



NPO SODIS

# Безопасность. Мониторинг. Эксплуатация.

Разработка проектной  
и рабочей документации  
строительных объектов

Монтаж и пусконаладка  
систем жизнеобеспечения,  
безопасности и мониторинга  
строительных систем

Энергоаудит  
строительных объектов  
и разработка энергоэффективных  
технологий

Разработка и внедрение  
программного обеспечения

г. Москва, ул. Болотниковская, д.11, корпус 1  
Телефон: (+7 495) 545-48-40

[www.nposodis.ru](http://www.nposodis.ru)

# МЕХАНИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ.

## Расследование причин аварии здания Крытого конькобежного центра «Спортивный комплекс «Крылатское»»

**Андрей ШАХРАМАНЬЯН,**

кандидат технических наук,  
генеральный директор

ООО «Научно-производственное объединение»  
«Современные диагностические системы»  
(НПО «СОДИС»)

Адрес: 117556, г. Москва,  
ул. Болотниковская, д.11, корпус 1  
Тел.: (495)545-48-40,  
www.nposodis.ru,  
andranic@nposodis.ru

**Алексей ШАДСКИЙ,**

ведущий специалист,

ООО «Научно-производственное объединение»  
«Современные диагностические системы»  
(НПО «СОДИС»)

Адрес: 117556, г. Москва,  
ул. Болотниковская, д.11, корпус 1  
Тел.: (495)545-48-40,  
www.nposodis.ru,  
andranic@nposodis.ru

**Аннотация:** В данной статье рассмотрены вопросы обеспечения конструктивной безопасности уникальных объектов на основе анализа аварии на уникальном спортивном сооружении Крытый конькобежный центр «Спортивный комплекс «Крылатское» (далее ККЦ) по адресу: Москва, ул. Крылатская, д. 16.

**Ключевые слова:** строительные объекты, безопасность несущих конструкций, инженерные расчеты, техническое состояние объекта.

**Annotation:** In given article questions of maintenance of constructive safety of unique objects on the basis of the failure analysis on a unique sports construction the Covered skating center «the Sports complex "Krylatsky"» (further ККЦ) to the address are considered: Moscow, street Krylatsky, d. 16.

**Keywords:** building objects, safety of bearing designs, engineering calculations, a technical condition of object.

Наша страна выбрана местом проведения олимпийских игр Сочи-2014, Чемпионата мира по футболу-2018, Универсиады-2013. В настоящее время осуществляется подготовка к

данному мероприятию, проектируются и строятся новые спортивные объекты, которые, как правило, являются уникальными зданиями и к которым уже предъявляются специальные требования в

части обеспечения их безопасности и мониторинга.

Несущие элементы покрытия ККЦ выполнены в виде радиальных деревометаллических ферм, опирающихся на центральную мо-



Рис.1 Крытый конькобежный центр «Спортивный комплекс «Крылатское»»

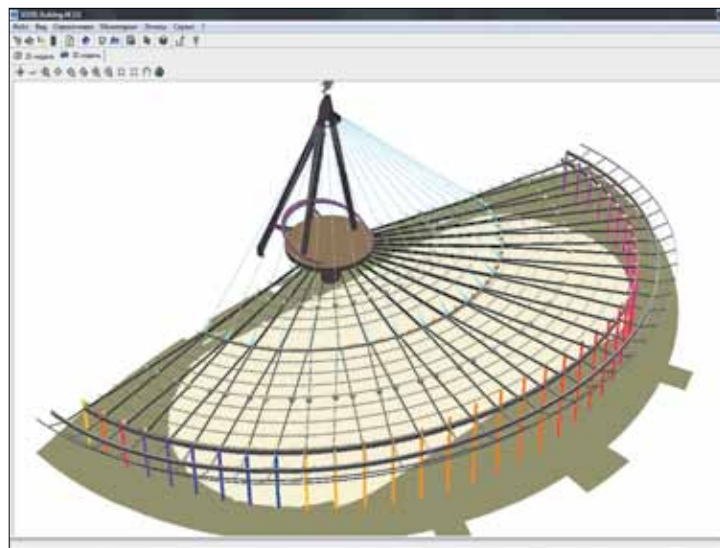


Рис.2 Трехмерная модель ККЦ



Рис. 3 Вид излома



Рис. 4 Вид излома (крупный масштаб)



Рис. 5 Вид излома (фронт круговой трещины)

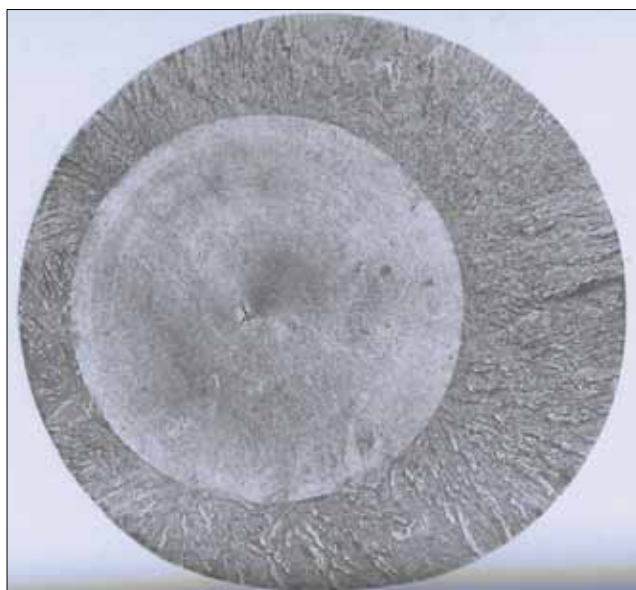


Рис. 6 Разрушение стержня поршня ковочного молота (Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник. / Под ред. Дж. Феллоуза. / Пер. с англ. под ред. Л.М. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1982.)

нолитную железобетонную опору с одной стороны и на монолитные железобетонные колонны по скользящим опорам. Покрытие состоит из двух пролетов таких ферм с опорой в центре на стальную полукольцевую балку, подвешенную к 19 стальным вантам. Система вант оттягивается двумя цепными оттяжками через Л-образную стальную опору, которая в свою очередь шарнирно опирается на центральную монолитную железобетонную опору.

Основные несущие элементы ККЦ представлены на фотографии (Рис.1) и на трехмерной модели. (Рис 2).

22 ноября 2007 года в 11 часов 30 минут на ККЦ произошло разрушение конструкции (стальной оси цепной оттяжки), повлекшее создание предаварийной ситуации, эвакуацию людей, остановку эксплуатации ККЦ и дальнейшее рас-

следование причин разрушения.

В рамках работы технической комиссии Ростехнадзора по расследованию причин нарушения законодательства о градостроительной деятельности на ККЦ по поручению Ростехнадзора была проведена независимая экспертиза работ по мониторингу ККЦ, в рамках которой был проведен ретроспективный анализ сценария развития дефектов и возникновения предаварийной ситуации с использованием средств математического моделирования.

Научные результаты данной экспертизы публикуются с согласия Заказчика работ – Ростехнадзора (Письмо ФГУ «ЦЛАТИ по ЦФО» исх. 278 от 25.06.2011). В статье используется материал «Экспертного заключения НПО СОДИС (2008 г.), подготовленного авторским коллективом: Е.М. Морозов,

А.М. Шахраманьян, А.С. Шадский, А.А. Богач, А.И. Уваров, С.И. Сухонос.

На основании изучения доступных материалов и на основании фотографий поверхности излома оси цепной оттяжки был сделан вывод о хрупком характере разрушения, которое могло быть комбинацией различных факторов:

#### **А. Наличие начального дефекта большого размера**

В центральной части оси, на изломе, наблюдались дефекты: флокены, рыхлость и начальная трещина, длина которой в радиальном направлении составляет десятую часть диаметра оси, т.е. более 50 мм (Рис 3).

#### **Б. Наличие остаточных напряжений**

Одной из возможных причин хрупкого разрушения может являть-

ся недостаточное содержание никеля в центральной области оси, что охрупчивает металл, в связи с возможной недостаточной закалкой, а также недостаточным отпуском центральной части оси из-за ее большого диаметра. Недоотпуск приводит к сохранению остаточных закалочных напряжений, распре-

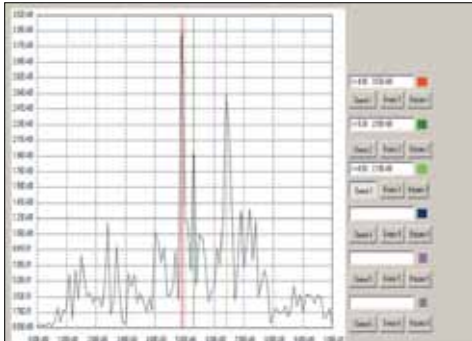


Рис. 7 ККЦ, ф.105, спектр по ускорениям (Z)

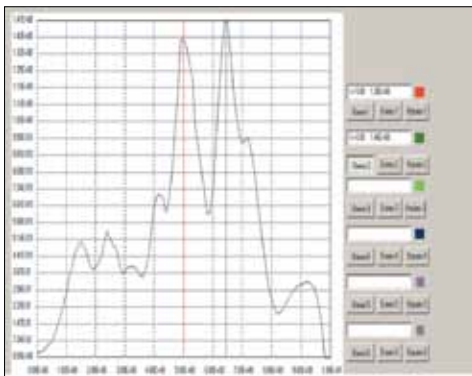


Рис. 8 ККЦ, ф.105, спектр по ускорениям (Z), со сглаживанием

деленных следующим образом: в центральных частях оси – растяжение, на периферии – сжатие. О наличии остаточных напряжений также свидетельствует отлет обломка на расстояние 8 м после разрушения оси.

### В. циклический характер нагрузок

Характер нагрузки является динамическим. Нагрузка изменяется случайным образом и имеет циклы: сезонные, суточные, ветровые и прочие.

Усталостное развитие трещины под воздействием циклической нагрузки также является одним из возможных факторов разрушения оси. Усталостный характер разрушения также подтверждается усталостными бороздками на поверхности излома. На фотографии излома виден фронт круговой трещины, диаметр которой растет с ростом числа циклов нагружения (Рис. 5).

### Г. Масштабный фактор

Учитывая большие размеры дефектной оси (диаметр оси составляет примерно 530 мм, а ее длина – около 1 метра), необходимо также учитывать явление масштабного фактора как одну из возможных причин разрушения оси цепной оттяжки (известно, что стержень большого размера разрушится при меньшей нагрузке, чем стержень равного эквивалентного сечения, состоящий из нескольких тонких; в СП 16.13330.2011 также показано, что расчетное сопротивление сталей уменьшается с ростом толщины проката).

На основании приведенных возможных факторов разрушения можно сделать вывод, что в охрупченной, структурно неравновесной (недоотпущенной) и растянутой остаточными напряжениями сердцевине оси спустя несколько лет после начала эксплуатации ККЦ под воздействием циклических нагрузок произошло замедленное усталостное хрупкое разрушение.

Косвенным подтверждением этого может служить сопоставление фотографии излома оси с фотографией излома похожей детали, для которой история нагружения известна. Картина излома оси (Рис. 3) хорошо совпадает с картиной излома стержня поршня ковочной машины (Рис. 6). Сталь стержня поршня (26ХНГ) также похожа на сталь оси [4, стр. 430]. Диаметр стержня ковочной машины составляет 203 мм. Разрушение стержня произошло от усталости при растяжении, трещина образовалась от дефекта в центре стержня. Под воздействием циклических нагрузок трещина, симметрично развиваясь, выросла до критических размеров, и стержень разрушился. При этом по краям сечения стержня можно наблюдать кольцевую рельефную поверхность, являющуюся статическим доломом (оставшееся сечение уже не смогло выдержать приложенную нагрузку), а в середине сечения видно трещину усталости, представляющей собой гладкую круговую область. Представленные материалы показывают, что оба излома (ось цепной оттяжки ККЦ и стержень поршня) совпадают, что подтверждает версию о росте трещины усталости.

За 2,5 года до произошедшей аварии 10 марта 2005 года группой

проф. Г.Э. Шаблинского (МГСУ) была замерена запись ускорений на полукольцевой балке (вертикальные колебания) при большой снеговой нагрузке на крыше здания. – см. Рис 7 и Рис 8.

На основе анализа записи сделан вывод о том, что эффективная частота случайных нагрузок составляет 5 Гц.

Для моделирования роста трещины усталости от действия циклической нагрузки на цепную оттяжку использовались методы механики разрушения, было принято, что скорость роста трещины следует модифицированному закону Париса:

$$\frac{dl}{dN} = 10^{-8} \left( \frac{\Delta K}{\Delta K^*} \right)^n \quad \text{м/цикл. (1)}$$

В этой формуле  $l$  – длина трещины. Трещина принимается в форме диска (круга радиусом  $l$ ) с центром на оси симметрии.  $N$  – число циклов нагружения, пропорциональное частоте переменного нагружения  $f$ , получаемой из спектра нагрузки ( $f$  принята равной 5 Гц).

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = K_{\max} (1 - R)$  – размах коэффициента интенсивности напряжений

$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  – коэффициент асимметрии цикла,  
 $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  – размах приложенных напряжений цикла,  $\Delta K = \Delta K(\Delta \sigma, l)$

Коэффициент интенсивности напряжений  $K = K(\sigma, l)$

вычисляется методом аппроксимации перемещений берегов трещины, с помощью конечно-элементного программного комплекса.

Величины  $n, \Delta K^*$  – экспериментально определяемые характеристики трещиностойкости материала. Этих характеристик для стали 38ХНЗМА не удалось обнаружить в общедоступных источниках. В справочнике [3] есть похожая (по химсоставу и по обычным мехсвойствам) сталь 35ХНЗМФА, для которой пороговый коэффициент интенсивности напряжений  $\Delta K_{th} = 5 \text{ MPa}\sqrt{\text{м}}$  параметр  $\Delta K^* = 33 \text{ MPa}\sqrt{\text{м}}$ , показатель степени  $n=3,3$ , вязкость разрушения  $K_{IC} = 120 \text{ MPa}\sqrt{\text{м}}$ .

Поскольку эти характеристики ориентировочные, то в расчете принята следующая величина:

$$\Delta K^* = 24,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{м}}$$

Эта величина находится в согласии с прикидочной формулой:

$$\Delta K^* = \sqrt{\Delta K_{th} \Delta K_{IC}} = \sqrt{5 \cdot 120} = 24,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{м}}.$$

Кроме того, для компенсации незнания достоверных характеристик показатель степени  $n$  в одном варианте расчета принят равным  $n = 3$  (более хрупкое состояние металла), а в другом варианте  $n = 4$  (более вязкое состояние металла). Это позволяет получить расчетную полосу разброса результатов расчета.

Для расчета числа циклов до разрушения уравнение (1) следует проинтегрировать по длине трещины в пределах от начальной (длина трещины – это радиус круговой трещины) до критической. Критическая длина трещины в момент полного разрушения определяется условием достижения коэффициентом интенсивности напряжений вязкости разрушения, т.е. критический радиус трещины находится из уравнения

$$K_{max} = K_{IC} \quad \text{или} \quad K(\sigma_{max}, l_c) = K_{Ic} \quad (2)$$

Начальный радиус трещины на основании анализа излома принят равным 79 мм. Расчет выполнен вплоть до радиуса трещины 185 мм.

Интегрирование по числу циклов начинается с нуля (поскольку начальная трещина уже есть) до искомого числа циклов, потребных для полного разрушения (при этом начальная трещина вырастает до критической, при которой происходит полное разрушение). Расчетное уравнение выглядит так:

$$\frac{(\Delta K^*)^n}{10^{-7}} \int_{l_0}^{l_c} \frac{dl}{\Delta K^n} = \int_0^{N_c} dN \quad (3)$$

В результате численного моделирования получены величины коэффициентов интенсивности напряжений для разных длин трещины в диапазоне от 79 до 185 мм, зависимость величины скорости роста трещины в м/цикл и в мм/год от длины трещины и зависимость длины трещины от времени как результат численного интегрирования уравнения (3).

Геометрические и конечно-элементные модели с начальной и конечной трещинами приведены на Рис. 9 – Рис.11.

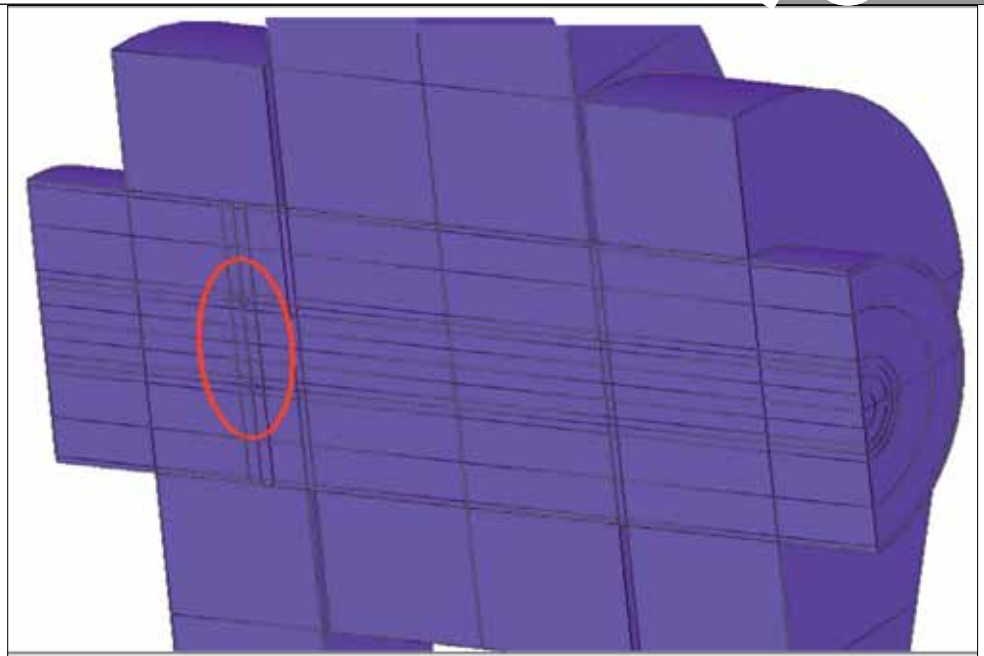


Рис. 9 Геометрическая модель оси цепной оттяжки (пальца) с трещиной начального размера (диаметр трещины составляет 0,3 от диаметра оси; на рис. трещина обведена красным).

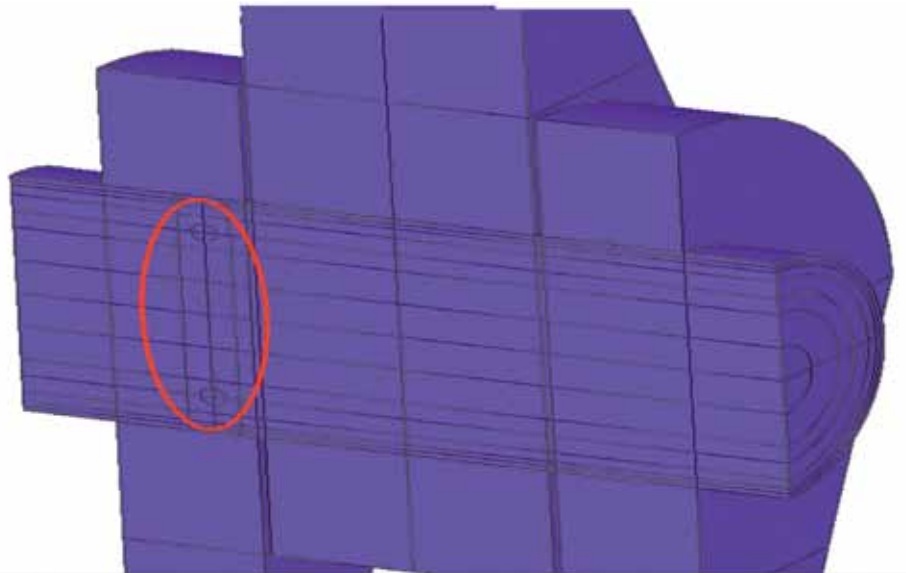


Рис. 10 Геометрическая модель оси цепной оттяжки (пальца) с трещиной конечного размера (диаметр трещины составляет 0,7 от диаметра оси; на рис. трещина обведена красным).

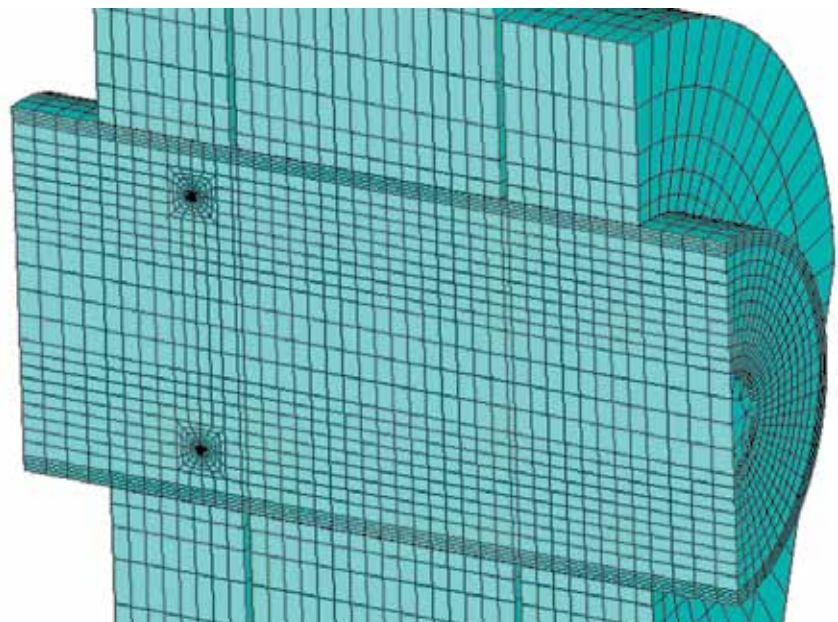


Рис. 11 Конечно-элементная модель с трещиной конечного размера

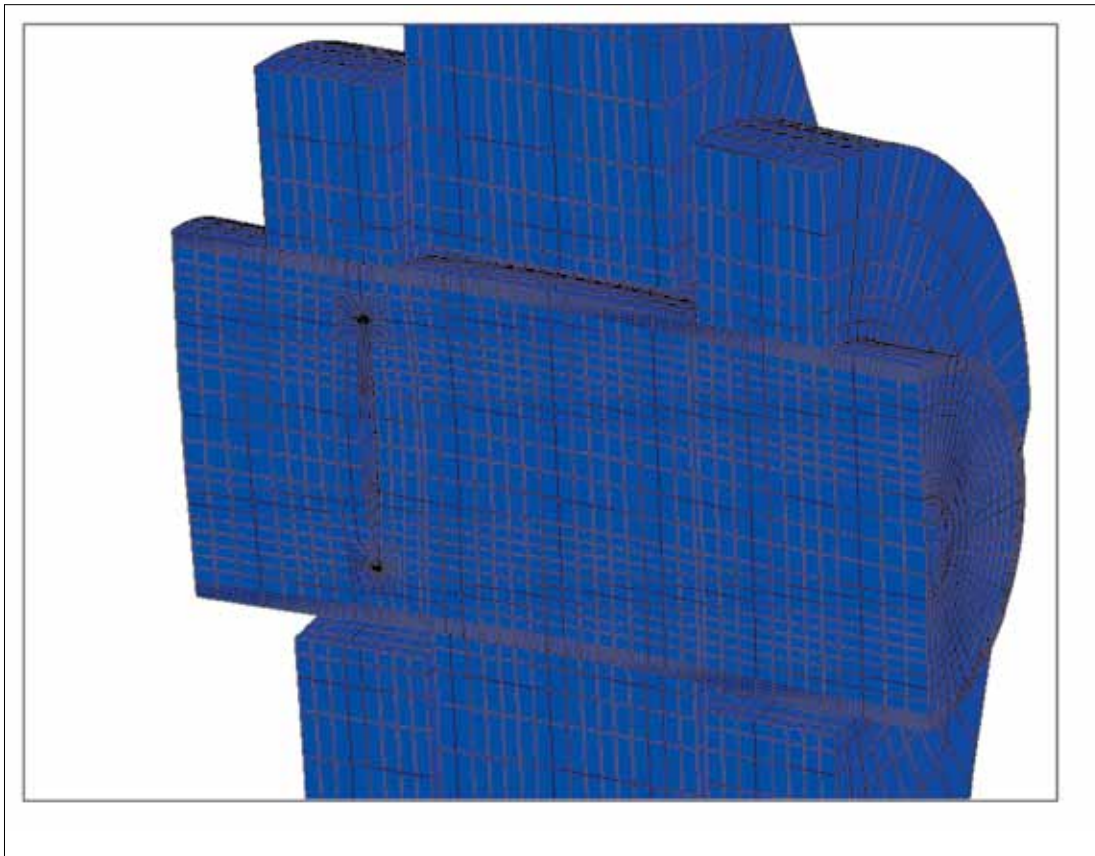


Рис. 12 Раскрытие трещины при максимальной нагрузке (масштаб для наглядности преувеличен)

Результаты численного моделирования приведены на Рис. 12. В условиях отсутствия до-

стоверной информации о характеристиках трещиностойкости материала, характере из-

менения нагрузок и др. были проведены расч - ты с различными исходными значениями этих параметров. Как показали результаты расч тов, срок службы оси цепной оттяжки в зависимости от разброса исходных данных находится в диапазоне от 2 до 20 лет.

Как видно из Рис. 12 и Рис. 14, время роста трещины от начального размера до критического составляет около 3,5 лет, что приблизительно соответствует реальному сроку службы оси цепной оттяжки от начала эксплуатации до момента разрушения, и находится в диапазоне возможных значений (от 2 до 20 лет). Скорость роста трещины в начальный период составляла около 9,5 мм

в год, далее скорость роста трещины непрерывно возрастала и к моменту хрупкого разрушения

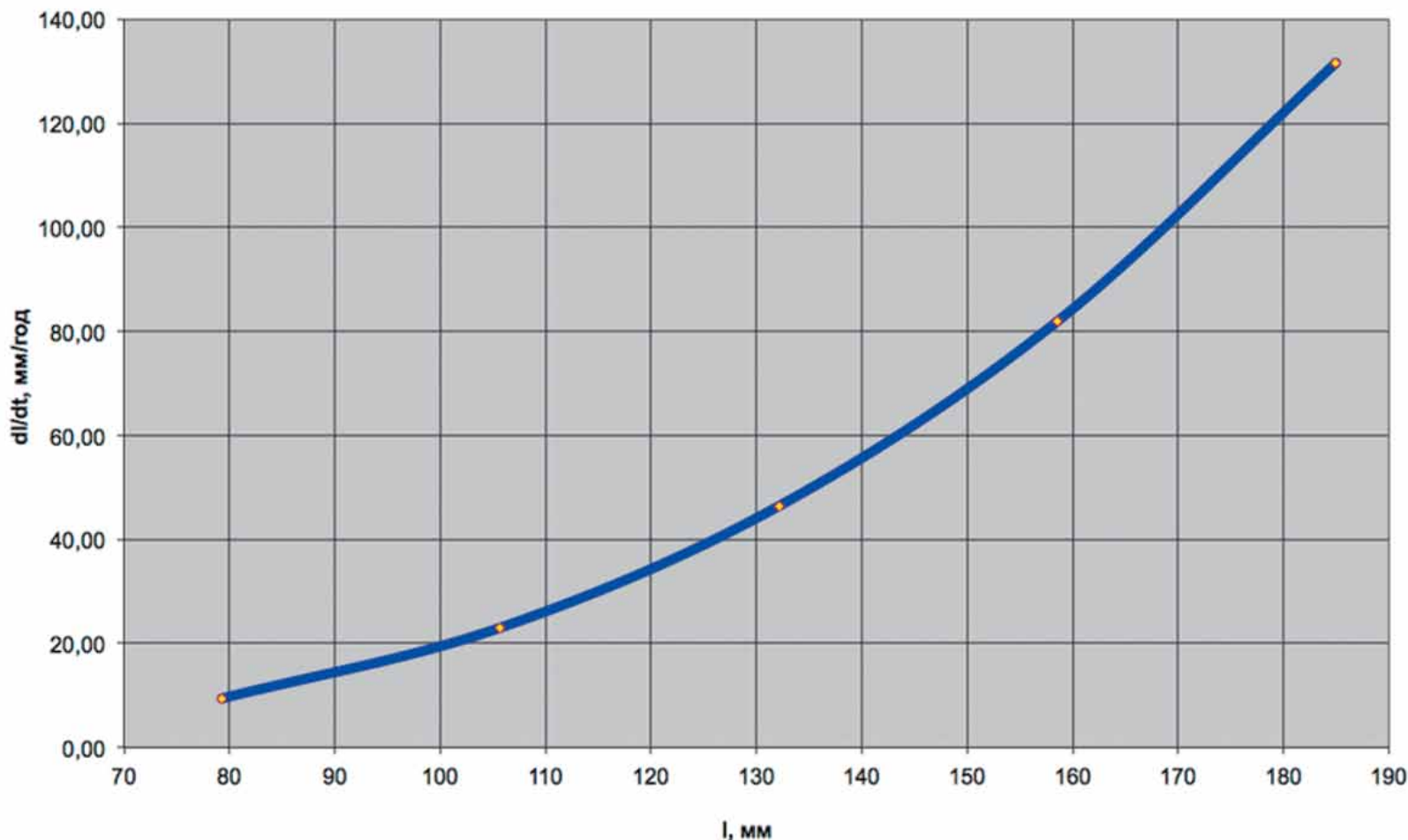


Рис. 13 Зависимости скорости роста трещины от ее длины

составила около 130 мм в год.

Таким образом, как следует из результатов математического моделирования, внутренний дефект (макротрещина) развивался в течение длительного времени с относительно небольшим градиентом скорости роста в первой половине реального срока службы. Следовательно, существует практическая возможность выполнения мониторинга технического состояния подобных объектов в режиме реального времени при условии наличия сертифицированных методик диагностики дефектов подобного рода. После проведения восстановительных работ на ККЦ была установлена автоматизированная система мониторинга технического состояния несущих конструкций, которая, в частности, была снабжена датчиками акустической эмиссии, установленными на металлических пальцах для отслеживания в них развития дефектов подобного рода.

В настоящее время принятая нормативно-правовая база

предусматривает создание автоматизированных систем мониторинга несущих конструкций на уникальных объектах. В частности, системы мониторинга необходимо предусматривать на уникальных объектах в соответствии ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» (введен в действие с 01.01.2011), который

включен в утвержденный распоряжением Правительства РФ от 21 июня 2010 г. 1047-р. перечень национальных стандартов и сводов правил, в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

#### Литература:

1. ГОСТ Р 53778-2010. «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».
2. ГОСТ 8479-70. «Поковки из конструкционной углеродистой и легированной стали. Общие технические условия».
3. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие в 4-х т. / Под общей ред. Панасюка В.В. – Киев: Наук. думка, 1988–1990. / Т. 4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов/ Романив О.Н., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др. – 1990 – 680 с.
4. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник. / Под ред. Дж. Феллоуза. / Пер. с англ. под ред. Л.М. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1982.

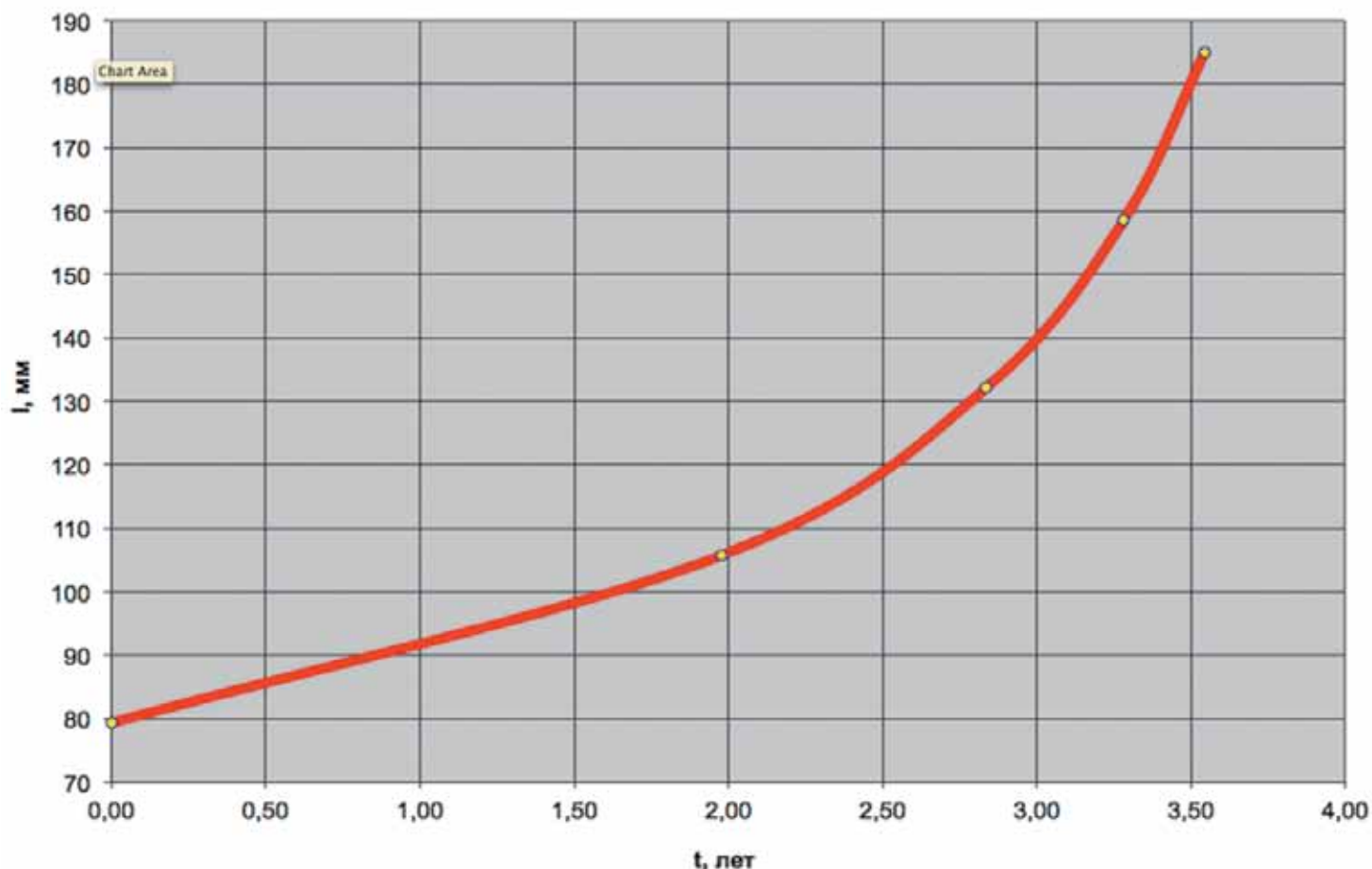


Рис. 14 Зависимость длины трещины от времени