

УДК 622.242.32:004.925.84

И.Ю. Быков, д.т.н., проф. кафедры МОНиГП; **А.Л. Смирнов**, аспирант, директор ООО «ЭкспертСтрой»;
Д.А. Борейко, ассистент кафедры МОНиГП Ухтинского государственного технического университета,
e-mail: diacont_dboreyko@mail.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫШКИ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕМОНТА СКВАЖИН

В статье приведены результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния вышки агрегата для ремонта скважин. Показаны основные зоны концентрации напряжений и их характерные параметры. Также приведены результаты моделирования сквозной трещины в трубном узле вышки, найдены ее критические длины для стали 09Г2С с различными коэффициентами ударной вязкости. Определена долговечность материалов вышки подъемной установки до момента достижения трещиной длины 8,9 мм при ее ширине 1 мм. Получены зависимости коэффициента интенсивности напряжений от максимального действующего напряжения в сечении образца и длины трещины для стали 09Г2С.

Для конструкционных металлов пластическая деформация имеет место практически при любых уровнях нагружения. В ряде случаев она может приводить к предельному состоянию, не допускаемому по условию эксплуатации объекта. В других случаях, когда отказ объекта вызван ростом трещин, пластическая деформация является сопутствующим процессом, предшествует образованию трещин и сопровождает их развитие. В статье рассматриваются результаты моделирования для случая роста трещины при пластическом деформировании конструкции [1].

Для оценочного компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов выбрана вышка подъемного агрегата А-50М с наружным диаметром несущих ног 100 мм, наружными диаметрами поперечин и раскосов 60 мм.

Для создания 3D-модели вышечной

конструкции применяются современные программные комплексы параметрического твердотельного моделирования, работа которых основана на общих принципах. Модель вышки представлена на рисунке 1.

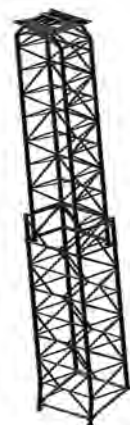


Рис. 1. Модель вышечной конструкции подъемной установки

В рассматриваемой компьютерной модели стыковка секций осуществляется с помощью глухого пальцевого замкового узла простейшей конструкции, схема которого показана на рисунке 2. Предлагаемая конструкция замкового

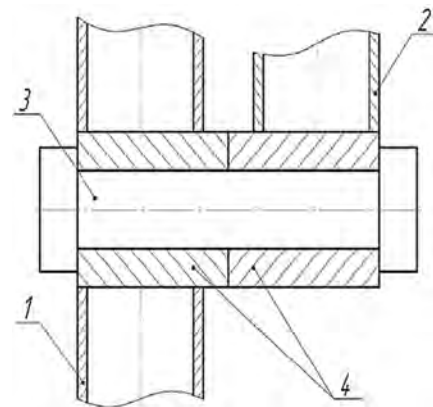


Рис. 2. Схема замкового соединения стыковки секций вышки
1 – нога нижней секции; 2 – нога верхней секции; 3 – палец; 4 – замок

соединения по принципу действия аналогична замковому механизму реальной вышки агрегата. Подобное упрощение необходимо из соображений облегчения генерации конечных элементов и снижения вероятности получения недостоверных результатов расчета из-за сложности геометрии узла.

Перед генерацией конечно-элементной сетки создаются закрепления опорных поверхностей, как показано на рисунке 3 красным цветом. В закреплениях запрещены перемещения вдоль трех осей координат X, Y и Z. Прикладывается испытательная нагрузка, увеличенная на 25% от максимально допустимой. Для рассматриваемого случая испытательная нагрузка $P_{исп} = 750$ кН, и приложена она к оси кронблока под углом 3 градуса к вертикали, как показано на рисунке 4. Конечно-элементный анализ созданной 3D-модели проводится в программных комплексах, таких как ANSYS, Solid Works, APM WinMachine и многие другие [2]. Объем разбиения на конечные элементы составил для вышки 782 074 конечных элемента и 252 537 узлов. Основная конфигурация элементов – тетраэдры. Максимальная длина стороны тетраэдра – 27 мм. Конечно-элементная сетка представлена на рисунке 5.

Процесс анализа состоит из нескольких этапов [2]:

1. Создание закреплений, т.е. запрещение перемещений в опорах или определенных узлах конструкции.
2. Приложение нагрузки к поверхности детали.
3. Создание конечно-элементной сетки с заданными параметрами

максимального размера тетраэдров, коэффициента разрежения в объеме и максимального коэффициента сгущения на поверхности.

4. Статический расчет в автоматическом режиме программы.

5. Просмотр результатов расчета и создание отчета.

Средства расчета являются сертифицированными программными продуктами, апробированными на достаточном количестве верификационных задач с известными аналитическими решениями.

Исходные данные для компьютерного моделирования:

1. Геометрические размеры вышки подъемной установки (наружный диаметр ног, поперечин и раскосов, толщины стенок).
2. Физико-механические характеристики материала вышки (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, предел прочности и др.).
3. Испытательная нагрузка, приложенная к элементам вышки.
4. Геометрические размеры дефекта (протяженность в окружном направлении, ширина).

Проведение компьютерного моделирования [2]:

1. Задают исходные данные.
2. Для созданной модели вышки производят расчет напряженно-деформированного состояния с нагрузкой, увеличенной на 25% от максимально допустимой – 750 кН. По результатам расчета определяют зоны концентрации напряжений (ЗКН).
3. Выбирают элемент вышечной конструкции с зоной максимальной концентрации напряжений.

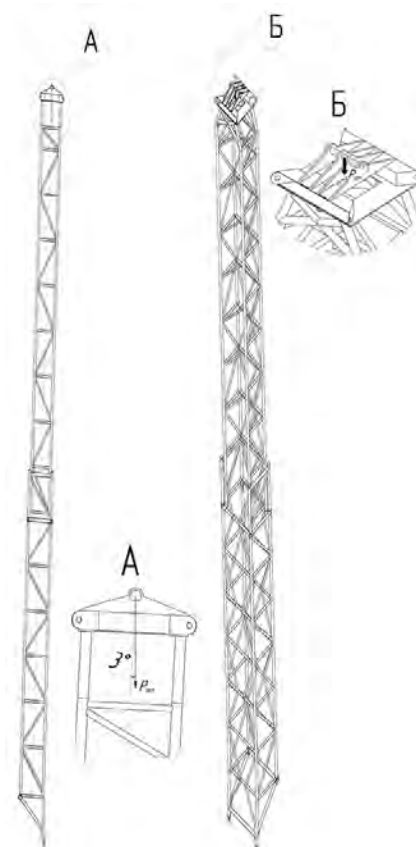


Рис. 4. Схема приложения нагрузки к вышечной конструкции

4. Создают геометрический образ элемента вышки.

5. Для выбранного элемента подбирают максимально допустимую нагрузку, при которой не нарушается условие прочности.

6. Далее в элементе вышечной конструкции задают сквозную эллиптическую поперечную трещину с начальными размерами длины $l = 1$ мм и ширины $b = 1$ мм и рассчитывают НДС, с приложением максимальной



Рис. 3. Схема закрепления вышечной конструкции

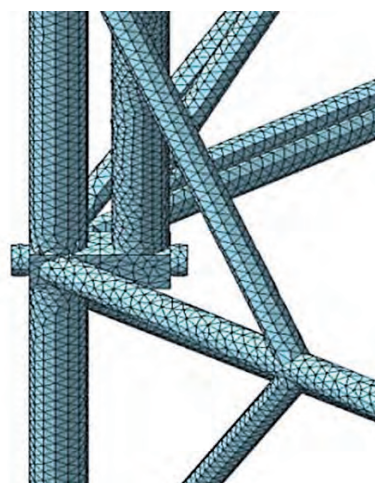


Рис. 5. Конечно-элементная сетка модели вышечной конструкции

Таблица. Результаты расчета изменения коэффициента интенсивности напряжений при росте длины трещины

	Длина трещины, l , мм	Максимальное напряжение, σ_{\max} , МПа	Коэффициент интенсивности напряжений, $K_{\text{инт}}$, МПа \cdot м $^{1/2}$	Коэффициент запаса прочности, n
$K_{\text{IC}} = 37$ МПа \cdot м $^{1/2}$	1	237,3	3,144954	1,84
	2	246,8	5,751602	1,765
	3	266	8,573833	1,617
	4	325	13,11785	1,595
	4,5	342,7	15,1389	1,432
	5	353,3	16,90029	1,341
	6	362,2	19,82392	1,318
	6,4	418,6	24,00345	1,121
	7	469,7	28,70249	1,073
8	480,7	32,21086	1,059	
8,5	493,4	34,43525	1,029	
8,9	514,3	37,00009	1,008	
9	549,8	39,84404	0,9083	

нагрузки, определенной для бездефектного образца.

По результатам ранее проведенных испытаний трубных образцов с соизмерными сквозными трещинами различной ориентации (продольной, поперечной) и несквозной кольцевой трещиной методом акустической эмиссии и моделирования установлено, что наиболее опасной является сквозная поперечная трещина [5]. Поэтому при моделировании процесса роста трещины в конструкции вышки рассматривается именно этот вид дефекта.

7. Моделируют процесс роста сквозной поперечной трещины, изменяя только ее длину l от 1 мм до некоторой критической величины с шагом 0,5–1 мм. Для каждого случая рассчитывают коэффициент интенсивности напряжений $K_{\text{инт}}$, МПа \cdot м $^{1/2}$ по формуле [3]

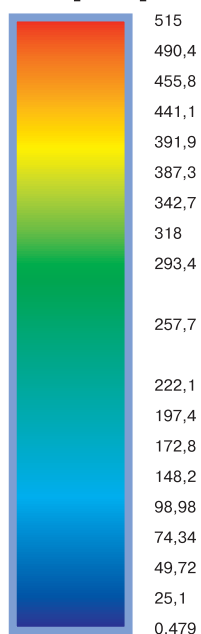
$$K_{\text{инт}} = \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot h}{Q}} \cdot F_i(\lambda), \quad (1)$$

где σ_{\max} – максимальное действующее напряжение, МПа;

h – глубина трещины, м;

λ – константа, зависящая от размеров и материала образца [3].

SVM [МПА]



а)

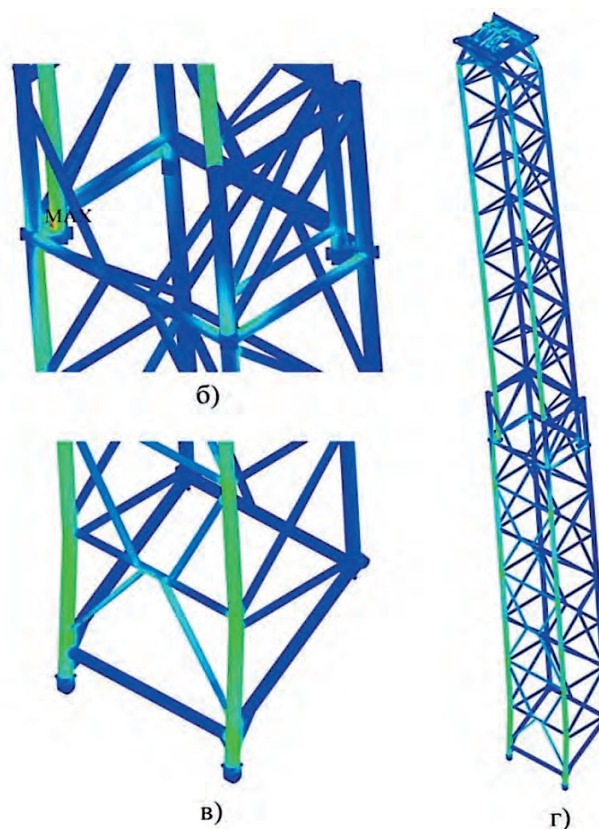


Рис. 6. Карта распределения напряжений по вышке подъемной установки
а) шкала напряжений; б) карта распределения напряжений в узле стыковки секций;
в) карта распределения напряжений в элементах нижней секции; г) карта распределения напряжений по телу вышечной конструкции

$$\lambda = \frac{[12 \cdot (1 - \nu^2)]^{1/4} \cdot a}{\sqrt{R \cdot t}}, \quad (2)$$

для нашего случая при $K_{ин} = 37$ МПа·м^{1/2} $\lambda = 0,442$ [3].

Q – квадратный корень из полного эллиптического интеграла второго рода, определяемый приближенной формулой [3].

$$Q = 1 + 1,464 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^{1,65}, \quad (3)$$

a – полудлина трещины, м;

F_i – корректировочный коэффициент, определяемый по таблице с учетом параметра λ ; при $\lambda = 0,442$ F_i = 1,0 [3];

t – толщина стенки оболочки, м;

R – внутренний радиус, м;

ν – коэффициент Пуассона.

Расчет ведут до тех пор, пока $K_{ин}$ не сравняется с параметром трещиностойкости материала – коэффициентом ударной вязкости K_{1С}. Этот момент является критическим, при котором начинается неконтролируемый катастрофический рост трещины с мгновенной скоростью и разрушение конструкции происходит за доли секунды.

Условие, при котором не возникнет катастрофического роста трещины

$$K_{1С} \geq K_{ин}, \quad (4)$$

где K_{1С} – коэффициент ударной вязкости материала; для стали 09Г2С K_{1С} = 24–37 МПа·м^{1/2} [3].

8. Для каждого из значений K_{1С} находят критическое значение длины трещины и напряжение, при которых $K_{ин} = K_{1С}$.

9. Определяют скорость роста сквозной поперечной трещины по формуле Пэриса [3]

$$V = A \cdot (\Delta K_{ин})^m, \quad (5)$$

где A – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала, для стали 09Г2С A = 4,82 · 10⁻¹⁴ м/(цикл·МПа·м^{1/2}) [4];

m – показатель степени, определяемый экспериментально;

$\Delta K_{ин}$ – средний размах коэффициента интенсивности напряжений [4].

$$\Delta K_{ин} = \frac{K_{i+1} - K_i}{k}, \quad (6)$$

где i – номер эксперимента по порядку,

k – общее количество экспериментов.

10. Далее определялись экспериментальные параметры роста трещины с применением метода акустической эмиссии. В совокупности с параметрами, полученными из моделирования, определена долговечность материалов вышечной конструкции с развивающимся дефектом по формуле [3]

$$\tau = \frac{2 \cdot K_{ин}^{2-n}}{A \cdot (m-2) \cdot \sigma^2 \cdot Y^2} = \frac{2 \cdot K_{ин}^2}{(m-2) \cdot \sigma^2 \cdot Y^2 \cdot V} \cdot (7)$$

Целью моделирования является оценка скорости роста дефекта заданного типа, оценка максимальной безопасной длины дефекта для дальнейшей оценки времени роста трещины до разрушения (времени жизни узла с растущим дефектом).

Задача решалась в несколько этапов. *Первый этап.* Спроектирована исходная модель вышечной конструкции подъемной установки, представленная ранее на рисунке 1.

Второй этап. С помощью программного комплекса для конечно-элементного анализа исходная модель получала осевую нагрузку 750 кН, приложенную к оси кронблока (рис. 4); далее разбивается сетка конечных элементов. Конечно-элементная сетка представлена выше на рисунке 5.

Третий этап. Произведен статический расчет вышки в автоматическом режиме. Для оценки результатов расчета рассматривается карта распределения напряжений по телу конструкции, представленная на рисунке 6.

Из рисунка 6 видно, что основная несущая нагрузка приходится на ноги, обращенные к скважине (передние ноги вышки), чего и следовало ожидать. Как оказалось, наиболее опасными зонами являются места сопряжения передних ног вышки с устройством соединения нижней и верхней секций. Обычно ожидают максимальную нагрузку на основания этих ног, однако нагружение модели показывает, что место сопряжения ног с замковым устройством является не менее опасным.

Четвертый этап. Далее для исследования динамики изменения прочностных характеристик материала

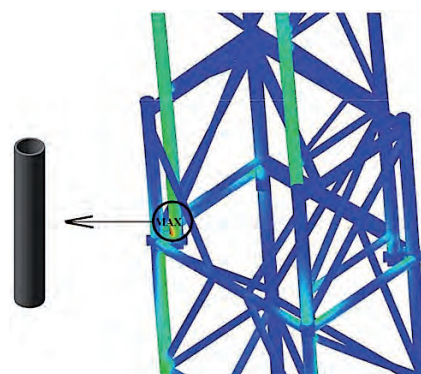


Рис. 7. Основная зона концентрации напряжений в модели вышечной конструкции

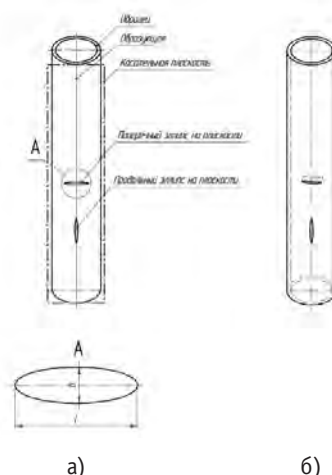


Рис. 8. Размеры модели эллиптической трещины а) эскиз эллипса на плоскости, касательной к образующей образца; б) результат операции вырезания

конструкции с ростом трещины выбран элемент вышки, как показано на рисунке 7.

Пятый этап. В выбранном трубном элементе D_н = 100 мм, d_{вн} = 86 мм смоделирована поперечная сквозная эллиптическая трещина, полученная путем вырезания эллипсом с диагоналями l = 40 мм и b = 1 мм, смоделированная на вспомогательной плоскости, касательной к образующей образца, как показано на рисунке 8. Произведен конечно-элементный анализ образца с приложением нагрузки P = 400 кН, которая определена как соизмеримая с предельной прочностью материала по текучести. По результатам анализа фиксировалось значение максимального напряжения и коэффициента запаса прочности. Затем по формуле (1) вычислялось значение коэффициента интенсивности напряжений K_{ин}. Далее моделировался рост длины трещины от l = 1 мм до критической длины с шагом 1±0,5 мм, для каждой длины фиксировалось значение

максимального напряжения, коэффициента интенсивности напряжений и коэффициента запаса прочности. Так как для стали 09Г2С значение коэффициента ударной вязкости (пороговое значение $K_{ин}$) лежит в диапазоне от 24 до 37 МПа·м^{1/2}, то результатом расчета определен интервал длин трещины при различном пороговом значении $K_{ин}$. Результаты расчетов сведены в таблицу. В таблице оранжевая зона соответствует стали с $K_{1C} = 24$ МПа·м^{1/2}, синяя – стали с $K_{1C} = 37$ МПа·м^{1/2}, зеленая – пороговому значению для коэффициента запаса прочности, т.е. значению, ниже которого нарушается условие прочности

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{max}} \geq 1.4, \quad (8)$$

где σ_B – предел прочности материала, МПа;

σ_{max} – максимальное действующее напряжение, МПа.

Из таблицы видно, что при любой критической длине трещины нарушается условие прочности (8). Поэтому для двух найденных критических длин трещины (6,4 и 8,9 мм) методом итерации найдены максимально допустимые нагрузки, при которых выполняется условие (8). Допустимые статические нагрузки составили для образцов с трещиной длиной 6,4 мм – 320 кН, длиной 8,9 мм – 270 кН.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

По результатам моделирования трещины шириной $b = 1$ мм для стали 09Г2С найдены зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины, максимального напряжения от длины трещины и коэффициента интенсивности напряжений от максимального напряжения. Выявленные зависимости представлены в виде графиков на рисунке 9.

На графических зависимостях зеленая зона соответствует безопасной

эксплуатации, желтая – процессу развития дефекта с нарушением условия прочности (8), красная – разрушению конструкции.

Результатом аппроксимации для рассматриваемых зависимостей являются полиномиальные кривые третьей степени, уравнения которых имеют вид:

$$K_{ин} = -0,005 \cdot l^3 + 0,3159 \cdot l^2 + 1,7169 \cdot l + 1,0819, \quad \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \quad (9)$$

$$\sigma = -0,3253 \cdot l^3 + 6,7052 \cdot l^2 - 0,4573 \cdot l + 227,62, \quad \text{МПа} \quad (10)$$

$$K_{ин} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^2 + 0,0934 \cdot \sigma - 19,45, \quad \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \quad (11)$$

При помощи компьютерного моделирования и конечно-элементного анализа также получены зависимости максимального напряжения σ_{max} от длины трещины l при различном коэффициенте K_{1C} в зоне развития трещины. Эта графическая зависи-

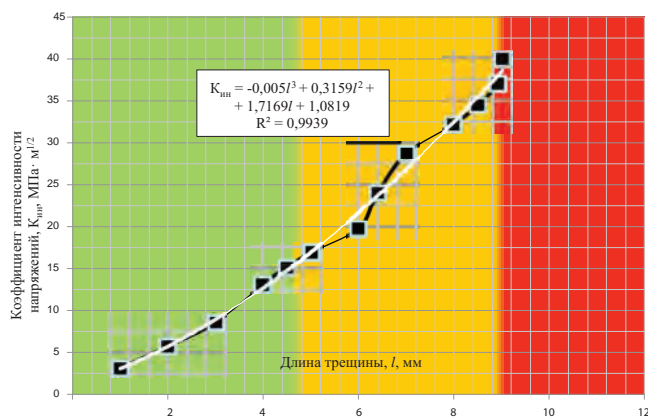


Рис. 9а. Графическая зависимость — а) зависимость σ_{max} – l

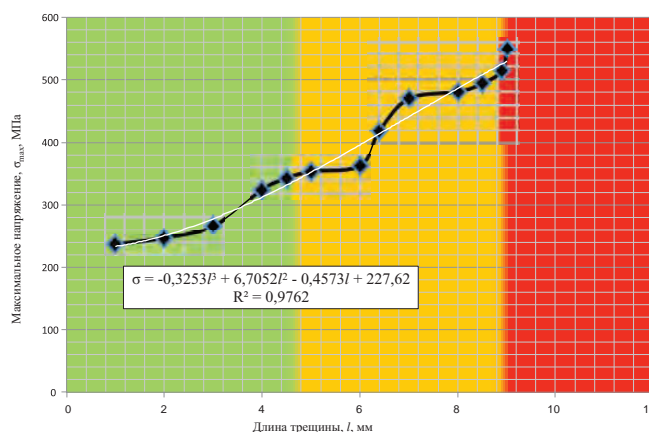


Рис. 9б. Графическая зависимость — б) зависимость $K_{ин}$ – l

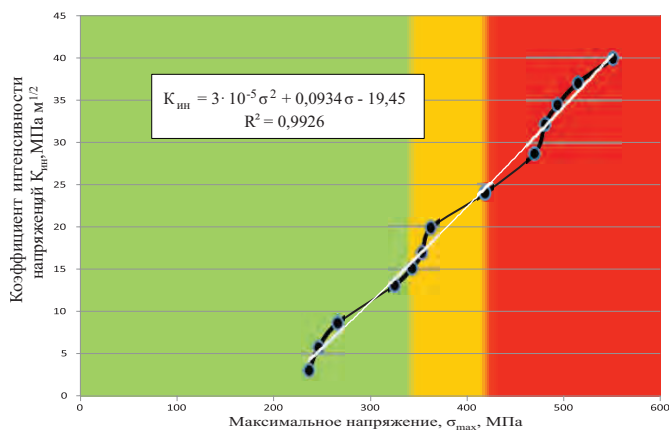


Рис. 9в. Графическая зависимость - в) зависимость $K_{ин}$ – σ_{max}

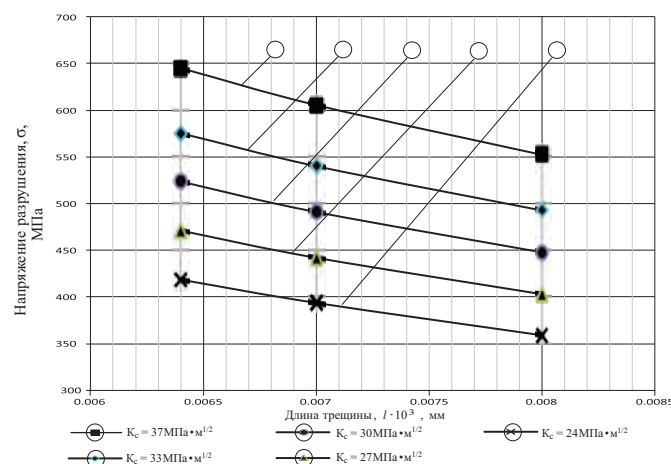


Рис. 10. Зависимость максимального разрушающего напряжения от длины трещины в зоне ее развития при различном значении K_{1C}

мость представлена на рисунке 10. Из этих графиков видно, что чем меньше параметр трещиностойкости материала K_{1C} , тем меньше необходимо приложить усилие, чтобы создать разрушающее напряжение. Аналогично и с длиной трещины: чем больше длина трещины, тем меньше усилие необходимо приложить, чтобы конструкция разрушилась. Таким образом, методика позволяет для каждого конкретного случая найти максимальное напряжение и рассчитать нагрузку разрушения для рассматриваемой конструкции в зависимости от коэффициента ударной вязкости материала и геометрии дефекта. По формуле (5) рассчитывалась скорость роста сквозной поперечной трещины в момент до начала разрушения, который еще относится к «вязкому» росту трещины. Экспериментальный показатель степени n определен опытным путем методом акустико-эмиссионного контроля нагруженной вышки, он составил 7,6. Средний размах коэффициента интенсивности $\Delta K_{ин}$ определится по формуле (6) с учетом полученных данных из таблицы.

$$\Delta K_{ин} = \frac{33,856}{12} = 2,821 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}.$$

Тогда по формуле (5) скорость роста трещины $V = 4,82 \cdot 10^{-14} \cdot (2,821)^{7,6} = 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$. Долговечность материалов вышки согласно формуле (7) составит

$$\tau = \frac{2 \cdot 37,009^2}{(7,6-2) \cdot 514,3^2 \cdot 0,7^2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-9}} = 33,6 \text{ сут.}$$

ВЫВОДЫ

1. Компьютерное моделирование позволяет наглядно выявлять зоны концентрации напряжений в вышечной конструкции и характерные параметры опасных зон (максимальное напряжение, характер распределения напряжений по телу конструкции, коэффициент запаса прочности в опасной зоне). В рассматриваемом примере испытательная нагрузка 1,25P, приложенная к кран-блоку вышки, обеспечивает минимальный коэффициент запаса прочности $K_{св} = 1,6$, что допустимо для эксплуатации конструкции.
2. По результатам моделирования трещины в трубном узле вышки найдены ее критические длины для стали 09Г2С с $K_{1C} = 24 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ и $37 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, которые составляют соответственно $l_{кр} = 6,4 \text{ мм}$ и $l_{кр} = 8,9 \text{ мм}$. При достижении трещиной критических размеров начнется катастрофическое неконтролируемое разрушение конструкции.
3. Вычисленная долговечность материалов вышки подъемной установки составила примерно 33,6 суток при нагружении до момента достижения трещиной длины 8,9 мм при ее ширине $b = 1 \text{ мм}$.
4. Получены зависимости параметра трещиностойкости материала $K_{ин}$ от максимального действующего напряжения σ_{max} в сечении образца и длины трещины l для стали 09Г2С.

Литература:

1. Неразрушающий контроль: Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. – Т. 7: В 2 кн. – Кн. 1: Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.
2. Сегерлинд Л.Ж. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. – Москва: МИР, 1979. – 389 с.
3. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2 т.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
4. Еремин К. И., Шаповалов Э.Л., Науменко В.Д. Влияние анизотропии проката на циклическую и статическую трещиностойкость сталей 09Г2С и ВСтЗсп // Сварочное производство. – 1992. – № 12. – С. 2–3.
5. Быков И.Ю., Смирнов А.Л. Исследование структуры металла методом акустической эмиссии при осевом сжатии элементов буровых мачт // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – № 8. – С. 8–14.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, дефект, разрушение, подъемный агрегат, вышка, сквозная трещина, компьютерное моделирование, трубный элемент, конечно-элементный анализ, коэффициент запаса, коэффициент интенсивности напряжений.

AKRUS® – НАДЕЖНЫЕ СТРАТЕГИИ ЗАЩИТЫ

Российский разработчик и производитель противокоррозионных защитных лакокрасочных материалов марки АКРУС®, специального и промышленного назначения.



МЫ ПРОИЗВОДИМ ТОЛЬКО ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Это позволяет нам концентрироваться на особенностях их изготовления и потребления.



ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Нефтехимическая индустрия
- Нефтегазодобывающая промышленность
- Судостроение
- Машиностроение
- Мостостроение
- Гражданское строительство



117420, г. Москва,
ул. Намёткина, д. 10Б
Тел./факс: +7(495) 363-56-69
info@akrus-akz.ru
www.akrus-akz.ru
www.akrus.pф