

## НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛОВ ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ

**Константин Иванович Еремин**

Генеральный директор ООО «ВЕЛД», г.Магнитогорск,  
доктор технических наук, профессор

**Шульга Степан Николаевич**

Начальник отдела экспертизы зданий и сооружений  
ОАО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ», г.Магнитогорск

Накопленный с годами материал наблюдений за техническим состоянием подкраново-подстропильных ферм (ППФ) позволяет сейчас судить об эффективности принятых инженерных решений в проектировании ППФ. Выявленные повреждения и дефекты, а также современные методы диагностирования и программно-вычислительные комплексы дают представление о фактическом напряжённо-деформированном состоянии конструкции ППФ.

До настоящего времени в конструкции ППФ недостаточно изученной остаётся работа узлов сопряжения решётки с нижним поясом. Подтверждением этому является возникновение трещин в зоне сопряжения прорезных фасонек с верхним поясом и опорной диафрагмой по сварному шву и околошовной зоне уже в первые годы [1, 2] эксплуатации этих конструкций (рис. 1). Длина таких трещин достигает порой размеров, равных длине самого сварного шва. Устранение таких трещин является трудоёмким процессом.

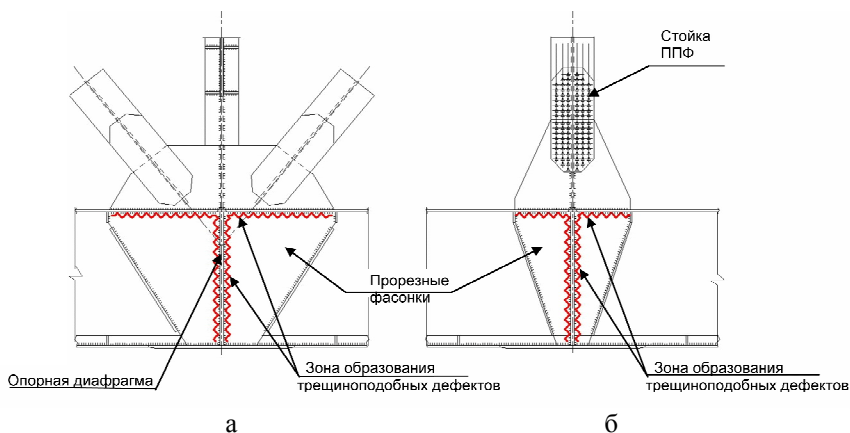


Рис.1. Схема мест расположения дефектов в узле сопряжения прорезных фасонек со стенкой и верхним поясом коробчатого нижнего пояса ППФ:  
а – на опоре; б – в месте примыкания стойки

При проектировании ППФ руководствуются методикой, разработанной ЦНИИ «ПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ» им. Мельникова, а также СНиП II-23-81 «Стальные конструкции» (п.13.29-13.35).

Недостатки существующих методов расчёта ещё в 80-х годах отметил в своих исследованиях Б.Б. Лампси [4].

Так при расчёте ППФ на вертикальную нагрузку от четырех кранов (по два крана наибольшей грузоподъемности в каждом пролете) и на поперечную горизонтальную нагрузку от двух кранов усилия в элементах определялись:

- осевые усилия по шарнирной схеме;
- момент и поперечная сила в нижнем поясе от вертикальной нагрузки как в балке на упруго податливых опорах.

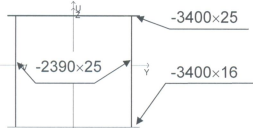
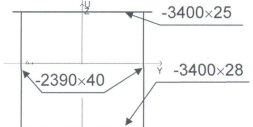
Такой подход, казалось бы, упрощает задачу расчета, т.к. обеспечивает минимальную статическую неопределимость системы. Однако анализ проектов и реализованных конструкций показывает, что узловые соединения как в примыкании решетки к ездовым поясам, так и в остальных узлах практически обладают значительной изгибной жесткостью в плоскости системы.

Нижний пояс подкраново-подстропильной фермы представляет собой тонкостенный стержень переменной толщины замкнутого коробчатого сечения (табл. 1), который работает на растяжение, изгиб в двух плоскостях и стесненное кручение. Расчет таких элементов выполнялся в соответствии с общей теорией тонкостенных стержней. При определении крутящих воздействий и момента от горизонтальных поперечных сил жесткость решетки не учитывалась, и нижний пояс рассматривался как тонкостенный стержень с длиной, равной пролету фермы. В действительности же горизонтальные линейные смещения и угловые смещения этого пояса неизбежно вовлекают в работу элементы решетки. Последние испытывают при этом изгиб из плоскости системы и кручение, оказывая в свою очередь поддерживающее влияние на ездовой пояс, уменьшая его смещения и, соответственно, усилия и напряжения.

Кроме этого, было отмечено, что имеется острая необходимость в разработке методов учета концентрации напряжений в конструкциях различного вида и в первую очередь воспринимающих значительные локальные нагрузки. Так подкраново-подстропильные фермы (ППФ), имеющие ездовые пояса в виде тонкостенных стержней коробчатого сечения, попадают под требования п.13 СНиП II-23-81, который предписывает учёт местных напряжений, но на практике отсутствуют достаточно точные теоретические расчётные методы определения этих напряжений. В настоящее время эту задачу можно решить пространственным расчётом, выполненным в программно-вычислительных комплексах типа SCAD или ANSYS. Преимущество пространственного расчёта заключается в том, что имеется возможность получить объёмную картину полей

напряжения и деформаций опорных узлов и сопоставить полученную информацию с существующими на сегодняшний день исследованиями фактического напряжённо-деформированного состояния (основным методом исследования фактического напряжённо-деформированного состояния являются тензометрические измерения. К косвенным методам можно отнести метод магнитной памяти металла).

Таблица 1  
Геометрические характеристики сечения нижнего пояса ППФ

Сечение	Характеристики сечения	Характеристики стали (по результатам анализов отобранных проб)
1. Сечение нижнего пояса ППФ (коробчатое) в межопорной части 	$A=2589 \text{ см}^2$ $W_y=234533 \text{ см}^3$ $W_z=236178 \text{ см}^3$ $I_y=25420809 \text{ см}^4$ $I_z=39870731 \text{ см}^4$	09Г2С $s_m=3450 \text{ кг/см}^2$ $s_g=5160 \text{ кг/см}^2$ $\gamma=73,6\%$ $d=30,2\%$
2. Сечение нижнего пояса ППФ (коробчатое) в опорном узле 	$A=3714 \text{ см}^2$ $W_y=355187 \text{ см}^3$ $W_z=297357 \text{ см}^3$ $I_y=35369228 \text{ см}^4$ $I_z=60381816 \text{ см}^4$	14Г2АФ-12 $s_m=5200 \text{ кг/см}^2$ $s_g=7000 \text{ кг/см}^2$ $\gamma=73,6\%$ $d=30,2\%$

Для определения степени достоверности прочностного расчёта ППФ, выполненного в программно-вычислительном комплексе SCAD, произведён сопоставительный анализ полученных расчётных результатов напряжённо-деформированного состояния с результатами уже известных тензометрических замеров опорных узлов ППФ, данные о которых взяты из монографии доктора технических наук К.И.Ерёмина [3]. С этой целью была задана пространственная расчётная схема (методом конечных элементов-пластин) ППФ треугольного очертания с треугольной решёткой и дополнительными стойками решётки, расположенная в отделении непрерывной разливки стали кислородно-конвертерного цеха ОАО «ММК». Раскосы и стойки решетки ферм составного двутаврового сечения. Нижний пояс – неразрезная балка коробчатого сечения с габаритными размерами 3400×2431 мм (см. табл.1), длиной 193,5 м, пролёт балок между опорами – 24 м.

На ППФ действует целый комплекс постоянных, кратковременных и особых нагрузок (рис. 2).

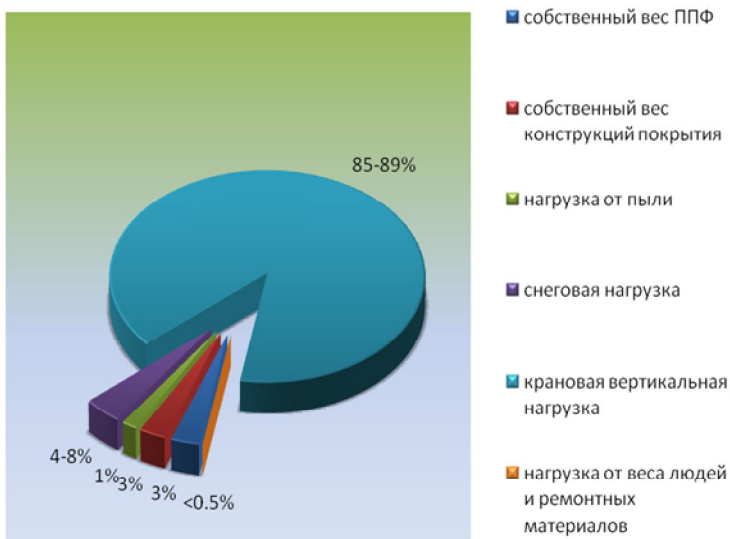


Рис.2. Диаграмма влияния действующих нагрузок на ППФ (в процентах)

Так основной постоянной нагрузкой, прежде всего, является нагрузка от собственного веса строительных конструкций. Для здания ячейкой 30×24 м с кранами грузоподъемностью 500 т собственный вес ППФ складывается из веса нижнего пояса около 80 т в одном пролёте (24 м), раскосов и стоек, общий вес которых в среднем в одном пролёте достигает 28 т.

Собственный вес покрытия состоит из веса стропильных ферм, площадок обслуживания светильников, связей и металлических щитов покрытия, конструкций фонарей, нормативные нагрузки которых при пролёте цеха 30 м соответствуют:

- стропильные фермы и связи –  $54 \text{ кг/м}^2$ ;
- щиты покрытия –  $70 \text{ кг/м}^2$ ;
- фонарь –  $28 \text{ кг/м}^2$ .

К временным нагрузкам, действующим на ППФ, относятся такие нагрузки, как:

- нагрузка от пыли, которую необходимо учитывать в уровне верха покрытия (принимается  $50 \text{ кг/м}^2$ ) и на элементах самой ППФ. Практика показывает, что на ППФ не предусмотрены специальные устройства по защите и очистке ППФ от пыли. Внутри и на верхней поверхности коробчатого нижнего пояса ППФ при продолжительной эксплуатации (около 20 лет) накапливаются значительные отложения производственной пыли – от 0,2 м (внутри и снаружи) до 1,5 м в отсеках с открытым

- входным люком. При плотности пыли  $\approx 800 \text{ кг/м}^3$  распределённая нормативная нагрузка может достигать  $160 \text{ кг/м}^2$  и более;
- температурные воздействия. Влияние повышенных температур на ППФ незначительно (рис. 3 и 4). Максимальная температура нагрева ППФ при тепловыделении из ковшей с открытым зеркалом расплавленного металла зафиксирована в осях расположения сталеплавильных агрегатов и составляет  $64\text{--}80^\circ\text{C}$  (в зоне расположения конвертеров и машин непрерывной разливки стали). Максимальный температурный перепад по всей длине ППФ составляет до  $125^\circ\text{C}$  (с учётом охлаждения крайних пролётов ППФ в зимний период времени до температуры  $-35^\circ\text{C}$ ).

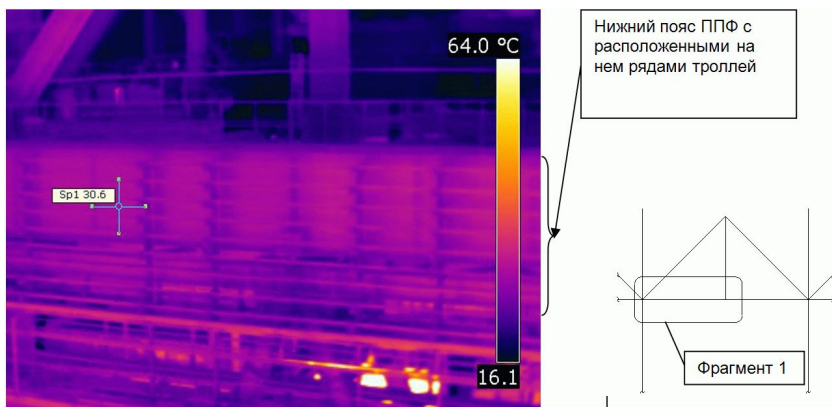


Рис. 3. Тепловизионная съёмка ППФ при закрытом зеркале раскालённого металла при установке на стэнд (фрагмент 1)

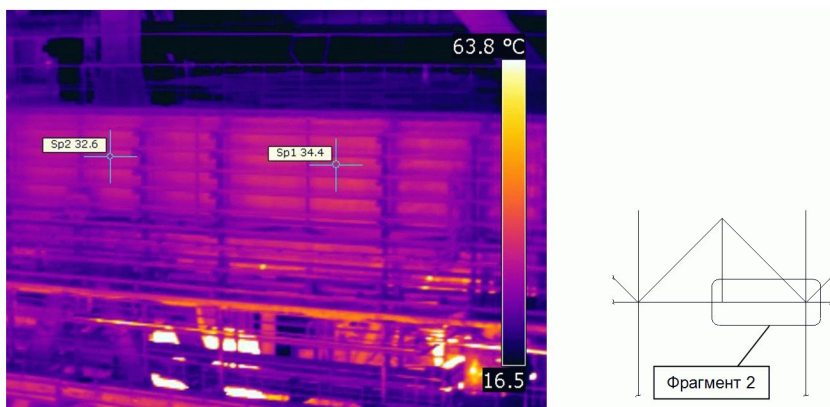


Рис. 4. Тепловизионная съёмка ППФ при открытом зеркале раскालённого металла при установке на стэнд (фрагмент 2)

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

Основной временной нагрузкой, действующей на ППФ, является крановая нагрузка (см. рис. 2). Грузоподъемность кранов в кислородно-конвертерных цехах достигает 500 т, режим работы кранов – тяжелый (7К) и весьма тяжелый (8К).

Характеристики мостовых кранов исследуемой ППФ приведены в табл. 2. Расположение крановой нагрузки представлено на рис. 5 и 6 и в табл. 3.

Таблица 2

Характеристики мостовых кранов

Параметр	Размерность	кран №1	кран №2
Грузоподъемность $Q$	т	500+100/20	125/20
Режим работы крана	-	7К	7К
Нагрузка на колесо $F_{max}^H$	тс	P1=67,0 P2=69,3	P3=28,35 P4=29,45
Масса тележки $G_m$	т	172,4	50,43
Масса крана с тележкой $G$	т	582,9	143,75
Ширина крана $B_{кр}$	м	19,48	11,56
Колесная база крана $K$	м	9,75	7,0

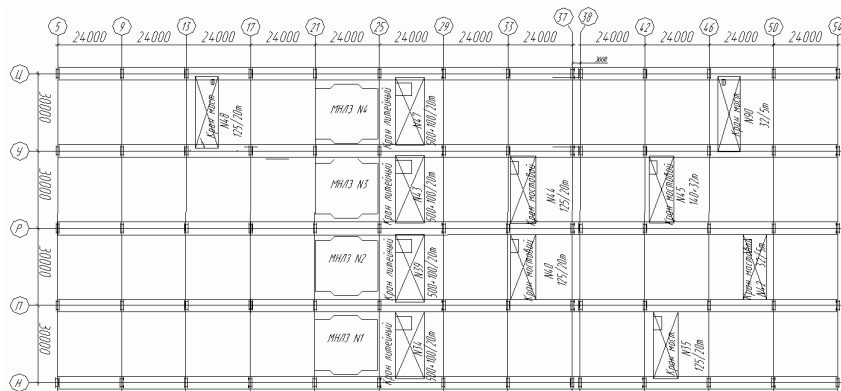


Рис. 5. Схема расположения кранов в цехе (план)

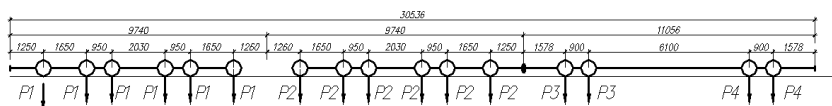
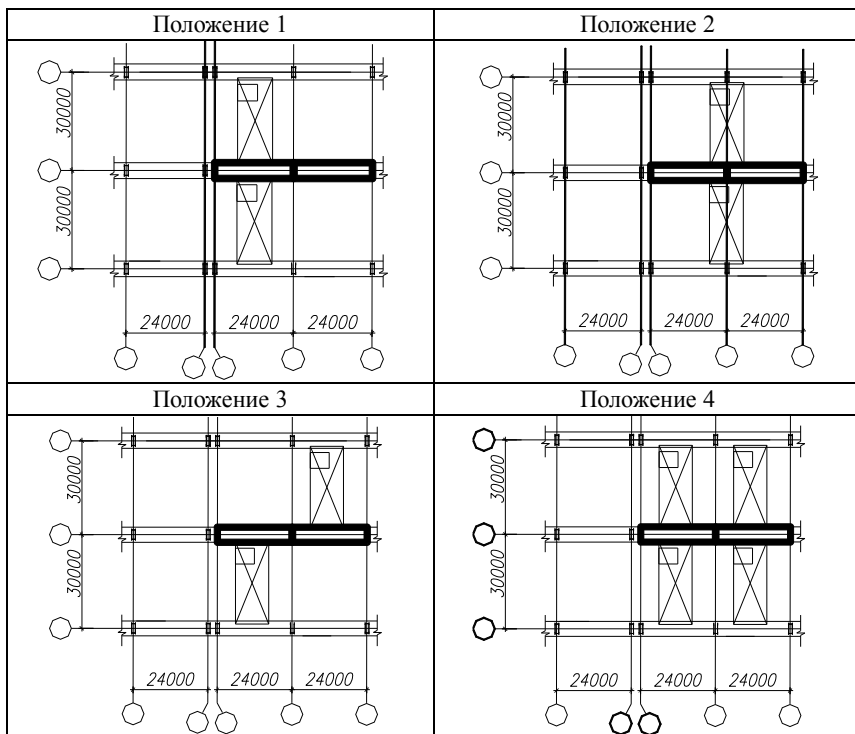


Рис. 6. Схема расположения кранов на ППФ при максимальном сближении кранов

Таблица 3

Схема положений крановой нагрузки



По результатам тензометрии максимальные напряжения в опорном узле ППФ (рис. 7, узел 3) выявлены при двустороннем загрузении ППФ крановой нагрузкой в зоне сопряжения верхней полки с опорной диафрагмой, размах напряжений в этой зоне составляет  $\Delta s = 4545 \div 4696 \text{ кг/см}^2$  ( $0,9s_m$ ). Также наиболее нагруженной зоной является зона сопряжения приопорного ребра с поясами и самой стенкой, размах главных напряжений в этой зоне составляет  $\Delta s = 2249 \div 2661 \text{ кг/см}^2$  ( $0,51s_m$ ).

По результатам прочностного расчёта, выполненного в программно-вычислительном комплексе SCAD (критерий Губера-Мизеса):

- 1) в положении крановой нагрузки №1 максимальные эквивалентные напряжения получены в зоне сопряжения прорезной фасонки с опорной диафрагмой узла 2 (см.рис.7) крайнего пролёта ППФ  $s_{max}^{экв} = 0,86s_m$  (рис. 9);
- 2) в положении крановой нагрузки №2 максимальные эквивалентные напряжения получены в зоне сопряжения опорного ребра со стенкой и нижней полкой узла 3 (см. рис. 7)  $s_{max}^{экв} = 0,38s_m$  (в положении №4  $s_{max}^{экв} = 0,56s_m$  (рис. 8));

- 3) в положении крановой нагрузки №3 максимальные эквивалентные напряжения получены в зоне сопряжения прорезной фасонки с опорной диафрагмой узла 1 (см. рис. 7) крайнего пролёта ППФ  $s^{экр}_{max}=0,82s_m$ ;
- 4) в положении крановой нагрузки №4 максимальные эквивалентные напряжения получены в зоне сопряжения прорезной фасонки с верхней полкой узла 3 (см. рис. 7) крайнего пролёта ППФ  $s^{экр}_{max}=0,8s_m$  (см. рис. 8).

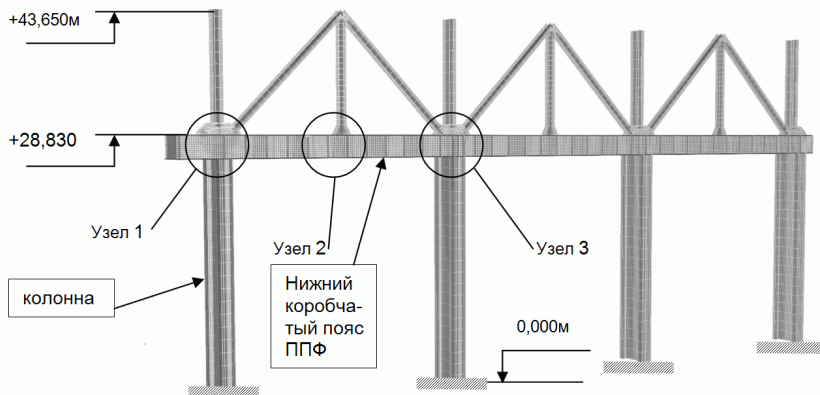


Рис. 7. Общий вид пространственной расчётной схемы ППФ (метод конечных элементов-пластин)

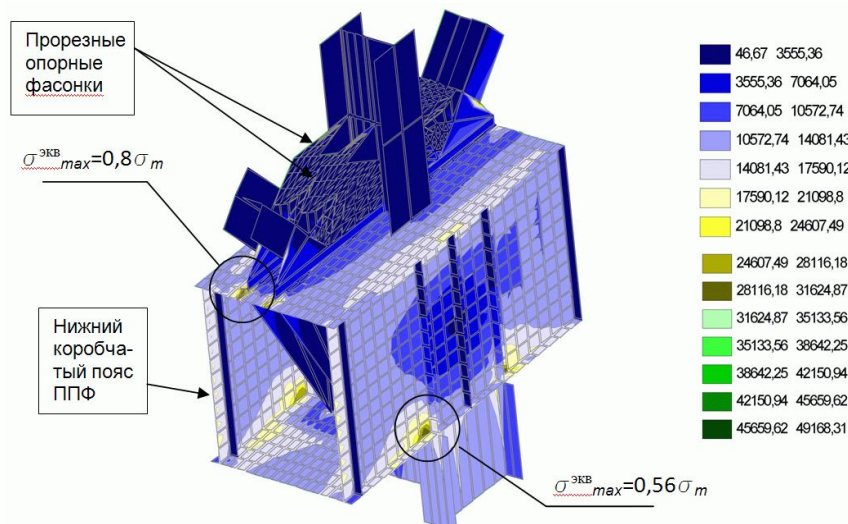


Рис. 8. Поле эквивалентных напряжений в узле 3 (комбинация от положения крановой нагрузки №4 (в т/м<sup>2</sup>))



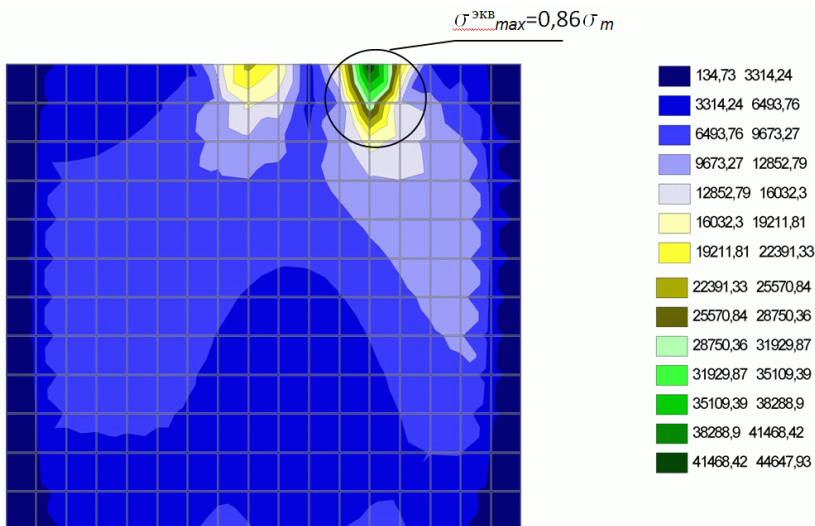


Рис. 10. Поле эквивалентных напряжений в опорной диафрагме узла 2  
(комбинация от положения крановой нагрузки №1 (в  $t/m^2$ ))

Экспериментальные значения напряжений в зонах возможных и выявленных усталостных повреждений в опорных частях ППФ превышают теоретические (расчётные) в положении крановой нагрузки №4 на 12% и более. При этом максимальные эквивалентные напряжения, полученные прочностным расчётом в зоне сопряжения стенки с верхней полкой ППФ, соответствуют  $\sigma^{ЭКВ}_{max} = 1507 \text{ кг/см}^2 (0,43\sigma_m)$  (в крайних пролётах ППФ при положении крановой нагрузки №1), что в два раза ниже напряжений, полученных в узлах сопряжения решётки с нижним поясом ППФ.

### Выводы

Современные вычислительные комплексы позволяют наиболее технологично решать инженерные задачи по проектированию и выполнять поверочные расчёты таких сложных сооружений, как ППФ.

Расчет, выполняемый с помощью построения пространственной расчётной схемы методом конечных элементов-пластин на современных вычислительных комплексах, позволяет:

- учесть совместное влияние изгибающих и крутящих моментов, вовлекающих в работу все элементы ППФ;
- учесть реалистичную жесткость узловых соединений и выполнить расчет без снижения статической неопределимости за счет шарнирности узлов;

- учесть физическую нелинейность деформированной схемы;
- выполнять расчет неразрезной ППФ или ППФ в виде ригелей рам зданий с достаточной точностью расчета в сравнении с фактическим уровнем напряжений.

Результат решения вышеперечисленного комплекса задач, расчёт которых ранее был в значительной степени аппроксимирован и приводил к значительным погрешностям, стал с большей точностью сопоставим с фактическими значениями напряжённо-деформированного состояния ППФ.

Тем не менее, до сих пор недостаточно изучен вопрос о выносливости ППФ. Факт наличия большого количества трещиноподобных повреждений уже после нескольких лет эксплуатации, а также их распределение свидетельствуют о том, что предел выносливости цельных элементов (стенки, полки, диафрагмы и др.) существенно выше, чем предел выносливости соединений этих элементов. Определяющим фактором обеспечения несущей способности всех элементов ППФ является не только прочностной расчёт, но и расчёт на выносливость таких зон, как:

- зона сопряжения стенки нижнего пояса с полкой;
- зона сопряжения прорезных фасонки с верхней полкой и опорной диафрагмой ППФ;
- зона сопряжения приопорного ребра с нижней полкой и стенкой.

Расчёт выносливости всех отмеченных зон позволит прогнозировать ресурс эксплуатации, приведёт в целом к повышению надёжности конструкции ППФ, снижению затрат на обслуживание (ремонтные и диагностические работы).

### Библиографический список

1. О состоянии подкрановых конструкций корпуса конвертерного производства ОАО «Северосталь» / В.Н. Артюхов, Е.А. Щербаков, В.М. Горицкий, Г.Р. Шнейдеров // Промышленное и гражданское строительство. 2008. №5.
2. Романов М.В. Напряжённо-деформированное состояние опорных частей подкраново-подстропильных ферм: Дис. ... канд.техн.наук / Магнитогорский государственный технический университет им.Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2002.
3. Ерёмин К.И. Предотвращение разрушений строительных конструкций. Изучение напряжено-деформированного состояния ППФ ККЦ ОАО «ММК»: Монография. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им.Г.И. Носова, 2004.
4. Лампси Б.Б. Оценка влияния особенностей конструкции и нагрузки на напряженное состояние и прочность ездовых поясов систем типа подкраново-подстропильных ферм: Дис. ... канд.техн.наук / Горьковский

ордена трудового красного знамени инженерно-строительный институт им. В.П. Чкалова. – Горький, 1983.

5. Оценка напряжённо-деформированного состояния продольных сварных стыковых соединений коробчатого пролётного строения методом магнитной памяти металла / В.М. Горицкий, А.В. Маланьин, О.В. Горицкий, Г.М. Плесков // Промышленное и гражданское строительство. 2011. №6.