

## ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**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

### Краткая характеристика и назначение каркаса

Объектом исследования стали подкраново-подстропильные фермы Кислородно-конвертерного цеха (ККЦ) Магнитогорского металлургического комбината (ОАО «ММК»), введенные в эксплуатацию в 1990 г.

Конструкции подкраново-подстропильных ферм (ППФ) расположены в отделеении непрерывной разливки стали (ОНРС) в пролетах «Н-П-Р-У-Ц» осях «5-50», запроектированы ЦНИИ «ПРОЕКТСТАЛЬ-КОНСТРУКЦИЯ» им. Мельникова в 1986 г.

Здание ОНРС ККЦ четырехпролетное, неотапливаемое (рис. 1). Основным технологическим процессом в здании является разливка конвертерной стали в машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). МНЛЗ расположены в осях «21-25» по одной в каждом пролёте здания. Общая длина здания в осях «5-50» составляет 291 м; ширина пролетов «Н-П-Р-У-Ц» – 30 м. Здание состоит из двух температурных блоков длиной 193,5 и 97,5 м. Температурно-деформационный шов расположен в осях «37-38».

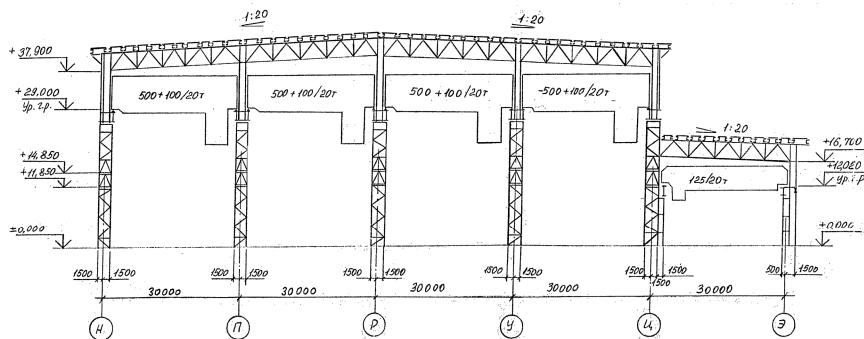


Рис. 1. Поперечный разрез здания ОНРС ККЦ

## **Предотвращение аварий зданий и сооружений**

---

Основной несущей конструкцией здания является четырехпролетная рама. Шаг рам составляет 24 м. Стойки рамы – металлические ступенчатые колонны составного сечения. Ригели рамы – металлические стропильные фермы с параллельной треугольной решеткой. Шаг стропильных ферм – 12 м. Промежуточные стропильные фермы опираются на ППФ. Стойки рам жестко заземлены в фундаменте, ригели рам жестко сопряжены со стойками.

К основной раме по ряду «Ц» к зданию ОНРС ККЦ пристроен пролёт «Ц-Э» – участок подготовки технологического оборудования, ширина пролёта – 30 м с шарнирным опиранием на фундамент стоек по ряду «Э». Крепление ферм в пролёте «Ц-Э» к стойкам основного каркаса – шарнирное.

Кровля двускатная. Уклон кровли 1:20. Конструкции кровли – сборные металлические щиты.

Пролеты «Н-П-Р-У-Ц» оборудованы мостовыми электрическими кранами (табл. 1). Режим работы кранов – тяжелый (по проекту 7К, за сутки краны выполняют до 180 циклов).

Таблица 1

Таблица грузоподъемности кранов ОНРС ККЦ

№ п/п	Пролёт	Грузоподъемность кранов, т			
		500/100/20	140/32	125/20	32/5
1	Н-П	+	-	+	+
2	П-Р	+	-	+	-
3	Р-У	+	+	+	+
4	У-Ц	+	-	+	-

Направляющие крановых путей (крановые рельсы КР-140) расположены на нижнем поясе подкраново-подстропильных ферм. Отметка уровня головки рельса +29,000 м. Промежуточные крепления направляющих на прижимных планках на болтах, стыковые крепления - неразъемного типа на сварке.

### **Конструктивное решение подкраново-подстропильных ферм (ППФ)**

Фермы треугольного очертания, решётка – треугольная с дополнительными стойками. Раскосы и стойки решетки ферм – составного двутаврового сечения. Нижний пояс – неразрезная балка коробчатого сечения (рис. 2).

Нижний пояс ферм выполнен в виде неразрезных балок коробчатого сечения длиной 193,5 и 97,5 м, пролёт балок между опорами – 24 м.

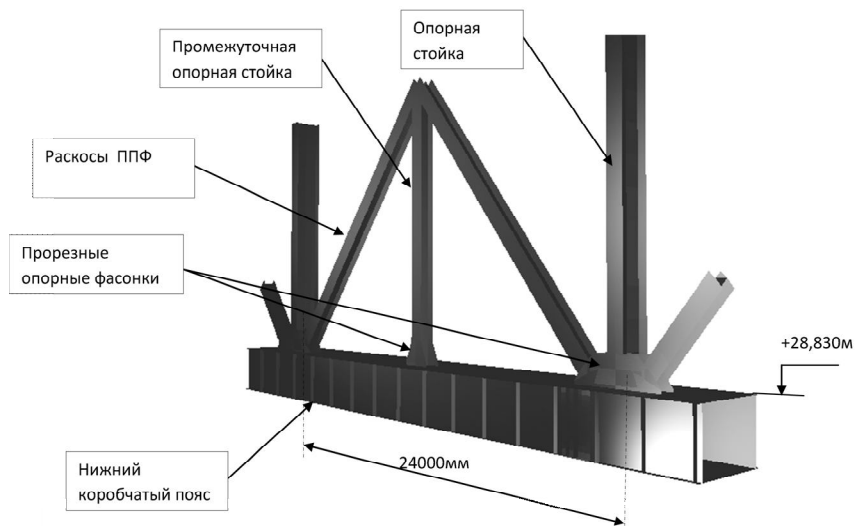


Рис.2. Общий вид среднего пролёта ППФ (перспективное изображение)

Сечение нижнего пояса ферм с габаритными размерами 3400×2431 мм состоит из двух стенок, верхнего и нижнего поясов, опорных и промежуточных диафрагм, ребер жесткости (шпангоутов и стрингеров) поясов, вертикальных прорезных фанонки для крепления раскосов и стоек. Высота стенок балки 2390 мм, толщина листа 25 мм из стали марки 09Г2С. Толщина листов верхнего пояса 25 мм, нижнего 16 мм из стали марки 09Г2С. В узлах опирания на колонны выполнены вставки шириной 2,0 м в стенку из листа толщиной 40 мм, и в нижнем поясе из листа толщиной 28 мм стали марки 14Г2АФ-12. Химический состав стали 09Г2С и 14Г2АФ приведен в табл. 2, механические характеристики – в табл. 3.

Таблица 2  
Химический состав исследуемых сталей (при 20°С), %

Сталь	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti
09Г2С	0,09	0,59	1,62	0,022	0,031	0,04	0,08	0,1	<0,005	<0,005
14Г2АФ	0,17	0,41	1,52	0,027	0,025	0,08	0,07	-	0,020	0,005

Таблица 3

Механические характеристики исследуемых сталей (при 20°С)

Сталь	Направление прокатки	$\sigma_{т}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{в}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\gamma$ , %	$d$ , %
09Г2С	Вдоль	345	516	73,6	30,2
09Г2С	Поперек	348	510	74,0	31,5
14Г2АФ	Вдоль	520	700	64,0	24,0

В верхнем пояском листе и в диафрагмах предусмотрены люки для доступа внутрь.

Крепление раскосов и стоек ППФ между собой – жесткое; крепления ППФ с колоннами – неподвижно-шарнирная опора.

Узлы соединения элементов подкраново-подстропильных ферм выполнены на высокопрочных болтах и на сварке. Заводские и монтажные стыки нижнего пояса ППФ выполнены на сварке.

### Повреждения (трещиноподобные дефекты)

Периодические обследования подкраново-подстропильных ферм в ККЦ ОАО «ММК» производились в три этапа, что позволило выявить фактическую историю развития повреждений:

I этап – обследование в период с 1989 по 1993 гг.;

II этап – обследование в 2003 г.;

III этап – обследование в 2010 г.

История развития трещиноподобных дефектов по рядам показана на рис. 3.

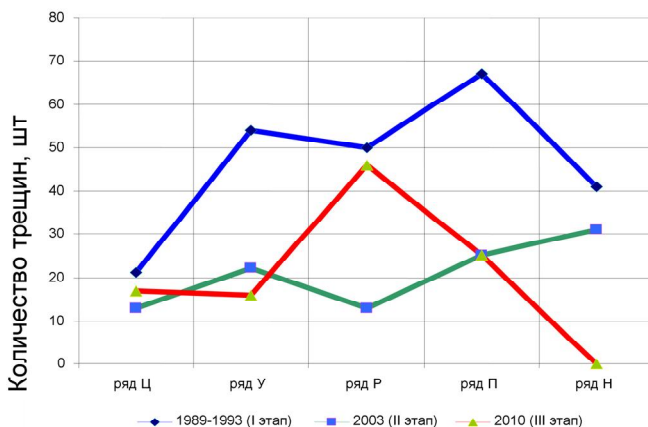


Рис. 3. График распределения трещиноподобных дефектов, выявленных при проведении обследований, по рядам

Все обследования этапу I являлись продолжением научно-исследовательской работы, выполненной ЦНИИ «ПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ» им. Мельникова в части проведения натурных испытаний ППФ крановыми нагрузками. Обследования производились с целью выявления дефектов и повреждений нижних поясов подкраново-подстропильных ферм и узлов опирания их на колонны.

Обследование выполнялось на различных стадиях:

- в исходном состоянии (после монтажа ППФ);
- в процессе испытания;
- после окончания испытаний;
- после 14 лет эксплуатации;
- после 20 лет эксплуатации.

При обследовании были выявлены:

- трещины по оси сварного шва;
- трещины по линии сплавления металла сварного шва с основным металлом;
- поперечные трещины в сварном шве;
- кратерные трещины.

Максимальная длина трещиноподобных дефектов достигала 2000 мм. В результате выполнения ремонтных работ после проведения каждого обследования трещины в ППФ устранялись или усиливались путём установки накладок. Несмотря на предпринятые усилия, мероприятия по ремонту трещин оказались малоэффективными, в настоящее время наблюдается развитие трещин в местах уже выполненного ремонта.

### **Статистика повреждаемости**

За I этап в период с 1989 по 1993 гг. выявлены участки с ростом трещин и дефекты в монтажных сварных швах (рис. 4).

Выявленные дефекты связаны в основном с двумя факторами:

- слоистое растрескивание листового проката под действием сварочных напряжений в жестких узлах с крестообразным и тавровым пересечением элементов;
- трещины в сварных заводских швах.

Причиной образования этих повреждений являлось:

- качество стали, связанное с повышенными прочностными свойствами и пониженными пластическими свойствами стали поперек и вдоль проката;
- нарушение технологии при изготовлении сварных металлоконструкций из марок 14Г2АФ толщиной 30-50 мм;
- отрицательные температуры при монтаже.

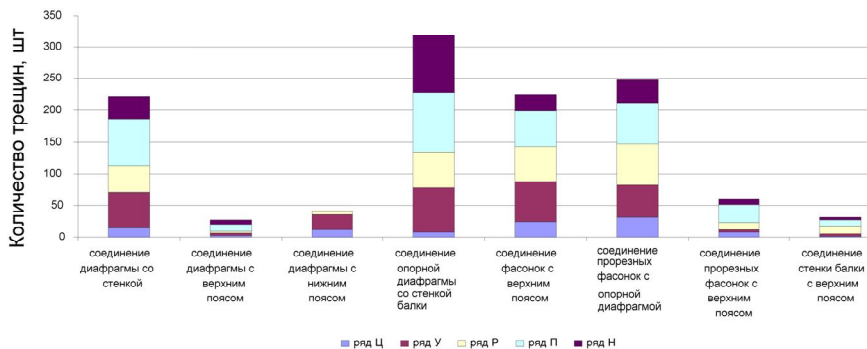


Рис. 4. Сводная диаграмма расположения дефектов I этапа (1989-1993 гг.)

В результате обследования ППФ в 2003 году (II этап) было установлено, что все повреждения, выявленные до 1994 года, были устранены полностью или частично (засверлены концы трещин), зоны повреждений усилены. Неотремонтированными остались участки ППФ с многочисленными дефектами в сварных швах крепления элементов коробчатых балок, такие как кратеры, кратерные трещины, непровары, поры, раковины, являющиеся концентраторами напряжений. Основной зоной развития трещиноподобных дефектов (около 90% от общего количества) является сварной шов в узле сопряжения прорезных фасонки с верхним поясом и опорной диафрагмой (рис. 5).

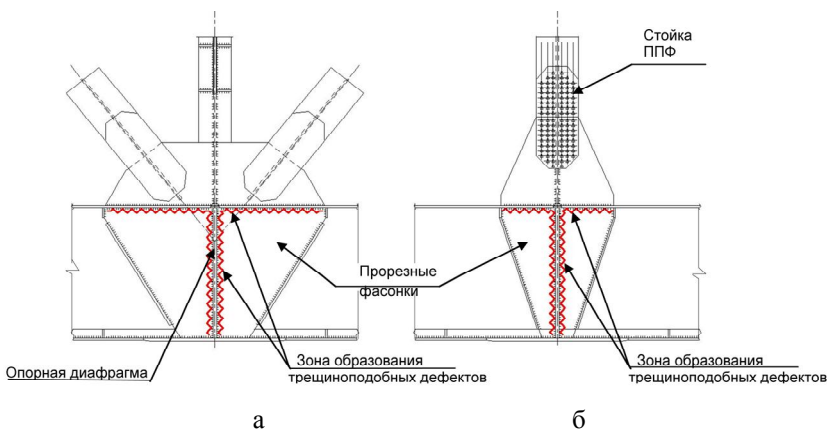


Рис.5. Схема мест расположения дефектов в узле сопряжения прорезных фасонки с коробчатым нижним поясом ППФ:  
а – на опоре; б – в месте примыкания стойки

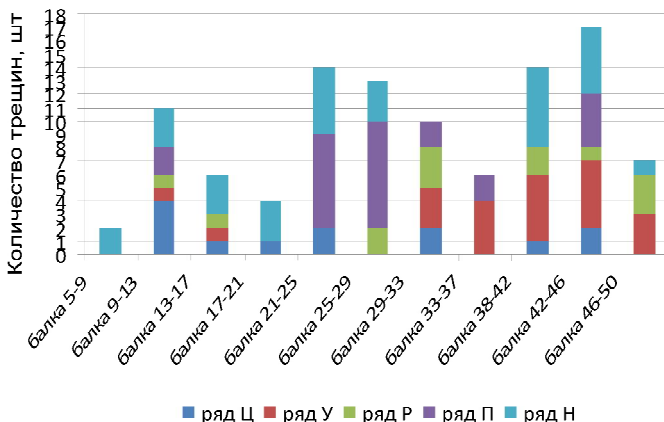


Рис. 6. Сводная диаграмма по количеству дефектов за 2003 год

По результатам обследования был сделан следующий вывод: Подкрановые конструкции эксплуатируются в течение 10 лет с наличием в сварных соединениях трещин и трещиноподобных дефектов, при этом трещины имеют усталостный характер при своём развитии и сконцентрированы в узле сопряжения прорезных фасонки с верхним поясом и опорной диафрагмой.

В результате обследования ППФ в 2010 году (III этап) установлено (рис. 6):

- повреждения, выявленные в 2003 году, были устранены частично;
- влияние повышенных температур на ППФ незначительно. Максимальная температура нагрева ППФ при тепловыделениях из ковшей с открытым зеркалом расплавленного металла зафиксирована в осях расположения стенда МНЛЗ и составляет не более 64°C;
- в результате безостановочной эксплуатации ППФ за период с 2003 по 2010 гг. (рис. 7) обнаружено большое количество усталостных трещин длиной в среднем 300 мм (максимальная длина трещины – 725 мм) в сварных швах соединения стенки с верхним поясом нижнего пояса ППФ (около 80% от общего количества трещиноподобных дефектов) в месте расположения диафрагм. Особым негативным фактором послужило то, что образование трещин по сварному шву сопровождается выходом на основной металл в зоне сопряжения стенки с верхним поясом коробчатого нижнего пояса ППФ.

Анализ местоположения дефектов показал, что существует зависимость уровня повреждаемости ППФ от интенсивности работы кранов (рис. 8 и 9).

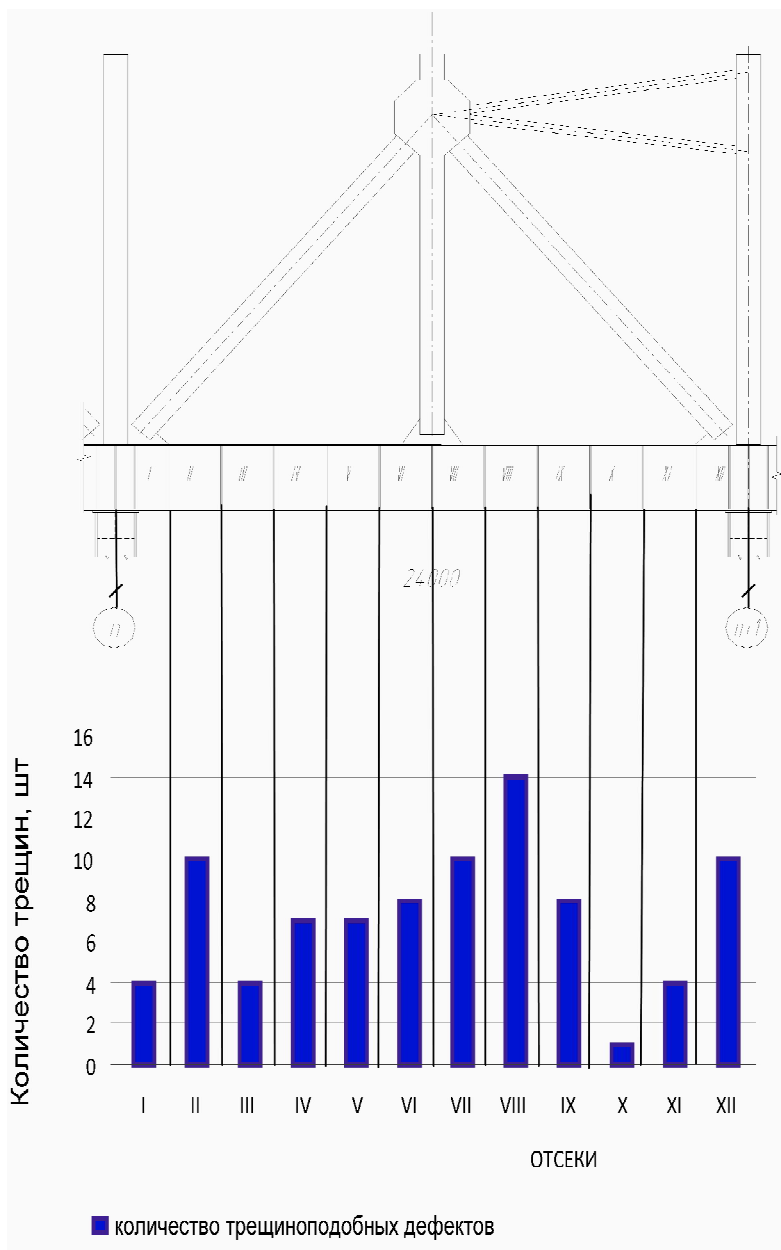


Рис. 7. Усреднённая схема расположения трещиноподобных дефектов по отсекам одного пролёта ППФ за 2010 год



## Предотвращение аварий зданий и сооружений

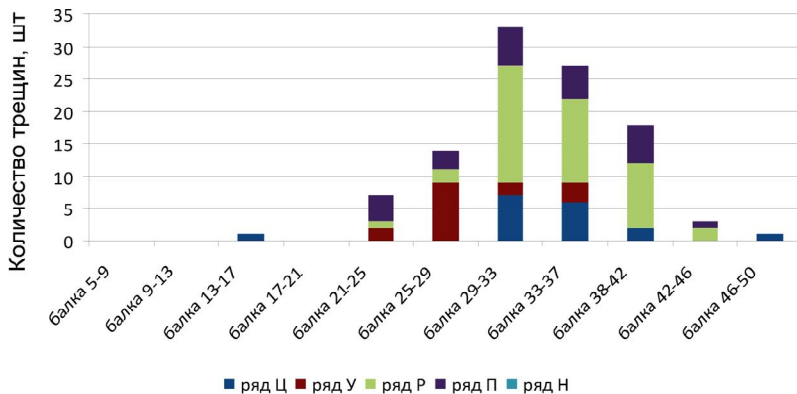


Рис. 8. Сводная диаграмма по количеству дефектов за 2010 год

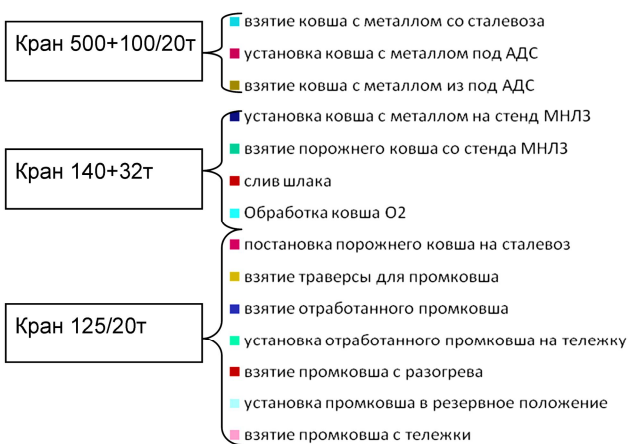
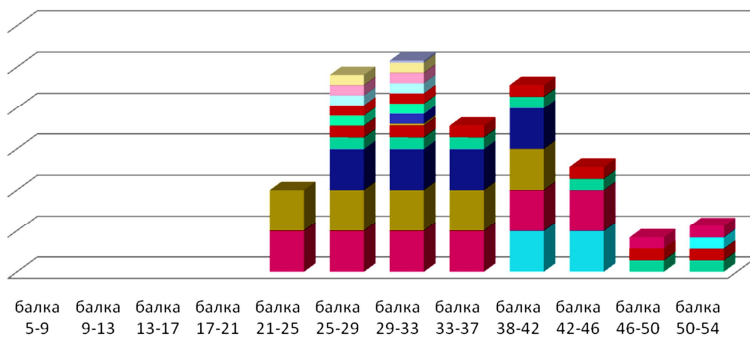


Рис. 9. Циклограмма работы кранов

Одними из причин появления и роста выявленных дефектов являются:

- внецентренное положение рельса относительно стенки коробчатого нижнего пояса;
- повышенные динамические нагрузки от выколов и выработки рельса в местах стыка.

Основные места скопления дефектов в зоне сопряжения стенки с верхним поясом в местах расположения диафрагм.

### Вывод

Анализ повреждений, накопленных за весь период эксплуатации ППФ, показал:

- основное количество трещин и трещиноподобных дефектов выявлено в первые 3 года эксплуатации (рис. 10). Связано это с качеством изготовления и качеством примененных сталей, а также с производимыми натурными испытаниями ППФ 500-тонными кранами в течение двух месяцев после завершения монтажа. Наличие выявленных повреждений существенно сократило ресурс ППФ;
- проводимые ремонтные работы позволили снизить интенсивность развития и появления трещиноподобных дефектов, выявленных на I и II этапах. Ремонт трещин выполнялся по методике, разработанной ЦНИИ «ПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ» им. Мельникова;
- установлены основные места развития повреждений в нижнем поясе ППФ – это зона сопряжения прорезных фасонки с верхним поясом и опорной диафрагмой (рис. 5), зона сопряжения стенки с верхним поясом в местах расположения диафрагм, зона сопряжения опорной диафрагмы со стенкой (табл. 4);

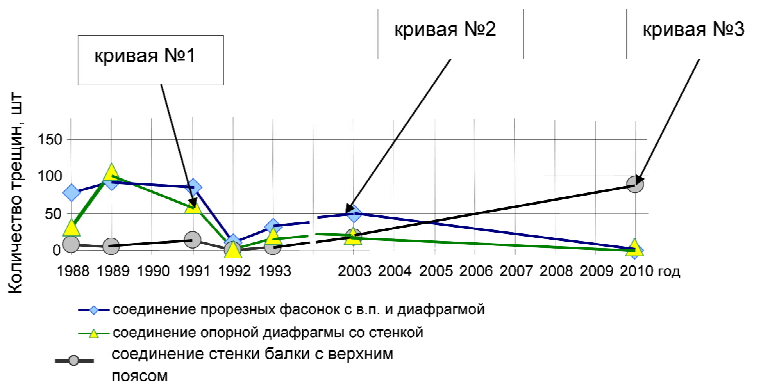


Рис. 10. График выявленных дефектов за весь наблюдаемый период

– на этапе III обследования наблюдается рост трещиноподобных дефектов в зоне сопряжения стенки с верхним поясом в местах расположения диафрагм (рис. 10, кривая №3). Трещины носят ярко выраженный усталостный характер, развитие этих повреждений связано с интенсивностью эксплуатационных нагрузок (в основном крановых нагрузок).

Таблица 4

Сводная таблица трещиноподобных дефектов, выявленных  
на всех этапах обследований

Год обследования	Количество трещиноподобных дефектов, %							
	соединение диафрагмы со стенкой	соединение диафрагмы с верхним поясом	соединение диафрагмы с нижним поясом	соединение опорной диафрагмы со стенкой балки	соединение фасонки с верхним поясом	соединение прорезных фасонки с диафрагмой	соединение прорезных фасонки с верхним поясом	соединение стенки балки с верхним поясом
1989	27	2	0	31	15	19	5	1
1991	17	2	12	25	16	21	3	4
1992	5	11	0	21	11	52	0	0
1993	22	1	0	24	12	36	1	4
2003	23	2	0	7	0	1	47	20
2010	0	8	0	0	2	0	3	87

### Библиографический список

1. Патрикеев А.В. Некоторые закономерности усталостных повреждений сварных подкрановых балок // Проблемы прочности. 1983. №7.
2. Калашников Г.В. Настоящее и будущее подкрановых балок // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2007. №7.
3. О состоянии подкрановых конструкций корпуса конвертерного производства ОАО «Северсталь» / В.Н. Артюхов, Е.А. Щербаков, В.М. Горичкий, Г.Р. Шнейдеров // Промышленное и гражданское строительство. 2008. №5.
4. Гладштейн Л.И. Разрушение материала и элементов строительных конструкций // МЕТАЛЛУРГ. 2011. №3.