифшиц, E-mail: v.lifshitz@mail.ru*



УДК 621.833.382+621.864

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧЕРВЯЧНЫХ РЕДУКТОРОВ ЛИФТОВЫХ ЛЕБЕДОК ПО ПРЯМОМУ И ОБРАТНОМУ КПД

**Юрий Иванович ГУСТОВ**, д-р техн. наук, профессор,  
**Сергей Юрьевич СЛЁТОВ**, аспирант  
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ)»

**Представлена методика определения триботехнических характеристик червячных редукторов лифтовых лебедок различных типов по прямым и обратным коэффициентам полезного действия. Показана возможность установления коэффициентов трения скольжения и парциальных величин микроизноса и микрометалла поверхностей трения, их степеней трибодформационного упрочнения (разупрочнения) и фрикционных температур. Приведено сопоставление триботехнических показателей рассмотренных типов редукторов.**

**Ключевые слова:** триботехнические показатели, червячный редуктор, лифтовая лебедка, прямой и обратный

КПД, коэффициент трения, упрочнение, температура.

**Введение.** При анализе эксплуатационных показателей триботехнических систем строительной техники имеющаяся информация об их важнейших служебных характеристиках недостаточна. Приводятся, в частности, коэффициент трения, либо внешняя нагрузка или приближенное значение коэффициента полезного действия (КПД). Для определения степеней трибодформационного упрочнения, температур фрикционного нагрева поверхностей трения, критериев выбора эффективных материалов и др. требуется привлечение соответствующих методик расчета. Применительно к используемым червячным редукторам лифтовых лебедок типов РЧ 160-40, РЧ 180-36, РЧ 160-52, РЧ 180-45 [1, 2] принят деформационно-топографический метод, учитывающий микротопографию изношенных поверхностей, характер и степень изменения свойств приповерхностных активных слоев [3].

Целью работы является определение триботехнических показателей червячных редукторов по прямым и обратным