

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ

Шульга Степан Николаевич

*ОАО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ», г.Магнитогорск,
Челябинская область*

Подкраново-подстропильные фермы (ППФ) с неразрезным нижним поясом на сегодняшний день являются уникальными конструкциями, т.к. ввиду сложности их расчёта, проектирования и изготовления с момента их изобретения построено относительно небольшое их количество.

Появление повреждений в виде трещин в таких масштабных конструкциях, как ППФ, вызывает понятное беспокойство у служб эксплуатации предприятий и специалистов, выполняющих их экспертизу, т.к. авария, замена или ремонт влекут за собой остановку, простой технологических мощностей предприятий и возникновение связанных с этим финансовых рисков.

Данные обследований ППФ с трещиноподобными дефектами за последние годы позволяют выявить определённые закономерности развития повреждений в этих конструкциях и оценить влияние этих повреждений на общий ресурс конструкции.

Одним наиболее распространённым проявлением усталостного повреждения ППФ является распространение продольных трещин в зоне сопряжения стенки с верхней полкой нижнего ездового пояса (рис. 1-4). Скорость роста трещин по результатам мониторинга с определённой долей аппроксимации соответствует:

$$\frac{dl}{dN} = -2 \cdot 10^{-15} \cdot l^4 + 4 \cdot 10^{-12} \cdot l^3 - 2 \cdot 10^{-9} \cdot l^2 + 4 \cdot 10^{-7} \cdot l - 3 \cdot 10^{-6}$$

Распределение растущих трещин по пролёту ППФ



Рис. 1. График распределения активно растущих трещин по пролёту ППФ

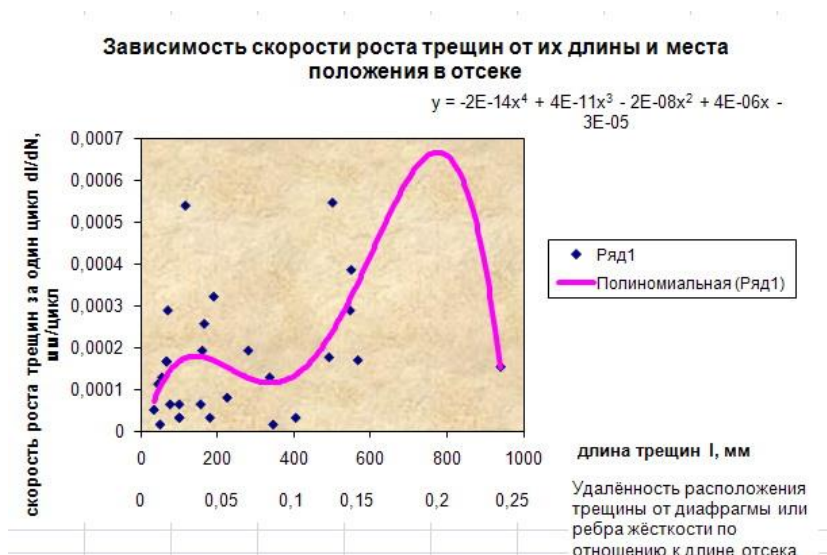


Рис. 2. График зависимости скорости роста трещин и места положения в отсеке ППФ, полученный в результате мониторинга конструкций ППФ за 4 года наблюдений

Появление множества таких трещин может привести к их дальнейшему объединению в одну общую магистральную трещину.

Изучение скорости образования, роста и степени опасности магистральной трещины позволяет определить критерии общего остаточного ресурса, а также разработать эффективные мероприятия по восстановлению.



Рис. 3. Круговая диаграмма положения трещин по отношению к диафрагмам и ребрам жёсткости в ППФ

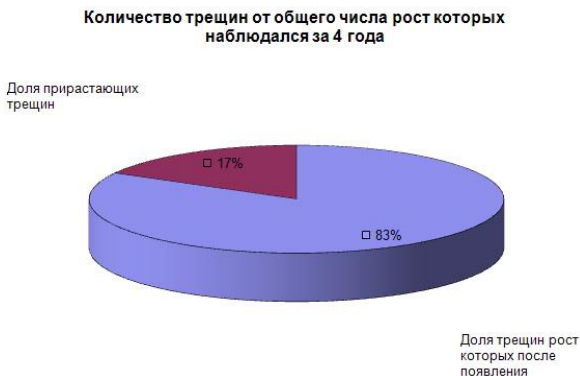


Рис. 4. График распределения активно растущих трещин по пролёту ППФ

Предполагается, что при развитии магистральной трещины происходит формоизменение нижнего пояса ППФ (диплонация) со значительным снижением его жёсткости, что в свою очередь приводит к невозможности его использования в качестве «ездового».

Основными повреждающими силовыми факторами, действующим в этой зоне, являются местные нормальные и касательные напряжения от воздействия катков крана.

Общее теоретическое решение о распределении местных напряжений в стенке стальных балок дано Б.М.Броуде. Исследование основано на решении плоской задачи теории упругости в напряжениях, которое сводится к определению функции напряжений F на верхней кромке стенки балки, удовлетворяющей бигармоническому уравнению:

$$\nabla^2 \nabla^2 F = \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0. \quad (1)$$

Функция напряжений F принята в виде тригонометрического ряда:

$$F = \sum \varphi_1(y) \cdot \cos(2n+1) \cdot (1 \cdot \pi \cdot x) / L. \quad (2)$$

Решение дифференциального уравнения с учетом функций напряжений в виде тригонометрического ряда, позволило получить выражение для определения давления на стенку от сосредоточенной силы F , приложенной к поясу балки:

$$\sigma_{loc.x} = \frac{\gamma_{f1} \cdot F_{max}^n}{t_w \cdot l_{ef}}, \quad (3)$$

где F_{max}^n – давление колеса крана;

Предотвращение аварий зданий и сооружений

γ_{fl} – коэффициент увеличения вертикальной сосредоточенной силы на отдельное колесо мостового крана (п.4.8 СНиП 2.01.07-85*);

$l_{ef} = c \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{p.f}}{t_w}}$ – условная длина распространения сжимающих

напряжений;

c – коэффициент, принимаемый для сварных балок равным 3,25;

t_w – толщина стенки.

$$I_{p.f} = I_p + I_f,$$

где I_p – собственный момент инерции рельса;

I_f – собственный момент инерции верхнего пояса,

$$I_f = \frac{b_{ef} \cdot t_f^3}{12}, \quad (4)$$

t_f – толщина верхней полки;

b_{ef} – эффективная ширина верхней полки.

Принимая $b_{ef} \approx 2h_{св}$ и сравнивая полученное значение σ_{loc} с $\sigma_{P_{loc}}^P$, полученным в результате расчёта методом конечных элементов, установлено, что их значения различаются на величину коэффициента концентрации напряжений в отдельно взятом отсеке и по длине всего нижнего пояса (рис. 5, 6).

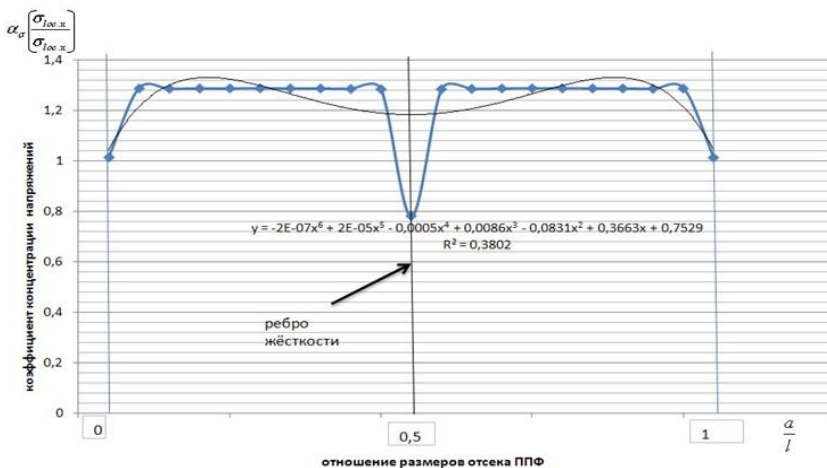


Рис. 5. График функции коэффициента концентрации напряжений α_l в одном отсеке

В пределах крайнего пролёта коэффициент интенсивности напряжений представлен функцией в соответствии с рис. 6.

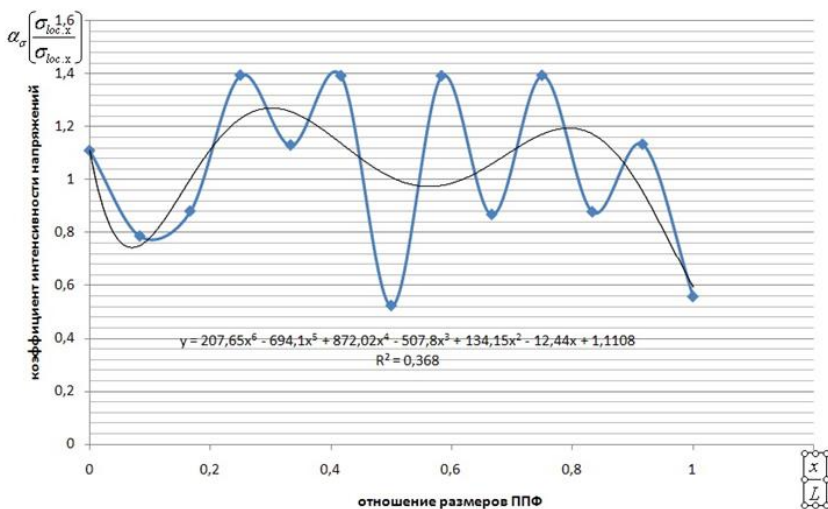


Рис. 6. График функции коэффициента концентрации напряжений α_2 в крайнем пролёте (L – длина пролёта ППФ)

Таблица 1

Значение коэффициента концентрации напряжения в зависимости от расположения в отсеке длиной l

a/l	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
α_1	1,015	1,287	1,288	1,288	1,286	0,781	1,286	1,289	1,288	1,287	1,013

Таблица 2

Значение коэффициента концентрации напряжения α_2 в зависимости от расположения в крайнем пролёте ППФ длиной L

x/L	0	1/12	2/12	3/12	4/12	5/12	6/12	7/12	8/12	9/12	10/12	11/12	12/12
α_2	1,109	0,786	0,880	1,393	1,129	1,391	0,523	1,391	0,867	1,392	0,877	1,132	0,557

Таблица 3

Значение коэффициента концентрации напряжения α_3 в зависимости от расположения в рядовом пролёте ППФ длиной L

x/L	0	1/12	2/12	3/12	4/12	5/12	6/12	7/12	8/12	9/12	10/12	11/12	12/12
α_3	0,557	1,117	0,879	1,393	0,867	1,386	0,771	1,386	0,866	1,393	0,876	1,386	0,710

Многочисленные исследования циклической трещиностойкости материалов и конструкций базируются на различных модельных представлениях, описывающих зависимость скорости роста трещины (СРТ) от характеристик трещиностойкости. Учитывая конструктивные особенности и условия нагружения ПБ, для решения задач оценки показателей ресурса и живучести с достаточной степенью точности может быть использована в качестве модели СРТ степенная зависимость, предложенная Пэрисом:

$$\frac{dl}{dN} = C(K_{\max})^m, \quad (5)$$

где C, m – характеристики циклической трещиностойкости;

K_{\max} – максимальное значение КИН в цикле нагружения.

Для описания СРТ можно использовать общую зависимость расчета эффективного КИН для трещин различной длины, развивающихся в элементах конструкций любых геометрических форм и размеров:

$$K_{ief} = \sigma_i \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (6)$$

где K_{ief} – эффективное значение коэффициента интенсивности напряжений, учитывающее конечные размеры элементов конструкции и его условия нагружения;

σ_i – значение интенсивности напряжений для рассматриваемой длины трещины в ее вершине;

l – рассматриваемая длина трещины.

Такой подход дает возможность для анализа кинетики развития усталостных трещин в области верхней зоны стенки нижнего пояса ППФ вне зависимости от конструктивных особенностей.

При проведении расчетов остаточного ресурса ППФ необходимо учитывать особенности развития каждой конкретной трещины: ее длину, местоположение, уровень интенсивности напряжений, возникающий в каждом ее конце. Таким образом, данный метод оценки циклической трещиностойкости элементов конструкций в условиях неоднородного напряженного состояния, какой является стенка нижнего пояса ППФ, основывается на использовании базовых характеристик циклической трещиностойкости.

Исходными данными для определения скорости роста трещины являются значение КИН, определенное для рассматриваемой длины трещины l , и соответствующее ей число циклов нагружения N .

Полная диаграмма усталостного разрушения, построенная в двойных логарифмических координатах, представляет собой S-образную кривую (рис. 7), на которой можно выделить три характерные зоны,

соответствующие различным механизмам роста трещины. Границы этих зон могут изменяться в зависимости от различных факторов (марки металла и т.д.).

Слева кривая ограничена пороговым значением КИН – K_{th} , ниже которого трещина не развивается или растет очень медленно $v < 10^{-10}$ м/цикл; справа – критическим значением КИН – K_{fc} (критическая вязкость разрушения).

Средний, линейный участок диаграммы ограничен значениями ΔK_{1-2} и ΔK_{2-3} .

Диаграммы, построенные на базе K_{max} или $\Delta K = (1 - R) \cdot K_{max}$, эквивалентны и отличаются только масштабом по оси абсцисс.

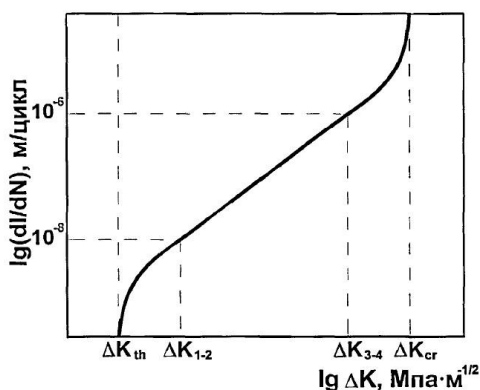


Рис. 7. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Пороговое значение K_{th} принимается согласно:

$$K_{th} = 12.7 - 0.006\sigma_{0.2} - (11.37 - 0.0065\sigma_{0.2})R \quad (7)$$

при $R=0$

Таблица 4

Значения K_{th} при $R=0$

Марка стали	$\sigma_{0.2}$, МПа	K_{th} , МПа√м
09Г2С	345	13,63
14Г2АФ	390	10,36

Критическое значение КИН – K_{fc} (критическая вязкость разрушения) для различных марок стали широко исследовано ведущими учёными страны. Так для стали 09Г2С и ВСтЗсп КИН – K_{fc} принимается согласно табл.5.

Значение параметров статической трещиностойкости
для сталей 09Г2С и ВСтЗсп

T, °C	Развитие трещин поперёк прокатки/развитие трещин вдоль прокатки K _{Ic}	
	ВСтЗсп	09Г2С
+20	148/125,3	169,7/150,3
0	140,4/130,4	169,3/148,6
-10	142,8/111,8	164,2/135,7
-20	147,3/107,9	156,8/128,4
-30	138,5/96,4	158,9/120,6
-40	130,1/87,2	152,4/110,2
-50	124,9/83,7	149,4/103,4
-60	125,6/80,1	142,1/94,1

Коэффициент интенсивности напряжений для среднего участка диаграммы можно рассчитать как для случая полуэллиптической трещины:

$$K_I = \frac{2 - 0.82 \frac{1}{c}}{\left[1 - \left(0.89 - 0.57 \sqrt{\frac{1}{c}} \right)^3 \left(\frac{1}{t} \right)^{1.25} \right]^{3.25}} \cdot \Phi \sigma^* \sqrt{l}, \quad (8)$$

где

$$\Phi = \left[1.1 + 0.35 \left(\frac{1}{t} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{1}{c}}, \quad (9)$$

t – толщина стенки;

c – полудлина трещины,

$$\sigma^* = 0.64 \sigma_A + 0.36 \sigma_B, \quad (10)$$

где σ_A, σ_B – напряжения определяются методом конечных элементов.

Для расчёта КИН выполнялся расчёт напряжённого состояния в вершине трещины (методом конечных элементов) с различной длиной трещины и раскрытием, а также при различном расположении в отсеке ППФ (табл. 6-8).

По результатам расчёта методом конечных элементов и формулам (8)-(10) определены зависимости и графики для нахождения КИН и Φ (табл. 9-12), также определена аналитическая зависимость СРТ и циклов нагружения от КИН и местных нормальных напряжений.

Таблица 6

Нормальные напряжения N_x в вершине трещины с раскрытием $a = 1$ мм

Длина трещины – 6,56 см	Длина трещины – 12,19 см	Длина трещины - 24,69 см
Длина трещины – 45 см	Длина трещины – 120 см	

Таблица 7

Нормальные напряжения σ_u в вершине трещины с раскрытием $a = 1$ мм

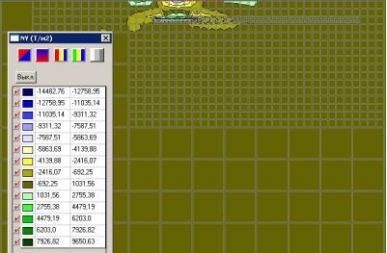
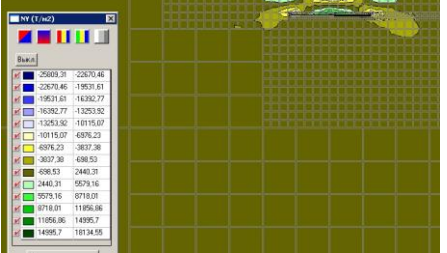
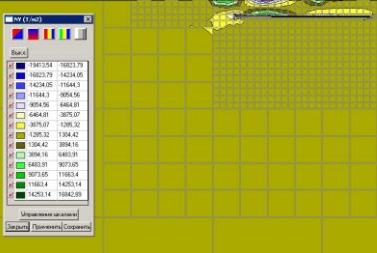
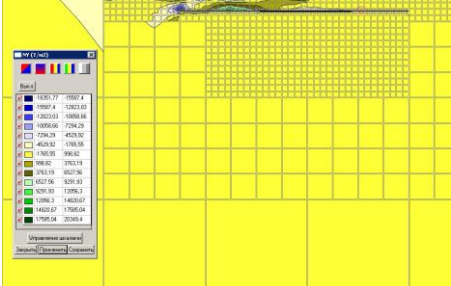
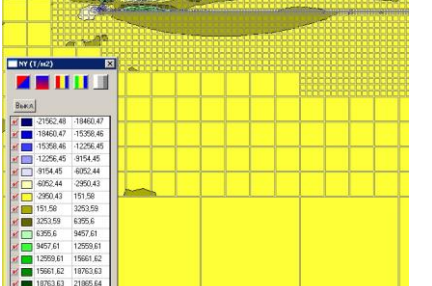
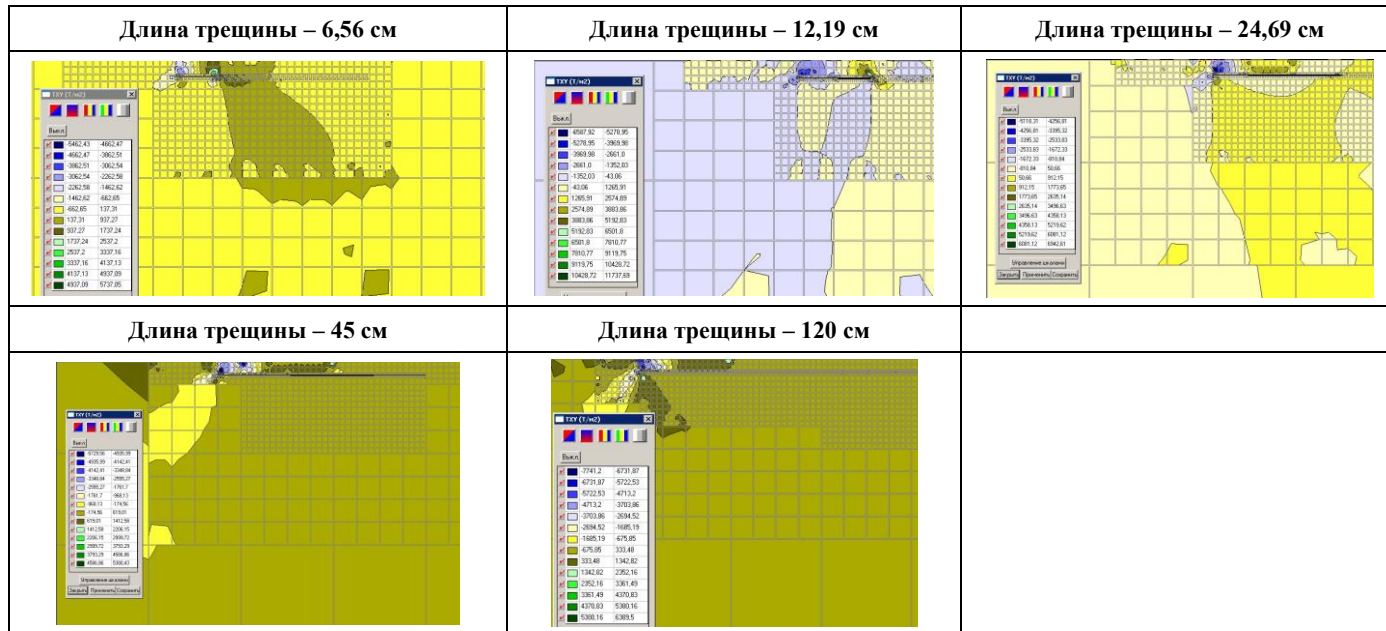
Длина трещины – 6,56 см	Длина трещины – 12,19 см	Длина трещины – 24,69 см
		
Длина трещины – 45 см	Длина трещины – 120 см	
		

Таблица 8

Касательные напряжения T_{xy} в вершине трещины с раскрытием $a = 1$ мм



Выводы

1) Полученные аналитические зависимости позволяют с определённой долей аппроксимации определить закономерность СРТ в зависимости от таких параметров как:

- температура эксплуатации;
- уровень напряжённого состояния зоны распространения трещины;
- направления прокатки;
- расположения трещины относительно сварного шва.

2) Полученные аналитические зависимости СРТ соответствуют СРТ, полученным при наблюдении за трещинами в процессе мониторинга.

3) В результате наблюдения и аналитического анализа выявлено, что усталостные трещины в зоне сопряжения стенки с верхней полкой ППФ направлены вдоль пояса и распространяются только в зоне влияния местных нормальных напряжений от колеса крана. Развитие усталостной трещины вне этой зоны возможно только в случае достижения предела усталости основного металла конструкции, которое соответствует расчётному числу циклов нагружения N до образования трещины:

$$N_p = \frac{1}{S_N} \left[\frac{0.25 E e_C}{\sigma_\alpha - \bar{\sigma}_{-1} / (1+r)} \right]^2,$$

где S_N – коэффициент запаса прочности по числу циклов нагружения;
 E – модуль упругости;

$$e_C = \ln [1 / (1 - \psi)];$$

ψ – относительное сужение материала;

$\sigma_\alpha = \frac{1}{\varphi} \{0.5 K_\sigma \sigma_n + 0.28 \sigma_{0.2}\}$ – амплитудные напряжения. σ_n – номинальные напряжения;

$$\bar{\sigma}_{-1} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_\sigma}$$

$$\bar{r} = (1+r) / (1-r)$$

r – коэффициент асимметрии цикла нагружения;

K_σ – коэффициент концентрации напряжений;

$\sigma_{-1}, \sigma_\sigma, \sigma_{0.2}$ – предел выносливости, предел временного сопротивления, предел текучести.

4) В отличие от двутавровых подкрановых балок, в зоне сопряжения стенки с верхней полкой ППФ развитие магистральной трещины не приведёт к исчерпанию ресурса в целом для конструкции.

Таблица 9

Графики значений K_{max} и K -тарировки (Φ) для стали 14Г2АФ в зависимости от длины трещины, места положения в отсеке и локальных напряжений σ_{loc}

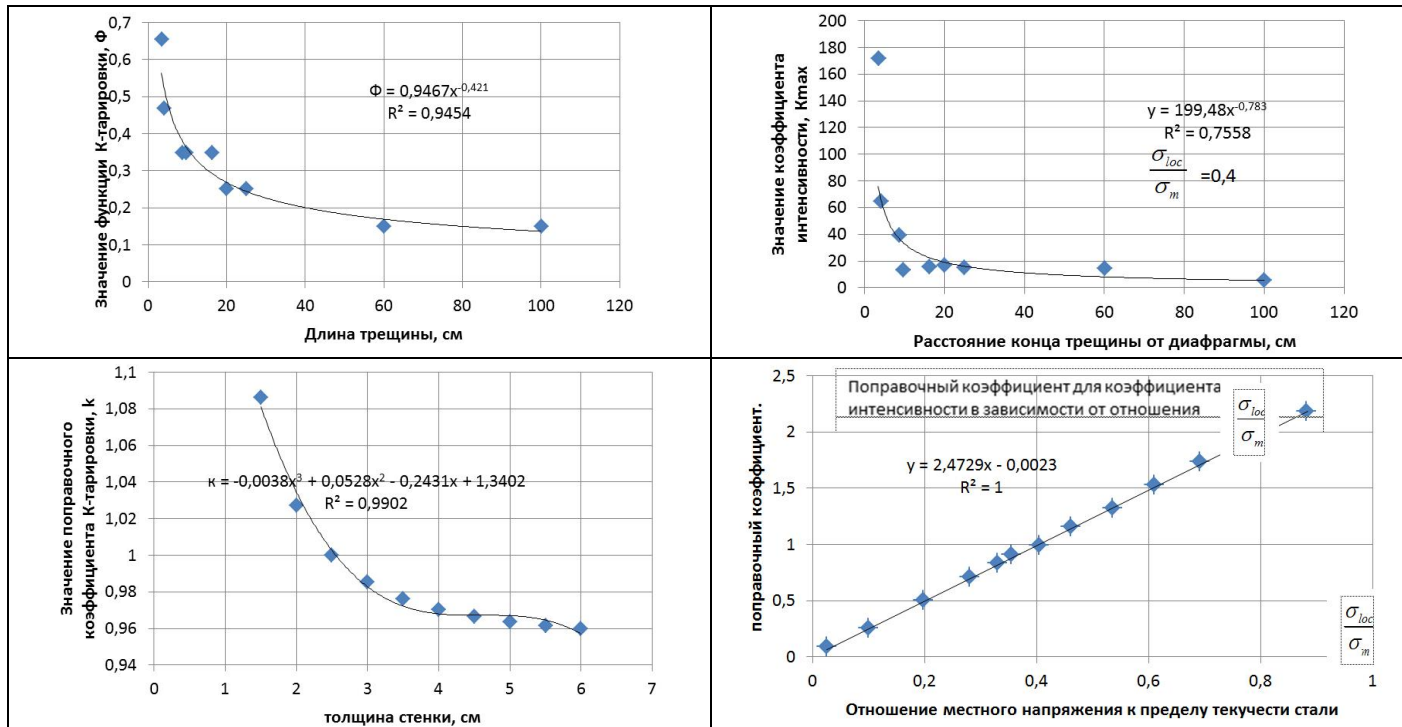


Таблица 10

Графики значений K_{max} и K -тарировки (Φ) для стали 09Г2С в зависимости от длины трещины, места положения в отсеке и локальных напряжений σ_{loc}

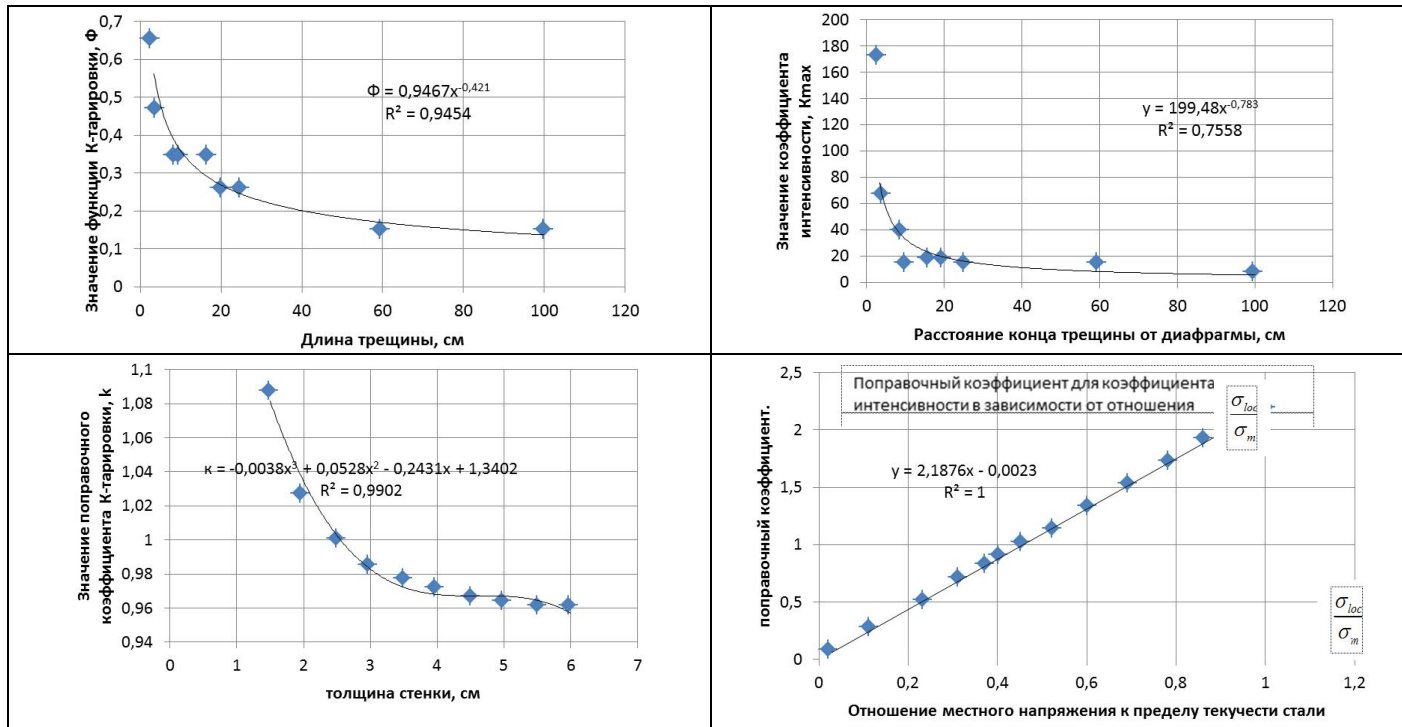


Таблица 11

Зависимость скорости роста трещин от коэффициента интенсивности напряжения K_I вдоль и поперёк прокатки для стали 09Г2С и 14Г2АФ

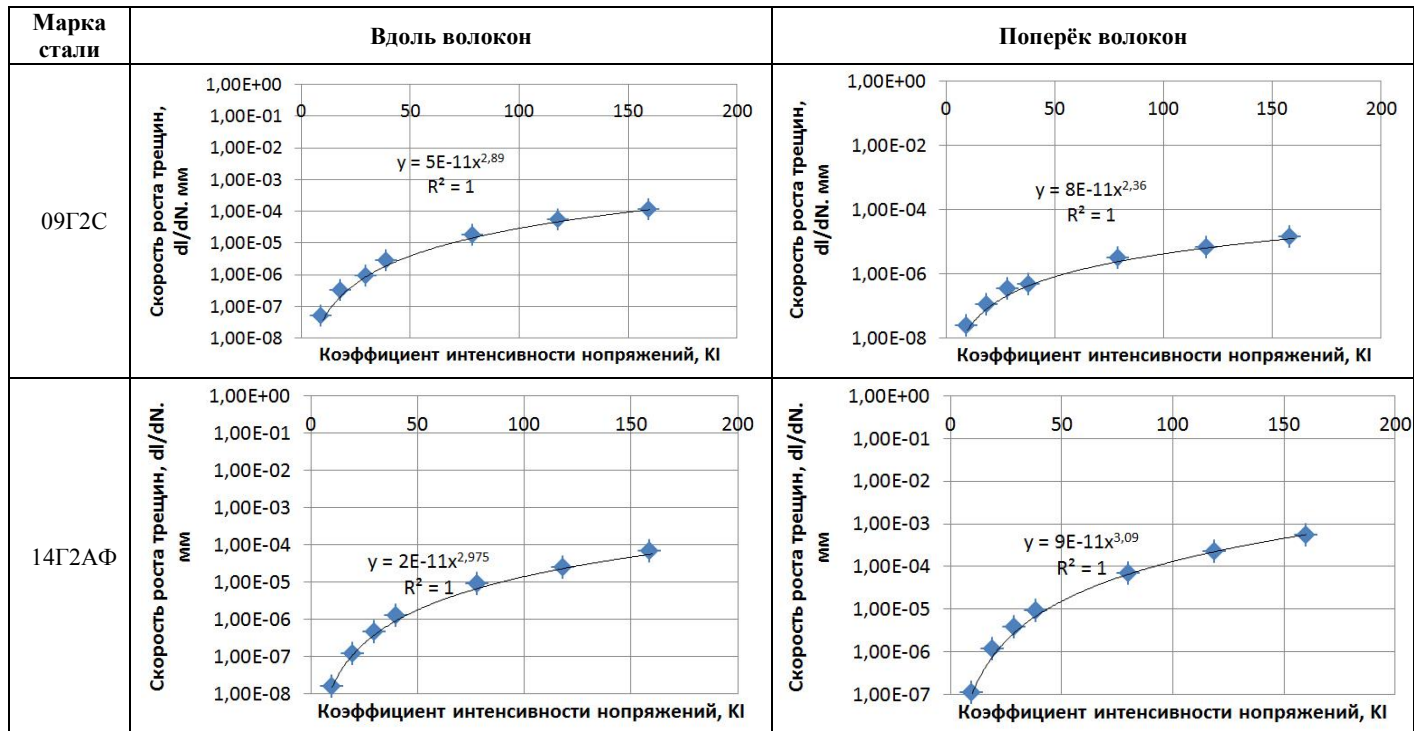


Таблица 12

Закономерность скорости роста трещин и коэффициентов интенсивности напряжений K_I в зависимости от зоны расположения трещины по отношению к сварному шву

Зона расположения трещины	При температуре +20°C	При температуре -70°C
Основной металл (ОМ)	<p>Скорость роста трещин, dl/dN, мм</p> <p>Кoeffициент интенсивности напряжений, K_I</p> <p>$y = 1E-09x^{3,5}$ $R^2 = 1$</p>	<p>Скорость роста трещин, dl/dN, мм</p> <p>Кoeffициент интенсивности напряжений, K_I</p> <p>$y = 8E-09x^{2,62}$ $R^2 = 1$</p>
Околошовная зона (ОШЗ)	<p>Скорость роста трещин, dl/dN, мм</p> <p>Кoeffициент интенсивности напряжений, K_I</p> <p>$y = 1E-09x^{3,56}$ $R^2 = 1$</p>	<p>Скорость роста трещин, dl/dN, мм</p> <p>Кoeffициент интенсивности напряжений, K_I</p> <p>$y = 8E-09x^{2,84}$ $R^2 = 1$</p>

Зона расположения трещины	При температуре +20°C	При температуре -70°C
Зона сварного шва	<p>Скорость роста трещин, dl/dN, мм</p> <p>Кoeffициент интенсивности напряжений, KI</p>	<p>Скорость роста трещин, dl/dN, мм</p> <p>Кoeffициент интенсивности напряжений, KI</p>

Библиографический список

1. Ерёмин К.И., Шульга С.Н. Напряженно-деформированное состояние узлов подкраново-подстропильных ферм // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №6. С. 52-55.
2. Ерёмин К.И., Шульга С.Н. Закономерность повреждений подкраново-подстропильных ферм на стадии эксплуатации// Промышленное и гражданское строительство. 2013. №4. С. 40-43.
3. Pinto J. M. A., Pujol J. C. F., Cimini C. A. Probabilistic cumulative damage model to estimate fatigue life// Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2013, Vol. 37, pp. 85-94.
4. Benjamin V. Fell, Ph.D., P.E. and Amit M. Kanvinde, Ph.D. Recent Fracture and Fatigue Research in Steel Structures// STRUCTURE magazine. 2009, no. 2, pp.14-17.
5. Артюхов В.Н., Щербakov Е.А., Горицкий В.М., Шнейдеров Г.Р. О состоянии подкрановых конструкций корпуса конвертерного производства ОАО «Северсталь»//Промышленное и гражданское строительство. 2001. №6. С. 31-34.
6. Kawasaki T., Nakanishe S., Sawaki I. Tangle crack growth // Engineering Fracture Mechanics. 1975, no. 3, pp. 12-18.
7. Сабуров В.Ф."Закономерности усталостных повреждений и разработка метода расчетной оценки долговечности подкрановых путей производственных зданий"Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук Челябинск - 2002-С. 388.