

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ С ТРЕЩИНОПОДОБНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

Шульга Степан Николаевич

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

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

ГОСТ 27751-88. Надежность строительных конструкций и оснований

Нормальная эксплуатация – эксплуатация, осуществляемая (без ограничений) в соответствии с предусмотренными в нормах или заданиях на проектирование технологическими или бытовыми условиями.

Надежность строительного объекта – свойство строительного объекта выполнять заданные функции в течение требуемого промежутка времени.

Нагрузочный эффект – усилия, напряжения, деформация, раскрытия трещин, вызванные силовыми воздействиями.

Эксплуатация здания или сооружения – использование здания или сооружения по функциональному назначению с проведением необходимых мероприятий по сохранению состояния конструкций, при котором они способны выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

Предельные состояния – состояния, при которых конструкция, основание (здание или сооружение в целом) перестают удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям при производстве работ (возведении).

ГОСТ Р 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований

Долговечность – способность строительного объекта сохранять физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы при надлежащем техническом обслуживании.

Надежность строительного объекта – способности строительного объекта выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации.

Расчетный срок службы – установленный в строительных нормах или в задании на проектирование период использования строительного объекта по назначению до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием. Расчетный срок службы отсчитывается от начала эксплуатации объекта или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта или реконструкции.

Строительная конструкция – часть здания или сооружения, выполняющая определенные несущие, ограждающие или эстетические функции.

Техническое обслуживание и текущий ремонт – комплекс мероприятий, осуществляемых в период расчетного срока службы строительного объекта, обеспечивающих его нормальную эксплуатацию.

Эксплуатация несущих конструкций объекта – комплекс мероприятий по поддержанию необходимой степени надежности конструкций в течение расчетного срока службы объекта в соответствии с требованиями нормативных и проектных документов.

Прогрессирующее (лавинообразное) обрушение – последовательное (цепное) разрушение несущих строительных конструкций, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей вследствие начального локального повреждения.

ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Живучесть – свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять заданное назначение в процессе неблагоприятных воздействий на весь объект или отдельные его компоненты, поддерживая в допустимых пределах свои эксплуатационные показатели.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость исследования живучести такой масштабной и многофункциональной системы, как подкраново-подстропильная ферма (далее ППФ), продиктована рядом проблем:

Во-первых, возрастание масштабов и стоимости систем приводит к значительному росту ущербов от длительного отключения даже части системы, увеличению доли технологически связанных нарушений работоспособности, а следовательно, масштабов «поражения» системы.

Во-вторых, в больших системах возрастают сложность и трудоемкость восстановительных операций. Поэтому стремление к уменьшению размеров «поражения» системы одновременно является стремлением к созданию более благоприятных условий для восстановления требуемого уровня функционирования.

Кроме того, существует проблема быстрого и оптимального включения сохранившихся в системе ресурсов в интересах выполнения жизненно важных функций системы после сильного на нее воздействия.

Решение этих проблем требует от системы новых качеств, которыми она может и не располагать, если спроектирована для работы только в нормальных условиях эксплуатации.

Решение этой задачи заключается в определении математических и физических моделей сложных технологических рабочих и аварийных процессов ППФ для анализа условий перехода от штатных состояний к условиям возникновения и развития аварий.

Такие модели характеризуются многоуровневой структурой, затрагивающей глобальные, локальные и объектовые аспекты безопасности. Результатом построения моделей является построение «дерева неисправностей». Анализ дерева неисправностей является одним из методов идентификации опасностей и оценки риска.

Количественные характеристики моделей аварийных процессов и их развитие по определённым сценариям осуществляются на базе фундаментальных закономерностей физики, химии и механики катастроф, алгебры логики. При этом стадии возникновения и развития аварийных ситуаций характеризуются различными сочетаниями физических, химических и механических поражающих и повреждающих факторов.

Теория, техника и технология предупреждения аварий ППФ и несущих конструкций покрытия производственных зданий включают в себя анализ новых предельных состояний при наиболее сложных сценариях развития аварийных ситуаций с учётом первичных и вторичных факторов повреждений в основном металле, металле сварных швов, в болтовых соединениях, развитие методов и создание систем оперативной диагностики аварийных ситуаций и поврежденных состояний в случае возникновения техногенных аварий.

Механика катастроф и нелинейная механика деформирования принимались в качестве научной основы для:

- анализа источников возникновения и сценариев развития аварийных ситуаций;
- разработки рекомендаций для проектирования ППФ по критериям живучести;
- принятия решений о допустимости реализации проектов, возможной эксплуатации и продлении ресурса безопасной эксплуатации.

Расчётное обоснование безопасности несущих конструкций ППФ выполняется поэтапно, с учётом:

- прочности, жёсткости и устойчивости (применение методов сопротивления материалов);
- выносливости, долговечности (применение методов теории много- и малоциклового усталости);
- динамической прочности и ресурса (с применением методов динамики деформирования и разрушения);
- трещиностойкости и живучести (с применением методов линейной и нелинейной механики разрушения).

1. ЦЕЛЬ МЕТОДИКИ

Прикладной задачей исследования живучести является определение возможности каскадного разрушения конструкции и разработки мероприятий по обеспечению комплексной безопасности ППФ по критериям прочности, ресурса, безопасности с использованием приемлемых и управляемых рисков на стадии проектирования, эксплуатации и при реализации восстановительных работ в условиях непрерывного производственного процесса.

2. МЕТОДИКА ОБСЛЕДОВАНИЯ ППФ С НЕРАЗРЕЗНЫМ НИЖНИМ ПОЯСОМ

Комплексное обследование промышленного здания в настоящее время регламентируется действующим ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга зданий и сооружений». Учитывая особенность конструкций ППФ с неразрезным нижним поясом, имеется специфика их обследования:

- значительная протяжённость сварных швов этих конструкций (длина только одной ППФ с неразрезным коробчатым нижним поясом может быть более 200 м);
- наличие фрикционных соединений на высокопрочных болтах;
- наличие в пролёте источников повышенного тепловыделения;
- обследование выполняется в условиях действующего производственного процесса;
- наличие работающих мостовых кранов грузоподъёмностью до 500 т.

Комплексное обследование ППФ включает:

- измерение необходимых для выполнения целей обследования геометрических параметров конструкций, их элементов и узлов;
- инженерно-геологические изыскания;
- инструментальное определение параметров дефектов и повреждений;
- определение фактических характеристик материалов основных несущих конструкций и их элементов;
- измерение параметров эксплуатационной среды, присущей технологическому процессу в здании и сооружении;
- определение реальных эксплуатационных нагрузок и воздействий, воспринимаемых обследуемыми конструкциями с учетом влияния деформаций грунтов основания;
- определение реальной расчетной схемы здания или сооружения и его отдельных конструкций;

- определение расчетных усилий в несущих конструкциях, воспринимающих эксплуатационные нагрузки;
- поверочный расчет несущей способности конструкций по результатам обследования;
- анализ причин появления дефектов и повреждений в конструкциях;
- составление итогового документа (заключения) с выводами по результатам обследования.

2.1. Обследование сварных швов ППФ

Сварные швы ввиду значительной их длины в конструкции ППФ обследуются в несколько этапов.

На первом этапе выполняется визуально-измерительный контроль.

Визуально-измерительный контроль (ВИК) - это один из методов неразрушающего контроля оптического вида. Он основан на получении первичной информации о контролируемом объекте при визуальном наблюдении или с помощью оптических приборов и средств измерений. Это органолептический контроль, т.е. воспринимаемый органами чувств (органами зрения). ГОСТ 23479-79 «Контроль неразрушающий. Методы оптического вида» устанавливает требования к методам контроля оптического вида.

Визуальный метод контроля позволяет обнаруживать несплошности, отклонения размера и формы от заданных более 0,1 мм при использовании приборов с увеличением до $\times 10$.

Визуальный контроль, как правило, производится невооруженным глазом или с использованием увеличительных луп до $\times 7$. В сомнительных случаях и при техническом диагностировании допускается применение луп с увеличением до $\times 20$.

Перед проведением визуального контроля поверхность в зоне контроля должна быть очищена от ржавчины, окалины, грязи, краски, масла, брызг металла и других загрязнений, препятствующих осмотру.

При визуально-измерительном контроле сварных швов зоной контроля являются сварной шов и прилегающие к нему участки основного металла на ширине не менее 200 мм в каждую сторону от шва с двух поверхностей, если обе они доступны для осмотра.

На втором этапе выполняется детализированное изучение выявленных дефектов с уточнением их параметров: определены их границы, ширина раскрытия, глубины.

Для решения этих задач наиболее эффективным методом для замера границ трещиноподобных дефектов оказался капиллярный.

2.2. Обследование соединений на высокопрочных болтах

Обследование фрикционных соединений выполняется согласно руководству [1]. Особенностью фрикционных соединений на высокопрочных болтах является то, что усилия воспринимаются не срезом болтов и смятием стенки, а силами трения, возникающими между соприкасающимися поверхностями, стянутыми высокопрочным болтом. В связи с этим величина натяжения высокопрочных болтов и качество подготовки фрикционных поверхностей соединяемых элементов являются решающими и контролируются во время проверки. Недостаточное натяжение высокопрочных болтов во фрикционных соединениях может привести к «проскальзыванию» элементов, при этом болты будут работать на срез, элементы – на смятие. Кроме того, возможно нарушение геометрической формы за счет взаимного смещения элементов – болты будут вступать в работу неравномерно, так как разница диаметров отверстий и болтов может достигать 6 мм и возможны случаи поочередного разрушения болтов.

Контроль за состоянием высокопрочных болтов и соединяемых элементов производится визуально и заключается в проверке наличия болтов в узлах, а также в выборочной проверке их натяжения и сохранности (отсутствие трещин, порывов) соединяемых элементов. Проверяются болты в каждом десятом узле (10% узлов). При последующих проверках проверяются не проверенные ранее узлы.

В процессе инструментальной проверки контролируется натяжение болтов (табл.1). Контроль натяжения болтов осуществляется по моменту закручивания динамометрическими ключами. В дополнение к этому контролируются зазоры между элементами фрикционных соединений. Проверка зазоров осуществляется набором щупов.

Таблица 1

Таблица контроля натяжения болтов

Временное сопротивление, МПа (кгс/см ²)	Диаметр болтов, мм	Усиление натяжения болтов, кН (тс)	Момент закручивания, Нм (кгс·м)	
			K=0,18	K=0,12
1100 (110)	16	121 (12,1)	349 (35)	232 (23)
	20	188 (18,8)	677 (68)	451 (45)
	22	233 (23,3)	922 (92)	615 (62)
	24	271 (27,1)	1170 (117)	780 (78)
	27	353 (35,3)	1714 (171)	1144 (114)

В случае выявления дефектов аварийного характера, когда в соединении ослаблено более 10% болтов, отсутствуют более 10% болтов, а также обнаружения трещин или порывов в соединяемых конструкциях немедленно должны быть приняты меры по их устранению.

2.3. Тепловизионный контроль

Для исследования тепловых воздействий на ППФ целесообразно выполнять тепловизионный контроль. Тепловизионное обследование ППФ выполняется в соответствии с ГОСТ Р 54852-2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций».

Метод основан на дистанционном измерении тепловизором полей температур контролируемых поверхностей. Перепады температур возникают при наличии источников тепловыделения технологического оборудования, а также в результате неравномерного распределения температуры конструкций внутри самого здания в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Измерения выполняются как в зимнее время года (выявляется максимальный перепад температур), так и в летнее (определяется максимальный нагрев конструкции от температуры наружного воздуха и технологического оборудования).

2.4. Исследование напряжённо-деформированного состояния

Для контроля напряжённо-деформированного состояния допускается использование нескольких методов:

- метод тензометрии;
- рентгенографический метод;
- магнитные методы;
- резистивный электроконтактный метод НК;
- акустические методы.

Метод тензометрии получил широкое распространение в практике исследования НДС металлоконструкций. Метод тензометрии, являющийся основным в экспериментальном определении напряжений при испытаниях, заключается в измерении при помощи специальных точных приборов, называемых тензометрами, деформаций в какой-либо точке (зоне) элемента конструкции и нахождении по величине этих деформаций, используя зависимость Гука, величин напряжений. Деформации, измеряемые на отрезке, длина которого до деформации называется базой S , при работе в упругой стадии характеризуются малыми величинами.

Тензомерами измеряют абсолютное удлинение (укорочение) ΔS , и по ним определяют среднюю относительную деформацию. Для того чтобы средняя относительная деформация точнее отражала истинную, база S должна быть по возможности короткой.

При линейном напряженном состоянии для определения напряжения достаточно измерить ΔS на базе, расположенной вдоль элемента.

По полученной в результате измерений относительного удлинения ε и известному модулю упругости E вычисляют величину $\sigma = \varepsilon E$.

В случае плоского напряженного состояния в данной точке измеряют деформации в двух или трех направлениях. Когда известны направления главных напряжений σ_1 и σ_2 , достаточно провести измерения на базах, расположенных вдоль σ_1 и σ_2 . Определив главные деформации ε_1 и ε_2 , вычисляют величины главных напряжений по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1).\end{aligned}\tag{1}$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Когда направления главных напряжений неизвестны, необходимо получить данные о деформациях в трех направлениях. Обычно одно из направлений выбирают произвольно, а два других – под углами 45° и 90° или 60° и 120° к нему.

В настоящее время тензометрирование проводят в основном с помощью струнных и электротензометров.

Принцип работы струнных тензометров основан на зависимости собственной частоты колебания струны от степени ее натяжения. Струнные тензометры обеспечивают точность измерений, сравнимую с точностью тензорезисторных преобразователей, но имеют относительно дорогую и сложную конструкцию.

Метод электротензометрии наиболее исследован и широко применяется во многих отраслях промышленности. Он основан на зависимости омического сопротивления проводника от его деформации. Существуют три основных вида тензорезисторов: проволочный, фольговый, полупроводниковый.

Рентгенографический метод основан на прецизионном измерении межплоскостных расстояний кристаллической решетки материала, определяемых по положениям дифракционных линий рентгеновских лучей, по уравнению Вульфа-Брэгга [2]. В данном методе речь идет об измере-

нии деформаций, которые затем переводят в напряжения, используя закон Гука. Рентгенографический метод позволяет осуществить прямые измерения деформаций кристаллической решетки нагруженных деталей, т.е. определить как остаточные напряжения, так и напряжения от действующей нагрузки.

Магнитные методы оценки параметров НДС базируются на магнитоупругом эффекте – изменении намагниченности тела под действием механических напряжений [3-5].

Магнитная память металла – последствие, которое проявляется в виде остаточной намагниченности металла изделий и сварных соединений, сформировавшейся в процессе их изготовления и охлаждения в слабом магнитном поле или в виде необратимого изменения намагниченности изделий в зонах концентрации напряжений и повреждений от рабочих нагрузок.

Метод магнитной памяти металла (МПМ) – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПР), возникающих на изделиях и оборудовании в зонах концентрации напряжений (ЗКН) и дефектов металла. При этом СМПР отображают необратимое изменение намагниченности в направлении действия максимальных напряжений от рабочих нагрузок, а также структурную и технологическую наследственность деталей и сварных соединений после их изготовления и охлаждения в слабом магнитном поле, как правило, в поле Земли. В методе МПМ используются естественная намагниченность и последствие, которое проявляется в виде магнитной памяти металла к фактическим деформациям и структурным изменениям в металле изделий и оборудования.

Физические основы метода МПМ:

- магнитоупругий эффект – изменение индукции в ферромагнетике, находящемся во внешнем магнитном поле под действием механических нагрузок;
- магнитомеханический эффект – изменение вектора остаточной намагниченности ферромагнитного изделия в направлении действия максимальных напряжений и соответственно, СМПР, измеряемого при контроле;
- магнитопластика – эффект формирования доменов и доменных границ на скоплениях дислокаций в зонах концентрации напряжений;
- эффект рассеяния магнитного поля структурными и механическими неоднородностями в условиях естественной намагниченности металла.

Магнитные параметры, используемые при контроле методом МПМ:

- нормальная и/или тангенциальная составляющая СМПР – H_r ;

- градиент магнитного поля по длине (dH_p/dx) или по базе между каналами измерений.

Методом МПМ определяют:

- зоны концентрации напряжений – основные источники развития повреждений;
- микро- и макродефекты на поверхности и в глубинных слоях металла.

Резистивный электроконтактный метод НК основан на измерении электрического сопротивления на участке поверхностного слоя металла при подаче к нему переменного тока. Известно, что при подаче к поверхности проводника переменного тока высокой частоты наблюдается скин-эффект, при котором токи высокой частоты сосредотачиваются у поверхности проводника, ближайшей к источникам поля, вызывающим появление токов.

Обнаружен эффект изменения электрического сопротивления ферромагнитной стали при изменении напряженного состояния за счет изменения магнитной проницаемости. Получена зависимость электрического сопротивления, измеряемого в поверхностном слое стальных элементов при пропускании через него электрического тока, от эксплуатационных одноосных механических напряжений растяжения-сжатия.

Акустические методы связаны с распространением упругих колебаний и широко применяются для изучения физико-механических характеристик твердых тел. Упругая волна, распространяющаяся в твердом теле, характеризуется амплитудой колебаний, их фазой и частотой, волновыми векторами и векторами поляризации. По параметрам распространения упругой волны можно судить о физических свойствах и техническом состоянии твердых тел. Высокая проникающая способность ультразвуковых колебаний обусловила широкое использование ультразвука при исследовании конструкционных материалов.

Акустические методы измерения механических напряжений в твердых телах основаны на использовании закономерностей распространения упругих волн в предварительно напряженных телах. Эти методы позволяют раздельно определять главные напряжения непосредственно в конструкциях без дополнительных процедур разгрузки. Они обладают достаточно высокой разрешающей способностью, обеспечивают оперативный контроль, позволяют измерять не только поверхностные напряжения, но и напряжения, действующие внутри материала.

В твердых телах можно возбудить различные виды колебаний. При приложении к изотропному материалу нагрузки вдоль определенного направления, возникает слабая искусственная анизотропия его упругих свойств. В случае распространения в таком материале произвольной

сдвиговой волны в направлении, перпендикулярном приложенному напряжению, образуются две чисто сдвиговые волны со взаимно-перпендикулярными векторами поляризации, т.е. наблюдается двойное лучепреломление. При этом направление поляризации одной волны параллельно направлению приложенной нагрузки, а другой – перпендикулярно этому направлению. Распространяющиеся волны имеют разные скорости, поэтому по мере прохождения толщи материала меняется разность их фаз. Если сдвиговая волна распространяется вдоль приложенного напряжения, то двойного лучепреломления не происходит. В этом случае напряжение можно определить только путем сравнения скоростей продольных или сдвиговых волн до и после приложения нагрузки. Развитие такого метода позволило определять напряжения в стержневых деталях, в том числе в болтах и шпильках.

Таким образом, одноосное напряжение в твердом теле может быть определено: по разности фаз волн, образовавшейся в результате двойного лучепреломления; по различию скоростей распространения упругих волн в двух специально выбранных направлениях; по изменившейся скорости распространения.

Наиболее распространены методы определения механических напряжений, основанные на измерении скорости ультразвука (УЗ). Для оценки упругих напряжений акустическим методом используют эффект акустоупругости, который отражает нелинейную связь между напряжениями и деформациями и, как следствие, влияние напряжений на скорости упругих волн. Зависимость скоростей упругих волн от напряжений – нелинейная, так как в линейной теории упругости они полностью определяются модулями упругости и плотностью среды. Эта зависимость весьма слабая ввиду малой нелинейности твердых тел по сравнению с жидкостями или газами. Для того чтобы определять напряжения, действующие в конструкционных материалах, с погрешностью 10% и менее предела текучести, требуются прецизионные измерения скоростей ультразвуковых волн с относительной погрешностью 0,01-0,1%.

Для определения плоского напряженного состояния детали наиболее удобно использовать волны, распространяющиеся по нормали к плоскости действия напряжений. В изотропном материале без напряжений скорость распространения сдвиговой волны будет одна и та же при любой ориентации плоскости ее поляризации. Акустическая анизотропия напряженного материала проявляется в запрете на линейную поляризацию тех сдвиговых волн, которые на входе в среду не поляризованы вдоль направлений действия главных механических напряжений. Разность скоростей разрешенных сдвиговых волн будет пропорциональна разности главных напряжений.

2.5. Исследование свойств стали конструкций

Для проведения исследований механических характеристик стали был произведён отбор фрагмента крестового соединения из опорных частей ППФ и ОНРС ККЦ «ММК».

Химический состав стали был определён согласно следующим нормативным документам: ГОСТ 12344-78, ГОСТ 12345-80, ГОСТ 12346-78, ГОСТ 12347-77, ГОСТ 12348-78, ГОСТ 12350-78, ГОСТ 12351-81, ГОСТ 12355-78, ГОСТ 12356-81, ГОСТ 12357-84, ГОСТ 12358-82, ГОСТ 12359-81, ГОСТ 18895-81, ГОСТ 20560-81.

2.6. Геодезия и инструментальный контроль пространственного положения

Определение пространственного положения исследуемых ППФ необходимо выполнять с помощью тахеометра или сканера-тахеометра отражательным на призму и безотражательным способами.

Электронный тахеометр автоматически снимает отсчеты, измеряет расстояния и вычисляет координаты точек, после чего заносит их во внутреннюю память прибора.

Тахеометры разделяются на три группы – это технические, инженерные и роботизированные. Технические тахеометры во внутреннем программном обеспечении содержат базовый набор функций и приложений. Это установка станции, вынос точек, простейшие задачи.

Роботизированные тахеометры имеют сервомоторы и могут сами наводиться на цель. Такие системы необходимы в сложных системах мониторинга.

Основные компании, производящие электронные тахеометры, - это Trimble, Spectra Precision, Nikon, Sokkia, Topcon и Leica.

2.7. Мониторинг и его методика

На основании выполненного обследования ППФ и при обнаружении трещиноподобных дефектов выполняется их мониторинг.

Мониторинг исследуемых ППФ рекомендуется осуществлять с периодичностью 1 раз в три месяца (четыре этапа в год). Мониторинг трещин в нижнем поясе ППФ главным образом позволяет выявить закономерность их образования и развития. Наиболее эффективным методом выявления трещин в ППФ с неразрезным нижним поясом является капиллярный метод.

На каждой стадии мониторинга технического состояния, т.е. контроля процессов, протекающих в конструкциях объектов, проводятся следующие работы:

- определение текущих динамических параметров объекта и сравнение их с аналогичными, измеренными на предыдущем этапе;
- фиксация степени изменения ранее выявленных дефектов и повреждений конструкций объекта и выявление вновь появившихся дефектов и повреждений;
- проведение повторных необходимых измерений деформаций, наклонов, прогибов и т.п. и сравнение с полученными на предыдущем этапе аналогичными величинами;
- анализ полученной на промежуточном этапе информации и составление заключения о текущем техническом состоянии объекта.

2.8. Применение капиллярного метода в процессе выявления дефектов

Капиллярный метод неразрушающего контроля (ГОСТ 18442-80) основан на капиллярном проникновении внутрь дефекта индикаторной жидкости, хорошо смачивающей материал объекта контроля (ОК) с последующей регистрацией индикаторных следов (рис.1).

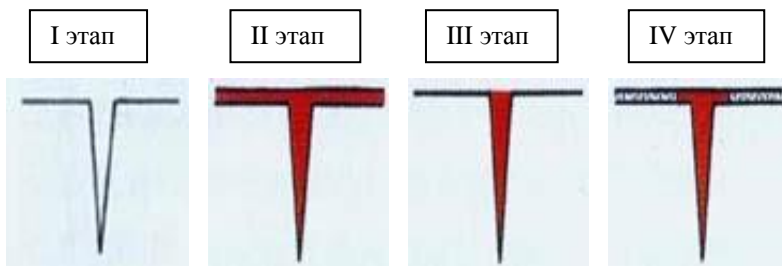


Рис. 1. Схема процесса обнаружения дефектов капиллярным методом

Данный метод пригоден для выявления несплошностей с поперечными размерами 0,1-500 мкм, в том числе сквозных, на поверхности металлов и широко применяется для контроля целостности сварного шва.

Красящий пенетрант наносится на контролируемую поверхность. Благодаря особым качествам, которые обеспечиваются подбором определенных физических свойств пенетранта: поверхностного натяжения, вяз-

кости, плотности, он под действием капиллярных сил проникает в мельчайшие дефекты, имеющие выход на поверхность объекта контроля. Проявитель, наносимый на поверхность объекта контроля через некоторое время после осторожного удаления с поверхности пенетранта, растворяет находящийся внутри дефекта краситель и за счет диффузии «вытягивает» оставшийся в дефекте пенетрант на поверхность объекта контроля. Имеющиеся дефекты видны достаточно контрастно. Индикаторные следы в виде линий указывают на трещины или царапины, отдельные точки – на поры.

Процесс обнаружения дефектов капиллярным методом разделяется на пять стадий.

1 стадия – предварительная очистка поверхности. Чтобы краситель мог проникнуть в дефекты на поверхности, ее предварительно следует очистить водой или органическим очистителем. Все загрязняющие вещества (масла, ржавчина и т.п.) и любые покрытия (ЛКП, металлизация) с контролируемого участка должны быть удалены. После зачистки поверхность высушивается, чтобы внутри дефекта не оставалось воды или очистителя.

2 стадия – нанесение пенетранта. Пенетрант, обычно красного цвета, наносится на поверхность путем распыления или кистью для хорошей пропитки и полного покрытия пенетрантом. Как правило, при температуре 5-50°C, на время 5-30 мин.

3 стадия – удаление излишков пенетранта. Избыток пенетранта удаляется протиркой салфеткой, промыванием водой или тем же очистителем, что и на стадии предварительной очистки. При этом пенетрант должен быть удален лишь с поверхности, но никак не из полости дефекта. Поверхность далее высушивается салфеткой без ворса или струей воздуха. При использовании очистителя есть риск вымывания пенетранта и неправильной его индикации.

4 стадия – нанесение проявителя. После просушки на контролируемую поверхность сразу же наносится проявитель, обычно белого цвета. Он наносится тонким ровным слоем.

5 стадия – контроль. Инспектирование начинается непосредственно после окончания процесса проявки и заканчивается согласно разным стандартам не более чем через 30 мин. Интенсивность окраски говорит о глубине дефекта: чем бледнее окраска, тем дефект мельче. Яркую окраску имеют глубокие трещины. После проведения контроля проявитель удаляется водой или очистителем.

Наиболее удобны такие распылители, как, например аэрозольные баллоны. После нанесения проявителя следует выждать время от 5 мин

для крупных дефектов до 1 часа для мелких. Дефекты будут проявляться как красные следы на белом фоне.

Сквозные трещины на тонкостенных изделиях можно обнаруживать, нанося проявитель и пенетрант с разных сторон изделия. Прошедший насквозь краситель будет хорошо виден в слое проявителя.

Согласно ГОСТ 18442-80 класс чувствительности контроля определяется в зависимости от размера выявляемых дефектов. В качестве параметра размера дефекта принимается поперечный размер дефекта на поверхности объекта контроля – так называемая ширина раскрытия дефекта. Нижний порог чувствительности, т.е. минимальная величина раскрытия выявленных дефектов, ограничивается тем, что весьма малое количество пенетранта, задержавшееся в полости небольшого дефекта, оказывается недостаточным, чтобы получить контрастную индикацию при данной толщине слоя проявляющего вещества. Существует также верхний порог чувствительности, который определяется тем, что из широких, но неглубоких дефектов пенетрант вымывается при устранении его излишков на поверхности.

Установлено пять классов чувствительности (по нижнему порогу) в зависимости от размеров дефектов.

За рубежом установлены другие шкалы чувствительности пенетрантов. Например, в немецком промышленном стандарте DIN 54 152 чувствительность пенетрантов разделяется на четыре класса, но шкала чувствительности обратная.

2.9. Замеры твердости и коэрцитивной силы

Твердость отражает многие эксплуатационные свойства материалов, в том числе сопротивляемость истиранию, режущие свойства, способность выдерживать местные давления, способность обрабатываться резанием, механические свойства (предел текучести, временное сопротивление) при растяжении и т.д.

Однако в последнее время внимание к твердости резко возросло в связи с использованием этой характеристики для оценки степени деградации и повреждаемости материала под воздействием эксплуатационных факторов. Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению в него другого более твердого тела. Для определения твердости используют статические (Бринелля, Виккерса, Роквелла, микротвердости), динамические (Шора, Польди и др.) и кинетические методы.

Основным экспресс-методом при изучении свойств металла исследуемых ППФ является метод Бринелля.

Определение твердости по методу Бринелля основано на вдавлении в исследуемый материал стального шарика стандартного диаметра (10, 5 и 2,5 мм) и последующем измерении диаметра отпечатка (рис. 2). Твердость по Бринеллю

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{P}{\pi R(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2)$$

где D, R – диаметр и радиус шарика соответственно, мм;
 d – диаметр полученного на поверхности материала отпечатка, мм;
 P – приложенная нагрузка при вдавлении шарика, кг;
 F – площадь отпечатка, мм².

Размеры шариков выбирают в зависимости от толщины исследуемых материалов. Нагрузка на шарик выбирается в зависимости от сопротивления материала пластическому деформированию. Время действия нагрузки на шарик варьируется от 10 с для черных металлов до 30 или 60 с для цветных.

Для удобства пользования при измерении твердости пользуются таблицами, рассчитанными по приведенной выше формуле. Определение твердости по методу Бринелля выполняется в соответствии с ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю» и рекомендуется для материалов, твердость которых не превышает 450 МПа.

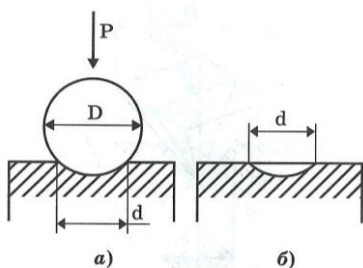


Рис. 2. Схема определения твердости по методу Бринелля:
 а – испытание; б – замер отпечатка

2.10. Метод магнитной памяти металла

Для определения экспресс методом напряженно-деформированного состояния исследуемых ППФ применен метод магнитной памяти металла. Метод магнитной памяти металла регламентирован ГОСТ Р 52005-2003 «Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования».

Магнитная память металла – это эффект магнитной памяти деформации металла, обусловленной ориентированными внутренними напряжениями. Уникальность метода магнитной памяти металла (МПМ) заключается в том, что он основан на использовании эффекта возникновения высокой намагниченности металла в зонах больших деформаций металла элементов конструкций, обусловленных действием рабочих нагрузок.

Основные практические преимущества этого метода диагностики по сравнению с известными магнитными и другими традиционными методами неразрушающего контроля (НК), следующие:

- применение метода не требует специальных намагничивающих устройств, так как используется явление намагничивания узлов конструкций в процессе их работы;
- места концентрации напряжений от рабочих нагрузок, заранее не известные, определяются в процессе их контроля;
- зачистки металла и другой какой-либо подготовки контролируемой поверхности не требуется;
- для выполнения контроля по предлагаемому методу используются приборы, имеющие малые габариты, автономное питание и регистрирующие устройства.

Основная задача метода МПМ – определение на объекте контроля наиболее опасных участков и узлов, характеризующихся зонами КН. Затем с использованием, например, УЗД в зонах КН определяется наличие конкретного дефекта.

Метод МПМ – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) на поверхности изделий с целью определения зон концентрации напряжений, дефектов, неоднородности структуры металла и сварных соединений.

Собственное магнитное поле рассеяния изделия (СМПР) – магнитное поле рассеяния, возникающее на поверхности изделия в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений или в зонах максимальной неоднородности структуры металла на новых изделиях.

Для отдельных деталей и изделий, а также для сварных соединений метод МПМ основан на регистрации СМПР, возникающих в зонах концентрации остаточных напряжений. В процессе изготовления любых ферромагнитных изделий (плавка, ковка, термическая и механическая обработка) механизм формирования реальной магнитной текстуры происходит одновременно с кристаллизацией при охлаждении, как правило, в магнитном поле Земли. В местах наибольшей концентрации дефектов

кристаллической решётки (например, скоплений дислокаций) и неоднородностей структуры образуются доменные границы с выходом на поверхность изделия в виде линий смены знака нормальной составляющей СМГР. Эти линии соответствуют сечению детали с максимальным магнитным сопротивлением и характеризуют зону максимальной неоднородности структуры металла и, соответственно, зону максимальной концентрации внутренних напряжений (ЗКН).

Магнитная память металла характеризуется значением коэрцитивной силы.

Коэрцитивная сила H_c , А/см, – напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного до насыщения ферромагнетика.

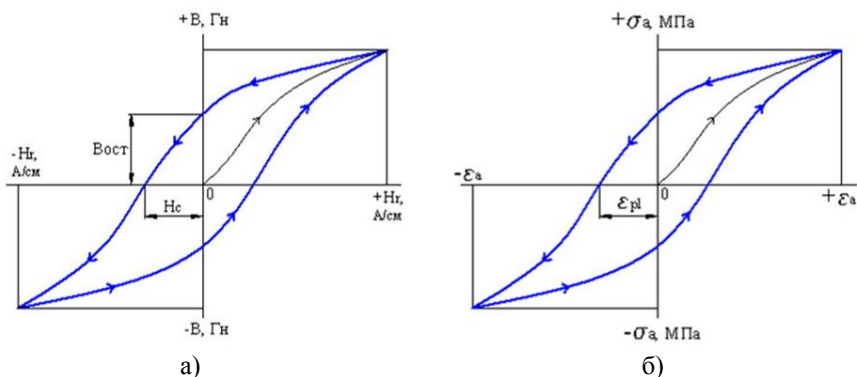


Рис. 3. Диаграмма зависимости намагничивания (H_c) и магнитной индукции (B):
а – магнитная петля гистерезиса, где H_c – коэрцитивная сила (А/см);

Вост – остаточная индукция (Гн);

K – циклический коэффициент напряжения;

б – деформационная петля гистерезиса, где ϵ_{pl} – остаточная деформация (см); σ_a – амплитуда нагружений (МПа);

n – циклический коэффициент упрочнения

Размерность H_c выражается в А/м или А/см. Последняя размерность чаще используется в отечественной практике магнитного контроля как при построении корреляционных зависимостей, так и в измерительной технике.

Поэтому при наличии корреляционных зависимостей между H_c и пластической деформацией по величине коэрцитивной силы можно вести контроль накопления повреждений в металле, упругопластической де-

формации металла, а также прогнозировать усталостную долговечность металла. Все эти зависимости выводились и выводятся экспериментальным путем.

Величина коэрцитивной силы определяется механизмом перемагничивания и является структурно-чувствительной характеристикой материала. На H_c влияют суммарная удельная поверхность зерен, остаточные механические напряжения, дефектность материала. Чем больше дефектность материала и меньше однородность структуры, тем больше коэрцитивная сила H_c и, соответственно, меньше магнитная проницаемость. Это связано с тем, что наличие в образцах различных примесей, дефектов кристаллической решетки затрудняет движение границ магнитных доменов.

Замеры коэрцитивной силы выполнены структуроскопом КРМ-Ц-К2М. Методологической основой работы данного прибора является межгосударственный (СНГ) стандарт ГОСТ 30415-96 «Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры магнитным методом».

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Система, обладающая свойством живучести, проявляет его в свойстве постепенной деградации, возникающем благодаря введению как пассивных, так и активных средств обеспечения живучести (СОЖ). Информация о первичных последствиях поступает к СОЖ, включающим в себя средства контроля работоспособности, средства аварийной защиты, средства реконфигурации и управления. Действие СОЖ оказывает влияние на развитие первичных последствий и в зависимости от интенсивности процессов в системе, конкретных внешних условий функционирования, эффективности СОЖ система в конечном счете переходит в одно из возможных устойчивых состояний. По своей природе этот переходный процесс является стохастическим.

После перехода в новое состояние выполняется оценка первичных последствий, в результате которой состояние системы относят к одному из трех классов: работоспособные, неработоспособные или неаварийные, аварийные. Именно по результатам этой классификации проводится оценка живучести по состоянию системы. При работоспособном состоянии система возвращается к выполнению задания немедленно. Если состояние неработоспособное, то система может вернуться к выполнению задания после некоторых процедур восстановления. Перевод системы в новое устойчивое состояние не завершает борьбы за живучесть, так как

при дальнейшем функционировании до выполнения установленного задания могут проявляться и вторичные последствия неблагоприятных воздействий (НВ); более отдаленные, но не менее опасные, чем первичные, связанные с неуправляемыми или плохо управляемыми процессами. Скорость развития вторичных последствий и конечный результат также существенно зависят от работы СОЖ. По истечении некоторого установленного времени проводится оценка результатов выполнения задания с четырьмя возможными исходами. Таким образом, в процессе борьбы за живучесть можно выделить два этапа; на первом этапе идет борьба за сохранение работоспособности системы, на втором этапе – борьба за успешное выполнение задания, несмотря на первичные и вторичные последствия НВ. Соответственно этому выделяют и две задачи оценки и обеспечения живучести.

Показатели живучести ППФ достаточно эффективно оцениваются по свойству системы сохранять работоспособность после неблагоприятного воздействия.

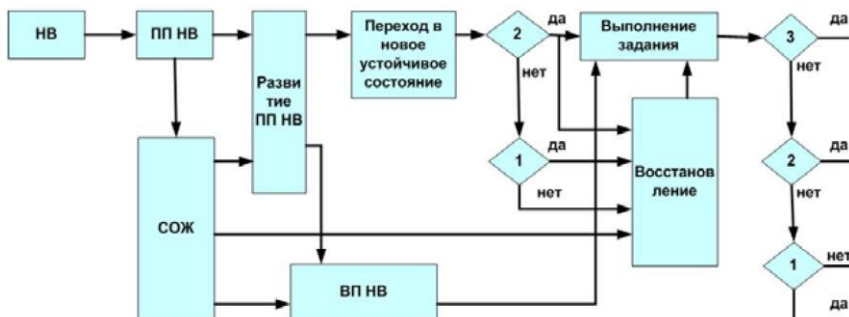


Рис. 4. Принципиальная схема обеспечения живучести ППФ после неблагоприятных воздействий:

ПП – первичные последствия; ВП – вторичные последствия;
1 – авария; 2 – работоспособно; 3 – выполнение задания

3.1. Расчёт живучести

Расчет живучести проводится в следующем порядке:

1. Определение статической определимости системы.
2. Определение степени живучести конструкции.
3. Выполнение оценки вероятности развития наиболее неблагоприятного сценария. Сценарии усталостного разрушения отдельных узлов ППФ.

4. Определение всех работоспособных структур, получаемых из базовой удалением одного (с наибольшей вероятностью отказа) или нескольких элементов.

5. Определение вероятности каскадного разрушения конструкции.

Для аппроксимации предполагается двухзначная логика поведения элементов (1 – работоспособное, 0 – неработоспособное).

Разрушение элементов конструкции имеет случайный характер и её вероятность распределяется по нормальному закону распределения.

Разрушение происходит при достижении предела прочности материала.

3.1.1. *Определение статической определимости системы*

Для проведения кинематического анализа сооружение представляется в виде дискового аналога. Если система статически неопределима только за счет лишних опорных связей, то степень статической неопределимости определяется по формуле

$$n = -W = -(3D - 2Ш - C - C_0), \quad (3)$$

где W – число степеней свободы сооружений;

D – количество дисков;

$Ш, C$ – число шарниров и стержней между дисками;

C_0 – число опорных связей.

3.1.2. *Определение степени живучести конструкции.*

Живучесть ППФ

В расчёте учитывается вероятность нарушений работоспособности элементов соответствующих сценариям, при которых возникает образование принципиально новой системы с однократной деградацией степени статической неопределимости.

Определяется вероятность отказа одного из элементов структуры.

Принимается, что X – случайная величина, характеризующая длительность функционирования ППФ (т.е. ресурс, наработку до предельного состояния и т.п.), длительность функционирования или жизни.

Случайной величиной является полученное значение количества циклов до появления трещины в различных элементах ППФ и при различных комбинациях нагружений N_p .

Расчётное число циклов нагружения N до образования трещины [11]:

$$N_p = \frac{1}{S_N} \left[\frac{0.25 E e_c}{\sigma_\alpha - \sigma_{-1} / (1 + r \bar{\sigma}_{-1})} \right]^2, \quad (4)$$

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

$$e_c = \ln[1 / (1 - \psi)]; \quad (5)$$

где ψ – относительное сужение материала;
 σ_α – амплитудные напряжения,

$$\sigma_\alpha = \frac{1}{\varphi} \{0.5 K_\sigma \sigma_n + 0.28 \sigma_{0.2}\}; \quad (6)$$

где σ_n – номинальные напряжения;
 φ – коэффициент понижения расчётного сопротивления основного металла, определяемый с учётом асимметрии цикла, вида соединения и влияния дефектов;

$$\bar{r} = (1 + r) / (1 - r); \quad (7)$$

где r – коэффициент асимметрии цикла нагружения;

$$\bar{\sigma}_{-1} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_\sigma}; \quad (8)$$

K_σ – коэффициент интенсивности напряжений;

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

1) Определяется среднее значение циклов до отказа

$$x_{сери} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (9)$$

где $x_i = N_{pi}$;

n – общее количество комбинаций нагружения.

2) Определяется среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{сери} - \bar{x}_{ср})^2 \cdot P_i}, \quad (10)$$

где m – частота события (в данном случае разрушение элемента $m=1$);
 p_i – частотность события,

$$p_i = \frac{m}{\sum m}; \quad (11)$$

$$\bar{x}_{cp} = \sum_{i=1}^n x_{cepi} p_i; \quad (12)$$

3) Определяется коэффициент вариации

$$v = \frac{\sigma}{x_{cp}}. \quad (13)$$

4) Находится значение дифференциальной функции распределения при $v < 0,4$.

5) Расчёт выполняется по нормальному закону распределения при $v > 0,4$.

$$f(x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_{cep} - \bar{x}_{cp})^2}{2\sigma^2}}. \quad (14)$$

Расчёт выполняется по закону распределения Вейбулла-Грениенко

$$f(x_i) = \frac{b}{a} \left(\frac{x_i}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x_i}{a}\right)^b\right], \quad (15)$$

где b , C_b – коэффициенты по табл.Б.1 приложения Б, определяются в зависимости от коэффициента вариации;

$$a = \frac{\sigma}{C_b}; \quad (16)$$

б) Определяется вероятность отказа

$$P^* = \frac{f(x_i)}{\sum f(x_i)}. \quad (17)$$

3.1.3. Определение работоспособных структур

Находятся все работоспособные структуры, получаемые из базовой удалением одного (с наибольшей вероятностью отказа) или нескольких элементов.

Определяется вероятность отказа одного из элементов новой структуры (после удаления одного элемента) $P^*(x_2)$. Расчёт выполняется в соответствии с п.3.1.2

3.1.4. Определение вероятности каскадного разрушения конструкции

Вероятность каскадного разрушения определяется для самой ППФ. Вероятность разрушения ППФ является вероятностью разрушения всего покрытия в целом (так как ППФ является несущей конструкцией покрытия здания).

$$P_{\text{каск}} = P^*(x_1) \cdot P^*(x_2). \quad (18)$$

где $P^*(x_1)$ – вероятность разрушения наиболее слабого звена в базовой структуре ППФ;

$P^*(x_2)$ – вероятность разрушения наиболее слабого звена во вновь образованной структуре ППФ после разрушения элемента базовой структуры, где итогом являются построение дерева события, определение ветки развития неблагоприятного сценария и разработка мероприятий по её блокировке.

Все возможные работоспособные структуры, которые могут возникнуть в двухъярусной системе при одно- и двукратном НВ. Пример построения дерева событий показан на рис. В.1 приложения В.

3.1.5 Определение запаса живучести

Запас живучести определяется разностью между статической определемостью системы и d

$$d = C - 1, \quad (19)$$

где $d = n$;

n – степень статической неопределимости по п.4.1.1.1;

d – критическое число дефектов (C), уменьшенное на единицу. Дефект – это единица измерения ущерба, нанесенного системе неблагоприятным воздействием. Принимаемый как один элемент (конструкция ППФ принимается стержневой системой), удаленный из системы в результате НВ. Критическим называют минимальное число дефектов, появление которых приводит к потере работоспособности.

3.2. Расчёт по росту трещин (рост трещин до критической длины с образованием магистральной трещины)

Появление магистральной трещины возможно в зоне сопряжения стенки с верхней полкой нижнего ездового пояса 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».

Местное напряженное состояние в зоне сопряжения стенки с верхней полкой характеризуется нормальными σ_{loc} и касательными $\tau_{loc,xy}$ напряжения от местного давления колеса крана.

Таким образом для ППФ определяющим напряжением является локальное нормальное сжимающее напряжение. 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:

$$\nabla^2 \nabla^2 F = \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0. \quad (20)$$

Функция напряжений F принята в виде тригонометрического ряда:

$$F = \sum \varphi_n(y) \cdot \cos(2n+1) \cdot (1 \cdot \pi \cdot x) / L. \quad (21)$$

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:

$$\sigma_{loc,x} = \frac{\gamma_{f1} \cdot F_{max}^n}{t_w \cdot l_{ef}}, \quad (22)$$

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

γ_{f1} – коэффициент увеличения вертикальной сосредоточенной силы на отдельное колесо мостового крана (п.4.8 СНиП 2.01.07-85*);

l_{ef} – условная длина распространения сжимающих напряжений

$$l_{ef} = c \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{p,f}}{t_w}} ; \quad (23)$$

где c – коэффициент, принимаемый для сварных балок 3,25;
 t_w – толщина стенки нижнего пояса ППФ;

$$I_{p,f} = I_p + I_f ; \quad (24)$$

I_p – собственный момент инерции рельса;
 I_f – собственный момент инерции верхнего пояса,

$$I_f = \frac{b_{ef} \cdot t_f^3}{12} , \quad (25)$$

где $h_{св}$ – ширина свеса верхней полки;
 t_f – толщина верхней полки;
 b_{ef} – эффективная ширина верхней полки.

$$\sigma_{loc}^p = \alpha 1 \cdot \alpha 2 (\text{или } \alpha 3) \cdot \sigma_{loc,x} , \quad (26)$$

где σ_{loc}^p – местное нормальное напряжение с учётом концентрации напряжений по длине отсека (характеризуется коэффициентом $\alpha 1$) и по длине нижнего пояса ППФ (характеризуется коэффициентом $\alpha 2$ и $\alpha 3$).

При $b_{ef} \approx 2h_{св}$, σ_{loc}^p определяется в соответствии с графиками на рис. 5-7 (из отношения σ_{loc}^p к σ_{loc} в зависимости от положения в отсеке ППФ принимаются в соответствии с графиком на рис. 5, в зависимости от положения относительно длины ППФ принимаются в соответствии с графиком на рис. 5, 6).

В пределах крайнего пролёта коэффициент интенсивности напряжений представлен функцией в соответствии с рис.5.

Таблица 2

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
α1	1,015	1,287	1,288	1,288	1,286	0,781	1,286	1,289	1,288	1,287	1,013

Таблица 3

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 4

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

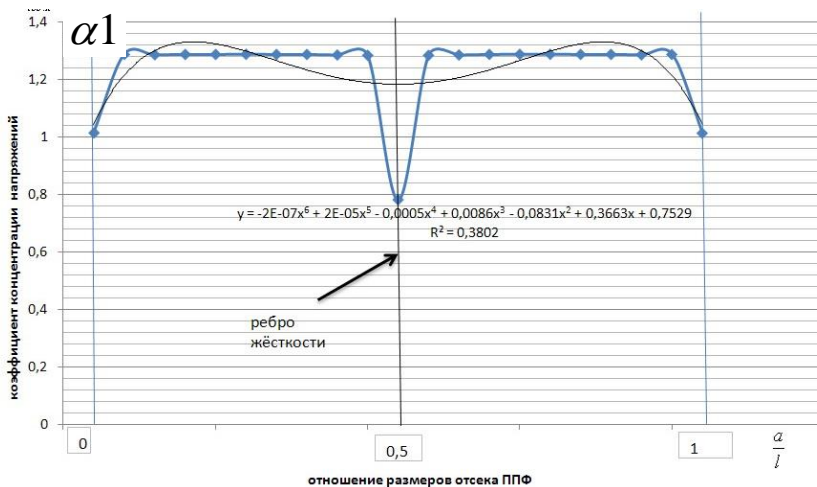


Рис. 5. График отношения σ_{loc}^p к σ_{loc} в зависимости от положения в отсеке ППФ (функции коэффициента концентрации напряжений α_1 по отсеку ППФ)

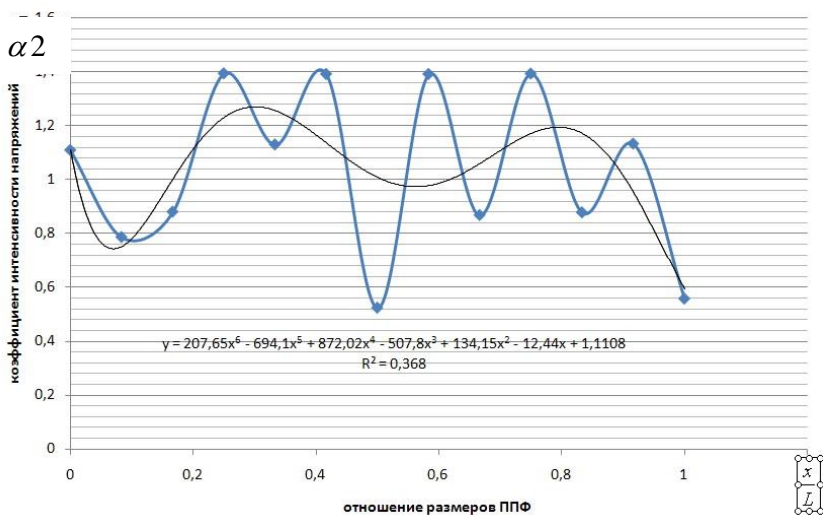


Рис. 6. График функции коэффициента концентрации напряжений α_2 в крайнем пролёте (L – длина пролёта ППФ)

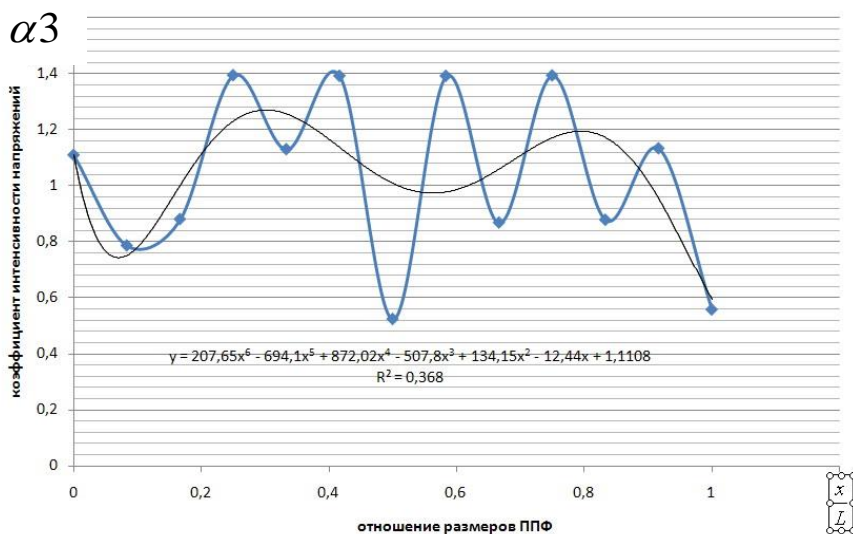


Рис. 7. График функции коэффициента концентрации напряжений α_3 в крайнем пролёте

Многочисленные исследования циклической трещиностойкости материалов и конструкций [6-8] базируются на различных модельных представлениях, описывающих зависимость скорости роста трещины (СРТ) от характеристик трещиностойкости. Учитывая конструктивные особенности и условия нагружения ППФ, для решения задач оценки показателей ресурса и живучести с достаточной степенью точности может быть использована в качестве модели СРТ-степенная зависимость, предложенная Пэрисом:

$$\frac{dl}{dN} = C(K_{max})^m, \quad (27)$$

где C, m – характеристики циклической трещиностойкости;
 K_{max} – максимальное значение КИН в цикле нагружения.

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

$$K_{ief} = \sigma_i \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (28)$$

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 возможности 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, ее 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.8), 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_{cr} (критическая вязкость разрушения). Средний, линейный участок диаграммы, ограничен значениями ΔK_{1-2} и ΔK_{2-3} .

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

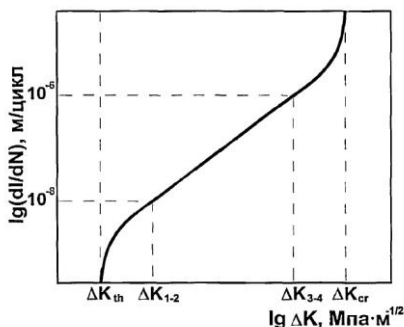


Рис. 8. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Пороговое значение K_{th} принимается согласно [9]:

$$K_{th} = 12.7 - 0.006\sigma_{0.2} - (11.37 - 0.0065\sigma_{0.2})R. \quad (29)$$

При $R=0$.

Таблица 5

Значения K_{th} при $R=0$

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

Критическое значение КИН – K_{cr} (критическая вязкость разрушения), принимается согласно табл. А.1, А.5 приложения А.

Коэффициент интенсивности напряжений рассчитывается как для случая полуэллиптической трещины [10]:

$$K_I = \frac{2 - 0.82 \frac{1}{c}}{\left[1 - \left(0.89 - 0.57 \sqrt{\frac{1}{c}} \right)^3 \left(\frac{1}{t} \right)^{1.25} \right]^{3.25}} \cdot \Phi \sigma^* \sqrt{1}, \quad (30)$$

где Φ – коэффициент К-тарировки,

$$\Phi = \left[1.1 + 0.35 \left(\frac{1}{t} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{1}{c}}; \quad (31)$$

t – толщина стенки;

c – полудлина трещины;

$$\sigma^* = 0.64 \sigma_A + 0.36 \sigma_B; \quad (32)$$

σ_A, σ_B – напряжения определяются методом конечных элементов.

Скорость роста трещин в отсеках ППФ в зависимости от параметров трещиностойкости K_I, Φ и циклов нагружения определяется по табл. А.6, А.7 приложения А.

Приложение А
Параметры трещиностойкости для стали 14Г2АФ, 09Г2С и ВСтЗсп

Таблица А.1

Значение параметров статической трещиностойкости
 для сталей 09Г2С и ВСтЗсп

Т, °С	Развитие трещин поперёк прокатки/развитие трещин вдоль прокатки Ксг	
	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

Таблица А.2

Параметры циклической трещиностойкости

Сталь	Вдоль прокатки		Поперёк прокатки	
	С, (мм/цикл)/МПа√м	m	С, (мм/цикл)/МПа√м	m
09Г2С	$4,82 \cdot 10^{-11}$	2,89	$8,03 \cdot 10^{-11}$	2,36
ВСтЗсп	$5,52 \cdot 10^{-11}$	2,61	$8,42 \cdot 10^{-11}$	2,42

Таблица А.3

Параметры циклической трещиностойкости основных зон
 сварного соединения стали 09Г2С

Т, °С	Параметры m, С (мм/цикл)/МПа√м		
	ОМ	ОШЗ	СШ
+20	$3,5/1,35 \cdot 10^{-9}$	$3,56/1,25 \cdot 10^{-9}$	$3,43/1,42 \cdot 10^{-9}$
-70	$2,62/8,4 \cdot 10^{-9}$	$2,84/8,1 \cdot 10^{-9}$	$2,34/8,86 \cdot 10^{-9}$

Таблица А.4

Экспериментальные значения параметров циклической
 трещиностойкости С и m стали 14Г2АФ

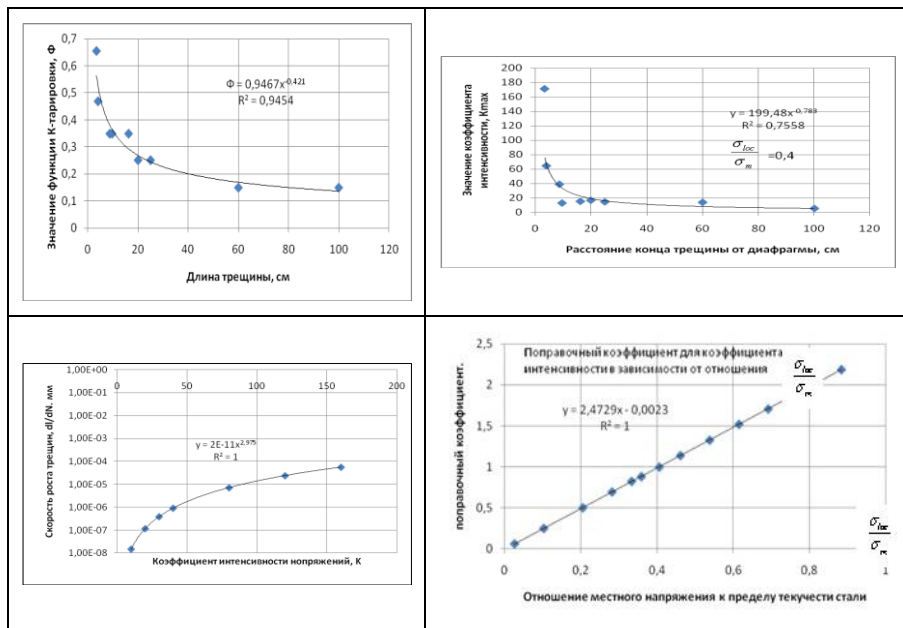
Направление развития трещины	m	С, (м/цикл)/(МПа√м)	Коэффициент корреляции R
Вдоль прокатки	2,975	$1,568 \cdot 10^{-11}$	0,987
Поперёк прокатки	3,090	$8,651 \cdot 10^{-11}$	0,959

Продолжение приложения А

Таблица А.5
Экспериментальные значения параметров статической трещиностойкости S и m стали 14Г2АФ

Направление развития трещины	$T, ^\circ C$	$J_s, \text{кг}^* \text{мм} / \text{мм}^2$	$K_{Ic}, \text{кгс} / \text{мм}^{3/2}$	$K_{Ic}, \text{МПа} \sqrt{\text{м}}$
Вдоль прокатки	+20	2,31	231,89	73,33
	-70	1,01	152,67	48,28
Поперёк прокатки	+20	2,7	252,83	79,95
	-70	0,813	130,66	41,32

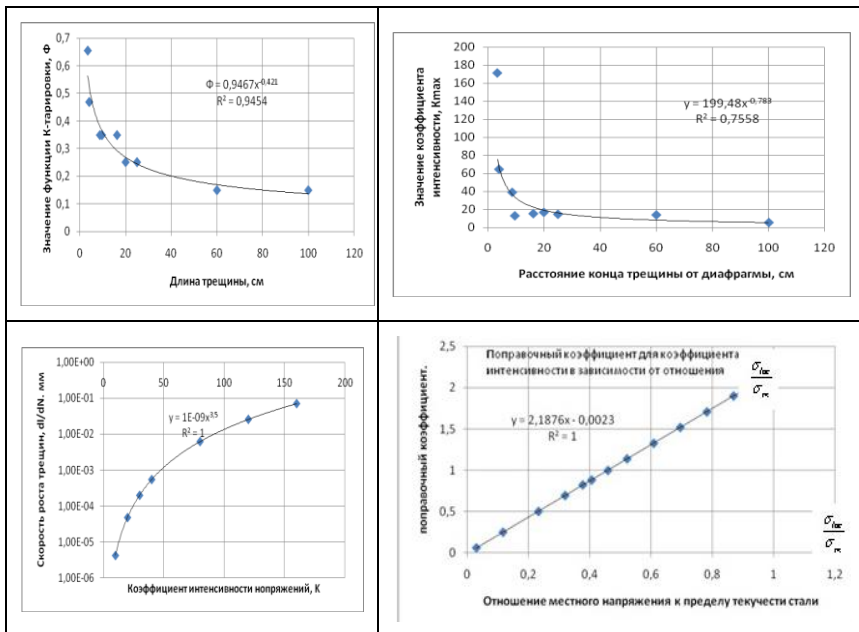
Таблица А.6
Графики значений K_{max} и K -тарировки (Φ) для стали 14Г2АФ в зависимости от длины трещины, места положения в отсеке и локальных напряжений σ_{loc}



Окончание приложения А

Таблица А.7

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



Примеры оценки живучести и остаточного ресурса

ПРИМЕР №1

Построение дерева событий. Определение вероятности каскадного разрушения.

Исходные данные: 8-пролётная ППФ пролётом 24 м с неразрезным нижним поясом. Материал конструкции – сталь марки 09Г2С.

1. Статическая определимость системы

Для отдельного пролёта ППФ

$$n = -W = -(3D - 2Ш - C - Co),$$

$$n = -(3 \cdot 3 - 2 \cdot 0 - 5 - 2 \cdot 3) = 2$$

Система дважды статически неопределимая (с одним лишним стержнем).

2. Живучесть ППФ

Для расчёта живучести ППФ $n = 2$ степень статической неопределимости, принятой для пролёта ППФ. В расчёте учитываются вероятности нарушения работоспособности элементов, соответствующих сценариям, при которых возникает образование принципиально новой системы с однократной деградацией степени статической неопределимости.

Для аппроксимации предполагается двухзначная логика поведения элементов (1 – работоспособное, 0 – неработоспособное).

Разрушение элементов конструкции имеет случайный характер.

Потеря работоспособности происходит после появления усталостной трещины.

2.1. Рассматривается исходная структура

Определяется вероятность отказа одного из элементов структуры.

Для определения номинальных напряжений различных сценариев разрушения (рис. В.1, табл. В.1) выполняется пространственный расчёт в расчётно-программном комплексе.

Продолжение приложения В

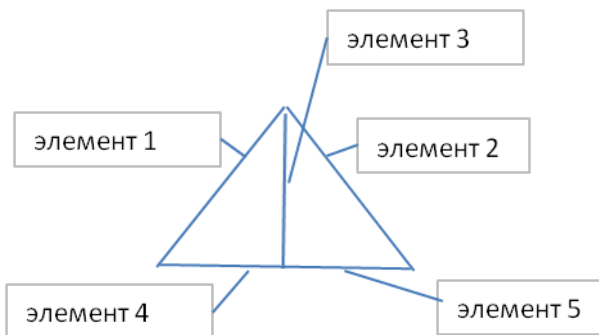
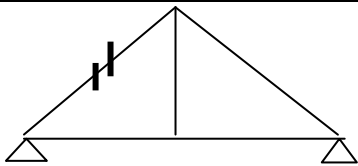
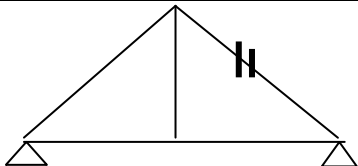
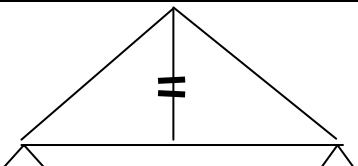


Рис. В.1. Схема пролёта базовой структуры ППФ с нумерацией элементов

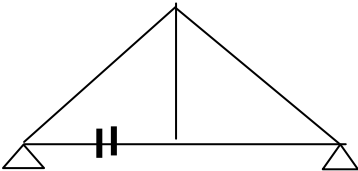
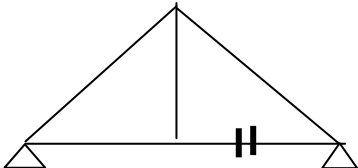
Таблица В.1

Сценарии усталостного разрушения отдельных элементов базовой структуры ППФ

№ сценария	Сценарии усталостного разрушения отдельных элементов ППФ	Схема разрушения
1	Разрушение левого раскоса ППФ	
2	Разрушение правого раскоса	
3	Разрушение стойки ППФ	

Продолжение приложения В

Окончание табл. В.1

№ сценария	Сценарии усталостного разрушения отдельных элементов ППФ	Схема разрушения
4	Разрушение элемента нижнего пояса слева от стойки	
5	Разрушение элемента нижнего пояса справа от стойки	

2.2. Определяется расчётное число циклов нагружения

Определяется расчётное число циклов нагружения N до образования трещины при каждой комбинации нагружения для каждого элемента ППФ (табл.В.2) по формуле:

$$N_p = \frac{1}{S_N} \left[\frac{0.25Ee_c}{\sigma_\alpha - \sigma_{-1} / (1 + r\sigma_{-1})} \right]^2$$

Таблица В.2

Номинальные напряжения от комбинаций загрузений и характеристики материала конструкции

Номер комбинации	Номер элемента	Номинальные напряжения σ_n , МПа	Предел выносливости σ_{-1} , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Предел временного сопротивления стали σ_v , МПа	Относительное сужение материала μ	Модуль упругости E , в МПа
1	1	150	235	305	460	0,63	210000
	2	200	235	305	460	0,63	210000
	3	140	235	305	460	0,63	210000

Окончание табл. В.2

Номер комбинации	Номер элемента	Номинальные напряжения σ_n , МПа	Предел выносливости σ_{-1} , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Предел временного сопротивления стали σ_v , МПа	Относительное сужение материала μ	Модуль упругости E , в МПа
1	4	115	235	305	460	0,63	210000
	5	95	235	305	460	0,63	210000
2	1	50	235	305	460	0,63	210000
	2	80	235	305	460	0,63	210000
	3	210	235	305	460	0,63	210000
	4	109	235	305	460	0,63	210000
	5	105	235	305	460	0,63	210000
3	1	40	235	305	460	0,63	210000
	2	50	235	305	460	0,63	210000
	3	170	235	305	460	0,63	210000
	4	200	235	305	460	0,63	210000
	5	130	235	305	460	0,63	210000
4	1	170	235	305	460	0,63	210000
	2	210	235	305	460	0,63	210000
	3	110	235	305	460	0,63	210000
	4	200	235	305	460	0,63	210000
	5	145	235	305	460	0,63	210000

2.3. Выполняется точечная оценка наработки до отказа

Точечная оценка наработки до отказа позволяет спрогнозировать вероятность разрушения отдельных элементов конструкции при различных комбинациях нагрузжений.

Случайной величиной является полученное значение количества циклов до появления трещины в различных элементах ППФ и при различных комбинациях нагрузжений N_p (табл. В.3).

1) Определяется среднее значение циклов до отказа

$$x_{сери} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где $x_i = N_{p_i}$;

n – общее количество комбинаций нагрузжения.

Продолжение приложения В

Таблица В.3

Определение расчётных циклов нагружения до трещинообразования N_p

Номер комбинации	Номер элемента	$e_c = \ln[1/(1-\psi)]$	Амплитудные напряжения σ_a , МПа $\sigma_a = \frac{1}{\varphi} \{0.5K_\sigma \sigma_n + 0.28\sigma_{0.2}\}$	$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_e}$	Коэффициент асимметрии цикла нагружения, r	$\bar{r} = (1+r)/(1-r)$	Коэффициент концентрации напряжений K_σ	Коэффициент запаса прочности по числу циклов нагружения S_N	Расчётное число циклов нагружения N_p до образования трещины
1	1	0,994252273	278,4126984	0,510869565	0,733333	6,5	1,2	0,85	31751037,09
	2	0,994252273	326,031746	0,510869565	0,75	7	1,2	0,85	8100198,429
	3	0,994252273	268,8888889	0,510869565	0,857143	13	1,2	0,85	162972077,6
	4	0,994252273	263,3333333	0,510869565	0,26087	1,705882353	1,4	0,85	13985225,45
	5	0,994252273	218,4920635	0,510869565	0,315789	1,923076923	1,1	0,85	46228311,97
2	1	0,994252273	183,1746032	0,510869565	0,8	9	1,2	0,85	37397829,52
	2	0,994252273	211,7460317	0,510869565	0,875	15	1,2	0,85	444876744,5
	3	0,994252273	335,5555556	0,510869565	0,714286	6	1,2	0,85	5238998,53
	4	0,994252273	256,6666667	0,510869565	0,275229	1,759493671	1,4	0,85	24620673,96
	5	0,994252273	227,2222222	0,510869565	0,285714	1,8	1,1	0,85	195248429,4

Продолжение приложения В

Окончание табл. В.3

Номер комбинации	Номер элемента	$e_c = \ln[1/(1-\psi)]$	Амплитудные напряжения σ_a , МПа $\sigma_a = \frac{1}{\varphi} \{0.5K_\sigma \sigma_n + 0.28\sigma_{0.2}\}$	$\bar{\sigma}_{-1} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0}$	Коэффициент асимметрии цикла нагружения, r	$\bar{r} = (1+r)/(1-r)$	Коэффициент концентрации напряжений K_σ	Коэффициент запаса прочности по числу циклов нагружения S_N	Расчётное число циклов нагружения N_p до образования трещины
3	1	0,994252273	173,6507937	0,510869565	0,95	39	1,2	0,85	372872866,8
	2	0,994252273	183,1746032	0,510869565	0,9	19	1,2	0,85	136805765,5
	3	0,994252273	297,4603175	0,510869565	0,882353	16	1,2	0,85	69150246,17
	4	0,994252273	357,7777778	0,510869565	0,15	1,352941176	1,4	0,85	608178,67
	5	0,994252273	249,047619	0,510869565	0,230769	1,6	1,1	0,85	53651802,28
4	1	0,994252273	297,4603175	0,510869565	0,882353	16	1,2	0,85	69150246,17
	2	0,994252273	302,2222222	0,510869565	0,714286	6	1	0,85	11722889,89
	3	0,994252273	240,3174603	0,510869565	0,818182	10	1,2	0,85	4230398970
	4	0,994252273	357,7777778	0,510869565	0,15	1,352941176	1,4	0,85	608178,67
	5	0,994252273	262,1428571	0,510869565	0,206897	1,52173913	1,1	0,85	13745390,57

Продолжение приложения В

2) Определяется среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{сепi} - \bar{x}_{ср})^2 \cdot P_i},$$

где

$$\bar{x}_{ср} = \sum_{i=1}^n x_{сепi} P_i$$

$$P_i = \frac{m}{\sum m} - \text{частотность события};$$

m – частота события (в данном случае разрушение элемента $m=1$).

3) Определяется коэффициент вариации

$$v = \frac{\sigma}{x_{ср}}.$$

4) Находится значение дифференциальной функции распределения.

При $v < 0,4$ расчёт выполняется по нормальному закону распределения.

$$f(x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_{сеп} - \bar{x}_{ср})^2}{2\sigma^2}}$$

При $v > 0,4$ расчёт выполняется по закону распределения Вейбулла-Грэненко;

$$f(x_i) = \frac{b}{a} \left(\frac{x_i}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x_i}{a}\right)^b\right],$$

где $a = \frac{\sigma}{C_b}$

b, C_b – коэффициенты по табл. В.4 приложения В, определяются в зависимости от коэффициента вариации.

Продолжение приложения В

Таблица В.4

Определение вероятности разрушения (отказа) элементов ППФ

Номер комбинации	Номер элемента	Среднее расчётное число циклов нагружения N до образования трещины $x_{сепi} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	Среднее значение наработки до отказа $\bar{x}_{cp} = \sum_{i=1}^n x_{сепi} P_i$	Частота, m	Частотность, $P_i = \frac{m}{\sum m}$	Среднеквадратическое отклонение, $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2 \cdot P_i}$
1,2,3,4	1	102234396	198547267	1	0,2	386231667
	2	120301120	198547267	1	0,2	386231667
	3	893552058	198547267	1	0,2	386231667
	4	7964451,4	198547267	1	0,2	386231667
	5	61774787	198547267	1	0,2	386231667

Продолжение приложения В

Окончание табл. В.4

Номер комбинации	Номер элемента	Коэффициент вариации $\nu = \frac{\sigma}{x_{cp}}$	Коэффициент b (приложение Б)	Коэффициент C_b (приложение Б)	Коэффициент a	Распределение Вейбулла-Гнеденко при $\nu > 0,4$ $f(x_i) = \frac{b}{a} \left(\frac{x_i}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x_i}{a}\right)^b\right]$	Вероятность отказа, $P^* = \frac{f(x_i)}{\sum f(x_i)}$
1,2,3,4	1	1,945288255	0,8	1,43	270092075	3,59717E-09	0,18559
	2	1,945288255	0,8	1,43	270092075	3,48198E-09	0,179647
	3	1,945288255	0,8	1,43	270092075	2,33161E-09	0,120296
	4	1,945288255	0,8	1,43	270092075	5,99307E-09	0,309203
	5	1,945288255	0,8	1,43	270092075	3,97849E-09	0,205264

Продолжение приложения В

5) Определяется вероятность отказа (см.табл. В.4)

$$P^* = \frac{f(x_i)}{\sum f(x_i)}$$

3. Определение работоспособных структур

Определяются все работоспособные структуры, получаемые из базовой удалением одного (с наибольшей вероятностью отказа) или нескольких элементов.

Определяется вероятность отказа одного из элементов новой структуры (после удаления одного элемента) $P^*(x_2)$. Расчёт выполняется в соответствии с п.2.

4. Определение вероятности каскадного разрушения конструкции

$$P_{\text{каск}} = P^*(x_1) \times P^*(x_2)$$

$$P^*(x_2) = 0,3$$

$$P^*(x_1) = 0,309$$

$$P_{\text{каск}} = 0,0927,$$

Итогом являются построение дерева события, определение ветки развития неблагоприятного сценария и разработка мероприятий по её блокировке.

Все возможные работоспособные структуры, которые могут возникнуть в двухърусной системе при одно- и двукратном НВ. Пример построения дерева событий показан на рис.В.2.

Продолжение приложения В

ПРИМЕР №2

При обследовании ППФ в третьем отсеке крайнего пролёта ППФ обнаружена трещина $l_0=100$ мм. Вершина трещины расположена на расстоянии $a=100$ мм от диафрагмы

Толщина стенки ППФ $t=25$ мм. Материал 09Г2С. Длина отсека $l=4$ м. Длина пролёта ППФ 24 м.

Нормальные напряжения $\sigma_{loc} = 105$ МПа.

Определить количество циклов до подрастания трещины до 1 м.

1) Определяется фактическое нормальное напряжение, действующее в зоне вершины трещины. При $l = 100$ мм.

$$\frac{a}{l} = 0,025$$

$$\alpha_{\sigma}^{\Phi o} = -2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^6 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^5 - 0.0005 \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^4 + 0.0086 \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^3 - 0.081 \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2 + 0.3663 \cdot \left(\frac{a}{l}\right) + 0.7529$$

$$\alpha_{\sigma}^{\Phi g} = 207.65 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^6 - 694.1 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^5 + 872.02 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^4 - 507.8 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^3 + 134.15 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^2 - 12.44 \cdot \left(\frac{x}{L}\right) + 1.1108$$

$$\alpha_{\sigma}^{\Phi \sigma} = \alpha 1 \text{ (или определяется по графику 5)}$$

$$\alpha_{\sigma}^{\Phi g} = \alpha 2 \text{ (или определяется по графику 6)}$$

$$\sigma_{loc}^{\Phi} = \sigma_{loc} \cdot \alpha_{\sigma}^{\Phi o} \cdot \alpha_{\sigma}^{\Phi} = 105 \cdot 1,2 \cdot 1 = 126 \text{ МПа.}$$

$$\text{Отношение } \frac{\sigma_{loc}^{\Phi}}{\sigma_m} = 126 / 345 = 0,36.$$

Окончание приложения В

2) Определяются коэффициенты интенсивности напряжений (по табл.А.7, прил. А):

- при $l = 100$ мм $KI = 40$;
- при $l = 1000$ мм $KI = 10$.

$$\Delta K = \frac{40 + 10}{2} = 25 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$$

3) Определяется скорость роста трещины

$$\Delta K \cdot K_{np} = 25 * 0,7 = 17,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} \approx K_{th}$$

$$\frac{dl}{dN} = 1 \cdot 10^{-9} \cdot \Delta K^{3,5}$$

$$\frac{dl}{dN} = 0,00000224 \text{ мм/цикл}$$

4) Определяется количество циклов нагружения N , необходимых для подрастания трещины длиной 100 мм до 1000 мм

$$N = \frac{(l_{расч.} - l_0)}{\left(\frac{dl}{dN}\right)} = \frac{(1000 - 100)}{0,00000224} = 11520000 \text{ циклов.}$$

Библиографический список

1. Рекомендации по надзору и технической эксплуатации монтажных соединений на высокопрочных болтах стальных строительных конструкций зданий и сооружений Министерства металлургии. – М.: СССР «ЦНИИПроектстальконструкция», 1990. – 30 с.
2. Горелик С.С., Скоков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: Учеб.пособие для вузов. – М.: МИСИС, 2002. — 360 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т./ Под общ. ред. В.В. Клюева. – Т.6. – Кн. 1. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.
4. Горицкий В.М. Диагностика металлов. – М.: Металлургиздат, 2004. – 402 с.
5. Дубов А.А. Материалы первой международной научно-технической конференции по теме: «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла». – М., 1999. – 1-4с.
6. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.
7. Романив О.Н. Механика разрушения и прочность материалов: Справ.пособие в 4 т. Т.4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н.Никифорчин. – Киев: Наук, думка, 1990. – 679 с.
8. Трошенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трошенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наук, думка, 1987. – 256 с.
9. Когаев В.П. Пасчёты на прочность при напряжениях переменных во времени. –М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.
10. Овчинников А.В. Приближённая формула определения коэффициентов интенсивности напряжений KI для тел с поверхностными трещинами // Проблемы прочности. 1986. №11. - 44-47 с.
11. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие / В.В. Носов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. -242 с.