



Руководство пользователя



Моделирование накопления контактно- усталостных повреждений в колёсах и рельсах

Рассмотрены специализированные возможности программного комплекса «Универсальный механизм» для моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в колёсах железнодорожного подвижного состава и рельсах

Оглавление

| | |
|--|-------------|
| 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОЛЁСАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И РЕЛЬСАХ | 1-4 |
| 1.1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ..... | 1-4 |
| 1.2. КОНТАКТНАЯ УСТАЛОСТЬ..... | 1-7 |
| 1.2.1. Контактно-усталостные повреждения колёс | 1-7 |
| 1.2.2. Контактно-усталостные повреждения рельсов | 1-8 |
| 1.2.3. Факторы, влияющие на контактную долговечность колёс и рельсов | 1-10 |
| 1.2.4. Подходы к моделированию накопления контактно-усталостных повреждений | 1-11 |
| 1.2.5. Критерии контактно-усталостного разрушения..... | 1-13 |
| 1.2.5.1. Критерий амплитудного значения максимального касательного напряжения | 1-14 |
| 1.2.5.2. Критерий Данг Вана | 1-17 |
| 1.2.5.3. Комбинированный критерий | 1-22 |
| 1.2.6. Испытания на контактную усталость | 1-29 |
| 1.2.7. Диаграммы деформирования колёсных сталей..... | 1-30 |
| 1.2.8. Кривые контактной усталости колёсных сталей..... | 1-32 |
| 1.2.9. Кривые контактной усталости рельсовой стали | 1-40 |
| 1.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МОДУЛЕ UM RCF WHEEL..... | 1-41 |
| 1.3.1. Исходные данные | 1-41 |
| 1.3.2. Создание конечноэлементной модели колеса | 1-43 |
| 1.3.3. Определение напряжений в области контакта колеса и рельса | 1-44 |
| 1.3.4. Накопление повреждений в узлах конечноэлементной модели колеса | 1-46 |
| 1.3.5. Учёт износа профиля колеса | 1-48 |
| 1.3.6. Учёт наличия лубриканта в контакте колеса и рельса..... | 1-50 |
| 1.3.7. Учёт остаточных напряжений в материале колеса | 1-51 |
| 1.4. РАБОТА С МОДУЛЕМ UM RCF WHEEL | 1-58 |
| 1.4.1. Запуск модуля | 1-58 |
| 1.4.2. Интерфейс модуля | 1-58 |
| 1.4.3. Параметры | 1-59 |
| 1.4.3.1. Вкладка «Расчёт» | 1-59 |
| 1.4.3.2. Вкладка «Материал» | 1-61 |
| 1.4.3.3. Вкладка «Остаточные напряжения» | 1-63 |
| 1.4.3.4. Вкладка «Визуализация»..... | 1-64 |
| 1.4.4. Режимы графического отображения | 1-65 |
| 1.4.4.1. Режим «Сетка» | 1-66 |
| 1.4.4.2. Режим «Профиль колеса» | 1-66 |
| 1.4.4.3. Режим «Повреждения в цвете»..... | 1-66 |
| 1.4.4.4. Режим «Напряжения в цвете»..... | 1-67 |
| 1.4.4.5. Режим «Изолинии»..... | 1-67 |
| 1.4.4.6. Режим «Максимальное повреждение» | 1-68 |
| 1.4.4.7. Режим «Накопленные повреждения» | 1-68 |
| 1.4.4.8. Режим «Номера узлов»..... | 1-68 |
| 1.4.4.9. Режим «Остаточные напряжения» | 1-69 |
| 1.4.5. Выполнение расчёта | 1-70 |
| 1.4.6. Сохранение результатов расчёта | 1-71 |
| 1.4.7. Удаление результатов расчёта | 1-72 |
| 1.4.8. Представление результатов расчёта..... | 1-72 |
| 1.4.9. Пример моделирования накопления повреждений в колесе..... | 1-75 |
| 1.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МОДУЛЕ UM RCF RAIL | 1-79 |
| 1.5.1. Исходные данные | 1-79 |
| 1.5.2. Создание конечноэлементной модели рельса | 1-81 |

| | |
|---|--------------|
| 1.5.3. Определение напряжений в области контакта колеса и рельса | 1-83 |
| 1.5.4. Накопление повреждений в узлах конечноэлементной модели рельса | 1-85 |
| 1.5.5. Учёт наличия лубриканта в контакте колеса и рельса..... | 1-86 |
| 1.5.6. Учёт износа профиля рельса | 1-87 |
| 1.6. РАБОТА С МОДУЛЕМ UM RCF RAIL..... | 1-89 |
| 1.6.1. Запуск модуля | 1-89 |
| 1.6.2. Интерфейс модуля | 1-89 |
| 1.6.3. Параметры | 1-90 |
| 1.6.3.1. Вкладка «Расчёт» | 1-90 |
| 1.6.3.2. Вкладка «Материал» | 1-92 |
| 1.6.3.3. Вкладка «Остаточные напряжения» | 1-94 |
| 1.6.3.4. Вкладка «Визуализация»..... | 1-95 |
| 1.6.4. Режимы графического отображения | 1-95 |
| 1.6.4.1. Режим «Сетка»..... | 1-96 |
| 1.6.4.2. Режим «Профиль рельса» | 1-96 |
| 1.6.4.3. Режим «Повреждения в цвете»..... | 1-97 |
| 1.6.4.4. Режим «Напряжения в цвете»..... | 1-97 |
| 1.6.4.5. Режим «Изолинии» | 1-97 |
| 1.6.4.6. Режим «Максимальное повреждение» | 1-98 |
| 1.6.4.7. Режим «Накопленные повреждения» | 1-98 |
| 1.6.4.8. Режим «Номера узлов»..... | 1-99 |
| 1.6.4.9. Режим «Остаточные напряжения» | 1-99 |
| 1.6.5. Выполнение расчёта | 1-100 |
| 1.6.6. Сохранение результатов расчёта | 1-101 |
| 1.6.7. Удаление результатов расчёта | 1-102 |
| 1.6.8. Представление результатов расчёта | 1-102 |
| 1.6.9. Пример моделирования накопления повреждений в рельсе | 1-105 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 1-115 |

1. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в колёсах железнодорожного подвижного состава и рельсах

1.1. Общая информация

Программный комплекс «Универсальный механизм» (УМ) разработан в лаборатории вычислительной механики Брянского государственного технического университета в сотрудничестве с кафедрой «Локомотивы» и ФГУП ВНИКТИ МПС. Правообладателем программного комплекса является проф. Погорелов Дмитрий Юрьевич (свидетельство Российского агентства по патентам и товарным знакам об официальной регистрации программы № 2001611072 от 22 августа 2001 г.)

Модули **UM RCF Wheel (UM Rolling Contact Fatigue of Wheel)** и **UM RCF Rail (UM Rolling Contact Fatigue of Rail)** представляют собой дополнительные программные инструменты, интегрированные в программу **UM Simulation**. Признаком наличия модуля в текущей конфигурации УМ является знак «+» в соответствующей строке окна **О программе** (команда меню **Помощь | О программе...**), рис. 1.1.

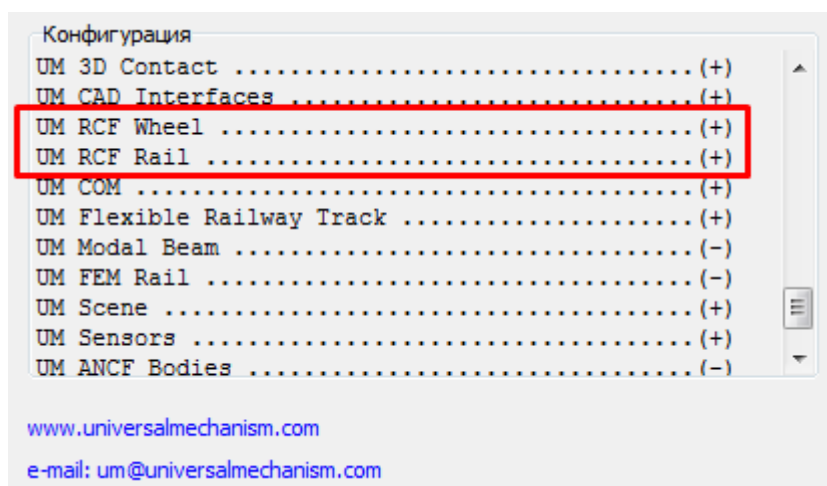


Рис. 1.1. Список модулей в окне **О программе**

Модули **UM RCF Wheel** и **UM RCF Rail** разработаны для моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в колёсах подвижного состава железных дорог и рельсах. Модули могут быть использованы для выполнения сравнительных расчётов, например, для решения задачи оптимизации профиля поверхности катания колеса или рельса по критерию контактной усталости.

Модуль **UM RCF Wheel** позволяет:

- определять скорость накопления контактно-усталостных повреждений в колёсах с различными профилями поверхностей катания с использованием данных, полученных в результате моделирования динамики движения железнодорожного экипажа с помощью модуля **UM Loco** ([Глава 8](#));

- использовать три критерия контактно-усталостного разрушения для моделирования накопления повреждений:
 - критерий амплитудного значения максимального касательного напряжения;
 - критерий Данг Вана;
 - комбинированный критерий;
- учитывать влияние износа профиля колеса на скорость накопления контактно-усталостных повреждений с помощью инструмента **UM Loco/Wheel Profile Wear Evolution** ([Глава 16](#));
- учитывать влияние твёрдости колёсной стали на скорость накопления контактно-усталостных повреждений;
- учитывать влияние остаточных напряжений на скорость накопления контактно-усталостных повреждений;
- с помощью графического интерфейса представлять процессы моделирования напряжений и накопления повреждений в материале колеса в режимах отображения изолиний и заливки цветом.

Модуль **UM RCF Rail** позволяет:

- определять скорость накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах с различными профилями поверхностей катания с использованием данных, полученных в результате моделирования динамики движения железнодорожных экипажей с помощью модуля **UM Loco** ([Глава 8](#));
- использовать три критерия контактно-усталостного разрушения для моделирования накопления повреждений:
 - критерий амплитудного значения максимального касательного напряжения;
 - критерий Данг Вана;
 - комбинированный критерий;
- учитывать влияние износа профиля рельса на скорость накопления контактно-усталостных повреждений с помощью инструмента **UM Loco/Rail Profile Wear Evolution** ([Глава 16](#));
- учитывать влияние остаточных напряжений на скорость накопления контактно-усталостных повреждений;
- с помощью графического интерфейса представлять процессы моделирования напряжений и накопления повреждений в материале рельса в режимах отображения изолиний и заливки цветом.

Для моделирования процессов накопления контактно-усталостных повреждений в модулях **UM RCF Wheel** и **UM RCF Rail** приняты следующие допущения:

- материалы контактирующих тел являются однородными, изотропными и деформируются упруго;
- определяющее влияние на условия в контакте оказывают геометрические формы поверхностей контакта, и эти условия мало зависят от конструктивных форм колёс или рельсов;

- уровень температур, возникающих в колесе или рельсе, не оказывает существенного влияния на напряжённо-деформированное состояние и физико-механические характеристики их материалов.

Для ускорения процесса моделирования на многопоточных процессорах в модулях реализовано решение задач контакта колеса и рельса в параллельных потоках.

Работа **UM RCF Wheel** требует обязательного наличия модуля **UM Loco** и инструмента **UM Loco/Wheel Profile Wear Evolution** в текущей конфигурации **УМ**.

Работа **UM RCF Rail** требует обязательного наличия модуля **UM Loco** и инструмента **UM Loco/Rail Profile Wear Evolution** в текущей конфигурации **УМ**.

Подробные сведения о контактной усталости и подходах к моделированию накопления контактно-усталостных повреждений, описание алгоритмов, задействованных в модуле, можно получить в п. 1.2. "*Контактная усталость*", с. 1-7, п. 1.3. "*Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в модуле UM RCF Wheel*", с. 1-41 и п. 1.5 "*Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в модуле UM RCF Rail*", с. 1-79.

Для получения практических навыков работы с модулем **UM RCF Wheel** пользователю достаточно ознакомиться с п. 1.4. "*Работа с модулем UM RCF Wheel*", с. 1-58.

Для получения практических навыков работы с модулем **UM RCF Rail** пользователю достаточно ознакомиться с п. 1.6. "*Работа с модулем UM RCF Rail*", с. 1-89.

1.2. Контактная усталость

Причиной некоторых распространённых дефектов деталей машин является контактная усталость. В их контакте возникают высокие давления, которые могут вызвать пластические деформации подконтактного слоя материала. В контакте колеса и рельса, например, максимальные давления достигают 1000 МПа и более. Качение колеса по рельсу сопровождается продольным и поперечным кривом, спином. Они вызывают появление касательных сил на поверхности контакта. При торможении, вписывании в кривой участок пути возможны случаи полного скольжения колеса по рельсу. Это приводит к термомеханическим повреждениям поверхности катания и выкрашиванию поверхностных повреждённых слоёв материала под действием контактных напряжений. В зарубежной литературе для обозначения такого повреждения используют термин *spalling*, подчёркивая, что выкрашивание происходит в поверхностном слое в отличие от подповерхностной контактной усталости, к которой относится термин *shelling*. В российском железнодорожном техническом лексиконе применяется термин «выщербины», объединяющий оба вида повреждений [1].

1.2.1. Контактно-усталостные повреждения колёс

В классификации [2] выделяется три типа выщербин: по светлым пятнам, ползунам и наварам; по усталостным трещинам; по сетке термотрещин. Следует подчеркнуть, что все перечисленные дефекты, включая термомеханические и термоусталостные, являются контактно-усталостными повреждениями, поскольку, несмотря на разные причины возникновения, разрушение поверхности происходит в результате многократного взаимодействия колеса и рельса, хотя число циклов взаимодействия до наступления повреждений для разных видов выщербин может существенно различаться [1].

Поверхностные контактно-усталостные повреждения (рис. 1.2а) проявляются в виде наклонных параллельных трещин, расположенных по кругу катания, и выщербин от них. За рубежом этот вид дефекта называют *thread checks* (дословно – растрескивание поверхности катания).

Подповерхностные контактно-усталостные повреждения (рис. 1.2б) возникают на глубине 3-6 мм и более, а трещины обычно развиваются в сторону поверхности катания, вызывая выкрашивания в виде раковин. Однако трещина может развиваться внутрь колеса, что в случае многократно обточенного обода при действии ударных нагрузок может привести к его разрушению [3].

На поверхность катания колеса действует спектр сил, зависящих от нагрузки на колесо, положения его на рельсе, профилей колеса и рельса, сил трения на поверхности катания. Неблагоприятное сочетание изношенных профилей колеса и рельса при некоторых положениях колеса на рельсе является фактором, способствующем увеличению нормальных и касательных напряжений и тем самым возрастанию скорости накопления повреждённости [1].

Одна из особенностей возникновения подповерхностных контактно-усталостных повреждений колеса состоит в том, что материал обода под действием нормальных и касательных сил находится в сложном напряжённом состоянии, при котором направление

главных напряжений за цикл нагружения меняется, а компоненты напряжений достигают максимальных значений в одно время [4].



Рис. 1.2. Контактно-усталостные повреждения колеса:
а – поверхностные; б – подповерхностные

Наиболее часто подповерхностные повреждения развиваются при наличии включений (пор, газовых пузырей), а также неоднородностей структуры. Моделирование упругопластического напряжённого состояния методом конечных элементов (МКЭ) показывает [5], что в зоне, близкой к дефекту, местные напряжения возрастают, вследствие чего происходит пластическая деформация, вызывающая остаточные напряжения, которые могут быть растягивающими. Это способствует зарождению трещины [1].

Однако контактнo-усталостные повреждения могут возникать и при отсутствии явных дефектов материала [6] на глубине примерно 4 мм от поверхности катания, там, где эквивалентные напряжения достигают максимальных значений, превышающих предел усталости материала в данной точке. Такие повреждения возникают при больших напряжениях в случаях неблагоприятных сочетаний изношенных профилей поверхностей колеса и рельса, особенно «корытообразного профиля износа» [1], когда нормальные напряжения при нагрузке на колесо 120 кН возрастают с 1100 до 2300 МПа и более. Контактные напряжения повышаются также при уменьшении диаметра колеса после многократных обточек.

1.2.2. Контактнo-усталостные повреждения рельсов

Контактнo-усталостные повреждения, вызванные циклическими нагрузками при взаимодействии колеса и рельса, подразделяются на возникающие с поверхности и зарождающиеся под поверхность.

Зарождение усталостного дефекта в рельсе происходит в точке, где достигается максимальное напряжение. Когда это максимальное напряжение приводит к повышенной циклической пластической деформации, возникающее повреждение будет контактнo-усталостным. Поскольку точка с максимальным напряжением в контакте колеса и рельса при повышенных коэффициентах трения находится на поверхности катания, соответствующий вид контактнo-усталостного повреждения, зарождающегося на поверхности, назы-

вают head check (параллельные трещины на выкружке головки рельса) или squat (вдавлины) – в зависимости от происхождения напряжения, вызывающего усталостные явления [7].

При снижении коэффициента трения в контакте точка с максимальным напряжением опускается в подповерхностный слой, и напряжение может достичь максимума в области, где в материале имеются включения. Тип контактно-усталостных повреждений, возникающих под поверхностью, известен как shelling. Трещины контактной усталости, возникшие под поверхностью, постепенно растут до поверхности и вызывают выкрашивание металла из головки рельса, обычно с поверхности катания внутреннего рельса в кривой или с выкружки головки наружного рельса, особенно когда он смазывается [7]. Вид такого усталостного повреждения показан на рис. 1.3а.

Поверхностное выкрашивание головки рельса (рис. 1.3б) вызвано контактно-усталостным повреждением в результате действия ряда факторов, таких как неконформные профили колеса и рельса, высокий коэффициент сцепления, перегрузка рельса вследствие скорости движения, не соответствующей равновесной, рост контактных напряжений из-за ложного гребня [7].



а)



б)

Рис. 1.3 Контактно-усталостные повреждения рельса:¹
а – подповерхностные; б – поверхностные

Усталостные трещины могут также возникать под действием высоких нагрузок при наличии неметаллических включений или дефектов в материале, которые являются концентраторами напряжений, вызывающими зарождение трещин. Развитие таких трещин может привести к излому рельса и в результате к сходу подвижного состава с рельсов.

Классификация дефектов рельсов, используемая на Российских железных дорогах, описание причин их появления и действий, которые необходимо предпринимать в случае достижения предельных состояний, приводятся в нормативных документах [8], [9].

¹ Фотографии любезно предоставлены проф. Захаровым С.М.

1.2.3. Факторы, влияющие на контактную долговечность колёс и рельсов

Сопротивление контактной усталости связано с пластичностью, твёрдостью, износостойкостью и другими важными аспектами. Но прежде всего контактная долговечность колёс и рельсов зависит от химического состава стали.

Анализ показывает, что колёсные стали различных стран не сильно различаются по составу. В табл. 1.1 приведен химический состав некоторых из них. Такие элементы как никель (Ni), медь (Cu) содержатся в количестве 0,25...0,3%, молибден (Mo) в количестве 0,08%, фосфор (P), сера (S) в количестве 0,015...0,04%, ванадий (V) – 0,01...0,05%. Содержание углерода (C) оказывает большое влияние на свойства стали. В составе сталей он содержится в количестве 0,44-0,77% [10], [11], [12] [13], [14].

Таблица 1.1

Химический состав колёсных сталей, %

| Регион | Стандарт | Марка стали | Массовая доля элемента, % | | | |
|--------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-----------|---------|-------|
| | | | C | Si | Mn | Cr |
| Россия, страны СНГ | ГОСТ 10791-2011 | Л | 0,48-0,54 | 0,45-0,65 | 0,8-1,2 | ≤0,25 |
| | | 2 | 0,55-0,63 | 0,22-0,45 | 0,5-0,9 | ≤0,3 |
| | | Т | 0,62-0,7 | 0,22-0,65 | 0,5-1,0 | ≤0,4 |
| Северная Америка | AAR M-1071 M-208 2012 | A | 0,47-0,57 | 0,15-1,0 | 0,6-0,9 | ≤0,25 |
| Европа | EN 13262:2004 +A2:2011 | ER7 | ≤0,52 | ≤0,4 | ≤0,8 | ≤0,3 |
| Китай | TB/T 2708 1996 | CL60 | 0,55-0,65 | 0,17-0,37 | 0,5-0,8 | ≤0,25 |
| Япония | JIS E5402_I 2015 | C55 | ≤0,58 | ≤0,4 | ≤0,9 | ≤0,3 |

Увеличение содержания углерода повышает твёрдость стали, её износостойкость и сопротивление контактной усталости. Более высокое содержание углерода делает колесо более чувствительным к температурным воздействиям в случае колодочного торможения, результатом которых являются термомеханические повреждения [1].

Легирующие элементы, такие как марганец (Mn), кремний (Si), хром (Cr) и другие, также влияют на способность стали сопротивляться контактной усталости.

В работе [15] отмечено, что самым мощным фактором, влияющим на контактную усталость колёсных сталей, является их твёрдость.

Мировые производители предоставляют большое разнообразие категорий рельсов разных типов для различных условий применения. Для изготовления рельсов используются стали с высоким содержанием углерода, которые имеют перлитную или близкую к перлитной структуру. Повышения прочностных свойств рельсов удаётся достичь благодаря легированию сталей марганцем, никелем, хромом, молибденом и ванадием, а также с помощью различных технологий изготовления и термообработки. В табл. 1.2 приведены характеристики рельсовых сталей различных типов [7].

Таблица 1.2

Характеристики рельсовых сталей

| Типы рельсовых сталей | С, % | Микролеги- рование | Временное сопротивле- ние, МПа | Твёрдость, НВ |
|--|-------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------|
| Среднеуглеродистые | 0,45 – 0,60 | - | 690 – 820 | 240 – 280 |
| Среднеуглеродистые легированные | 0,50 – 0,70 | - | 880 – 1080 | 270 – 300 |
| С повышенным содержанием углерода (стандартные) | 0,72 – 0,82 | - | 900 – 1020 | 260 – 290 |
| Высокоуглеродистые (средней прочности) | 0,60 – 0,82 | Мо, Ni и/или V | 1000 – 1200 | 310 – 330 |
| Высокоуглеродистые (микролегированные) | 0,65 – 0,82 | V, Nb и/или Mo | 1100 – 1300 | 330 – 400 |
| Высокоуглеродистые термоупрочненные | 0,65 – 0,82 | Cr, V и/или Nb | 1130 – 1300 | 340 – 380 |
| Заэвтектоидные (термоупрочненные) | 0,85 – 1,00 | - | 1300 – 1400 | 380 – 430 |
| Низкоуглеродистые, мартенситной структуры | 0,20 – 0,30 | - | 1450 – 1650 | 440 – 460 |
| Среднеуглеродистые бейнитные | 0,30 – 0,40 | Mo и/или V | 1300 – 1500 | 380 – 450 |

Увеличение содержания углерода повышает твёрдость стали, её износостойкость и сопротивление контактной усталости, однако снижает ударную вязкость материала. Улучшение технологии производства рельсовых сталей в последние десятилетия привело к тому, что и более твёрдые рельсы имеют достаточную пластичность и ударную вязкость.

1.2.4. Подходы к моделированию накопления контактно-усталостных повреждений

Расчёт на многоцикловую усталость строится по следующей схеме. Выбирается критерий контактно-усталостного разрушения [16]. Определяются параметры цикла переменных напряжений в точках подконтактного слоя при проходе их через область, прилегающую к контакту. С использованием этих параметров вычисляются значения критерия в точках. В качестве опасной берётся точка с наибольшим значением критерия. Считается, что прочность обеспечена, если значение критерия в опасной точке меньше некоторой величины. В качестве такой величины берётся предел усталости при кручении. Если подход предусматривает построение диаграммы предельных напряжений – линии, разделяющей поле диаграммы на области безопасных и опасных состояний, – считают, что прочность обеспечена, если изображающая цикл точка попадает в область безопасных состояний.

При таких подходах используются величины, значения которых сравнительно легко определяются путём испытаний образцов материалов на усталость при изгибе и кручении.

Возможность отнести контактную усталость колеса к многоцикловой подтверждается статистическими данными о переточках колёс из-за появления усталостных повреждений. В работе [17] приведено значение среднего пробега колеса типа W3 между переточками $3,02 \cdot 10^5$ км. При этом количество циклов нагружения области контакта составляет $1,1 \cdot 10^8$. В процессе качения пятно контакта занимает разные положения по ширине поверхности катания колеса. Поэтому число циклов для опасной точки меньше этого значения с учётом частоты повторения контакта в области расположения этой точки.

Рассматриваемые далее критерии контактно-усталостного разрушения построены на учёте только напряжённого состояния. В то же время есть факторы, оказывающие большее влияние на усталостные процессы. К ним относится влияние лубриканта, попадающего на поверхности колёс и рельсов. В работах [18], [19] отмечается, что при испытаниях образцов колёсных сталей на контактную усталость при перекачивании без скольжения и без подачи лубриканта – масла или воды – контактные повреждения не наблюдаются даже при очень высоких давлениях.

В ряде работ рассматривается возможность использования кривых контактной усталости типа кривых Вёлера [1], [20]. Они представляются в виде характерном для малоцикло-вой усталости

$$N = C \sigma_{eq}^{-m}, \quad (1.1)$$

где σ_{eq} – выбранный критерий контактной прочности, характеризующий напряжённое состояние в области контакта;

N – число циклов переменных напряжений до появления выщербин усталостного характера;

C, m – константы материала, определяемые экспериментально.

Вид кривой контактной усталости показан на рис. 1.4.

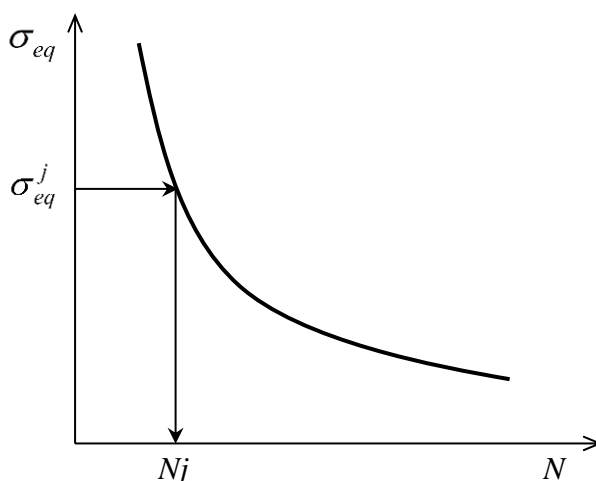


Рис. 1.4. Кривая контактной усталости

Уравнение (1.1) позволяет вычислить количество циклов до разрушения материала при заданном значении критерия σ_{eq} . Такой подход может быть оправдан тем, что в ряде работ [18], [19] получены кривые контактной усталости колёсных сталей, которые стремятся

к асимптоте не параллельной оси абсцисс, а наклонной, т.е. для них не существует физического предела контактной усталости. Для них можно применить понятие предела ограниченной контактной усталости.

Кривая контактной усталости может быть получена только в результате испытаний.

Эквивалентные напряжения в соответствии с выбранным критерием контактной прочности и накопленные повреждения вычисляются в узлах конечноэлементной сетки фрагмента колеса или рельса [21]. Для исследования накопления повреждений в материале колеса или рельса используется модель линейного суммирования, предполагающего, что в каждый момент времени приращение поврежденности не зависит от накопленной поврежденности. Контактно-усталостная поврежденность Q , накопленная в i -ом узле, вычисляется как

$$Q = \sum_{j=1}^n \frac{1}{N_i(j)}, \quad (1.2)$$

где $N_i(j)$ – число циклов до появления выщербин усталостного характера, когда значение критерия равно σ_{eq}^i ;

n – число циклов нагружения.

В общем случае $Q = 1$ считается условием, при котором наступает разрушение.

1.2.5. Критерии контактно-усталостного разрушения

Особенность контактной задачи состоит в том, что точка, в которой наиболее интенсивно идёт процесс накопления повреждений, располагается на поверхности пятна контакта или в подконтактном слое материала, где напряжённое состояние является трёхосным. При испытании образцов для получения значений пределов усталости при растяжении-сжатии или изгибе опасная точка располагается на поверхности, где напряжённое состояние одноосное и характеризуется нормальным напряжением σ . При кручении напряжённое состояние двухосное, характеризуемое касательным напряжением τ . Кривые усталости, необходимые для определения пределов усталости, строятся, соответственно, в координатах: нормальное или касательное напряжение – количество циклов до разрушения образца.

В мировой практике кривые контактной усталости строятся в координатах: максимальное контактное давление p_0 – количество циклов N до появления выщербин усталостного характера. В качестве критерия контактно-усталостного разрушения принимается максимальное контактное давление. Есть несколько причин, почему оно не может использоваться в качестве критерия при моделировании процессов накопления контактно-усталостных повреждений.

1. Критерий не учитывает распределённые по поверхности контакта касательные силы, возникающие при качении колеса при торможении, продольном и поперечном крепе, спине. Эти факторы оказывают значительное влияние на напряжённое состояние.

2. Критерий не позволяет учесть остаточные напряжения в подконтактном слое материала.

3. Испытания на контактную усталость проводятся при высоких герцевских давлениях до 3500 МПа. При этом в подконтактном слое возникают пластические деформации, при-

водящие к изменению геометрии поверхностей контакта и, как следствие, изменению распределения контактных давлений.

В связи с этим для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений необходимо использовать более сложные критерии, позволяющие учитывать особенности напряжённого состояния в контакте колеса и рельса.

1.2.5.1. Критерий амплитудного значения максимального касательного напряжения

Простейшим критерием, используемым при моделировании процессов накопления контактно-усталостных повреждений, является амплитудное значение максимального касательного напряжения τ_{max}^a [1]. Целесообразность его использования в качестве критерия очевидна с учётом доминирующего представления о природе усталостного разрушения: вследствие сдвигов материала по площадкам действия наибольших касательных напряжений материал разрыхляется, образуются микротрещины, переходящие затем в магистральную трещину. Критерий позволяет учесть напряжения, вызванные нормальными и касательными силами в контакте.

В работе [22] на примере одноосного напряжённого состояния показано, что критерий позволяет учесть остаточные напряжения. Он не учитывает гидростатическое напряжение. Оно играет важную роль, поскольку при всестороннем растяжении в материале создаются благоприятные условия для образования и распространения трещины, а при сжатии затрудняющие её образование.

С помощью конечноэлементной модели параллелепипеда исследовано распределение значений критерия τ_{max}^a в области, прилегающей к пятну контакта эллиптической формы (рис. 1.5).

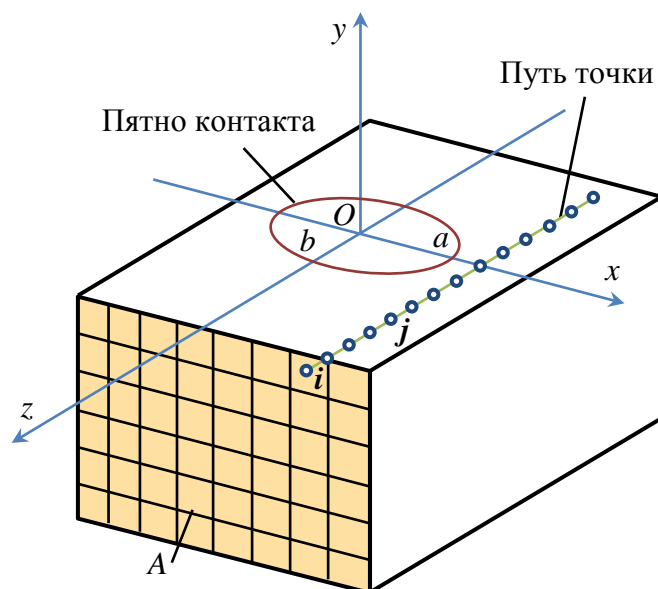


Рис. 1.5. Конечноэлементная модель фрагмента, прилегающего к эллиптическому пятну контакта

Модель состоит из восьмиузловых конечных элементов с размерами рёбер 1 мм. Вертикальные силы прикладывались в узлах, расположенных на поверхности пятна контакта. Их значения определялись в соответствии с эллиптическим законом распределения давлений

$$p(x, z) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}, \quad (1.3)$$

где a, b – полуоси эллипса пятна контакта;

p_0 – максимальное давление.

В ходе исследования варьировались коэффициент трения f и эксцентриситет эллипса пятна контакта

$$e = \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (1.4)$$

где $\beta = b/a$.

Для всех вариантов были приняты нормальная сила равной 120 кН и максимальное давление 1000 МПа.

Значение критерия определялось для узлов плоской конечноэлементной сетки A , которая протягивалась через подконтактную область вдоль оси Oz с шагом равным длине ребра конечного элемента (рис. 1.5). Значение максимального касательного напряжения τ_{max}^j определялось для каждого положения j , занимаемого точкой в процессе протягивания сетки, как

$$\tau_{max}^j = \frac{(\sigma_1^j - \sigma_3^j)}{2}. \quad (1.5)$$

В дальнейшем точка будет ассоциироваться с узлом i плоской конечноэлементной сетки. Затем определялось среднее значение

$$\tau_{mid} = \frac{\sum \tau_{max}^j}{n}, \quad (1.6)$$

где n – число позиций узла i .

Значение критерия τ_{max}^a для каждой позиции узла вычислялось как разность максимального касательного напряжения τ_{max}^j , полученного для позиций j , и среднего значения τ_{mid}

$$\tau_{max}^a = \tau_{max}^j - \tau_{mid}. \quad (1.7)$$

В качестве значения критерия для узла i плоской сетки выбиралось наибольшее из значений, полученных для позиций j .

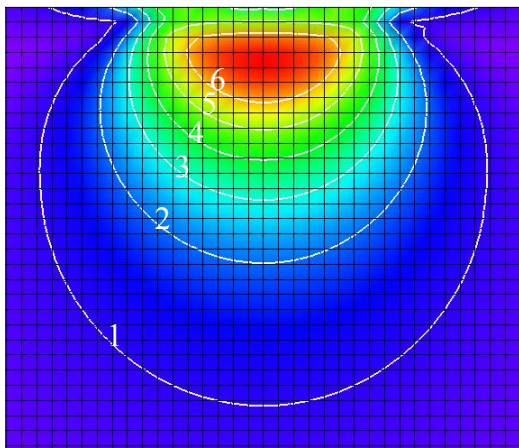
Исследовано влияние касательных сил, возникающих при полном скольжении колеса вдоль оси Oz , при различных значениях коэффициента трения f . При $f = 0,0$ опасная точка располагается на глубине 4 мм под поверхностью контакта. При $f = 0,3$ опасная точка располагается на глубине 3 мм под поверхностью контакта, кроме того, значение критерия в точках, расположенных на поверхности контакта, близко к максимальному.

На рис. 1.6 представлены изолинии значений критерия в узлах плоской сетки, протягиваемой вдоль оси Oz через область, прилегающую к контакту. Для эллипса контакта с эксцентриситетом $e = 0,2$ размеры полуосей составили: $a = 7,65$ мм и $b = 7,49$ мм; с экс-

центриситетом $e = 0,9$: $a = 11,41$ мм и $b = 5,02$ мм. Во всех представленных случаях число изолиний одинаково – семь, но цены изолиний разные. Для эллипса с эксцентриситетом $e = 0,2$ при $f = 0,0$ получено максимальное значение критерия 163 МПа, при $f = 0,3$ – 174 МПа. Для эллипса с эксцентриситетом $e = 0,9$ при $f = 0,0$ получено максимальное значение критерия 170 МПа, при $f = 0,3$ – 181 МПа.

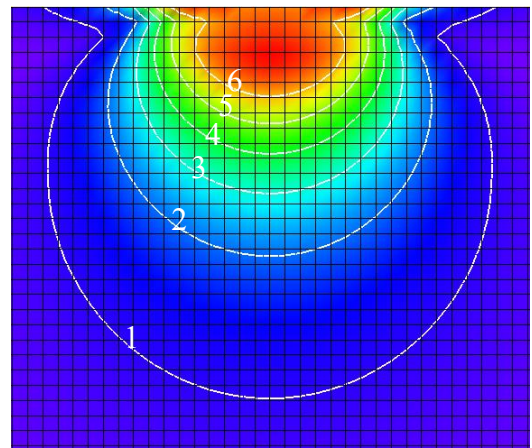
Форма пятна контакта оказывает слабое влияние на максимальное значение критерия.

Использование критерия амплитудного значения максимального касательного напряжения приводит к возрастающей роли касательных сил. С увеличением касательных сил распределение τ_{max}^a существенно изменяется: область с большими значениями критерия увеличивается и смещается к поверхности контакта.



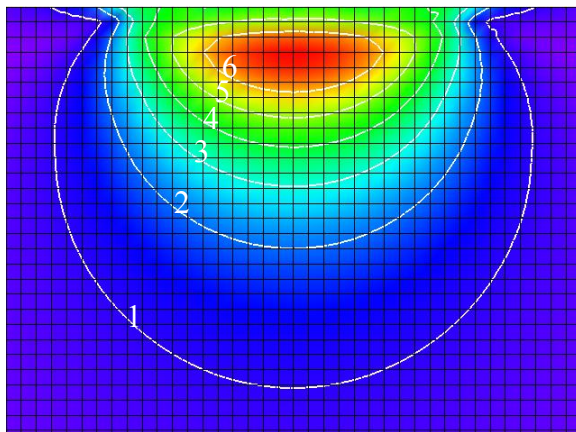
$e = 0,2; f = 0,0;$

Максимальное значение τ_{max}^a 163 МПа



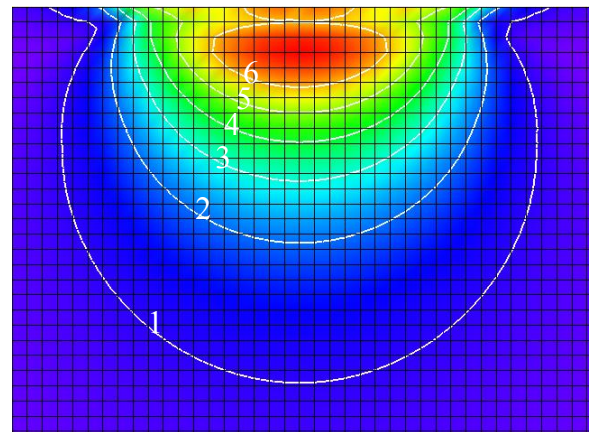
$e = 0,2; f = 0,3;$

Максимальное значение τ_{max}^a 174 МПа



$e = 0,9; f = 0,0;$

Максимальное значение τ_{max}^a 170 МПа



$e = 0,9; f = 0,3;$

Максимальное значение τ_{max}^a 181 МПа

Рис. 1.6. Изолинии значений критерия амплитудного значения максимального касательного напряжения τ_{max}^a в узлах плоской сетки, протягиваемой вдоль оси Oz через область, прилегающую к контакту; 1-6 – номера изолиний

1.2.5.2. Критерий Данг Вана

Критерий Данг Вана [17] представляется двумя неравенствами:

$$\begin{aligned} \tau_{EQ1} &= \tau_a(t) + \alpha_{DV}\sigma_h(t) > \tau_e; \\ \tau_{EQ2} &= \tau_a(t) - \alpha_{DV}\sigma_h(t) < -\tau_e, \end{aligned} \tag{1.8}$$

где $\tau_a(t)$ – зависимое от времени значение касательного напряжения в определённой точке материала и в определённой плоскости, проходящей через эту точку – так называемое "амплитудное" касательное напряжение. Значение $\tau_a(t)$ вычисляется как разность между текущим значением касательного напряжения в определённой плоскости в момент времени t и его средним значением в течение одного цикла;

$\sigma_h(t) = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ – зависимое от времени значение гидростатического напряжения в той же точке материала (положительным считается растягивающее);

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные напряжения в той же точке;

α_{DV} – коэффициент Данг Вана – положительный безразмерный параметр материала, представляющий влияние гидростатического напряжения;

τ_e – величина напряжения, обычно принимаемая равной пределу усталости материала при чистом сдвиге.

Критерий представлен диаграммой в виде двух наклонных линий, соответствующих неравенствам (1.8). Гидростатическое напряжение откладывается по оси абсцисс, "амплитудное" касательное напряжение – по оси ординат и может быть как положительным, так и отрицательным (рис. 1.7).

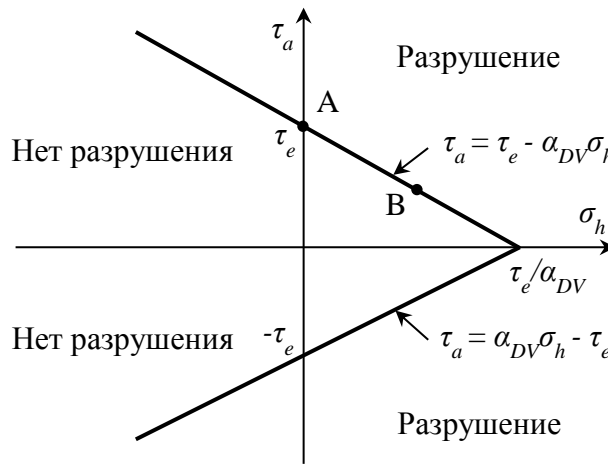


Рис. 1.7. Диаграмма Данг Вана контактной усталости при многоосном напряжённом состоянии

Коэффициент Данг Вана равен тангенсу угла наклона диаграммы циклической усталости. Тогда критерий численно равен длине отрезка ОС, отсекаемого линией, проходящей через точку А с координатами $\sigma_h(t), \tau_a(t)$ параллельно наклонной линии диаграммы (рис. 1.8). Отношение $\tau_e/ОС$ можно рассматривать как коэффициент запаса по циклической прочности, поэтому состояния, представленные точками А и В, одинаково опасны.

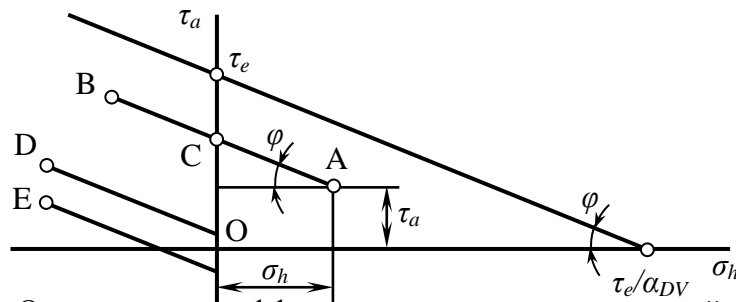


Рис. 1.8. Определение коэффициента запаса по циклической прочности с помощью диаграммы усталости

Наклонная прямая, проходящая через точку D, отсекает короткий отрезок на оси $\tau_a(t)$, коэффициент запаса принимает большое значение. Если прямая пересекает ось $\tau_a(t)$ в точке с отрицательным значением критерия, критерий полагают равным нулю (линия, проходящая через точку E). Если в расчётах учитывается лишь абсолютное значение касательного напряжения $\tau_a(t)$, тогда может быть использована только верхняя часть диаграммы. Критерий Данг Вана может быть представлен в форме

$$\tau_{DV} = |\tau_a(t)| + \alpha_{DV}\sigma_h(t). \tag{1.9}$$

Величины $\tau_a(t)$ и $\sigma_h(t)$ изменяются во времени. В расчётах с использованием конечноэлементных расчётных схем время преобразуется в координаты точек i , занимаемых узлом при прохождении через область, прилегающую к контакту (рис. 1.5).

Чтобы упростить вычисление $\tau_a(t)$, вместо касательного напряжения в некоторой точке материала, действующего на некоторой площадке, проходящей через эту точку, определяется максимальное касательное напряжение τ_{max}^i [17]. Тогда среднее значение максимального касательного напряжения равно

$$\tau_{mid} = \frac{\sum \tau_{max}^i}{n}, \tag{1.10}$$

где n – число позиций узла в одном цикле нагружения.

Амплитудное значение касательного напряжения определяется как

$$\tau_a(t) = \tau_{max}^i - \tau_{mid}. \tag{1.11}$$

В работе [23] для определения коэффициента Данг Вана используется зависимость

$$\alpha_{DV} = 3(\tau_e/\sigma_e - 0,5), \tag{1.12}$$

где σ_e – предел усталостной прочности материала при одноосном напряжённом состоянии.

В работе [24] приводится рекомендуемое значение коэффициента 0,38.

Распределение значений критерия Данг Вана в области, прилегающей к пятну контакта эллиптической формы, исследовано с помощью конечноэлементной модели параллелепипеда (рис. 1.5). Описание модели и условия тестирования приведены в п. 1.2.5.1.

Значение максимального касательного напряжения τ_{max}^j определялось для каждого положения j , занимаемого узлом i в процессе протягивания плоской конечноэлементной сетки A вдоль оси Oz (рис. 1.5). Затем определялось среднее значение

$$\tau_{mid} = \frac{\sum \tau_{max}^j}{n}, \tag{1.13}$$

где n – число позиций узла i .

Значение критерия для каждой позиции узла вычислялось как

$$\tau_{DV} = \tau_a + \alpha_{DV}\sigma_h, \tag{1.14}$$

где $\tau_a = \tau_{max}^j - \tau_{mid}$ – "амплитуда" касательного напряжения;

σ_h – гидростатическое напряжение в узле, когда он занимает положение j .

В качестве значения критерия для узла i плоской сетки выбиралось наибольшее из значений, полученных для позиций j .

Изолинии значений критерия в области герцевского контакта с эксцентриситетом $e = 0,2$ показаны на рис. 1.9. Полуоси эллипса пятна контакта составляли $a = 7,65$ мм и $b = 7,49$ мм. На рис. 1.9а показана картина изолиний на поверхности контакта. Отрицательные значения критерия получены для всех узлов, расположенных в пределах пятна контакта, поэтому они принимались равными нулю.

Как видно на картине изолиний для узлов, расположенных в плоскости yOz , нулевые значения критерия получены для всей области, прилегающей к контактному пятну (рис. 1.9б). Ненулевые значения получены в смежных с ней областях. Картина изолиний для плоской сетки, протягиваемой вдоль оси Oz через подконтактную область, показана на рис. 1.9в. Максимальное значение критерия 145 МПа получено для узла, расположенного на оси Oy на глубине 2 мм.

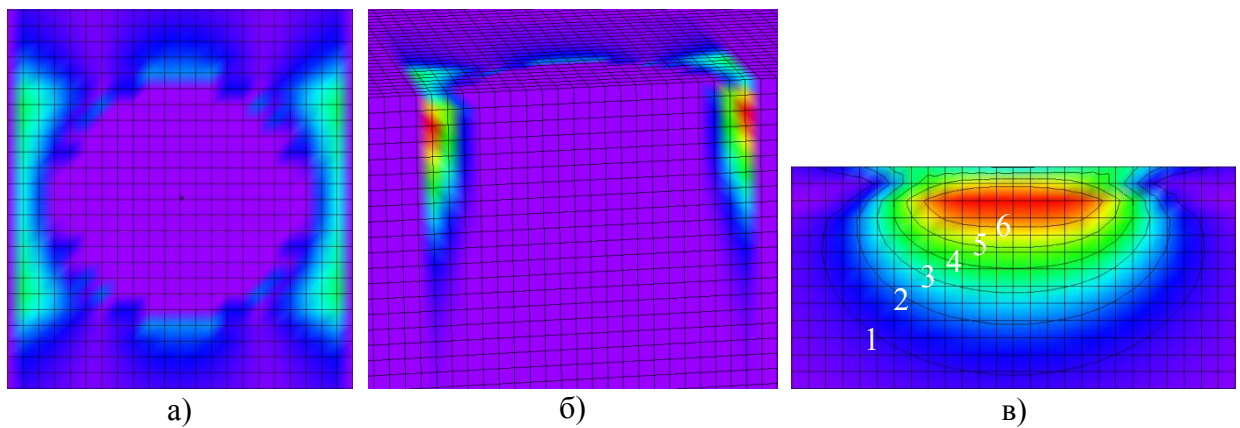


Рис. 1.9. Изолинии значений критерия Данг Вана в области эллиптического контакта с эксцентриситетом $e = 0,2$ при действии нормальной силы: а – на поверхности контакта; б – в плоскости yOz ; в – в узлах плоской сетки, протягиваемой вдоль оси Oz через область, прилегающую к контакту; 1-6 – номера изолиний

Значение критерия зависит от длины выбранного пути точки (рис. 1.5). От неё зависит среднее значение максимального касательного напряжения τ_{mid} , вычисляемое по формуле (1.10), и, соответственно, "амплитудное" значение τ_a (1.14).

Исследовано влияние касательных сил, возникающих при полном скольжении колеса вдоль оси Oz , при двух значениях коэффициента трения $f = 0,17$ и $f = 0,3$. Изолинии значений критерия представлены на рис. 1.10: на поверхности контакта (рис. 1.10а), в плоской сетке (рис. 1.10б,в). На рис. 1.10б,в показано одинаковое число изолиний – семь, но цены изолиний разные. Максимальное значение критерия при коэффициенте трения $f = 0,17$ составило 185 МПа, при $f = 0,3$ достигло 211 МПа.

Такой же анализ был проведен для контактов с эксцентриситетами $e = 0,6$ и $e = 0,9$. Получены аналогичные картины распределений значений критерия. На рис. 1.11 показаны картины распределения критерия в плоской сетке с эксцентриситетом пятна контакта $e = 0,9$.

В табл. 1.3 приведены максимальные значения критерия и глубина под поверхностью контакта, на которой находится точка с максимальным значением критерия, для рассматриваемых вариантов.

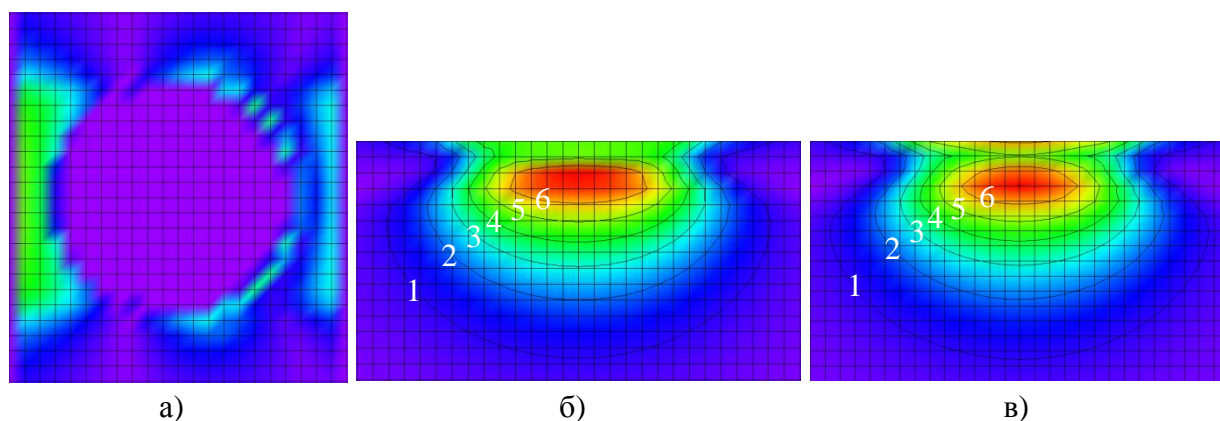


Рис. 1.10. Изолинии значений критерия Данг Вана в области эллиптического контакта с эксцентриситетом $e = 0,2$ при действии нормальной N и касательной силы $F_z = fN$:
 а, б – $f = 0,17$; в – $f = 0,3$;
 а – на поверхности контакта; б, в – в узлах плоской сетки, протягиваемой вдоль оси Oz

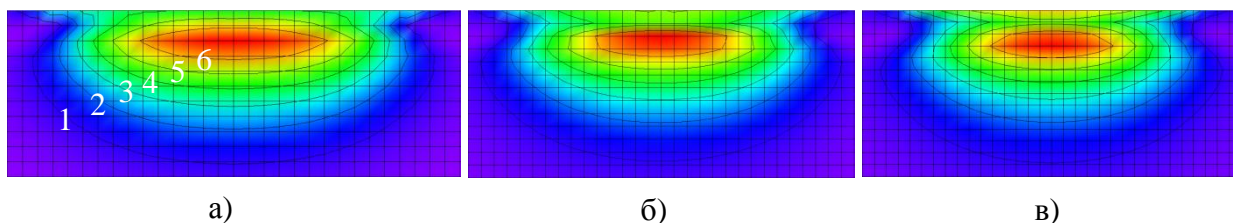


Рис. 1.11. Изолинии значений критерия Данг Вана в узлах плоской сетки, протягиваемой вдоль оси Oz через подконтактную область эллиптического контакта с эксцентриситетом $e = 0,9$ при действии нормальной N и касательной силы $F_z = fN$:
 а – $f = 0$; б – $f = 0,17$; в – $f = 0,3$

Таблица 1.3

Максимальные значения критерия Данг Вана и координаты у точки с максимальным значением критерия в зависимости от эксцентриситета e эллипса пятна контакта и коэффициента трения f

| Эксцентриситет e | | 0,2 | | 0,6 | | 0,9 | |
|-----------------------------|------------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| | | τ_{DV} , МПа | y , мм | τ_{DV} , МПа | y , мм | τ_{DV} , МПа | y , мм |
| Силы в контакте N и F_z | $f = 0$ | 145 | 2 | 154 | 2 | 139 | 2 |
| | $f = 0,17$ | 185 | 2 | 185 | 3 | 178 | 2 |
| | $f = 0,3$ | 211 | 3 | 206 | 3 | 201 | 3 |

Форма пятна контакта оказывает слабое влияние на максимальное значение критерия.

Использование критерия Данг Вана приводит к возрастающей роли касательных сил: максимальное значение критерия увеличивается на 25,3% при значении коэффициента трения $f = 0,17$ и на 41,5% при $f = 0,3$.

Критерий Данг Вана позволяет учесть гидростатическое напряжение и остаточные напряжения.

Критерий Данг Вана применяется в расчётах на прочность при переменных напряжениях и трёхосном напряжённом состоянии. Оценка прочности выполняется с использованием диаграммы, две ветви которой представлены неравенствами (1.8). Если точка, представляющая цикл переменных напряжений, расположена в области безопасных состояний, считается, что прочность обеспечена, и усталостные повреждения не накапливаются.

Если критерий Данг Вана используется в качестве критерия контактно-усталостного разрушения, для построения кривой контактной усталости необходимо определить значения критерия при испытательных нагрузках. Он представлен левой частью неравенств (1.8) и может быть истолкован как длина отрезка, отсекаемого прямой, параллельной ветви диаграммы, проведенной через точку, представляющую цикл. При большом отрицательном гидростатическом напряжении, присущем контактной задаче, значение критерия невелико и даже может иметь знак минус.

В результате, в области с наибольшими значениями компонентов напряжений, расположенных под контактным пятном, критерий принимает значение ноль. Доминирующее влияние на значение критерия оказывают периферийные области, примыкающие к области контакта.

1.2.5.3. Комбинированный критерий

Пусть напряжённое состояние в точке твёрдого тела задано главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (рис. 1.12а). Разделим его на два состояния [25]. Состояние I с напряжениями σ_h связано с изменением объёма элемента (рис. 1.12б). Среднее напряжение

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1.15)$$

называется гидростатическим напряжением. Оно вызывает всестороннее растяжение или сжатие.

Состояние II с напряжениями

$$\begin{aligned} \sigma'_1 &= \sigma_1 - \sigma_h, \\ \sigma'_2 &= \sigma_2 - \sigma_h, \\ \sigma'_3 &= \sigma_3 - \sigma_h \end{aligned} \quad (1.16)$$

на гранях элемента связано с изменением его формы (рис. 1.12в).

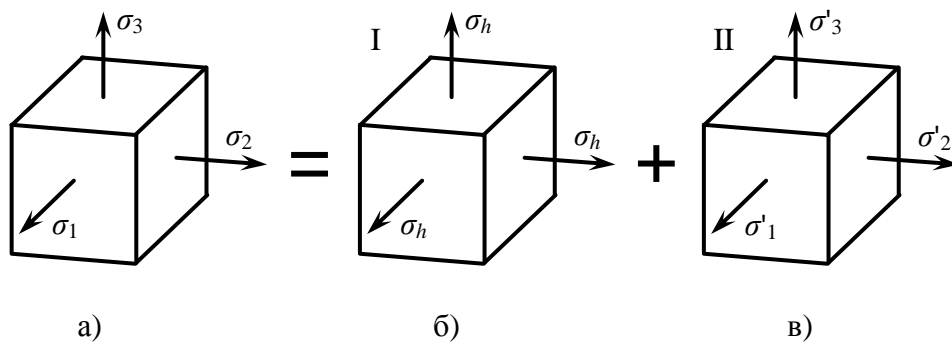


Рис. 1.12. Разделение напряжённого состояния в точке на два:
I – вызывающее изменение объёма элемента;
II – вызывающее изменение формы элемента

В соответствии с этим разделением потенциальная энергия изменения формы элемента равна

$$U_0^F = \frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \quad (1.17)$$

потенциальная энергия изменения объёма

$$U_0^V = \frac{1 - 2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2, \quad (1.18)$$

где E – модуль упругости материала; ν – коэффициент Пуассона.

Принимая во внимание, что в случае всестороннего сжатия тела не разрушаются, Мизес исключил энергию изменения объёма из рассмотрения и получил критерий, учитывающий энергию изменения формы

$$\sigma_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}. \quad (1.19)$$

Соотношение между энергиями зависит от напряжённого состояния и может варьироваться в широких пределах. При чистом сдвиге энергия изменения объёма равна нулю. Для одноосного растяжения выражения для энергий записываются в следующем виде

$$U_0^F = \frac{1 + \nu}{6E} 2\sigma_{tens}^2, \tag{1.20}$$

$$U_0^V = \frac{1 - 2\nu}{6E} \sigma_{tens}^2. \tag{1.21}$$

Если коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$ энергия изменения формы в 6,5 раз больше энергии изменения объёма.

Если на выбранный элемент тела действуют напряжения, равные по величине $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_n$, энергия изменения формы и, следовательно, эквивалентное напряжение σ_{Mises} равно нулю независимо от того, являются ли они растягивающими или сжимающими.

Давиденков и Фридман предложили объединённую теорию прочности, которая учитывает механическое состояние материала [26]. Диаграмма состояния материала представлена графиком, построенным в координатах: эквивалентное напряжение, определяемое по второй теории прочности – максимальное касательное напряжение (рис. 1.13).

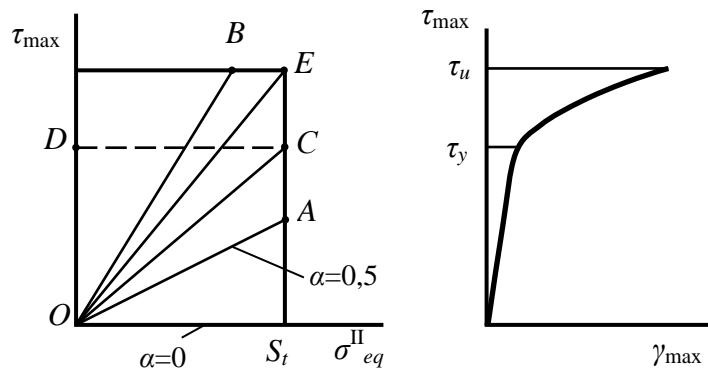


Рис. 1.13. Диаграмма механического состояния материала

Напряжённое состояние характеризуется соотношением $\alpha = \tau_{max} / \sigma_{max}^II$. Вертикальная линия диаграммы отсекает на оси абсцисс отрезок равный действительному сопротивлению отрыву S_t . Если луч, угол наклона которого определяется отношением α , пересекает эту линию, материал разрушается путём отрыва. Всестороннее растяжение характеризуется лучом, проходящим по оси абсцисс. Он представляет собой наиболее жёсткое нагружение, при котором даже пластичные материалы разрушаются путём отрыва. Противоречивый результат получается при оценке такого случая нагружения в соответствии с теорией Мизеса – эквивалентное напряжение равно нулю. Причиной этого является исключение из анализа энергии изменения объёма при всестороннем растяжении или сжатии.

С другой стороны, контактная задача имеет свою особенность. В точках области, прилегающей к контакту, преобладает всестороннее сжатие. Соотношение энергий изменяется в пользу энергии изменения объёма. Это можно увидеть на примере контакта колеса и рельса. Возьмём следующие исходные данные: диаметр круга катания колеса 950 мм, радиус кривизны профиля рельса 500 мм, нагрузка от колеса на рельс равна 120 кН.

Напряжения в точке, расположенной на поверхности в центре эллиптического пятна контакта, равны

$$\sigma_x = -0,797p_0; \sigma_y = -0,8036p_0; \sigma_z = -p_0,$$

где $p_0 = 1056,6$ МПа – максимальное давление.

Энергия изменения объёма в 26 раз больше, чем энергия изменения формы. Получается, что компонент, во много раз превышающий энергию изменения формы, не используется при оценке прочности.

Критерий Данг Вана (п. 1.2.5.2) учитывает гидростатическое напряжение. В критерии Данг Вана гидростатическое напряжение умножается на коэффициент α_{DV} , который принимается равным 0,38 для колёсных сталей. При высоком гидростатическом напряжении порядка -916 МПа в рассматриваемом примере для точек, расположенных в области, прилегающей к контакту, этот отрицательный член по абсолютной величине превосходит "амплитудное" значение максимального касательного напряжения, что приводит к отрицательному значению критерия.

Разработчиками модулей **UM RCF Wheel** и **UM RCF Rail** предлагается комбинированный критерий контактно-усталостного разрушения [27], полученный на основе оценки прочности малого элемента тела, на который действуют напряжения, вызывающие изменение его формы и объёма. Критериальные теории прочности применялись в соответствии со следующей схемой.

С использованием соответствующего критерия определяется одноосное растягивающее напряжение, эквивалентное трёхосному напряжённому состоянию. Для оценки прочности под действием напряжений, вызывающих изменение формы, можно использовать третью или четвертую теорию прочности. Теория прочности Мизеса предпочтительнее, так как она учитывает все три главных касательных напряжения. Тогда эквивалентное одноосное напряжение равно

$$\sigma_{eq}^F = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}. \quad (1.22)$$

Для оценки прочности элемента, на который действует гидростатическое напряжение, может быть применена первая или вторая теория прочности. Для легированных сталей применяется вторая теория прочности.

Тогда эквивалентное напряжение одноосного растяжения

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3), \quad (1.23)$$

или, учитывая $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_h$, получаем

$$\sigma_{eq}^V = (1 - 2\nu)\sigma_h. \quad (1.24)$$

Тогда одноосное напряжение, эквивалентное трёхосному напряжённому состоянию, определяемому главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, равно

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} + (1 - 2\nu)\sigma_h. \quad (1.25)$$

Исследование распределения значений эквивалентного напряжения в области, прилегающей к пятну контакта эллиптической формы, выполнялось с помощью конечноэлементной модели параллелепипеда (рис. 1.5), описанной в п. 1.2.5.1. Величина эквивалентного напряжения определялась для каждого положения j узла i с использованием выражения (1.25). Набор их значений определял цикл переменных напряжений для узла i . Харак-

теристики цикла переменного напряжения, эквивалентного трёхосному напряжённому состоянию, определялись как

$$\sigma_m = (\sigma_{eq}^{max} + \sigma_{eq}^{min})/2, \tag{1.26}$$

где σ_m – среднее значение напряжения цикла;

$$\sigma_a = (\sigma_{eq}^{max} - \sigma_{eq}^{min})/2, \tag{1.27}$$

где σ_a – амплитудное значение напряжения цикла.

В расчётах на усталость используется диаграмма предельных напряжений Хейя. Серенсен и Кинасошвили [28] предложили аппроксимацию этой диаграммы (рис. 1.14).

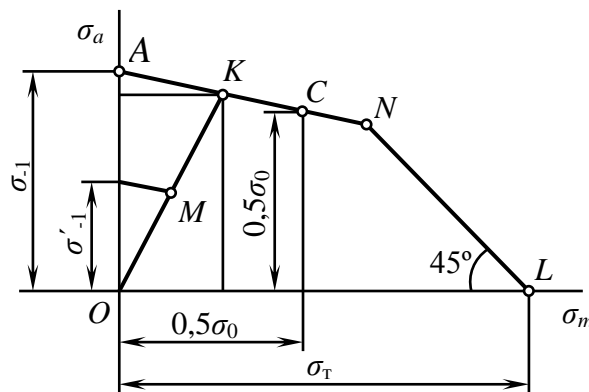


Рис. 1.14. Аппроксимированная диаграмма Серенсена-Кинасошвили

Отрезок, который ограничивает прочность по усталостному разрушению, строится по результатам двух испытаний. Испытания при симметричном цикле позволяют получить предел усталости σ_{-1} . На диаграмме он представляется точкой A (рис. 1.14). Испытания при отнулевом цикле дают значение предела усталости σ_0 , который представляется точкой C с координатами

$$\sigma_m = \frac{\sigma_0}{2}, \sigma_a = \frac{\sigma_0}{2}. \tag{1.28}$$

Через точки A и C проводится прямая, аппроксимирующая предельную кривую. Тангенс угла наклона этой прямой равен

$$\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}. \tag{1.29}$$

Коэффициент ψ_σ называется коэффициентом чувствительности материала к асимметрии цикла. Значения коэффициента ψ_σ в зависимости от предела прочности материала σ_B приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Зависимость коэффициента чувствительности материала к асимметрии цикла от предела прочности материала

| | | | | | |
|------------------|---------|---------|----------|-----------|-----------|
| σ_B , МПа | 350-550 | 520-750 | 700-1000 | 1000-1200 | 1200-1400 |
| ψ_σ | 0 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,25 |

По данным из табл. 1.4 в результате линейной аппроксимации с помощью метода наименьших квадратов получена зависимость

$$\psi_\sigma = 0,000301\sigma_B - 0,141. \tag{1.30}$$

Введение коэффициента ψ_σ позволяет выразить параметры цикла, который представлен точкой K , через параметр симметричного цикла σ_{-1} . Аналогично, параметры цикла, который представлен точкой M , могут быть выражены через параметр σ'_{-1} эквивалентного симметричного цикла.

Тогда отношение

$$\frac{\sigma_{-1}}{\psi_\sigma \sigma_m + \sigma_a} \tag{1.31}$$

можно рассматривать как коэффициент запаса сопротивления усталости, а

$$\sigma_{RCF} = \psi_\sigma \sigma_m + \sigma_a \tag{1.32}$$

как критерий контактно-усталостного разрушения.

Распределение значений эквивалентного напряжения и комбинированного критерия в области, прилегающей к пятну контакта эллиптической формы с эксцентриситетом $e = 0,2$, исследовано с помощью конечноэлементной модели параллелепипеда (рис. 1.5). Описание модели и условия тестирования приведены в п. 1.2.5.1.

Изолинии значений эквивалентного напряжения в плоскости yOz в области, прилегающей к герцевскому контакту и на его поверхности, показаны на рис. 1.15а. Наибольшее значение эквивалентного напряжения 480 МПа получено для точки, расположенной на глубине 4,5 мм под поверхностью контакта. Область с отрицательными значениями напряжений σ_{eq} расположена вблизи центра контакта. В центре контакта они достигают -118 МПа.

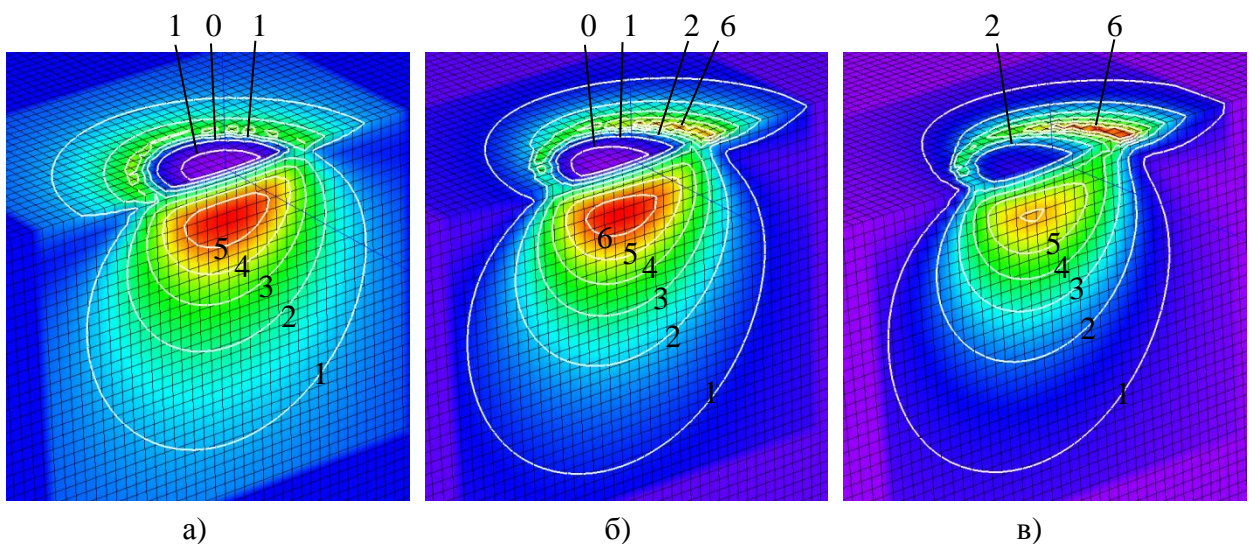


Рис. 1.15. Изолинии значений эквивалентного напряжения σ_{eq} в плоскости yOz в области эллиптического контакта с эксцентриситетом $e = 0,2$ при действии нормальной N и касательной $F_z = fN$: а – $f = 0$; б – $f = 0,17$; в – $f = 0,3$; 1-6 – номера изолиний

Изучено влияние касательных сил, возникающих при полном скольжении колеса вдоль положительного направления оси Oz , которые связаны прямой пропорциональностью с давлениями (1.3) для двух значений коэффициента трения $f = 0,17$ и $f = 0,3$. Изолинии эквивалентных напряжений показаны на рис. 1.15б,в. Напряжение в точке, расположенной ниже поверхности контакта, растёт незначительно с увеличением коэффициента трения: до 487 МПа при $f = 0,17$ и до 507 МПа при $f = 0,3$. Эта точка смещена вдоль оси Oz на 1,05 мм и 2 мм и вдоль оси Oy на 4 мм соответственно. Эквивалентное напряжение на контактной поверхности резко возрастает от -118 до 443 МПа при $f = 0,17$ и до 588 МПа при $f = 0,3$. Точка с наибольшим напряжением перемещается к поверхности контакта и располагается у сбегающего края контактного пятна.

Эти линии показывают тот же самый максимальный порядок изолиний – седьмой, но цена изолинии отличается. Максимальное значение положительного эквивалентного напряжения при $f = 0,17$ составляет 560 МПа. При $f = 0,3$ точка с максимальным положительным напряжением 650 МПа расположена на поверхности контакта.

Множество эквивалентных напряжений в точках j , занимаемых узлом i при протягивании плоской сетки через подконтактную область (рис. 1.5), представляет собой цикл переменных напряжений для этого узла. Максимальное и минимальное значения напряжений, а также среднее значение σ_m (1.26) и амплитудное значение σ_a (1.27) определяются для полученного цикла. Значение критерия получается путём их подстановки в уравнение (1.32). Изолинии значений комбинированного критерия в узлах плоской сетки A представлены на рис. 1.16.

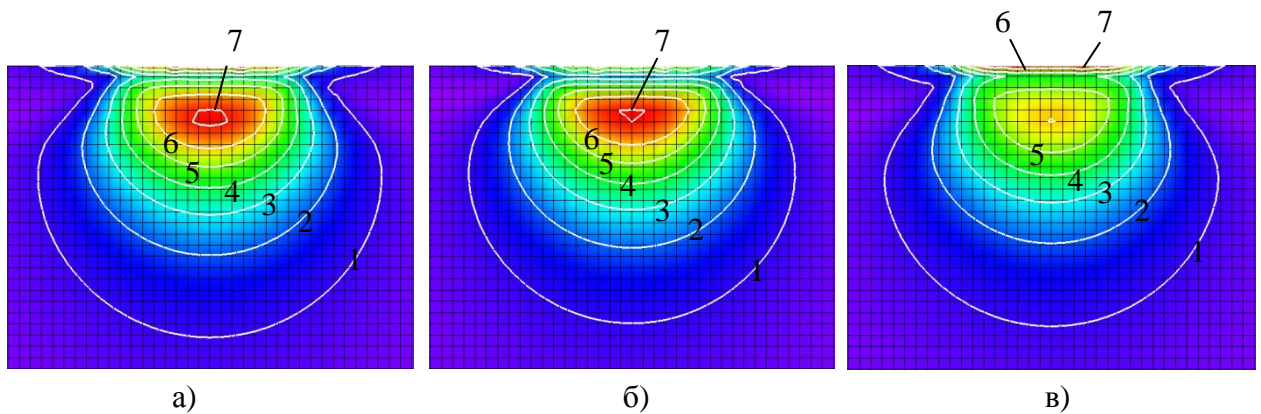


Рис. 1.16. Изолинии значений комбинированного критерия σ_{RCF} в узлах плоской сетки A при действии нормальной N и касательной силы $F_z = fN$:
 а – $f = 0$; б – $f = 0,17$; в – $f = 0,3$; 1-6 – номера изолиний

Наибольшие значения критерия для вариантов $f = 0$ и $f = 0,17$ получены для точек, расположенных на глубине 4,5 мм от поверхности контакта. Они составили 267 и 273 МПа соответственно. При коэффициенте трения $f = 0,3$ точка с наибольшим значением критерия 328 МПа смещается на поверхность контакта. Максимальное значение критерия в подконтактном слое на глубине 5 мм составляет 277 МПа.

Таким образом, получены распределения значений эквивалентных напряжений, не противоречащих оценкам по теориям Треска и Мизеса. Наибольшее эквивалентное напряжение получается в точке, расположенной в подконтактном слое, когда к телам при-

кладывается только нормальная сила. Точка с наибольшим значением эквивалентного напряжения смещается на контактную поверхность, когда одно тело скользит относительно другого с коэффициентом трения, равным 0,3. Отрицательное значение напряжения наблюдается в небольшой области, прилегающей к пятну контакта.

Критерий Данг Вана (п. 1.2.5.2), позволяющий анализировать многоосное напряжённое состояние с учётом гидростатического напряжения, нашёл применение в расчётах деталей сложных геометрических форм. Проблема учёта гидростатического напряжения была отмечена в работах А. Экберга. Она заключается в том, что для точек, расположенных в области пятна контакта, значение гидростатического напряжения, входящего в критерий, получается большим и отрицательным, поэтому этот член может превышать по абсолютной величине "амплитуду" максимального касательного напряжения. В результате критерий может иметь отрицательное значение.

В предлагаемом критерии важную роль играет только одна составляющая гидростатического напряжения, а две другие входят в него с умножением на $-v$.

Критерий позволяет учитывать остаточные напряжения в материале колеса, а также температурные напряжения, возникающие при колодочном торможении.

1.2.6. Испытания на контактную усталость

Построение кривых контактной усталости требует решения двух проблем: определения значения критерия σ_{eq} для разных уровней нагрузки и определения констант материала C и m в выражении (1.1).

Для испытания материалов на контактную усталость в лабораторных условиях обычно используются образцы в форме роликов или дисков диаметром 30-40 мм и толщиной 8-12 мм (рис. 1.17). Один ролик изготавливается из колёсной стали, другой – из рельсовой. В некоторых работах ролик, изготовленный из рельсовой стали, называют контролликом [29]. Контролик также может быть изготовлен из высокопрочной стали или сплава ВК-8 (W 92%, Co 8%), имеющего твёрдость 88 HRA.

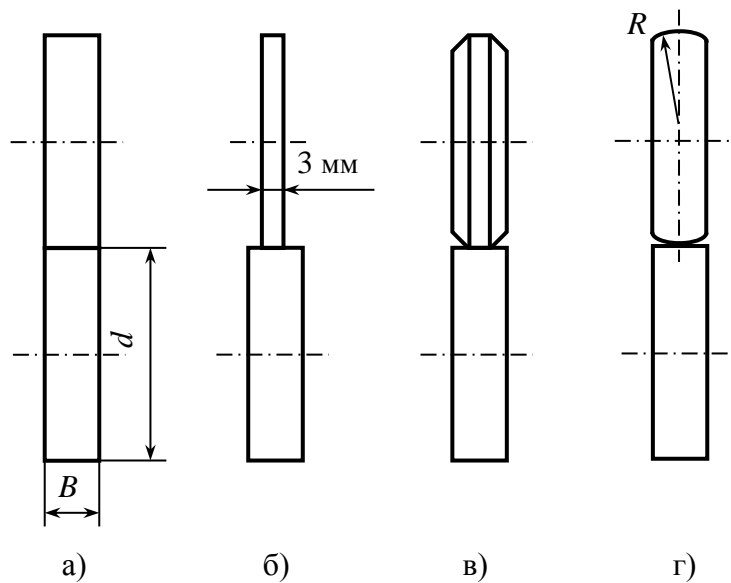


Рис. 1.17. Образцы для испытаний колёсных сталей на контактную усталость

Материал образца в области контакта находится в состоянии плоской деформации. У торцов напряжённое состояние является плоским, поэтому толщина образца должна быть достаточной, чтобы влиянием торцов можно было пренебречь.

При размерах образцов $d = 40$ мм и $B = 8$ мм для получения максимального контактного давления порядка 2000 МПа необходимо приложить нагрузку 9,16 кН. Уменьшение нагрузки достигается за счёт уменьшения длины полосы контакта B (рис. 1.17а). Для этого используют контролик толщиной 3 мм (рис. 1.17б) либо ролики с шириной дорожки катания 3-4 мм (рис. 1.17в). Используются также контролики с тороидальной поверхностью катания (рис. 1.17г).

Ещё одна особенность испытаний на контактную усталость – появление пластических деформаций в материалах образцов даже при сравнительно небольших герцевских давлениях, влияние которых должно быть учтено.

При разработке модуля **UM RCF** использовались результаты испытаний на контактную усталость, предоставленные д.т.н. Д.П. Марковым. Испытания проводились в Научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). Образцы для

испытаний изготавливались из колёсных сталей, имеющих различный химический состав. Для этого были выполнены девять опытных плавков (ОП).

В п. 1.2.3 отмечалось, что самым мощным фактором, влияющим на контактную усталость колёсных сталей, является их твёрдость [15]. Поэтому твёрдость была взята в качестве критерия отбора стали. Были выбраны три опытных плавки, охватывающие диапазон твёрдости от 260 до 320 НВ. Кроме того, они близки к сталям марок 2, Л и Т [10] по своим характеристикам. Далее в руководстве стали будут называться по номерам опытных плавков.

Опытные плавки 6, 2 и 9 по содержанию углерода соответствуют сталям марок 2, Л и Т в указанном порядке (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Характеристики материалов опытных плавков

| Номер опытной плавки | Массовая доля углерода, % | Твёрдость, НВ |
|----------------------|---------------------------|---------------|
| 6 | 0,57 | 269 |
| 2 | 0,54 | 295 |
| 9 | 0,73 | 322 |

Образцы для испытаний вырезались на расстоянии 10 мм от поверхности катания колеса. Использовались цилиндрические образцы диаметром 40 мм. Тороидальный ролик диаметром 38,6 мм с радиусом тора 18 мм, выполненный из твёрдого сплава ВК-8, использовался в качестве контролика. Скорость вращения образца составляла 1500 об/мин. Образцы катались без скольжения. На поверхности качения подавалось масло И-20. Испытания проводились на пяти уровнях нагрузки. На каждом уровне нагрузки испытывалось от одного до пяти образцов. Результаты испытаний приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Зависимость контактной долговечности образцов от нагрузки

| Нагрузка, Н | Долговечность, число циклов · 10 ⁵ | | |
|-------------|---|-------|-------|
| | ОП6 | ОП2 | ОП9 |
| 120 | 8,71 | 11,73 | 18,90 |
| 300 | 5,12 | 5,86 | 9,14 |
| 600 | 2,82 | 3,21 | 5,78 |
| 900 | 2,90 | 2,80 | 3,87 |
| 1200 | 1,89 | 2,16 | 2,91 |

1.2.7. Диаграммы деформирования колёсных сталей

Для решения контактных задач в упругопластической постановке для испытываемых образцов были получены диаграммы деформирования колёсных сталей марок 2, Л и Т [10]. Испытания на растяжение длинных цилиндрических образцов диаметром 10 мм проводились на Выксунском металлургическом заводе (ВМЗ). Полученные значения предела

текучести, условного предела текучести и предела прочности при растяжении сталей представлены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Характеристики прочности и пластичности колёсных сталей

| Параметр | Марка стали | | |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Л | 2 | Т |
| Предел текучести, МПа | 655 | 624 | 747 |
| ε_T | $3,28 \cdot 10^{-3}$ | $3,12 \cdot 10^{-3}$ | $3,73 \cdot 10^{-3}$ |
| Предел прочности при растяжении, МПа | 931 | 887 | 1121 |

Для использования диаграмм деформирования в расчётах выполнена их кусочно-линейная аппроксимация. Связь между напряжениями и деформациями для i -го отрезка представлена как

$$\bar{\sigma} = a_i + b_i \bar{\varepsilon}, \tag{1.33}$$

где $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_i / \varepsilon_T$ – нормированная интенсивность деформаций;

ε_i – интенсивность деформаций;

ε_T – деформация, соответствующая пределу текучести;

$\bar{\sigma} = \sigma_i / \sigma_T$ – нормированная интенсивность напряжений;

σ_i – интенсивность напряжений;

σ_T – предел текучести материала образца;

a_i, b_i – безразмерные коэффициенты для i -го отрезка диаграммы.

Аппроксимированные диаграммы деформирования для сталей марок 2 и Л показаны на рис. 1.18.

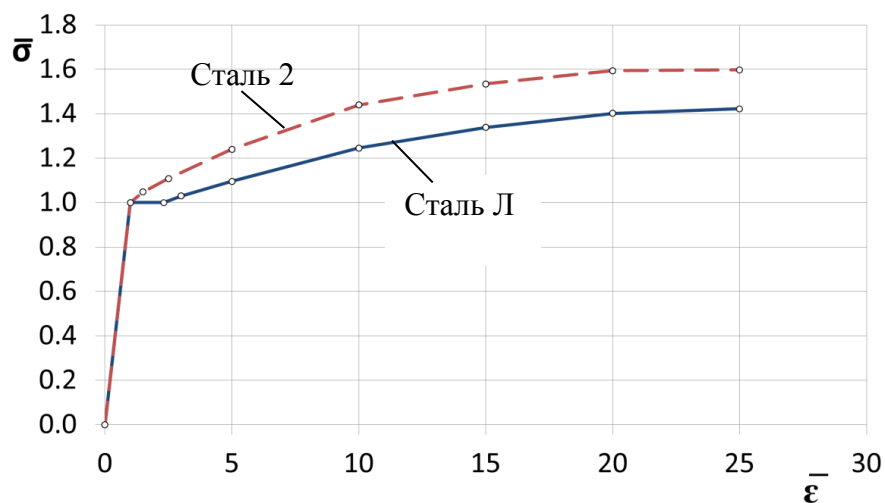


Рис. 1.18. Аппроксимированные диаграммы деформирования колёсных сталей

Значения коэффициентов полигональной аппроксимации в выражении (1.33) для восьми участков диаграмм деформирования сталей марок 2, Л и Т приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

**Параметры полигональной аппроксимации
диаграмм деформирования колёсных сталей**

| Сталь марки Л | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Интервалы деформаций $\bar{\epsilon}$ | 0-1 | 1-2,32 | 2,32-3 | 3-5 | 5-10 | 10-15 | 15-20 | 20-25 |
| a_i | 0 | 1 | 0,898 | 0,931 | 0,946 | 1,06 | 1,15 | 1,318 |
| b_i | 1 | 0 | 0,044 | 0,033 | 0,03 | 0,0186 | 0,0126 | 0,0042 |
| Сталь марки 2 | | | | | | | | |
| Интервалы деформаций $\bar{\epsilon}$ | 0-1 | 1-1,5 | 1,5-2,5 | 2,5-5 | 5-10 | 10-15 | 15-20 | 20-25 |
| a_i | 0 | 0,904 | 0,9565 | 0,978 | 1,04 | 1,25 | 1,358 | 1,578 |
| b_i | 1 | 0,096 | 0,061 | 0,0524 | 0,04 | 0,019 | 0,0118 | 0,0008 |
| Сталь марки Т | | | | | | | | |
| Интервалы деформаций $\bar{\epsilon}$ | 0-1 | 1-1,5 | 1,5-2 | 2-4 | 4-6 | 6-8 | 8-12 | 12-16 |
| a_i | 0 | 0,93 | 0,915 | 0,959 | 1,001 | 1,046 | 1,18 | 1,329 |
| b_i | 1 | 0,07 | 0,08 | 0,058 | 0,0475 | 0,04 | 0,0233 | 0,0108 |

1.2.8. Кривые контактной усталости колёсных сталей

Напряжённно-деформированное состояние образцов исследовалось с помощью метода конечных элементов [21]. Схема испытаний и конечноэлементные модели фрагментов образца из колёсной стали и контролика показаны на рис. 1.19.

Размеры конечноэлементных моделей фрагментов образца из колёсной стали и контролика составляли 3,15 мм по осям Ox и Oz и 1,5 мм по оси Oy . Использовались восьми-узловые конечные элементы сирендипового семейства [30] с размерами рёбер 0,075 мм по осям Ox и Oz и 0,1 мм по оси Oy . Ролики имели следующие размеры: радиус цилиндрического образца из колёсной стали составлял 20 мм, радиус тороидального контролика 19,3 мм и радиус тора 18 мм. Параметры материала контролика: модуль упругости – $5,9 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона – 0,202. Параметры образца из колёсной стали: модуль упругости – $2,0 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона – 0,3. Конечноэлементная модель образца из колёсной стали содержала 26 896 узлов и 24 000 конечных элементов, контролика – 11 767 узлов и 9 600 конечных элементов.

Контактная задача качения решалась в упругопластической постановке. Для материалов колёсных сталей использовались аппроксимированные диаграммы деформирования (п. 1.2.7) со значениями коэффициентов a_i и b_i , заданными в табл. 1.8. Качение моделировалось путём последовательного сдвига контролика вдоль оси Oz на шаг, равный размеру конечного элемента. Было сделано 30 шагов, что соответствовало прокатке на расстоя-

ние 2,25 мм. Такого расстояния достаточно, чтобы исключить влияние краевых эффектов на напряжённое состояние в области контакта. Контактная задача решалась для каждого положения контролика. Моделирование выполнялось для образцов всех трёх опытных плавок для пяти уровней нагрузок (п. 1.2.6).

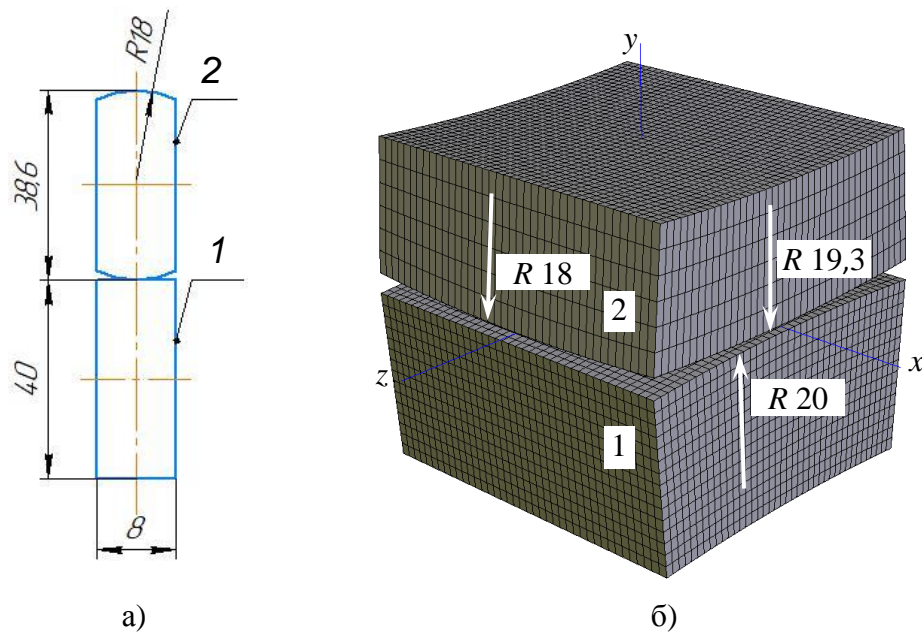


Рис. 1.19. Образец цилиндрической формы из колёсной стали (1) и контролик тороидальной формы (2): а – схема испытаний; б – конечноэлементные модели

В процессе качения контролика по образцу из колёсной стали на цилиндрической поверхности образца образовывался жёлоб (рис. 1.20).

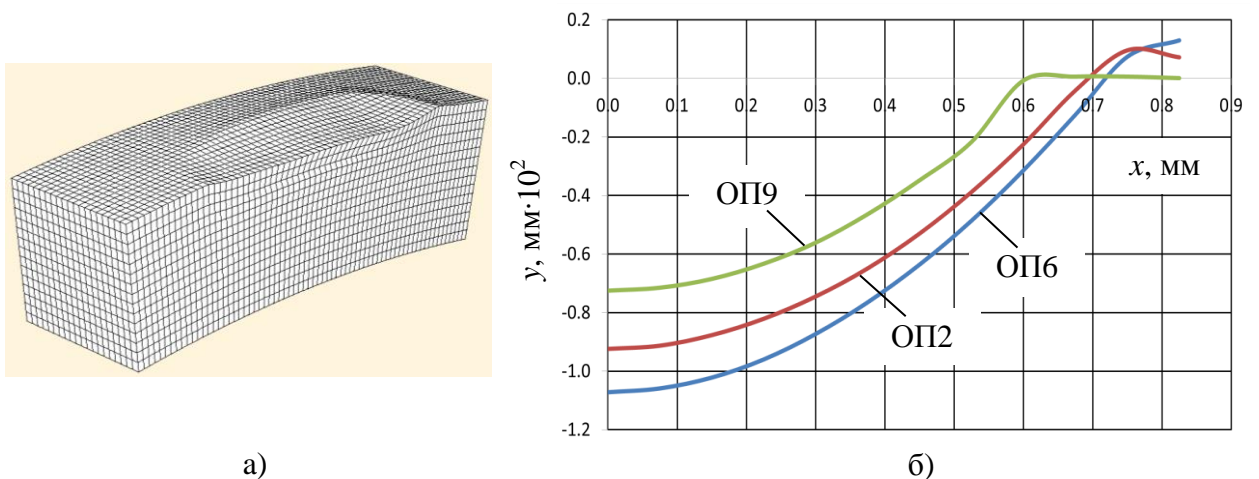


Рис. 1.20. Жёлоб, образующийся на цилиндрической поверхности образца из колёсной стали при прокатке контроликом:
 а – деформированное состояние конечноэлементной модели при образовании жёлоба (перемещения увеличены в 20 раз);
 б – профили поперечного сечения жёлоба после первой прокатки контроликом под нагрузкой 1200 Н для образцов из сталей ОП6, ОП2 и ОП9

Наибольшая глубина жёлоба получена для образца из стали ОП6. Она составила 0,0107 мм при нагрузке 1200 Н. Радиусы кривизны жёлобов в поперечном сечении были определены приблизительно. Их значения 24; 25,8 и 27,5 мм получены для образцов из сталей ОП6, ОП2 и ОП9 соответственно.

Обычно для построения кривых контактной усталости используется максимальное давление по Герцу. Однако из-за образования жёлоба реальное контактное давление будет значительно ниже максимального давления по Герцу. Например, сравнение значений максимального герцевского давления и давления, рассчитанного с помощью метода конечных элементов для образца из стали ОП2, приведено в табл. 1.9

Таблица 1.9

Максимальное давление в контакте образца из стали ОП2 и контролика

| Нагрузка, Н | 120 | 300 | 600 | 900 | 1200 |
|---|------|------|------|------|------|
| Давление p_0 по Герцу без учёта образования жёлоба, МПа | 1520 | 2059 | 2598 | 2978 | 3278 |
| Давление p_0 по МКЭ с учётом образования жёлоба, МПа | 1471 | 1643 | 1936 | 2095 | 2195 |

Максимальное давление под нагрузкой 1200 Н с учётом кривизны образовавшегося жёлоба из решения Герца в упругой постановке равно 2345 МПа. Это намного меньше, чем давление 3278 МПа, рассчитанное без учёта образовавшегося жёлоба.

Первая прокатка контролика моделировалась следующим образом. Контролик помещался в положение 0. К нему прикладывалась нагрузка. Решалась контактная задача в упругопластической постановке. Затем контролик перемещался в положение 1 на расстояние, равное длине конечного элемента. Снова решалась контактная задача. Последовательность этих действий повторялась до достижения позиции 29. Деформированное состояние поверхности образца после первой прокатки показано на рис. 1.20а. На рисунке видно, что после первой прокатки на поверхности образца образуется жёлоб. После первой прокатки для образца было получено поле остаточных напряжений.

Контролик помещался в положение 14 в центре дорожки качения для моделирования повторного нагружения. К нему прикладывалась та же нагрузка, что и при первичном нагружении. Напряжения, полученные после вторичного нагружения, использовались для определения значений критерия контактно-усталостного разрушения.

Длина прокатки контролика выбиралась так, чтобы на этой длине можно было выбрать область, где остаточные напряжения не менялись. Изолинии остаточных напряжений по Мизесу после первой прокатки показаны на рис. 1.21.

Переменное напряжённое состояние в направлении прокатки имеет место вблизи начального положения 1 и конечного положения 2. Поэтому для определения значения критерия контактно-усталостного разрушения выбиралась область модели между плоскостями А и В (рис. 1.21). Напряжения во всех узлах конечноэлементной сетки после повторного нагружения и значения критериев контактно-усталостного разрушения в узлах, расположенных в радиальном сечении образца, определялись методами, описанными в п. 1.2.5.

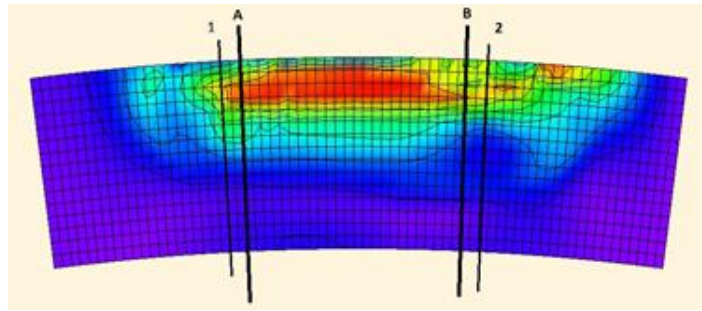


Рис. 1.21. Сечение фрагмента образца из колёсной стали вдоль продольной плоскости симметрии: 1, 2 – начальное и конечное положение контролика; АВ – сегмент, выбранный для определения значений критерия контактно-усталостного разрушения; цветовая заливка – уровни напряжений по Мизесу

Изолинии значений критерия Данг Вана (п. 1.2.5.2) в радиальном сечении образца из стали ОП2 при нагрузках 300 и 1200 Н показаны на рис. 1.22. При самых низких нагрузках самые высокие значения напряжений наблюдаются на глубине 0,4 мм (рис. 1.22а). По мере увеличения нагрузки точки с наибольшими значениями напряжений поднимаются к поверхности контакта. Существует область с нулевыми значениями критерия ниже поверхности пятна контакта. Это область с высоким отрицательным гидростатическим напряжением (рис. 1.22б). Максимальные значения критерия Данг Вана в материале образца из стали ОП2 в зависимости от прикладываемых нагрузок приведены в табл. 1.10.

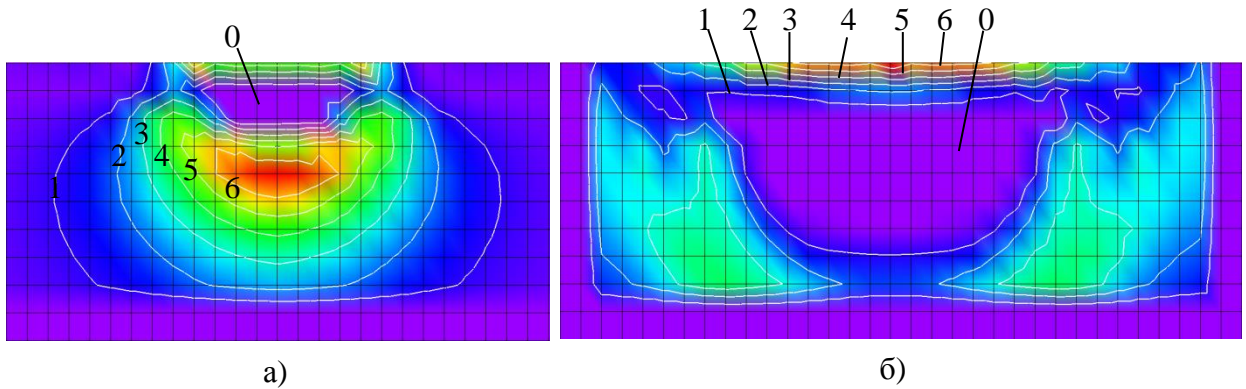


Рис. 1.22. Изолинии значений критерия Данг Вана в радиальном сечении образца из стали ОП2 при нагрузках: а – 300 Н; б – 1200 Н; 1-6 – номера изолиний

Таблица 1.10

Максимальные значения критерия Данг Вана в материале образца из стали ОП2 и его долговечность в зависимости от уровня нагрузки

| | | | | | |
|--|------|-----|------|------|-------|
| Нагрузка, Н | 1200 | 900 | 600 | 300 | 120 |
| τ_{DV} , МПа | 296 | 280 | 251 | 140 | 110 |
| Долговечность, число циклов $\cdot 10^5$ | 2,16 | 2,8 | 3,21 | 5,86 | 11,73 |

В результате аппроксимации полученных данных в соответствии с выражением (1.1) получена зависимость числа циклов до появления выщербин усталостного характера в материале образца из стали ОП2 от значения критерия Данг Вана

$$N = 5,28 \cdot 10^9 \tau_{DV}^{-1,8}. \tag{1.34}$$

Зависимость (1.34) представлена графиком на рис. 1.23.

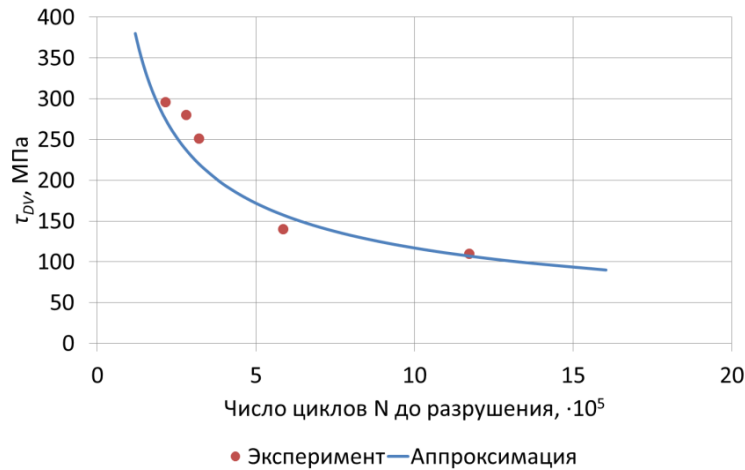


Рис. 1.23. Кривая контактной усталости колёсной стали ОП2, полученная с использованием критерия Данг Вана

Для образцов из сталей ОП6 и ОП9 были выполнены аналогичные исследования. Полученные в результате кривые контактной усталости для образцов из трёх опытных плавок показаны на рис. 1.24.

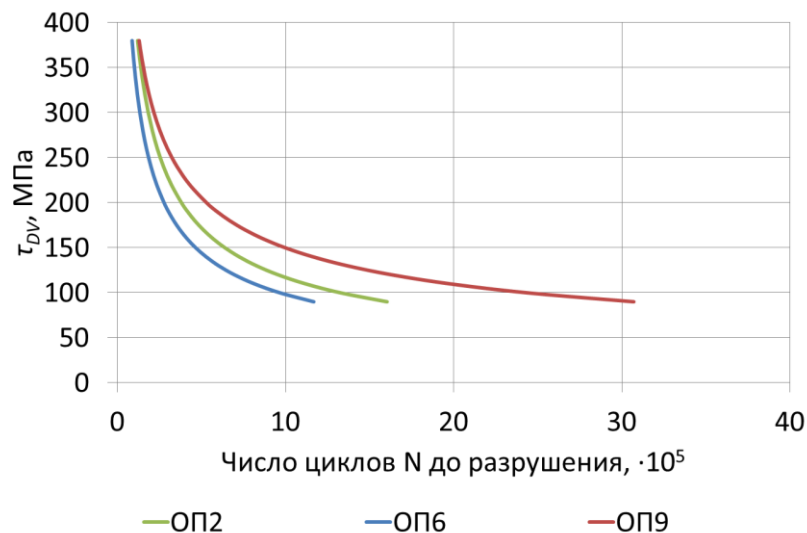


Рис. 1.24. Кривые контактной усталости колёсных сталей ОП6, ОП2 и ОП9, полученные с использованием критерия Данг Вана

Аналогично выполняются расчёты при использовании других критериев контактно-усталостного разрушения.

В соответствии с комбинированным критерием (п. 1.2.5.3) для каждого положения j узла i конечноэлементной модели (рис. 1.5) вычисляется значение эквивалентного напряжения σ_{eq} (1.25). Для полученного цикла вычисляются среднее σ_m (1.26) и амплитудное σ_a (1.27) напряжения. Значение критерия для узла i вычисляется с использованием зависимости (1.32).

Изолинии значений комбинированного критерия в радиальном сечении образца из стали ОП2 при нагрузках 300 и 900 Н показаны на рис. 1.25.

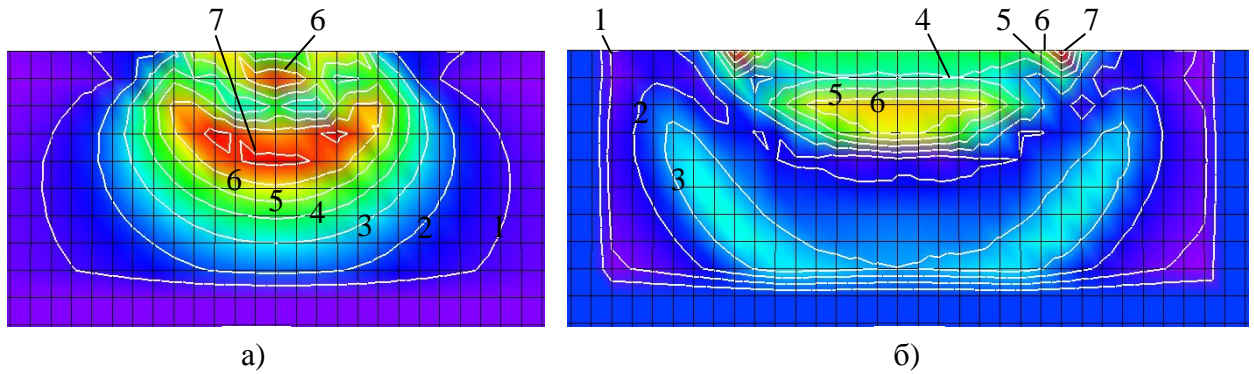


Рис. 1.25. Изолинии значений комбинированного критерия в радиальном сечении образца из стали ОП2 при нагрузках: а – 300 Н; б – 900 Н; 1-7 – номера изолиний

При нагрузке равной 300 Н наибольшее значение критерия 276 МПа наблюдается в точках, расположенных на глубине 0,3-0,4 мм от поверхности контакта (рис. 1.25а). Наибольшее значение критерия 488 МПа при нагрузке 900 Н наблюдается в точке, расположенной на поверхности образца (рис. 1.25б).

Максимальные значения комбинированного критерия в материале образца из стали ОП2 в зависимости от прикладываемых нагрузок приведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11

Максимальные значения комбинированного критерия в материале образца из стали ОП2 и его долговечность в зависимости от уровня нагрузки

| | | | | | |
|--|------|-----|------|------|-------|
| Нагрузка, Н | 1200 | 900 | 600 | 300 | 120 |
| σ_{RCF} , МПа | 450 | 488 | 462 | 276 | 263 |
| Долговечность, число циклов $\cdot 10^5$ | 2,16 | 2,8 | 3,21 | 5,86 | 11,73 |

В результате аппроксимации полученных данных в соответствии с выражением (1.1) получена зависимость числа циклов до появления выщербин усталостного характера в материале образца из стали ОП2 от значения комбинированного критерия

$$N = 3,61 \cdot 10^{10} \sigma_{RCF}^{-1,9} \tag{1.35}$$

Зависимость (1.35) представлена графиком на рис. 1.26.

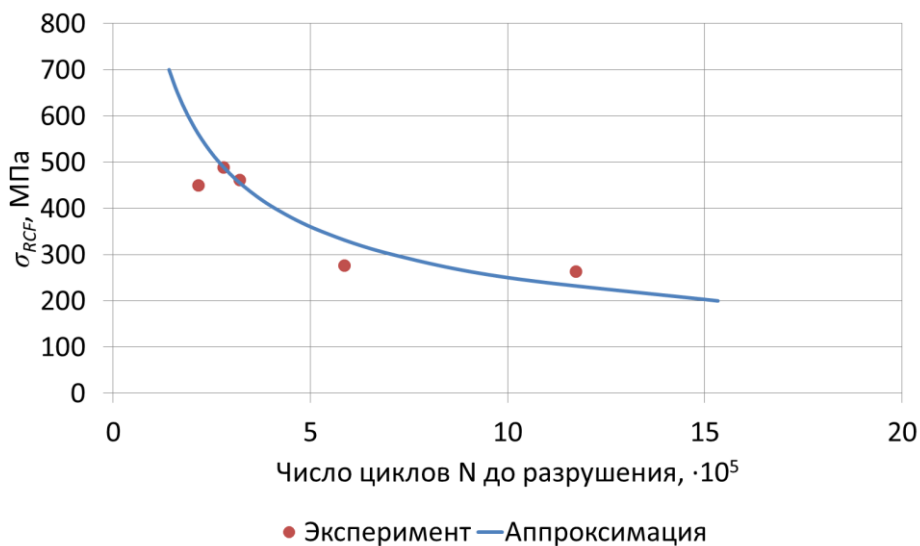


Рис. 1.26. Кривая контактной усталости колёсной стали ОП2, полученная с использованием комбинированного критерия

Для образцов из сталей ОП6 и ОП9 были выполнены аналогичные исследования. Кривые контактной усталости, полученные с использованием комбинированного критерия для образцов из трёх опытных плавок, показаны на рис. 1.27.

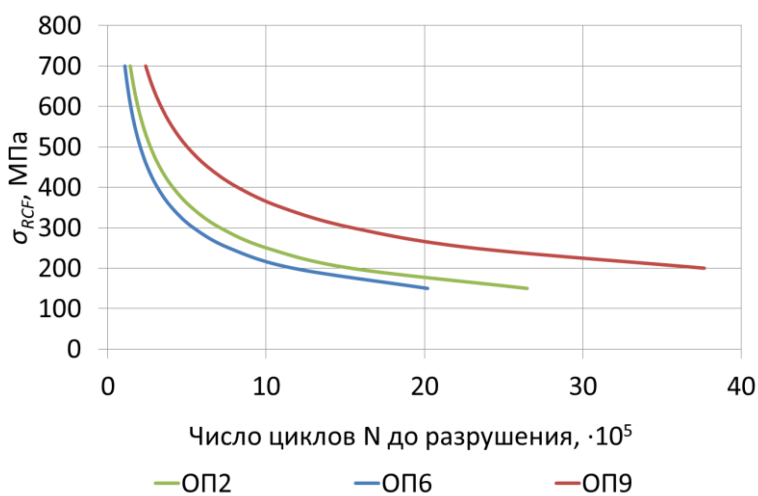


Рис. 1.27. Кривые контактной усталости колёсных сталей ОП6, ОП2 и ОП9, полученные с использованием комбинированного критерия

В соответствии с критерием амплитудного значения максимального касательного напряжения (п. 1.2.5.1) для каждого положения j узла i конечноэлементной модели (рис. 1.5) вычисляется значение τ_{max}^j (1.5), среднее значение τ_{mid} (1.6), а затем значение критерия τ_{max}^a (1.7) как амплитудное значение цикла напряжений τ_{max} .

Кривые контактной усталости, полученные с использованием критерия амплитудного значения максимального касательного напряжения для образцов из трёх опытных плавок, показаны на рис. 1.28.

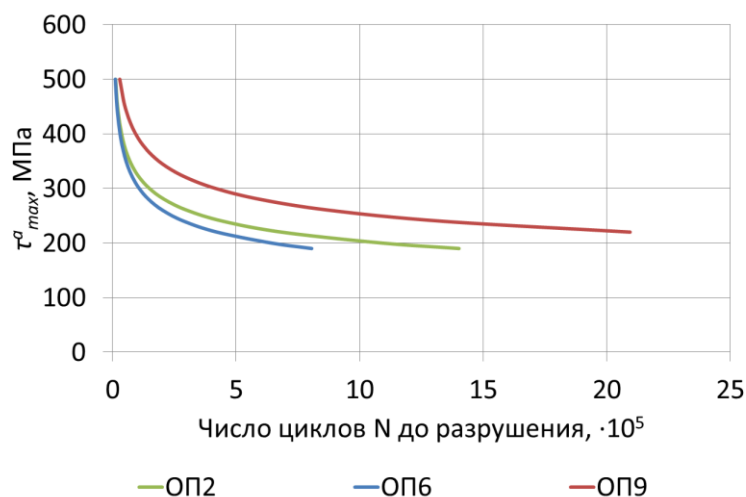


Рис. 1.28. Кривые контактной усталости колёсных сталей ОП6, ОП2 и ОП9, полученные с использованием критерия амплитудного значения максимального касательного напряжения

Для удобства использования в расчётах значения констант материала C и m в выражении кривой контактной усталости (1.1) для трёх рассмотренных выше критериев и колёсных сталей различной твёрдости из трёх опытных плавков сведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12

Значения констант материала для различных колёсных сталей и критериев контактно-усталостного разрушения

| Критерий контактно-усталостного разрушения | Колёсная сталь | Твёрдость, НВ | Константа материала в выражении для кривой контактной усталости (1.1) | |
|--|----------------|---------------|---|-----|
| | | | C | m |
| Критерий амплитудного значения максимального касательного напряжения | ОП6 | 269 | $8,566 \cdot 10^{15}$ | 4,4 |
| | ОП2 | 295 | $2,054 \cdot 10^{17}$ | 4,9 |
| | ОП9 | 322 | $5,309 \cdot 10^{24}$ | 7,7 |
| Критерий Данг Вана | ОП6 | 269 | $3,845 \cdot 10^9$ | 1,8 |
| | ОП2 | 295 | $5,280 \cdot 10^9$ | 1,8 |
| | ОП9 | 322 | $6,117 \cdot 10^{10}$ | 2,2 |
| Комбинированный критерий | ОП6 | 269 | $2,753 \cdot 10^{10}$ | 1,9 |
| | ОП2 | 295 | $3,610 \cdot 10^{10}$ | 1,9 |
| | ОП9 | 322 | $4,347 \cdot 10^{11}$ | 2,2 |

Полученные кривые контактной усталости могут быть использованы при моделировании процесса накопления контактно-усталостных повреждений для колёсных сталей, близких по своим характеристикам к характеристикам опытных плавков.

1.2.9. Кривые контактной усталости рельсовой стали

В работе [31] приведено описание испытаний на контактную усталость образцов из рельсовой стали и получены кривые контактной усталости для рельсовой стали. Значения констант материала C и m в выражении кривой контактной усталости (1.1) для рельсовой стали, полученные после обработки результатов испытаний с помощью метода конечных элементов, представлены в табл. 1.13.

Таблица 1.13

Значения констант материала для рельсовой стали в зависимости от критерия контактно-усталостного разрушения

| Критерий контактно-усталостного разрушения | Константа материала в выражении для кривой контактной усталости (1.1) | |
|--|---|-------|
| | C | m |
| Комбинированный критерий | $5,988 \cdot 10^9$ | 1,424 |
| Критерий Данг Вана | $4,966 \cdot 10^9$ | 1,606 |
| Критерий амплитудного значения максимального касательного напряжения | $3,333 \cdot 10^{10}$ | 1,767 |

1.3. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в модуле UM RCF Wheel

Так как качение колеса по рельсу является циклическим нагружением, то максимальные напряжения в любом радиальном сечении колеса возникают один раз за один оборот колеса. Исходя из этого, в модуле **UM RCF Wheel** накапливаемые усталостные повреждения приписываются одному радиальному сечению колеса.

При моделировании процесса накопления контактно-усталостных повреждений нельзя указать точку, в которой накопление повреждений будет идти наиболее интенсивно. Даже если контактирующие тела не будут взаимно перемещаться, а будет переменной нормальной сила, например, в задаче Герца будут меняться размеры полуосей эллиптического пятна контакта, а значит и положения опасных точек, как на поверхности контакта, так и в подконтактном слое.

Следовательно, расчёты необходимо проводить для некоторого множества точек, расположенных в области, прилегающей к контакту. При применении метода конечных элементов в качестве таких точек могут использоваться узлы конечноэлементной модели. Для корректного решения контактной задачи размеры расчётной схемы тел должны быть такими, чтобы выполнялось условие малости размеров контактного пятна.

Но при большом количестве степеней свободы системы потребуется значительное время для решения контактной задачи и определения напряжений в узлах. А выполнять такие расчёты необходимо многократно. Можно наметить некоторое поперечное сечение обода колеса и отслеживать значения сил в каждый момент, когда оно попадает в контакт с рельсом. Количество таких случаев должно быть достаточным, чтобы статистические данные о силах и положении колеса на рельсе были представительными.

Исходя из соображений, изложенных выше, в модуле используется фрагмент конечно-элементной модели колеса, прилегающий к контакту. Его размеры берутся такими, чтобы напряжения на гранях, которыми он выделяется, были сравнительно малыми.

1.3.1. Исходные данные

Данные, необходимые для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в модуле **UM RCF Wheel**, создаются в процессе моделирования динамики движения железнодорожного экипажа в модуле **UM Loco** ([Глава 8](#)) с помощью инструмента **UM Loco/Wheel Profile Wear Evolution** ([Глава 16](#)). На рис. 1.29 показано окно **Инспектора моделирования объекта** с настройками проекта эволюции профиля колеса.

Колёса, для которых необходимо моделировать накопление повреждений, нужно отметить флажками на дереве в группе **Контактно-усталостная долговечность**. В результате после завершения моделирования динамики движения железнодорожного экипажа в папке, указанной в графе **Каталог сохранения результатов**, будут созданы бинарные файлы с расширением ***.wld** и текстовый файл проекта контактной усталости с расширением ***.rcf**. В той же папке будут находиться файлы с результатами моделирования износа и настройками проекта эволюции. Файл проекта контактной усталости **rcf** имеет такое же название, как и модель. Файл с исходными данными **wld** содержит в названии номер колёсной пары и обозначение колеса – левое "l" или правое "r".

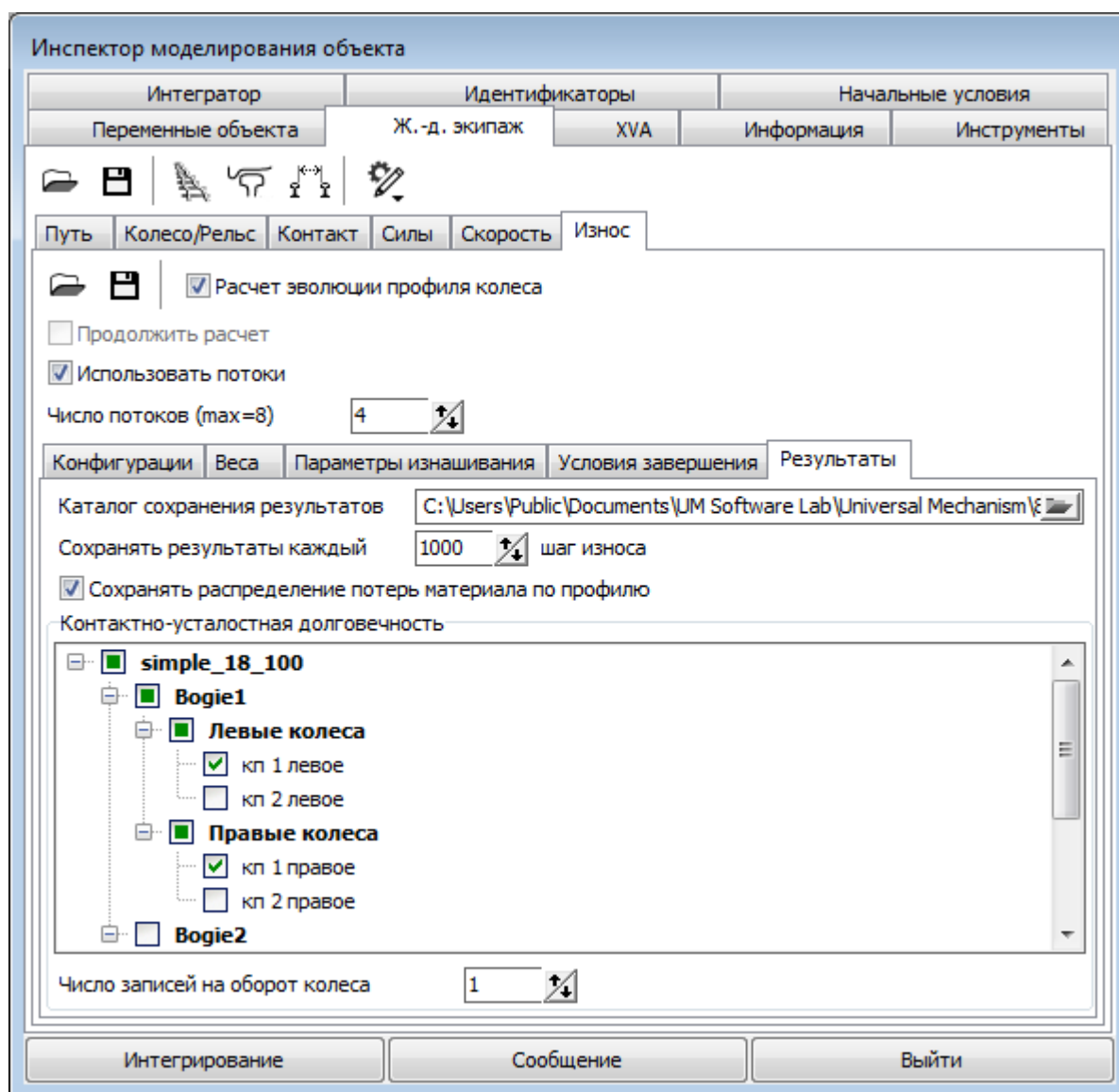


Рис. 1.29. Настройки проекта эволюции профиля колеса в **UM Simulation**

В файле с исходными данными **wld** сохраняются профили колеса, полученные в результате износа. Количество профилей зависит от числа итераций, заданных в проекте эволюции. Для каждого номера профиля хранится следующая информация:

- модуль упругости и коэффициент Пуассона материала колеса;
- радиус колеса;
- количество точек профиля колеса и их координаты;
- весовые коэффициенты;
- количество циклов нагружения;
- сведения о контакте для каждого цикла нагружения – координаты узлов сетки на поверхности пятна контакта и значения сил в узлах сетки.

Замечание. На жёстком диске должно быть достаточно места. В зависимости от настроек проекта эволюции каждый файл с исходными данными **wld** может занимать до нескольких гигабайт.

1.3.2. Создание конечноэлементной модели колеса

При решении отдельных задач, связанных с контактом колеса и рельса, размеры элементов используемых сеток выбраны такими, чтобы обеспечить минимальные затраты машинного времени при достаточной точности решения. Профили поверхностей катания колеса и рельса заданы координатами точек, расположенных с шагом 0,1 мм по контурам. Для исследования напряжённого состояния в области контакта оказалось целесообразным для трёхмерных конечноэлементных расчётных схем применить сетки с размером элементов 1 мм. Тем не менее, при использовании фрагментов, включающих области, прилегающие к поверхностям контакта, таких размеров, при которых напряжения малы на поверхностях выделения фрагмента, конечноэлементная схема содержит большое число степеней свободы. В связи с этим в расчётах использовалась схема, содержащая 10 слоёв конечных элементов, отсчитанных от поверхности контакта.

Построение конечноэлементной модели фрагмента колеса начинается с построения плоской сетки из четырёхугольных конечных элементов. Она создаётся на базе узлов, расположенных на профиле колеса с шагом 1 мм (рис. 1.30). Её размер по профилю колеса составляет 105 мм. Этот размер охватывает участок профиля, на котором происходит контактирование при любых возможных положениях колеса на рельсе. Затем строится трёхмерная сетка: поворотом относительно оси колёсной пары плоская сетка протягивается по дуге окружности (рис. 1.31). В окружном направлении размер сетки составляет 50 мм. Этот размер выбран с учётом того, что в любых случаях длина контактного пятна не превышает 50 мм.

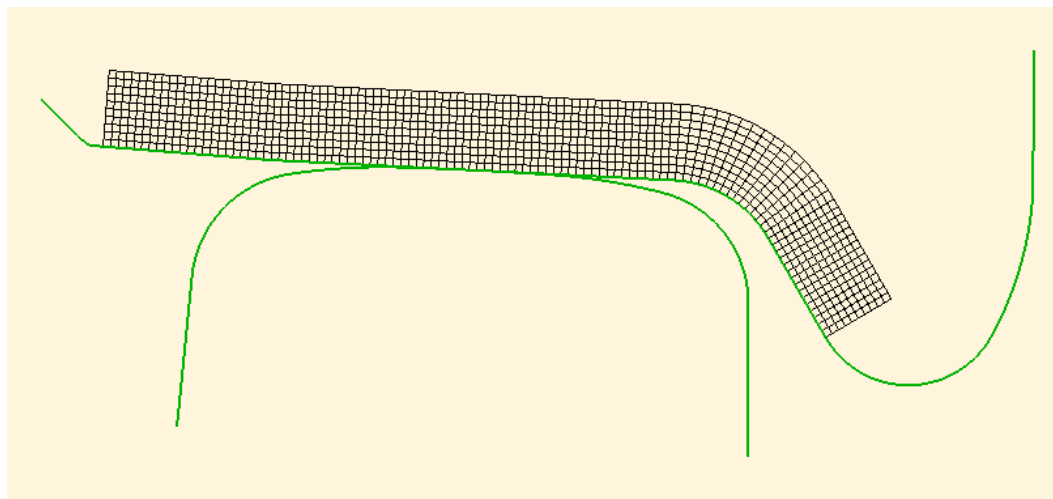


Рис. 1.30. Плоская сетка для построения конечноэлементной модели фрагмента колеса

При использовании упругого основания толщина фрагмента 10 мм обеспечивает достаточную точность решения. Наиболее вероятный размер a полуоси пятна контакта не превышает 10 мм, а точка с наибольшими касательными напряжениями располагается на глубине около $0,5a$. При выбранном размере фрагмента удаётся охватить область наибольших напряжений. Тем не менее, полученная схема характеризуется большим числом степеней свободы. Так, например, представленная на рис. 1.31 схема содержит 59 466 узлов и имеет 178 398 степеней свободы. Поэтому с целью снижения затрат машинного

времени в расчётах будет использоваться фрагмент этой схемы (см. п. 1.3.3. "Определение напряжений в области контакта колеса и рельса", с. 1-44).

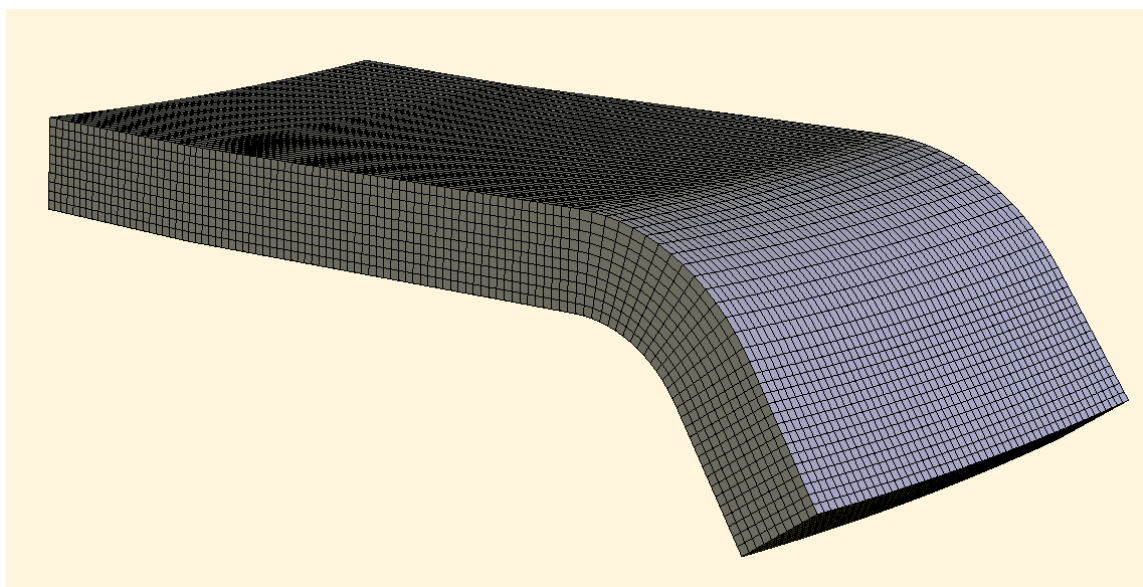


Рис. 1.31. Трёхмерная конечноэлементная модель фрагмента колеса

Формируется матрица жёсткости полученной трёхмерной конечноэлементной модели колеса, состоящей из восьмиузловых конечных элементов. На этом заканчивается подготовительный этап, и дальше начинаются расчёты для циклов нагружения.

1.3.3. Определение напряжений в области контакта колеса и рельса

Для решения задачи качения в модуле **UM Loco** используются модели контактных сил В. Кика и И. Пиотровского [32] и модель Калкера CONTACT [33] ([Глава 8](#), п. 8.5.2.5.2. "Параметры контакта инерционного рельса"). Для модели В. Кика и И. Пиотровского требуется инструмент **UM Loco/Multi-point Contact Model**, а для использования программы CONTACT – инструмент **UM Loco/CONTACT add-on interface**.

С помощью этих алгоритмов вычисляются нормальные и касательные силы в узлах двумерной сетки, расположенной на поверхности контакта. Сетка создаётся следующим образом: пятно контакта разбивается на полосы одинаковой ширины, ориентированные по направлению качения, затем каждая полоса разбивается на одинаковое количество элементов, имеющих в пределах полосы одинаковые размеры ([Глава 8](#), п. 8.4.1.2.2.3. "FASTSIM"). Определяются силы на площадке каждого элемента. Вычисленные силы приписываются центру тяжести элемента. Число полос и элементов задаётся пользователем. Поскольку в процессе качения колеса по рельсу пятна контакта меняют свою форму и размер, шаг сетки в двух направлениях также меняется для каждого нового контакта.

Для определения напряжений в узлах конечноэлементной модели фрагмента колеса необходимо приложить силы, полученные в результате решения контактной задачи, к узлам, расположенным на поверхности контакта. Однако узлы сетки, созданной при решении задачи быстрыми алгоритмами, не совпадают с узлами конечноэлементной сетки. По-

этому после загрузки исходных данных выполняется расчёт сил в узлах конечноэлементной сетки, расположенных на поверхности контакта, с помощью линейной интерполяции. При этом взаимное положение сеток друг относительно друга однозначно определяется координатами точек профиля колеса, на основе которого эти сетки создаются.

Процедура определения напряжений в узлах конечноэлементной модели колеса для каждого цикла нагружения начинается с того, что из исходной конечноэлементной схемы (см. п. 1.3.2) выделяется фрагмент (рис. 1.32а). Размеры сетки фрагмента, прилегающей к поверхности контакта, выбираются такими, чтобы они на 3 мм превышали размеры пятна контакта по каждому направлению. По толщине она имеет такой же размер, как и сетка, из которой выделяется фрагмент.

В расчётах используется схема конечноэлементного фрагмента, опирающегося на упругое основание [34], позволяющая определить напряжения и деформации в трёхмерной области, прилегающей к поверхности контакта, не прибегая ко всякого рода упрощающим предположениям таким, как: пятно имеет форму круга или эллипса, выделению критической плоскости, допущению о том, что она находится в состоянии плоской деформации. Использование такого фрагмента позволяет существенно снизить затраты машинного времени [34, 35, 36, 37].

При создании исходной конечноэлементной схемы вычисляются компоненты её матрицы жёсткости. На узлы, расположенные на всех поверхностях выделенного фрагмента, кроме поверхности контакта, накладываются упругие связи (рис. 1.32б). Жёсткость связей принимается равной 10^7 Н/м в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [37].

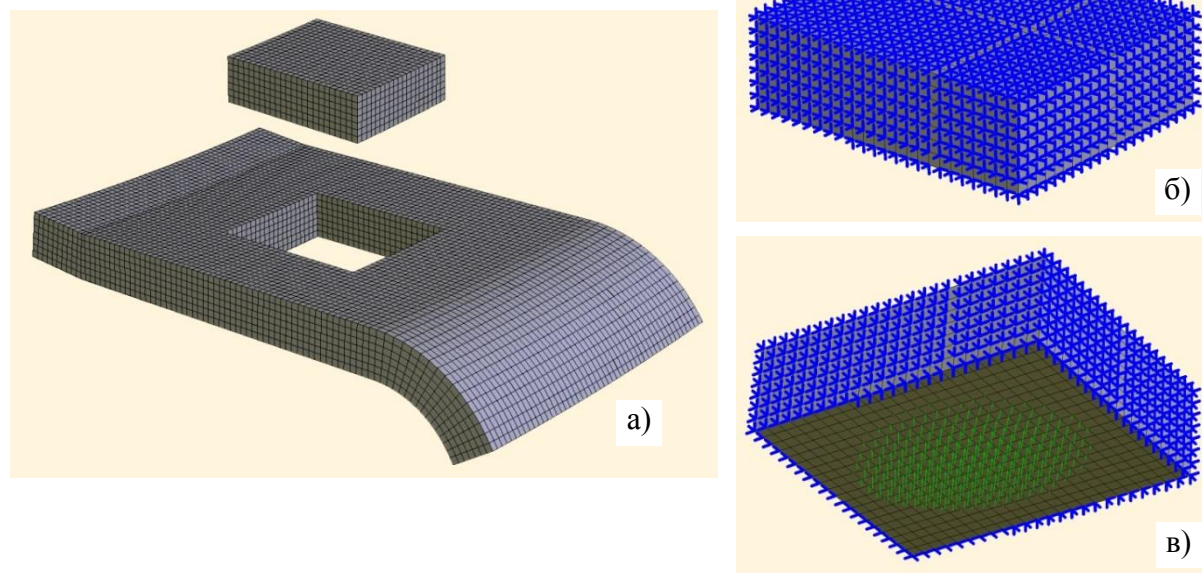


Рис. 1.32. Конечноэлементный фрагмент на упругом основании:
а – выделение фрагмента из исходной конечноэлементной схемы;
б – наложение упругих связей на поверхности выделенного фрагмента;
в – приложение сил к узлам поверхности контакта выделенного фрагмента

Компоненты матрицы жёсткости ансамбля конечных элементов выделяемого фрагмента, прилегающих к его внутреннему узлу, берутся из матрицы жёсткости, построенной для исходной расчётной схемы. Для узлов, расположенных на поверхности фрагмента, они делятся пополам; для узлов, расположенных на рёбрах, они делятся на четыре.

К узлам выделенного фрагмента, расположенным на поверхности контакта, прикладываются узловые контактные силы (рис. 1.32в). Перемещения узлов определяются методом поузловых итераций [38].

Нормальные и касательные напряжения вычисляются для всех узлов выделенного конечноэлементного фрагмента. Количество узлов фрагмента в направлении качения рассматривается как путь i -го узла плоского радиального сечения фрагмента (рис. 1.5). Тогда каждый узел из этой цепочки представляет собой j -ую позицию, занимаемую i -ым узлом при прохождении области, прилегающей к контакту. Вычисляется эквивалентное напряжение за цикл в соответствии с выбранным критерием контактно-усталостного разрушения (п. 1.2.5). Полученные значения критерия приписываются узлам, расположенным в плоскости симметрии конечноэлементной модели фрагмента колеса. При моделировании процесса накопления усталостных повреждений они сопоставляются с повреждающими по заданной кривой контактной усталости.

Области равных значений комбинированного критерия σ_{RCF} в цветовой заливке и изолинии критерия показаны на рис. 1.33. Наибольшее $\sigma_{RCF} = 263$ МПа получено для узла, расположенного на глубине 4 мм под поверхностью контакта.

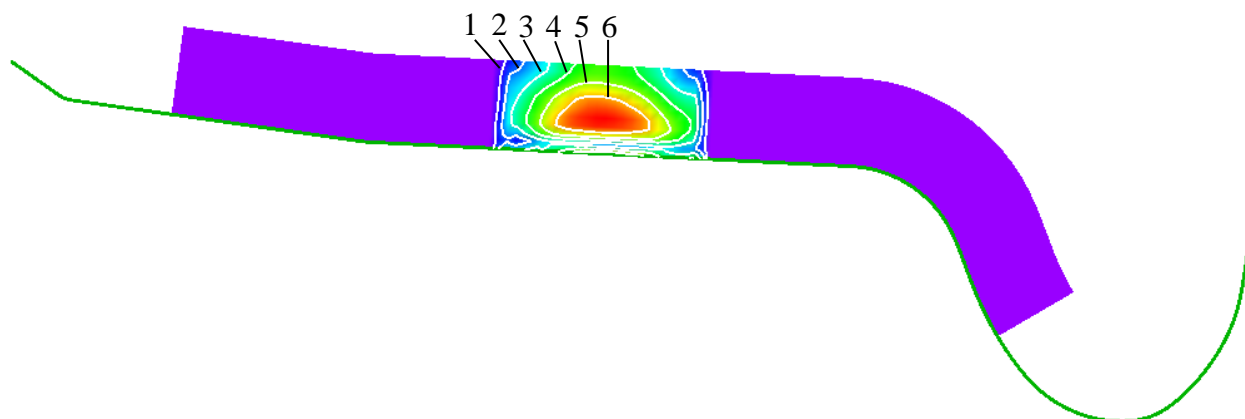


Рис. 1.33. Области равных значений комбинированного критерия σ_{RCF} в радиальном сечении колеса, проходящем по плоскости симметрии конечноэлементного фрагмента:
1-6 – номера линий равных σ_{RCF} , цена изолинии 37,57 МПа

1.3.4. Накопление повреждений в узлах конечноэлементной модели колеса

С целью уменьшения затрат машинного времени моделирование динамики движения железнодорожного экипажа выполняется на участках пути небольшой протяжённости. Для получения показателей износа на участках большей длины, например, в несколько тысяч километров, пробег масштабируется. Износ в каждой точке профиля колеса вычисляется с использованием коэффициента масштабирования. Аналогичный подход приме-

няется и для процесса моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в колесе. Зависимость (1.2) для вычисления контактно-усталостной поврежденности Q , накопленной в n -ом узле, преобразуется к виду

$$Q = \sum_{m=1}^{N_{it}} \sum_{i=1}^{N_C} \frac{N_{ws} km_{step}}{S_i - S_{b_i}} \alpha_i \sum_{j=1}^{N_{v_i}} \beta_{ij} \sum_{k=1}^{N_{LC_i}} \frac{1}{N_n(k)}, \quad (1.36)$$

где N_{it} – число итераций моделирования износа;

N_C – число конфигураций в проекте износа;

N_{ws} – число шагов износа (число изменений профиля за одну итерацию износа);

km_{step} – пробег на одном шаге износа;

S_i – длина пути, проходимого экипажем при моделировании;

S_{b_i} – расстояние, после прохождения которого начинается расчёт износа;

α_i – вес i -ой конфигурации ($\sum_{i=1}^{N_C} \alpha_i = 1$);

N_{v_i} – число скоростей в i -ой конфигурации;

β_{ij} – вес j -ой скорости в i -ой конфигурации ($\sum_{j=1}^{N_{v_i}} \beta_{ij} = 1$);

N_{LC_i} – число циклов нагружения для i -ой конфигурации;

$N_n(k)$ – число циклов до появления выщербин усталостного характера, когда значение критерия равно σ_{eq}^n .

Число циклов нагружения N_{LC_i} для i -ой конфигурации определяется по формуле

$$N_{LC_i} = \frac{S_i - S_{b_i}}{2\pi R} N_r, \quad (1.37)$$

где R – радиус колеса;

N_r – число записей на оборот колеса.

Все перечисленные выше параметры задаются в проекте сканирования. Подробная информация находится в [Главе 16](#) руководства пользователя.

С использованием зависимости (1.1) вычисляется число циклов до появления выщербин усталостного характера для узлов, расположенных в плоскости симметрии конечно-элементного фрагмента. Затем в этих узлах определяется накопленная поврежденность путём суммирования повреждений в соответствии с формулой (1.36).

В настройках программы пользователь может выбрать два варианта прекращения моделирования накопления повреждений.

1) Задать предельное значение накопленной поврежденности Q .

2) Выбрать вариант по пробегу, т.е. повреждения будут накапливаться без ограничения, пока колесо не пройдёт всю дистанцию, заданную в проекте эволюции.

Пользователь также может установить минимальное значение повреждающего напряжения в соответствии с выбранным критерием контактно-усталостного разрушения. При моделировании накопления контактно-усталостных повреждений цикл считается повреждающим, если значение критерия превышает этот предел. По умолчанию минимальное значение повреждающего напряжения равно нулю.

1.3.5. Учёт износа профиля колеса

Износ профиля поверхности катания колеса является одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на накопление контактно-усталостных повреждений в материале колеса. В процессе износа профиль колеса изменяется, что приводит к изменению динамики экипажа и перераспределению давлений в контакте колеса и рельса. Кроме того в результате изнашивания исчезает поверхностный слой материала колеса, в котором уже были накоплены усталостные повреждения, начинают накапливаться повреждения в слое, расположенном глубже под поверхностью катания. Таким образом, процессы износа и накопления контактно-усталостных повреждений неразрывно связаны. По этой причине данные, необходимые для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в модуле **UM RCF Wheel**, создаются с помощью инструмента **UM Loco/Wheel Profile Wear Evolution** ([Глава 16](#)).

Введём понятие *итерация износа колеса*. В рамках излагаемого раздела *итерация износа колеса* – это серия расчётов, в пределах которой профиль поверхности катания колеса не меняется.

Для накопления контактно-усталостных повреждений в модуле **UM RCF Wheel** используется конечноэлементная модель фрагмента колеса (п. 1.3.2). На каждой *итерации износа колеса* эта модель перестраивается. Новая конечноэлементная сетка строится на базе изношенного профиля колеса. Полученным узлам новой сетки приписываются повреждения, вычисленные путём интерполяции повреждений, накопленных в узлах сетки на предыдущей *итерации износа колеса*. Далее повторяется процедура накопления контактно-усталостных повреждений в узлах новой конечноэлементной схемы колеса.

На рис. 1.34 показано распределение накопленной повреждённости в материале колеса грузового вагона с профилем ГОСТ [10] после пробега 10, 50 и 100 тыс. км.

Количество *итераций износа колеса*, общий пробег и пробег на одной *итерации износа колеса* определяются набором параметров, задаваемых в проекте эволюции профиля колеса. Рассмотрим пример задания этих параметров в **UM Simulation**.

Необходимая группа параметров находится на вкладке **Колесо/Рельс | Износ | Параметры изнашивания в Инспекторе моделирования объекта**.

- **Число итераций** = 10;
- **Число шагов износа** = 2000;
- **Пробег (км)** = 5.

В соответствии с формулой (16.12) п. 16.1.1.3. "Параметры изнашивания" [Главы 16](#) общий пробег колеса составит

$$km_{tot} = N_{it} N_{ws} km_{step} = 10 \cdot 2000 \cdot 5 = 100\,000 \text{ км.}$$

В результате для проекта контактной усталости мы получим 10 *итераций износа колеса*. Пробег колеса на одной *итерации износа колеса* составит 10 000 км.

Если пользователь планирует выполнять моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в материале колеса, то уже на стадии создания проекта эволюции ему необходимо определить, сколько *итераций износа колеса* потребуется для решения этой задачи и пробег на одной итерации. Увеличение пробега приводит к увеличению износа и, следовательно, к перераспределению сил в контакте колеса и рельса из-за изменения формы контактирующей поверхности колеса.

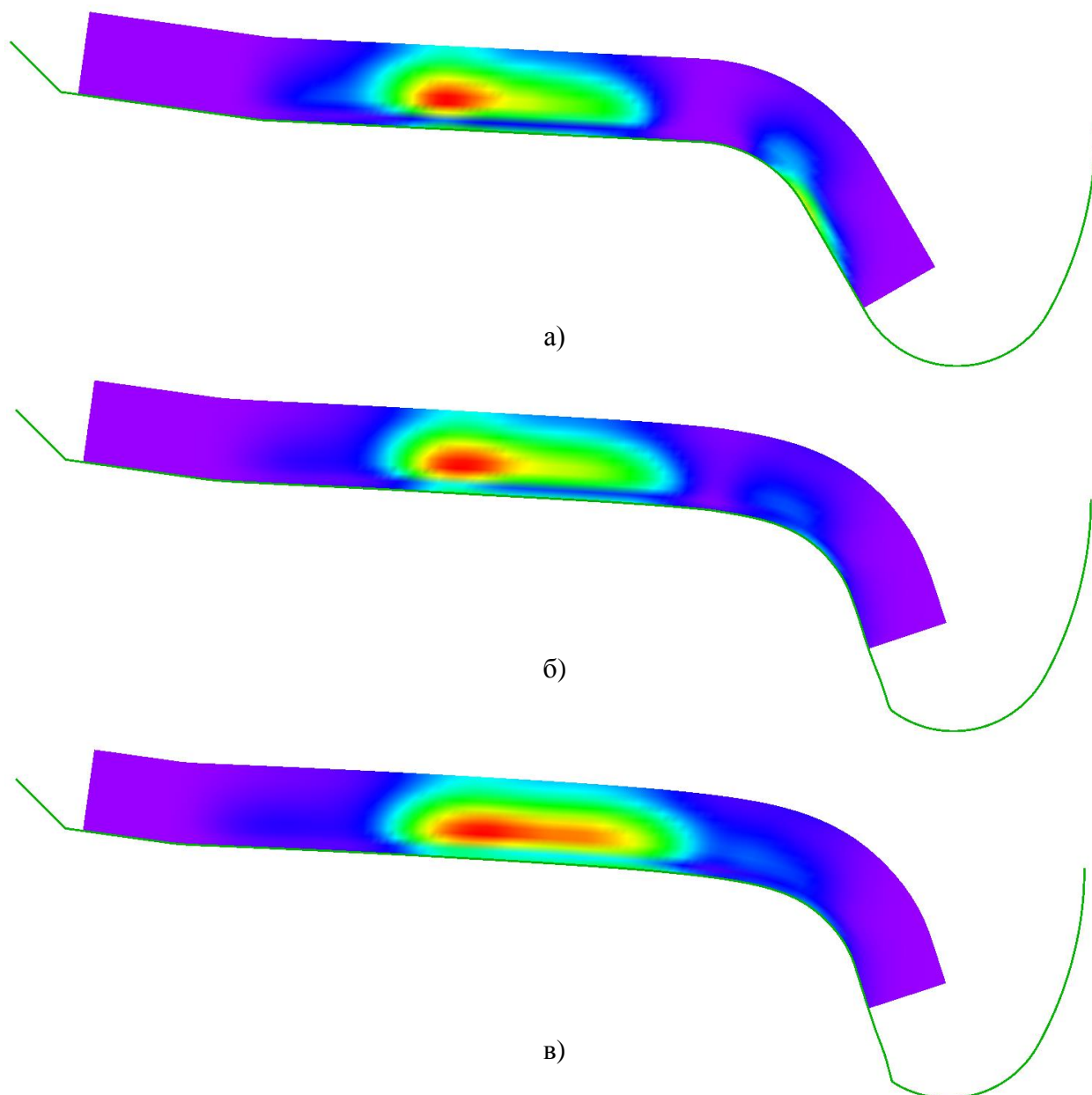


Рис. 1.34. Изохромы накопленных повреждённостей в материале колеса грузового вагона с профилем ГОСТ [10] после пробега: а – 10 тыс. км; б – 50 тыс. км; в – 100 тыс. км

Заметим, что в проекте эволюции число изменений профиля колеса определяется параметром **Число шагов износа**, а для каждой новой *итерации износа колеса* сохраняется профиль, определённый параметром **Число итераций**. Т.е. из серии эволюционирующих профилей выбирается полученный на последнем шаге предыдущей итерации расчёта износа, и он считается неизменным на одной *итерации износа колеса*. При моделировании накопления повреждений в пределах одной *итерации износа колеса* к узлам сетки конечноэлементной модели колеса прикладываются силы, полученные с учётом эволюции профиля колеса в проекте эволюции. Такой подход обеспечивает приемлемую точность решения задачи определения напряжений в материале колеса и позволяет задавать достаточно большой пробег на одной *итерации износа колеса*.

С другой стороны, в результате износа происходит съём поверхностного слоя материала колеса, что приводит к перераспределению накопленных повреждений. Это распределение существенно изменяется с увеличением износа (см. рис. 1.34). Поэтому нецелесообразно задавать очень большой пробег на одной *итерации износа колеса*. Исходя из этих соображений, общий пробег колеса желательно разделить на достаточно большое число участков, каждому из которых будет соответствовать одна *итерация износа колеса*.

Однако следует учитывать, что чрезмерное увеличение числа *итераций износа колеса* влечёт за собой увеличение затрат машинного времени на моделирование накопления контактно-усталостных повреждений и зачастую может не приближать к более точному решению задачи. Кроме того, увеличивается размер файлов с исходными данными (п. 1.3.1), каждый из которых, в зависимости от настроек проекта эволюции, может занимать до нескольких гигабайт на жёстком диске.

Необходимое количество *итераций износа колеса* и пробег на одной итерации определяются с помощью тестирования конкретной модели. В качестве ориентировочного значения при моделировании процесса накопления контактно-усталостных повреждений можно рекомендовать пробег на одной *итерации износа колеса* 5-10 тыс. км.

Количество контактных задач, которые необходимо решить на одной *итерации износа колеса* при моделировании процесса накопления контактно-усталостных повреждений, определяется длиной пути, проходимого экипажем при моделировании динамики, и параметром **Число записей на оборот колеса** на вкладке **Колесо/Рельс | Износ | Результаты** в **Инспекторе моделирования объекта** (рис. 1.29). Этот параметр может принимать только положительные целочисленные значения больше нуля. При значении 1 количество контактных задач будет равно числу оборотов колеса на заданной дистанции. При увеличении значения параметра количество контактных задач будет увеличиваться кратно этому значению. Увеличение значения параметра **Число записей на оборот колеса** делает репрезентативнее набор статистических данных о контактах колеса и рельса, получаемых в результате моделирования движения экипажа, но увеличивает затраты машинного времени на моделирование процесса накопления контактно-усталостных повреждений.

1.3.6. Учёт наличия лубриканта в контакте колеса и рельса

Ранее в п. 1.2.4 уже было отмечено, что при испытаниях образцов колёсных сталей на контактную усталость без наличия лубриканта в контакте повреждения не наблюдаются даже при очень высоких давлениях. Это связано с механизмом образования трещин [19]. Как правило, испытания образцов колёсных сталей на контактную усталость в лабораторных условиях дают заниженное число циклов до появления повреждений, поскольку проводятся при постоянной подаче лубриканта в виде масла или воды на контактирующие поверхности. Такие условия являются более жёсткими по сравнению с реальными условиями эксплуатации колёс. Железнодорожный транспорт широко применяется для перевозки пассажиров и грузов на магистральных железных дорогах, на трамвайных линиях и линиях метрополитена, в промышленных зонах, в горнодобывающей промышленности. В условиях эксплуатации под открытым небом естественным лубрикантом в контакте колеса и рельса является дождевая вода и конденсат. Очевидно, в зависимости от погодных условий такой лубрикант не всегда присутствует в контакте. Поэтому статистические

данные показывают, что ресурс колёс по контактно-усталостной долговечности выше, чем у лабораторных образцов.

С целью получения результатов, близких к статистическим эксплуатационным данным, в модуле **UM RCF Wheel** вводится так называемый "коэффициент лубрикации" K_{lub} . Этот коэффициент задаётся пользователем. Он является безразмерным и находится в пределах от 0 до 1. Коэффициент вычисляется для конкретных условий эксплуатации железнодорожного экипажа. Например, если железнодорожный экипаж эксплуатируется под открытым небом в конкретном географическом регионе, то K_{lub} можно определить как отношение количества дождливых дней в году, характерного для этого региона, к количеству всех дней в году. В других условиях эксплуатации можно брать отношение пути, пройденного экипажем с наличием лубриканта в контакте колеса и рельса, ко всему пути, пройденному экипажем.

С введением коэффициента K_{lub} при моделировании накопления контактно-усталостных повреждений в расчётах используется модифицированная форма зависимости (1.36)

$$Q = K_{lub} \sum_{m=1}^{N_{it}} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{N_{ws} km_{step}}{S_i - S_{b_i}} \alpha_i \sum_{j=1}^{N_{v_i}} \beta_{ij} \sum_{k=1}^{N_{LC_i}} \frac{1}{N_n(k)}. \quad (1.38)$$

По умолчанию коэффициент лубрикации K_{lub} равен 0,33.

1.3.7. Учёт остаточных напряжений в материале колеса

Остаточные технологические напряжения после изготовления колеса и монтажные напряжения от посадки с натягом бандажа на колёсный центр могут быть представлены в виде стационарных полей в материале колеса. Поскольку задачи определения таких напряжений решаются в осесимметричной постановке, полученные распределения напряжений приписываются одному радиальному сечению колеса.

В работе [39] с помощью программного комплекса ANSYS выполнен расчёт остаточных технологических напряжений в материале цельнокатаного колеса вагона из стали марки 2 [10].

Сотрудниками лаборатории "Вычислительная механика" БГТУ выполнен расчёт монтажных напряжений в колесе локомотива [40], вызванных посадкой бандажа на колёсный центр. Напряжения вычислены с помощью программного пакета ITFEMCP, ориентированного на решение контактных задач. На рис. 1.35 показаны конечноэлементная схема колеса и поля эквивалентных напряжений по критерию Мизеса в цветовой заливке.

Для использования в процессе моделирования накопления контактно-усталостных повреждений информация о распределении остаточных напряжений в радиальном сечении колеса задаётся в текстовом файле. Файл имеет следующую структуру:

- 1) количество точек радиального сечения колеса;
- 2) координаты x и y точек;
- 3) значения нормальных и касательных напряжений для каждой точки – $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$.

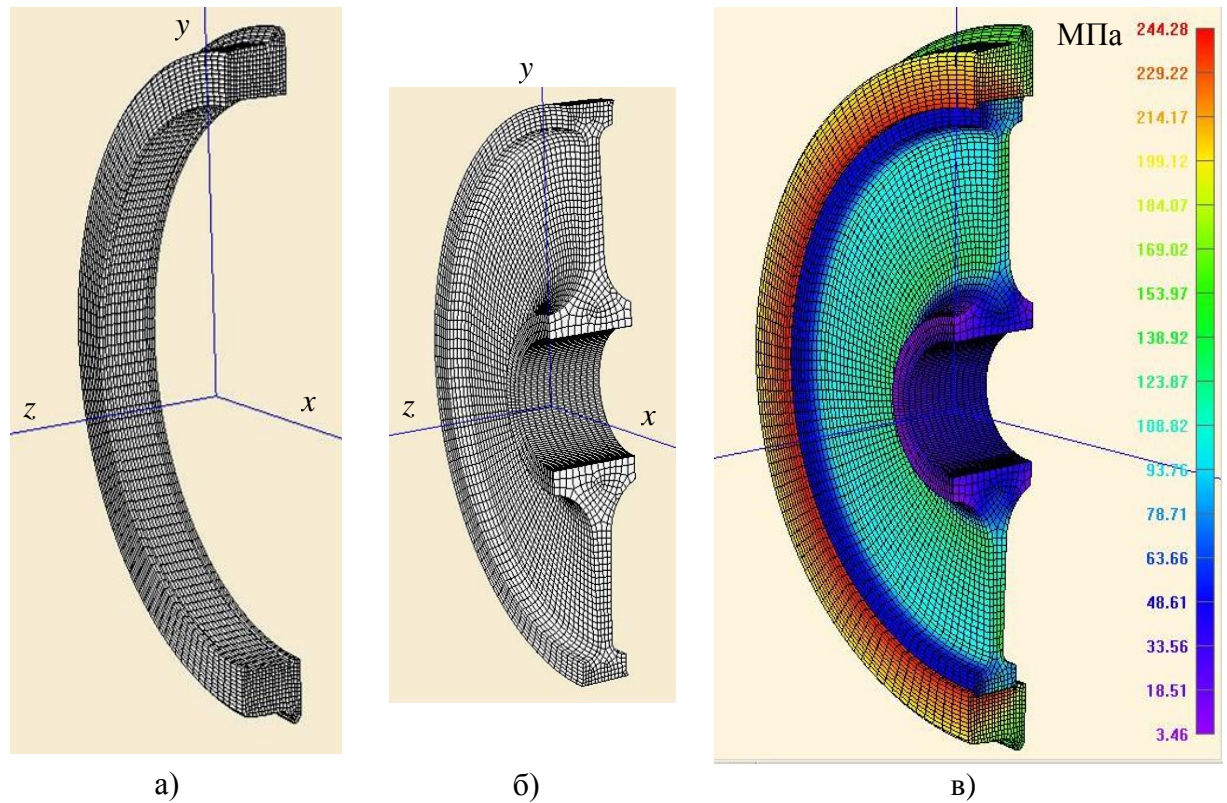


Рис. 1.35. Монтажные напряжения в колесе локомотива, вызванные посадкой бандажа на колёсный центр: конечноэлементная схема бандажа (а) и колёсного центра (б); области равных эквивалентных напряжений по критерию Мизеса (в)

Начало отсчёта координат выбирается в точке профиля колеса, расположенной на круге катания. Профиль колеса должен быть ориентирован таким образом, чтобы гребень располагался справа. Положительное направление оси абсцисс Ox – вправо к гребню, положительное направление оси ординат Oy – вверх к оси вращения колёсной пары (рис. 1.36). Координаты задаются в миллиметрах, напряжения – в Мегапаскалях.

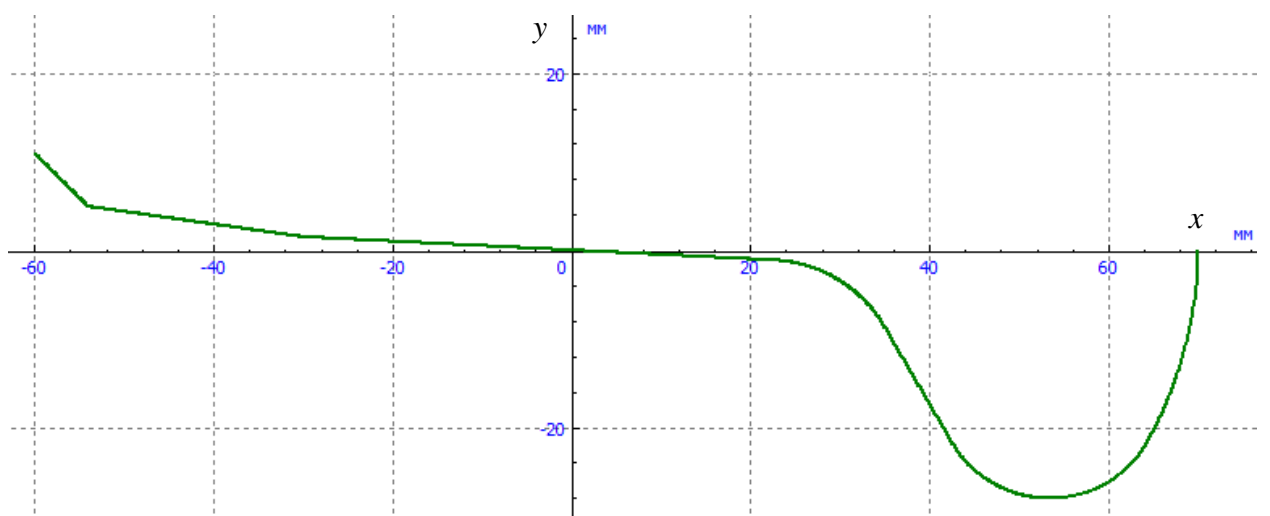


Рис. 1.36. Система отсчёта для задания координат точек радиального сечения колеса

В библиотеку **УМ** включены два файла описанного выше формата. Первый файл содержит данные об остаточных технологических напряжениях в материале цельнокатаного колеса вагона из стали марки 2 [10], диаметр колеса – 954 мм:

[{Данные УМ}\RCF\Wheel\Residual technological stresses - wheel D954 mm.txt](#)

Второй файл содержит данные о монтажных напряжениях в материале колеса локомотива [40], вызванные посадкой бандажа на колёсный центр, диаметр колеса – 1250 мм:

[{Данные УМ}\RCF\Wheel\Interference fit stresses - wheel D1250 mm.txt](#)

После загрузки данных об остаточных напряжениях из файла в проект **UM RCF Wheel** с помощью интерполяции вычисляются их значения в узлах плоской конечноэлементной сетки фрагмента колеса.

На рис. 1.37 показаны распределения окружных, осевых и радиальных остаточных технологических напряжений в радиальном сечении колеса вагона после загрузки и обработки в проекте **UM RCF Wheel**.

Распределения окружных, осевых и радиальных монтажных напряжений, вызванных посадкой бандажа на колёсный центр, в радиальном сечении колеса локомотива после загрузки и обработки в проекте **UM RCF Wheel** представлены на рис. 1.38.

В процессе моделирования накопления контактно-усталостных повреждений переменное поле нагрузочных напряжений, полученных в результате решения контактной задачи, накладывается на стационарное поле остаточных напряжений – нормальные и касательные напряжения обоих полей суммируются. Затем вычисляется значение критерия контактно-усталостного разрушения в узлах конечноэлементной сетки, расположенных в радиальном сечении колеса.

На рис. 1.39а показаны области равных эквивалентных напряжений по комбинированному критерию (п. 1.2.5.3) в радиальном сечении колеса вагона для одного из вариантов расположения контакта, полученные в результате решения контактной задачи без учёта остаточных напряжений. Точка с максимальным значением критерия 170,42 МПа располагается на глубине 3 мм под поверхностью контакта. Как видно на рис. 1.39б, учёт остаточных технологических напряжений существенно изменяет распределение эквивалентных напряжений. Благодаря большим сжимающим окружным напряжениям (рис. 1.37а) эквивалентное напряжение в точке на глубине 3 мм снижается до 89 МПа. Однако точка с максимальным значением критерия 160,94 МПа теперь располагается на поверхности контакта.

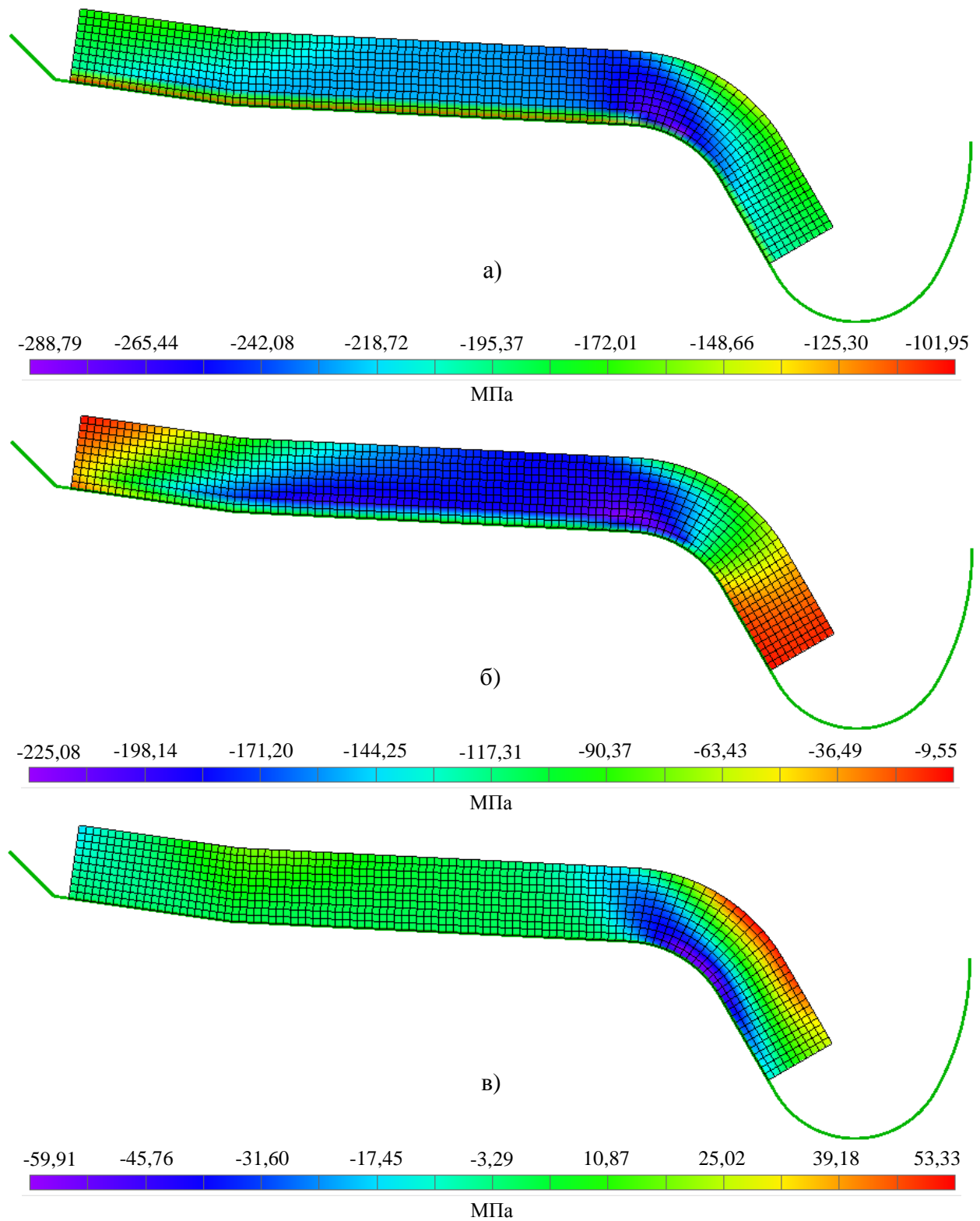


Рис. 1.37. Распределение остаточных технологических напряжений в радиальном сечении колеса вагона: а – окружные; б – осевые; в – радиальные

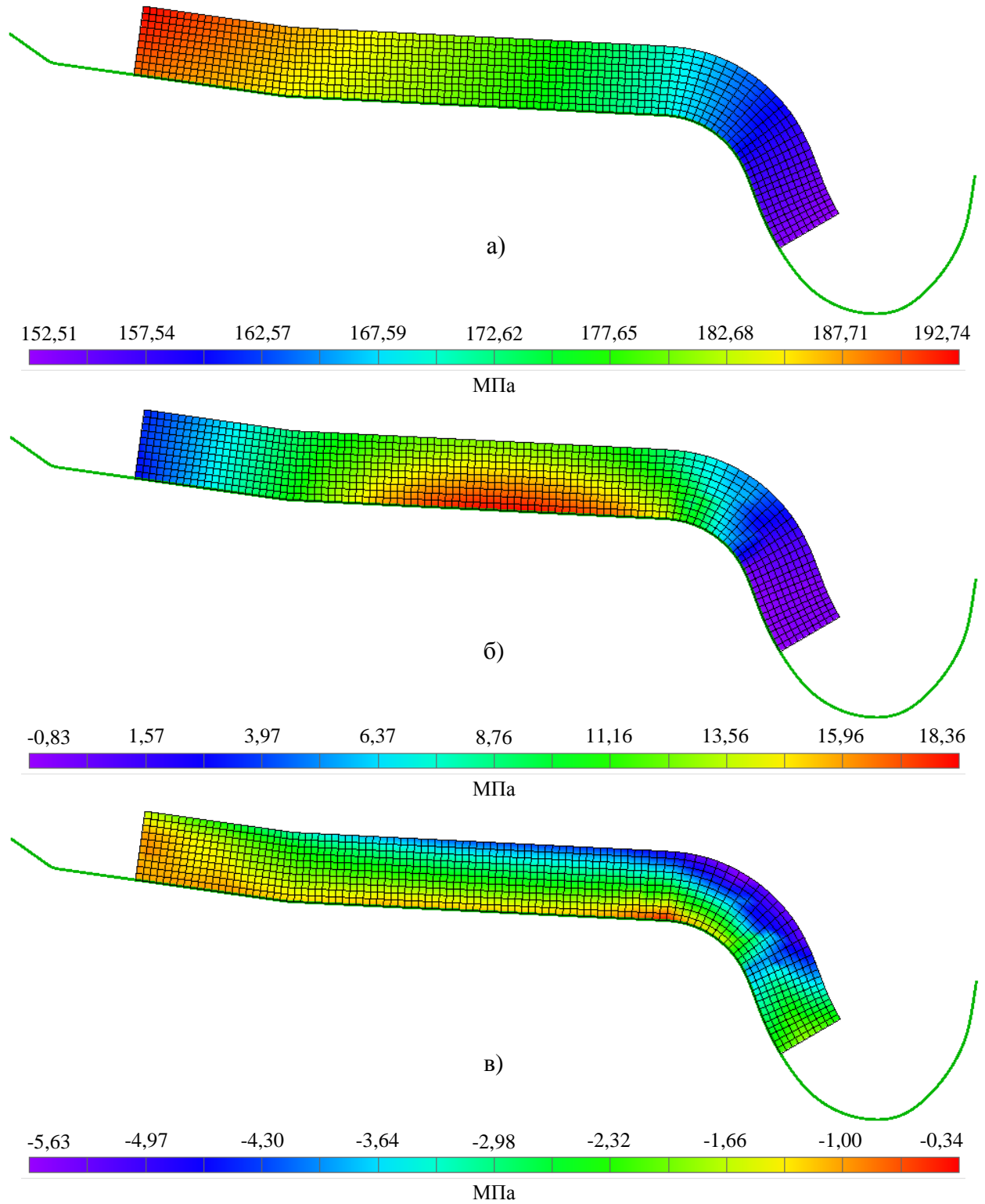


Рис. 1.38. Распределение монтажных напряжений, вызванных посадкой бандажа на колёсный центр, в радиальном сечении колеса локомотива:
 а – окружные; б – осевые; в – радиальные

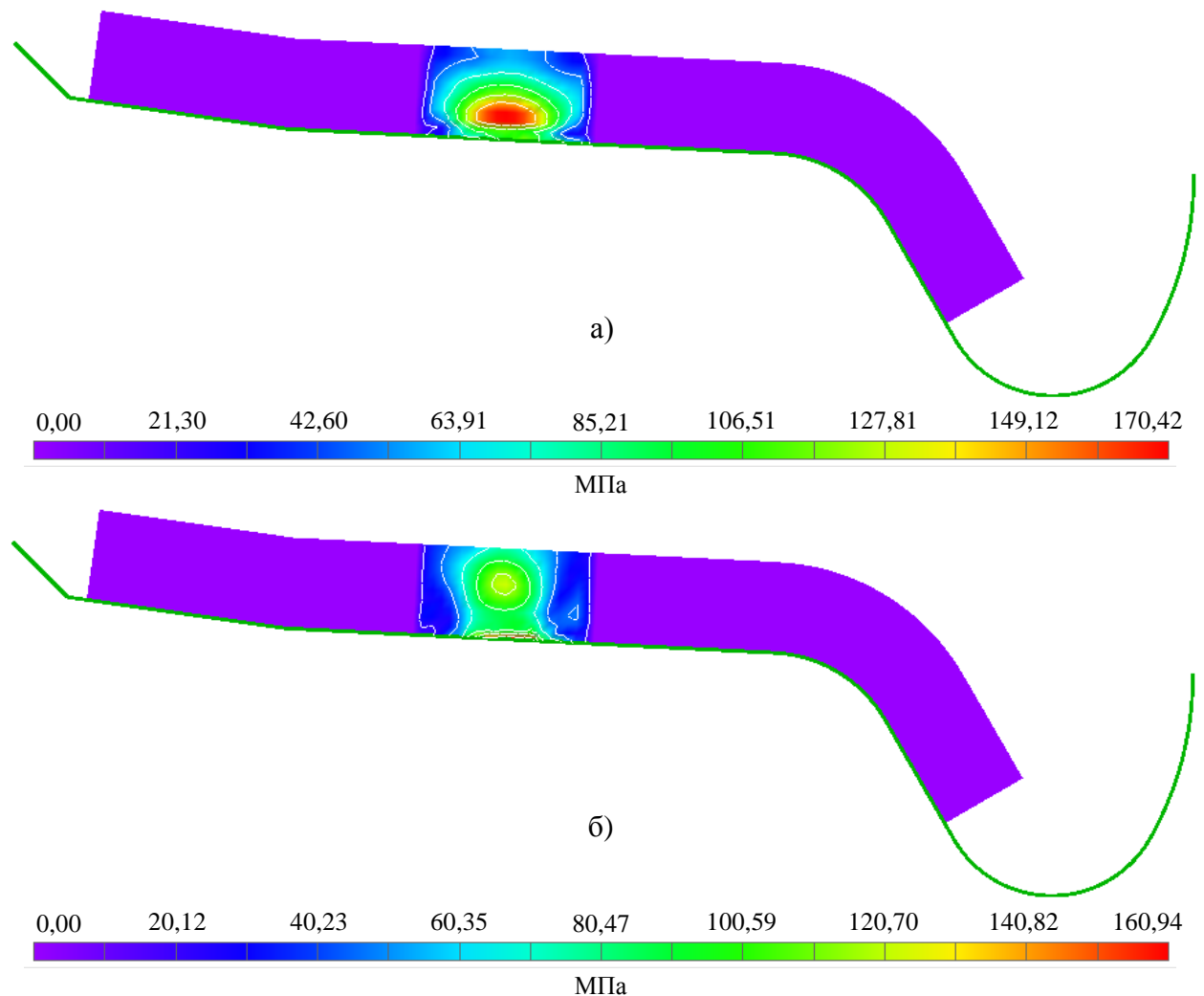


Рис. 1.39. Области равных эквивалентных напряжений по комбинированному критерию в радиальном сечении колеса вагона: а – без учёта остаточных напряжений; б – с учётом остаточных технологических напряжений

На рис. 1.40а показаны области равных эквивалентных напряжений по комбинированному критерию (п. 1.2.5.3) в радиальном сечении колеса локомотива для одного из вариантов расположения контакта, полученные в результате решения контактной задачи без учёта остаточных напряжений. Точка с максимальным значением критерия 241,65 МПа располагается на глубине 4 мм под поверхностью контакта. Учёт монтажных напряжений, вызванных посадкой бандажа на колёсный центр, существенно не изменяет распределение эквивалентных напряжений (рис. 1.40б), точка с максимальным значением критерия остаётся на той же глубине. Однако из-за больших растягивающих окружных напряжений (рис. 1.38а) эквивалентное напряжение в этой точке увеличивается до 295 МПа.

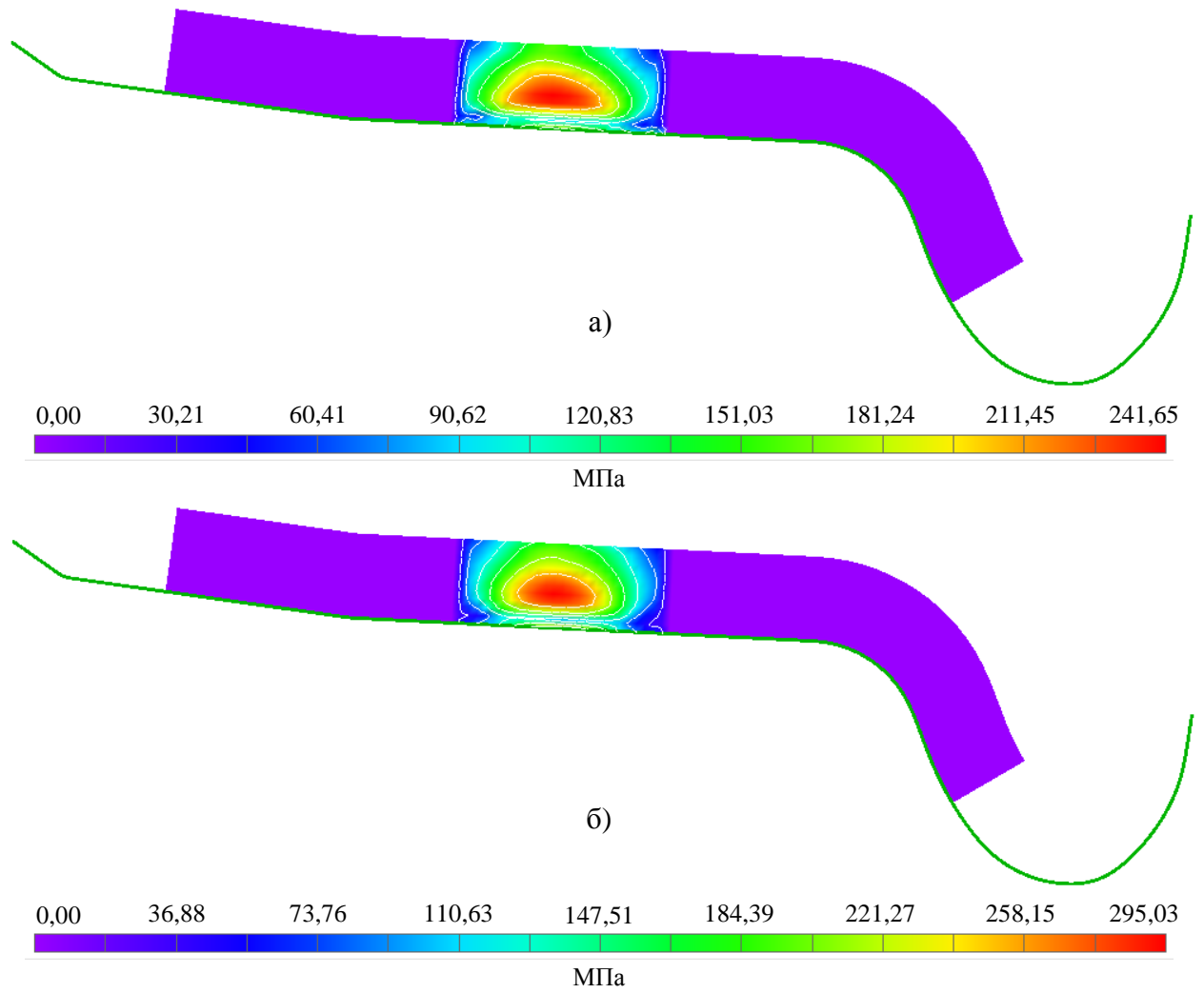


Рис. 1.40. Области равных эквивалентных напряжений по комбинированному критерию в радиальном сечении колеса локомотива: а – без учёта остаточных напряжений; б – с учётом монтажных напряжений от посадки бандажа на колёсный центр


1.4. Работа с модулем UM RCF Wheel

1.4.1. Запуск модуля

Файл проекта контактной усталости создаётся в модуле **UM Loco** (Глава 8) с помощью инструмента **UM Loco/Wheel Profile Wear Evolution** (Глава 16), см. п. 1.3.1.

В процессе или после установки **УМ** на компьютер рекомендуется ассоциировать файлы с расширением ***.rcf** с файлами проекта контактной усталости **UM RCF Wheel**. В этом случае при двойном щелчке мышью на таком файле будет автоматически запускаться модуль **UM RCF Wheel**.

Другой вариант запуска модуля – воспользоваться кнопкой **Пуск – Все программы | Универсальный механизм 10 | Инструменты | UM Rolling Contact Fatigue of Wheel**. После запуска модуля **UM RCF Wheel** пользователю необходимо самому открыть файл

проекта ***.rcf** с помощью меню **Файл | Открыть** или кнопки  на панели инструментов **Стандартная**.

1.4.2. Интерфейс модуля

На рис. 1.41 представлен интерфейс модуля **UM RCF Wheel**.

В верхней части окна расположены последовательно заголовок окна, строка меню, панели инструментов **Стандартная** и **Расчётная схема**. Внизу находится строка состояния. Слева отображается **Панель информации**, она является плавающей: пользователь может закрепить её в левой или правой части окна, сделать выплывающей (скрыть), закрыть. По умолчанию **Панель информации** закреплена в левой части окна и всегда отображается при каждом запуске модуля.

Отобразить или скрыть панели инструментов и **Панель информации**, поменять их настройки, пользователь может в меню **Вид | Панели инструментов и закрепляемые окна**, либо вызвав контекстное меню, наведя указатель мыши на строку меню или любую панель инструментов и щёлкнув правой кнопкой мыши. Также пользователь может изменить внешнее оформление окна модуля с помощью меню **Вид | Вид приложения**.

Рабочая область окна предназначена для графического отображения расчётной схемы и результатов расчётов. Если данные для расчёта загружены, то в центре рабочей области по умолчанию отображаются профиль колеса и конечноэлементная сетка. Все режимы отображения можно включать или отключать, например, с помощью кнопок на панели инструментов **Расчётная схема**. Если в процессе вычислений включены режимы заливки цветом, то в центре рабочей области отображаются эквивалентные напряжения в плоскости симметрии конечноэлементного фрагмента колеса на шаге по пробегу, в верхней части рабочей области – накопленная поврежденность в той же плоскости, слева – цветовая шкала для оценки уровня накопленной поврежденности, справа – цветовая шкала для оценки уровня эквивалентных напряжений.

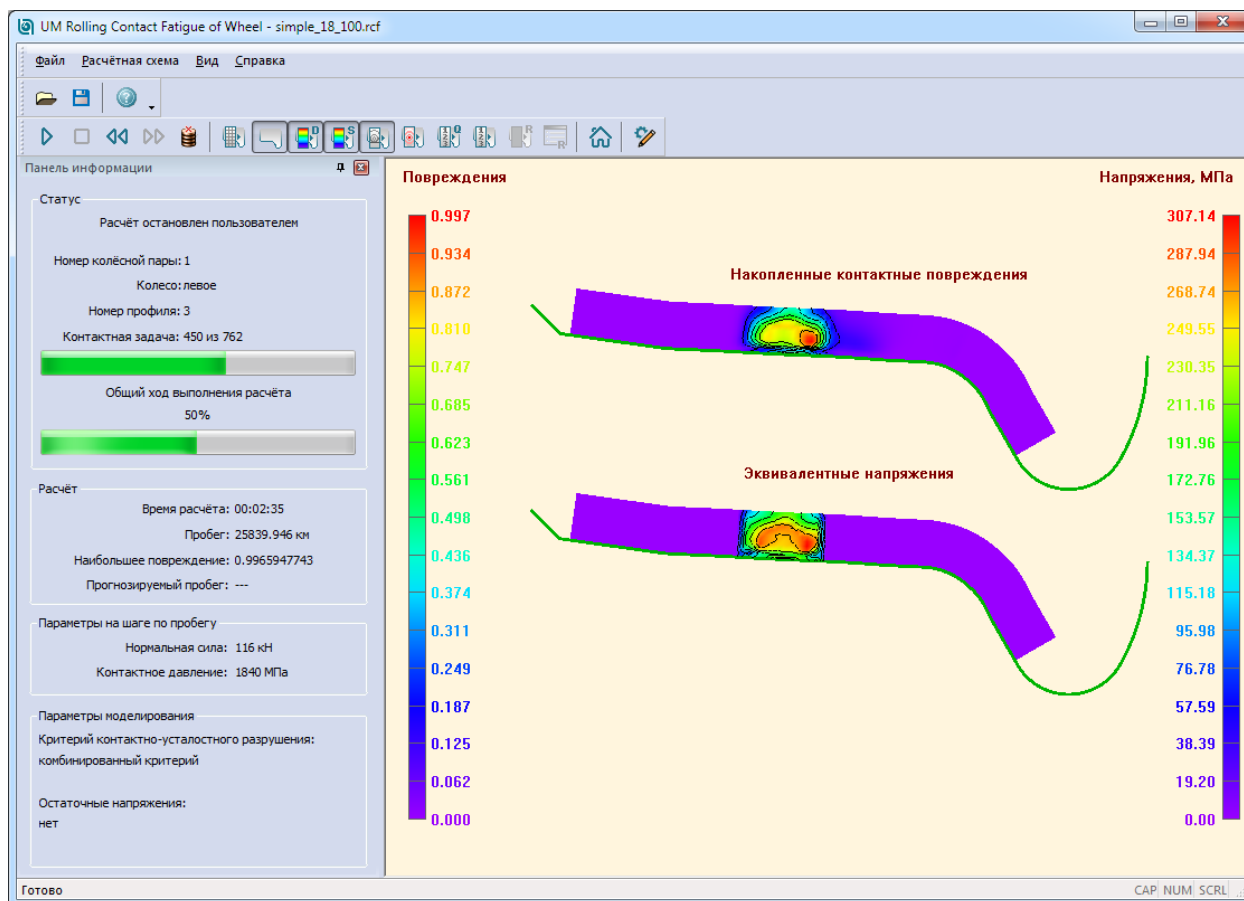



Рис. 1.41. Интерфейс модуля UM RCF Wheel

1.4.3. Параметры

Опция «Параметры» становится активной, когда загружены данные для расчёта. После её выбора с помощью меню **Расчётная схема | Параметры...** или кнопки  на экране появится окно, показанное на рис. 1.42.

Появившееся окно диалога содержит четыре вкладки: **Расчёт**, **Материал**, **Остаточные напряжения** и **Визуализация**. Кнопка **Восстановить значения по умолчанию** позволяет вернуться к исходным значениям параметров на выбранной вкладке. Сохранение изменённых параметров происходит только после нажатия кнопки **ОК**. В противном случае изменения сохранены не будут.

1.4.3.1. Вкладка «Расчёт»

Вкладка **Расчёт** показана на рис. 1.42.

Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в модуле **UM RCF Wheel** предусматривает два варианта окончания расчёта:

- 1) прохождение всей дистанции, заданной при моделировании динамики движения железнодорожного экипажа (пробег);
- 2) достижение предельного значения накопленных повреждений в точке колеса.

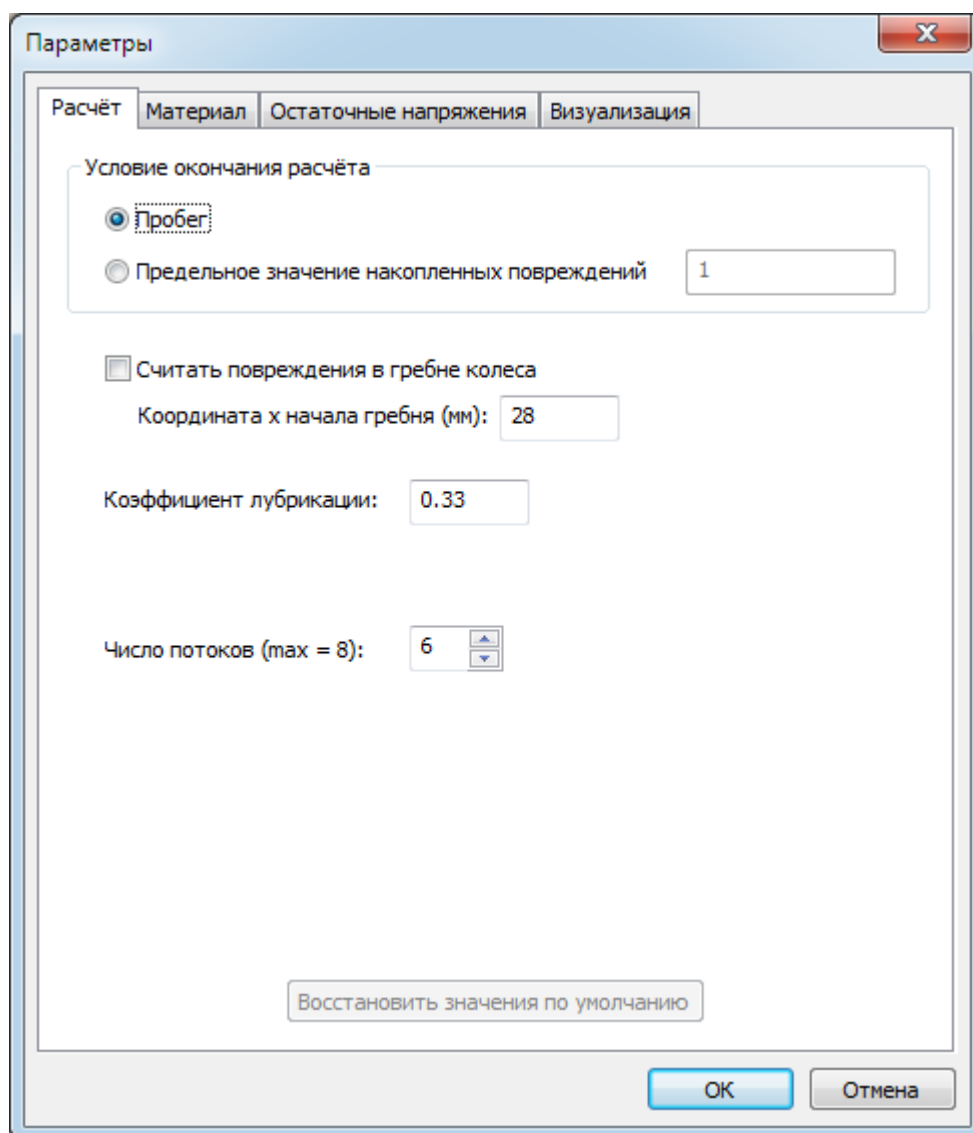


Рис. 1.42. Окно диалога **Параметры**, вкладка **Расчёт**

При выборе первого варианта расчёт будет выполняться для всех итераций износа колеса, для всех колёс, указанных в проекте *.rcf, вне зависимости от накопленной повреждённости в точке колеса.

При выборе второго варианта пользователю необходимо задать предельное значение накопленных повреждений. Накопленная повреждённость в точке колеса вычисляется с использованием зависимости (1.38), накопление повреждений в узлах конечноэлементной расчётной схемы рассмотрено в п. 1.3.4. После достижения предельного значения накопленных повреждений расчёт будет продолжен до завершения текущей *итерации износа колеса* (см. п. 1.3.5), затем начнётся выполнение расчёта для следующего колеса.

По умолчанию выбран первый вариант **Пробег**.

Пункт **Считать повреждения в гребне колеса** (см. рис. 1.42).

Скольжение в контакте гребня колеса и боковой поверхности рельса приводит к большим касательным напряжениям на поверхности гребня и быстрому накоплению контактно-усталостных повреждений на этой поверхности. Однако в результате интенсивного износа поверхностный слой с накопленными повреждениями достаточно быстро исчезает.

Статистические эксплуатационные данные подтверждают, что контактно-усталостные дефекты на контактной поверхности гребня колеса возникают редко. Поэтому модуль **UM RCF Wheel** позволяет не моделировать процесс накопления контактно-усталостных повреждений в гребне колеса – по умолчанию пункт **Считать повреждения в гребне колеса** не активирован. При этом пользователю необходимо задать участок профиля колеса, который будет считаться гребнем. Для этого предназначен параметр **Координата x начала гребня (мм)**, см. рис. 1.42. По умолчанию значение этого параметра 28 мм. Координата задаётся в системе отсчёта, показанной на рис. 1.36. Таким образом, часть конечноэлементной модели фрагмента колеса, координаты x узлов которой больше заданной координаты x начала гребня, считается гребнем колеса.

Назначение параметра **Коэффициент лубрикации** (см. рис. 1.42) подробно описано в п. 1.3.6.

Значение в ячейке **Число потоков** определяет число потоков для выполнения вычислений в параллельных потоках. Максимальное число потоков зависит от конфигурации компьютера. По умолчанию задаётся число потоков на два меньше от максимально возможного в целях сохранения производительности операционной системы во время выполнения расчётов.

Если на вкладке **Расчёт** были изменены параметры расчёта (кроме числа потоков), то после нажатия кнопки **ОК** на экране появится окно, показанное на рис. 1.43.

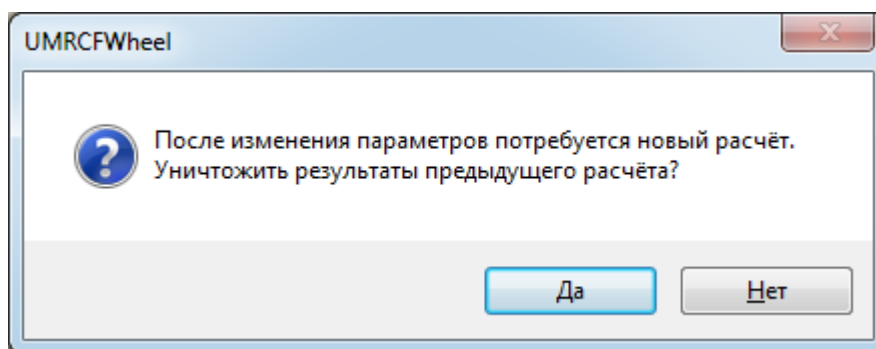


Рис. 1.43. Окно диалога – запрос на удаление результатов расчёта

Кнопка **Нет** – изменения параметров не будут сохранены.

Кнопка **Да** – изменённые параметры будут сохранены. Файлы с результатами расчёта будут уничтожены. Можно запускать расчёт с новыми параметрами.

1.4.3.2. Вкладка «Материал»

Вкладка **Материал** показана на рис. 1.44.

На вкладке задаются характеристики материала колеса: модуль упругости E (по умолчанию $2 \cdot 10^{11}$ Па), коэффициент Пуассона μ (по умолчанию 0,3), условный предел текучести σ_T (по умолчанию $6,55 \cdot 10^8$ Па).

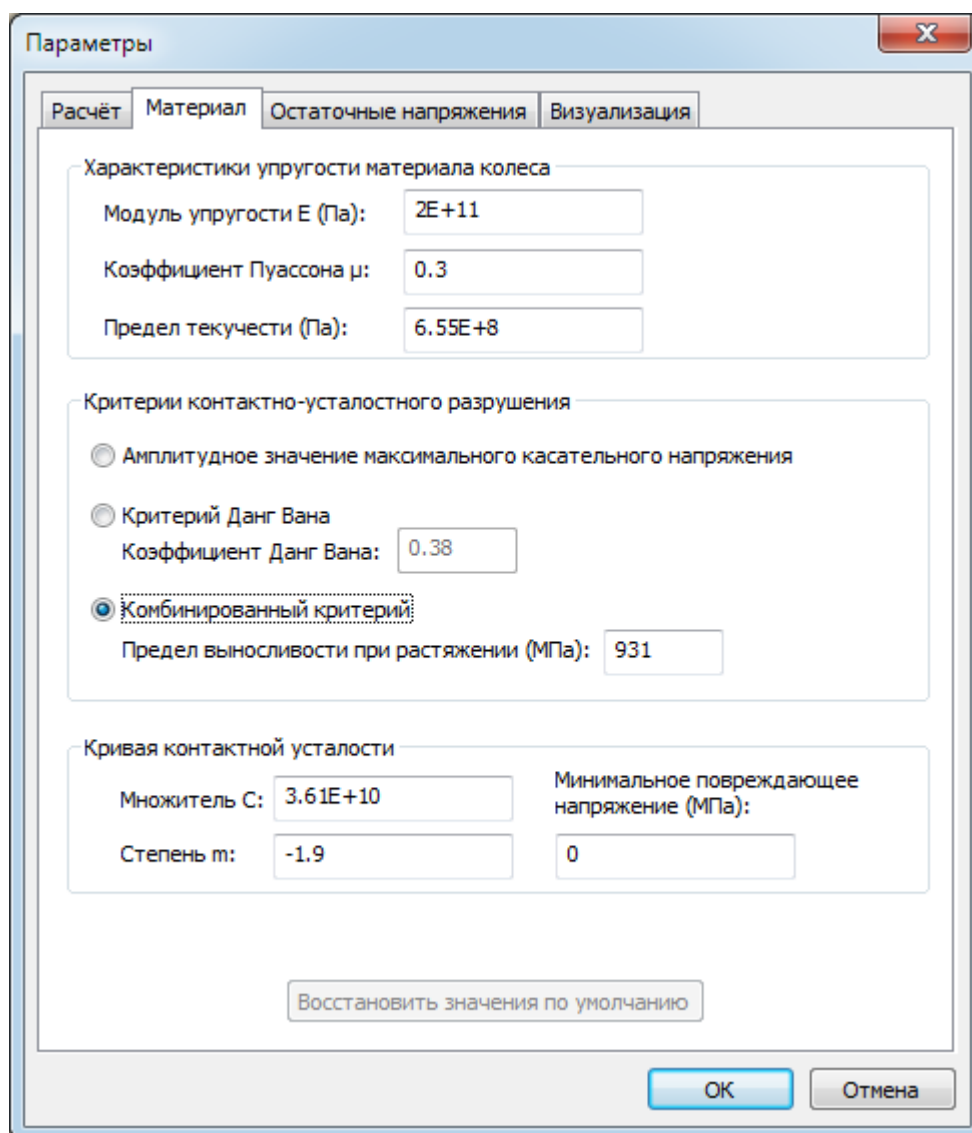


Рис. 1.44. Окно диалога **Параметры**, вкладка **Материал**

Расчёт накопления повреждённости ведётся с предположением о том, что материал колеса работает в условиях упругой приспособляемости. Но в случае, когда профили колеса и рельса не гладкие вследствие износа в виде кольцевых выработок, напыла материала колеса, в контакте могут возникать высокие давления, что при сохранении условия упругой приспособляемости приводит к получению нереально больших значений интенсивностей деформаций и напряжений. Для их ограничения используется диаграмма Прандтля: интенсивность напряжений, превышающая условный предел текучести материала, принимается равной этому пределу.

Кривая контактной усталости материала аппроксимирована функцией (1.1), см. п. 1.2.4. Значения констант материала C и m в этом выражении задаются в зависимости от выбранного критерия контактно-усталостного разрушения. Выбрать критерий можно в поле **Критерии контактно-усталостного разрушения**. Описание критериев дано в следующих разделах:

1) Критерий амплитудного значения максимального касательного напряжения – п. 1.2.5.1.

2) Критерий Данг Вана – п. 1.2.5.2.

3) Комбинированный критерий – п. 1.2.5.3.

Кривые контактной усталости колёсных сталей и значения констант материала C и m для указанных критериев приведены в п. 1.2.8.

Пользователь также может установить минимальное значение повреждающего напряжения в соответствии с выбранным критерием контактно-усталостного разрушения. При моделировании накопления контактно-усталостных повреждений цикл считается повреждающим, если значение критерия превышает этот предел. По умолчанию минимальное значение равно нулю.

Если на вкладке **Материал** был изменён любой из параметров, то после нажатия кнопки **ОК** на экране появится окно, показанное на рис. 1.43.

Кнопка **Нет** – изменения параметров не будут сохранены.

Кнопка **Да** – изменённые параметры будут сохранены. Файлы с результатами расчёта будут уничтожены.

1.4.3.3. Вкладка «Остаточные напряжения»

Вкладка **Остаточные напряжения** показана на рис. 1.45.

С помощью этой вкладки пользователь может включить в расчёт два вида остаточных напряжений: остаточные технологические напряжения в колесе после изготовления и монтажные напряжения в колесе, вызванные посадкой бандажа на колёсный центр. Информация об остаточных напряжениях хранится в файлах текстового формата.

Подход к моделированию процесса накопления контактно-усталостных повреждений с учётом остаточных напряжений описан в п. 1.3.7.

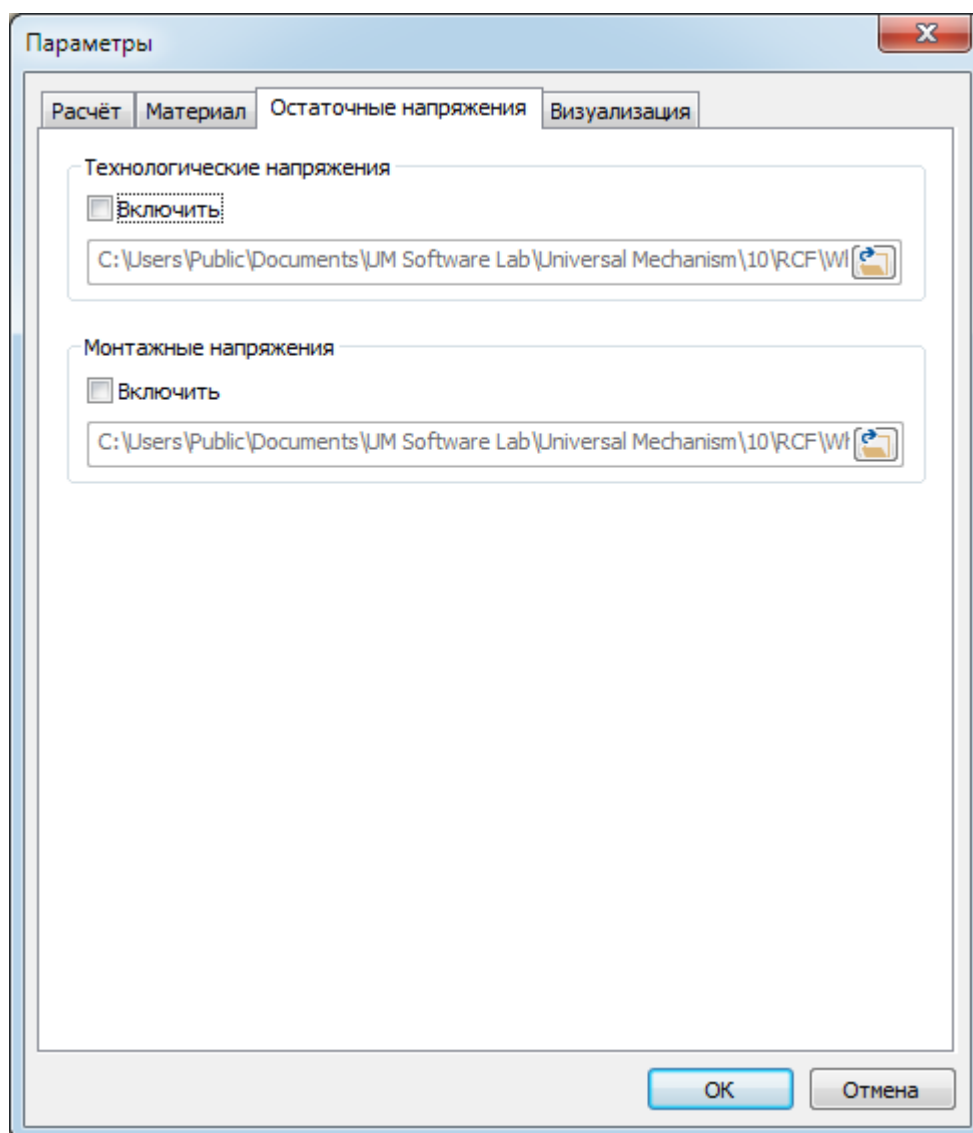


Рис. 1.45. Окно диалога **Параметры**, вкладка **Остаточные напряжения**

1.4.3.4. Вкладка «Визуализация»

Вкладка **Визуализация** показана на рис. 1.46.

Расчётную схему в рабочей области окна можно перемещать в любом направлении в плоскости экрана с помощью кнопок со стрелками на клавиатуре (либо левой кнопкой мыши), увеличивать или уменьшать с помощью кнопок «Gray +» и «Gray –» (либо вращая колесо мыши). Все эти операции выполняются дискретно с заданным шагом. Поменять значения шагов можно на вкладке **Визуализация**. Шаги задаются в условных единицах.

Также на вкладке можно задать цвет фона рабочей области окна, цвет и ширину линий для отображения профиля колеса, конечноэлементной сетки, изолиний.

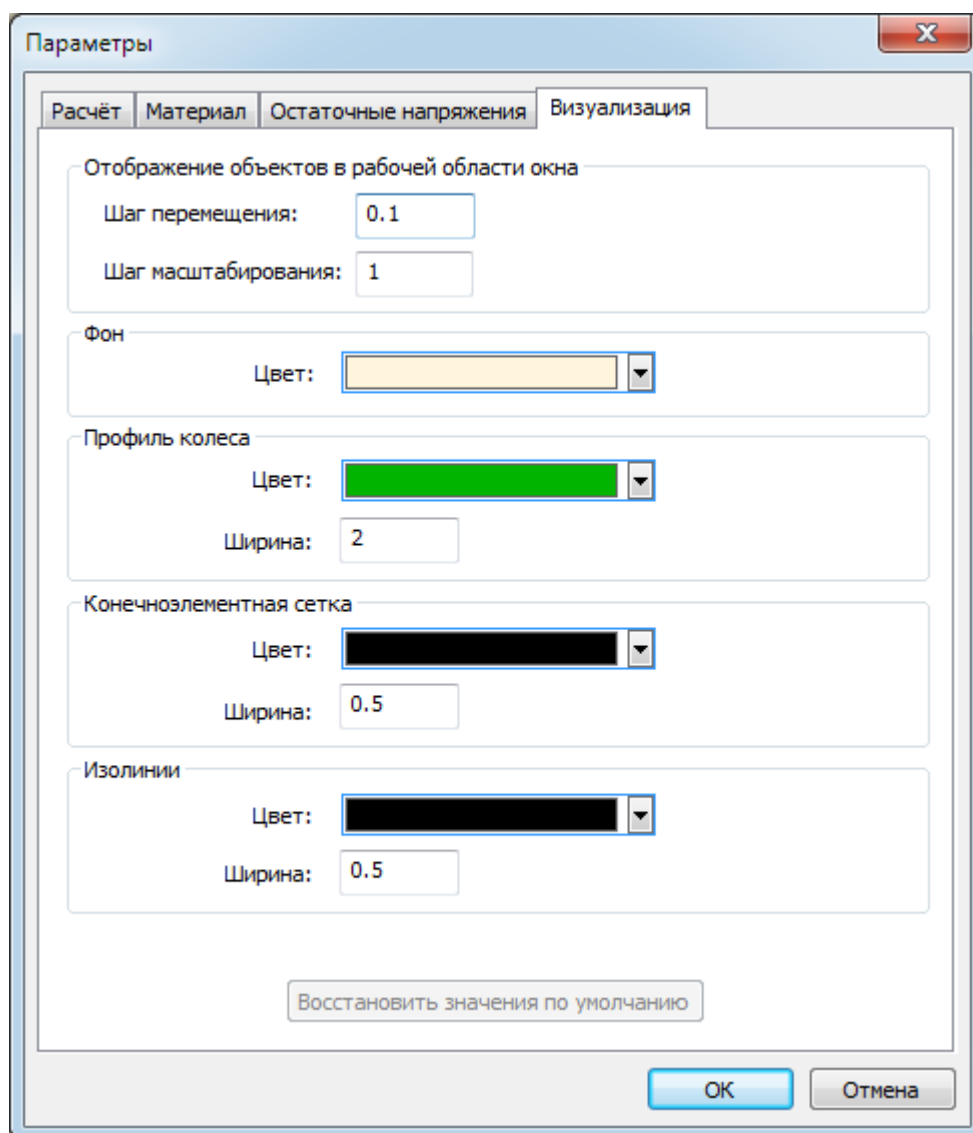



Рис. 1.46. Окно диалога **Параметры**, вкладка **Визуализация**

1.4.4. Режимы графического отображения


В модуле реализовано несколько видов графического отображения расчётной схемы и результатов расчёта, которые могут включаться или отключаться в различных сочетаниях друг с другом.

При необходимости расчётную схему в рабочей области окна можно перемещать, увеличивать или уменьшать. Вернуть схему в исходное положение можно следующими способами:

- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Исходное положение**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **Home** на клавиатуре;
- щёлкнуть правой кнопкой мыши в рабочей области окна, в появившемся контекстном меню выбрать пункт **Исходное положение**.

1.4.4.1. Режим «Сетка»

Включить или отключить режим отображения **Сетка** можно тремя способами:

- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Сетка**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **1** на клавиатуре.


В центральной части рабочей области окна отображается сетка, состоящая из четырёхугольных элементов, расположенная в плоскости симметрии конечноэлементного фрагмента колеса (рис. 1.30). Если при включённом режиме **Сетка** включён режим **Повреждения в цвете**, то аналогичная сетка отображается в верхней части рабочего окна в поперечном сечении колеса, где иллюстрируется процесс накопления контактно-усталостных повреждений.

Режим автоматически включается при загрузке данных.

Замечание. Режим отображения **Сетка** доступен всегда, если загружены данные для расчёта.

1.4.4.2. Режим «Профиль колеса»

Включить или отключить режим отображения **Профиль колеса** можно тремя способами:

- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Профиль колеса**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **2** на клавиатуре.


В центральной части рабочей области окна отображается профиль колеса (рис. 1.41). Если при включённом режиме **Профиль колеса** включён режим **Повреждения в цвете**, то аналогичный профиль отображается в верхней части рабочего окна, где иллюстрируется процесс накопления контактно-усталостных повреждений.

Режим автоматически включается при загрузке данных.

Замечание. Режим отображения **Профиль колеса** доступен всегда, если загружены данные для расчёта.

1.4.4.3. Режим «Повреждения в цвете»

Включить или отключить режим отображения **Повреждения в цвете** можно тремя способами:

- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Повреждения в цвете**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **3** на клавиатуре.


В верхней части рабочей области окна отображается поперечное сечение колеса, в котором с помощью заливки цветом показано распределение накопленных контактно-усталостных повреждений (рис. 1.41). Заливка цветом осуществляется для каждого четырёхузлового элемента плоской сетки: в зависимости от значения накопленного поврежде-

ния в узле в соответствии со шкалой выбирается необходимый цвет для узла, затем полученные цвета от четырёх вершин смешиваются в плоскости элемента по линейному закону. Слева в рабочей области окна отображается цветовая шкала для оценки уровня накопленных повреждений.

Замечание. Режим отображения **Повреждения в цвете** доступен, если загружены данные для расчёта и расчёт выполнялся.

1.4.4.4. Режим «Напряжения в цвете»

Включить или отключить режим отображения **Напряжения в цвете** можно тремя способами:


- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Напряжения в цвете**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **4** на клавиатуре.

В центральной части рабочей области окна отображается поперечное сечение колеса, в котором с помощью заливки цветом показано распределение эквивалентных напряжений (рис. 1.41). Заливка цветом осуществляется для каждого четырёхузлового элемента плоской сетки: в зависимости от значения эквивалентного напряжения в узле в соответствии со шкалой выбирается необходимый цвет для узла, затем полученные цвета от четырёх вершин смешиваются в плоскости элемента по линейному закону. Справа в рабочей области окна отображается цветовая шкала для оценки уровня эквивалентных напряжений.

Замечание. Режим отображения **Напряжения в цвете** доступен, если загружены данные для расчёта и расчёт выполнялся.

1.4.4.5. Режим «Изолинии»

Включить или отключить режим отображения **Изолинии** можно тремя способами:

- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Изолинии**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **5** на клавиатуре.


Режим предназначен для отображения линий равных значений компонента – изопараметрических линий. Режим поддерживает шесть изолиний, то есть компонент разбивается на семь уровней. Если включён режим **Напряжения в цвете**, то в центральной части рабочей области окна отображается поперечное сечение колеса, в котором показаны изолинии эквивалентных напряжений (рис. 1.41). Если включён режим **Повреждения в цвете**, то в верхней части рабочей области окна отображается поперечное сечение колеса, в котором показаны изолинии накопленных контактно-усталостных повреждений (рис. 1.41).

Замечание. Режим отображения **Изолинии** доступен, если загружены данные для расчёта, расчёт выполнялся и включён режим отображения **Повреждения в цвете** или **Напряжения в цвете**.

1.4.4.6. Режим «Максимальное повреждение»

Включить или отключить режим отображения **Максимальное повреждение** можно тремя способами:

– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Максимальное повреждение**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;

– нажать клавишу **6** на клавиатуре.


В верхней части рабочей области окна в поперечном сечении колеса кружком белого цвета обозначается узел, в котором накоплено наибольшее контактно-усталостное повреждение (рис. 1.41). Значение наибольшего повреждения можно посмотреть на **Панели информации** в поле **Расчёт** (рис. 1.48).

Замечание. Режим отображения **Максимальное повреждение** доступен, если загружены данные для расчёта, расчёт выполнялся, при этом наибольшее накопленное повреждение больше нуля, и включён режим отображения **Повреждения в цвете**.

1.4.4.7. Режим «Накопленные повреждения»

Включить или отключить режим отображения **Накопленные повреждения** можно тремя способами:

– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Накопленные повреждения**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;

– нажать клавишу **7** на клавиатуре.


Если включён режим **Повреждения в цвете**, то в верхней части рабочей области окна отображается поперечное сечение колеса, в котором точками обозначены узлы конечно-элементной сетки, рядом с каждым узлом отображается числовое значение накопленного в нём повреждения. Если включён режим **Напряжения в цвете**, то в центральной части рабочей области окна отображается поперечное сечение колеса, в котором точками обозначены узлы конечноэлементной сетки, рядом с каждым узлом отображается числовое значение эквивалентного напряжения.

Замечание. Режим отображения **Накопленные повреждения** доступен, если загружены данные для расчёта, расчёт выполнялся, и включён режим отображения **Повреждения в цвете** или **Напряжения в цвете**.

1.4.4.8. Режим «Номера узлов»

Включить или отключить режим отображения **Номера узлов** можно тремя способами:

– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Номера узлов**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;

– нажать клавишу **8** на клавиатуре.

В центральной части рабочей области окна в поперечном сечении колеса точками обозначаются узлы конечноэлементной сетки, рядом с каждым узлом отображается его но-

мер. Если включён режим **Повреждения в цвете**, то номера отображаются рядом с узлами поперечного сечения колеса в верхней части рабочей области окна, где иллюстрируется процесс накопления контактно-усталостных повреждений.

Замечание. Режим отображения **Номера узлов** доступен всегда, если загружены данные для расчёта.


1.4.4.9. Режим «Остаточные напряжения»

Включить или отключить режим отображения **Остаточные напряжения** можно двумя способами:

– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Остаточные напряжения**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**.

В центральной части рабочей области окна отображается поперечное сечение колеса, в котором с помощью заливки цветом показано распределение одной из компонент остаточных напряжений (рис. 1.37). Заливка цветом осуществляется для каждого четырёхузлового элемента плоской сетки: в зависимости от значения компоненты напряжения в узле в соответствии со шкалой выбирается необходимый цвет для узла, затем полученные цвета от четырёх вершин смешиваются в плоскости элемента по линейному закону. Справа в рабочей области окна отображается цветовая шкала для оценки уровня выбранной компоненты остаточных напряжений.

Выбрать компоненту остаточных напряжений для отображения можно в окне диалога **Остаточные напряжения** (рис. 1.47). Окно диалога вызывается с помощью пункта меню **Расчётная схема | Выбор компоненты** либо кнопки  на панели инструментов **Расчётная схема**.

Замечание. Режим отображения **Остаточные напряжения** доступен, если загружены данные об остаточных напряжениях (см. п. 1.3.7, 1.4.3.3).

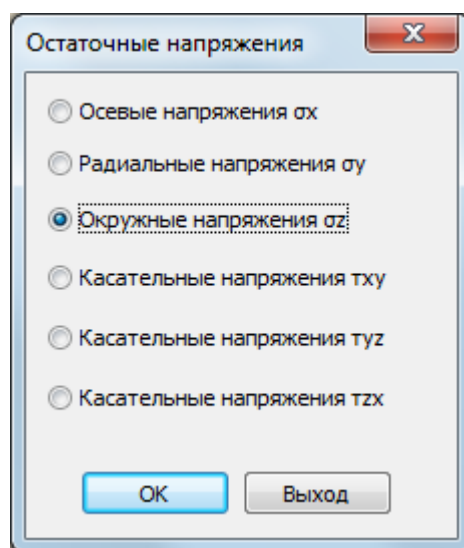



Рис. 1.47. Выбор компоненты остаточных напряжений для отображения

1.4.5. Выполнение расчёта

Запустить расчёт можно следующими способами:

- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Запустить расчёт**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **F9** на клавиатуре;
- щёлкнуть правой кнопкой мыши в рабочей области окна, в появившемся контекстном меню выбрать пункт **Запустить расчёт**.


Последовательность выполнения расчёта определяется списком файлов **wld** в проекте контактной усталости **rcf** (см. п. 1.3.1). Каждый файл **wld** содержит исходные данные для одного колеса. Вначале расчёт с учётом *итераций износа колеса* будет полностью выполнен для первого колеса, затем для второго и т.д.

Если условием окончания расчёта является достижение предельного значения накопленного повреждения в точке колеса, и оно достигается раньше, чем были выполнены расчёты на всех *итерациях износа колеса*, то оставшиеся *итерации износа колеса* пропускаются, и происходит переход к расчёту следующего колеса. Если условием окончания расчёта является пробег, то расчёт выполняется на всех *итерациях износа колеса* для всех колёс, входящих в проект.

Следить за состоянием расчёта позволяет **Панель информации** (рис. 1.48).

После окончания расчёта модуль выдаёт соответствующее сообщение в окне диалога на экране.

Прервать расчёт можно следующими способами:

- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Остановить расчёт**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **Esc** на клавиатуре;
- щёлкнуть правой кнопкой мыши в рабочей области окна, в появившемся контекстном меню выбрать пункт **Остановить расчёт**.

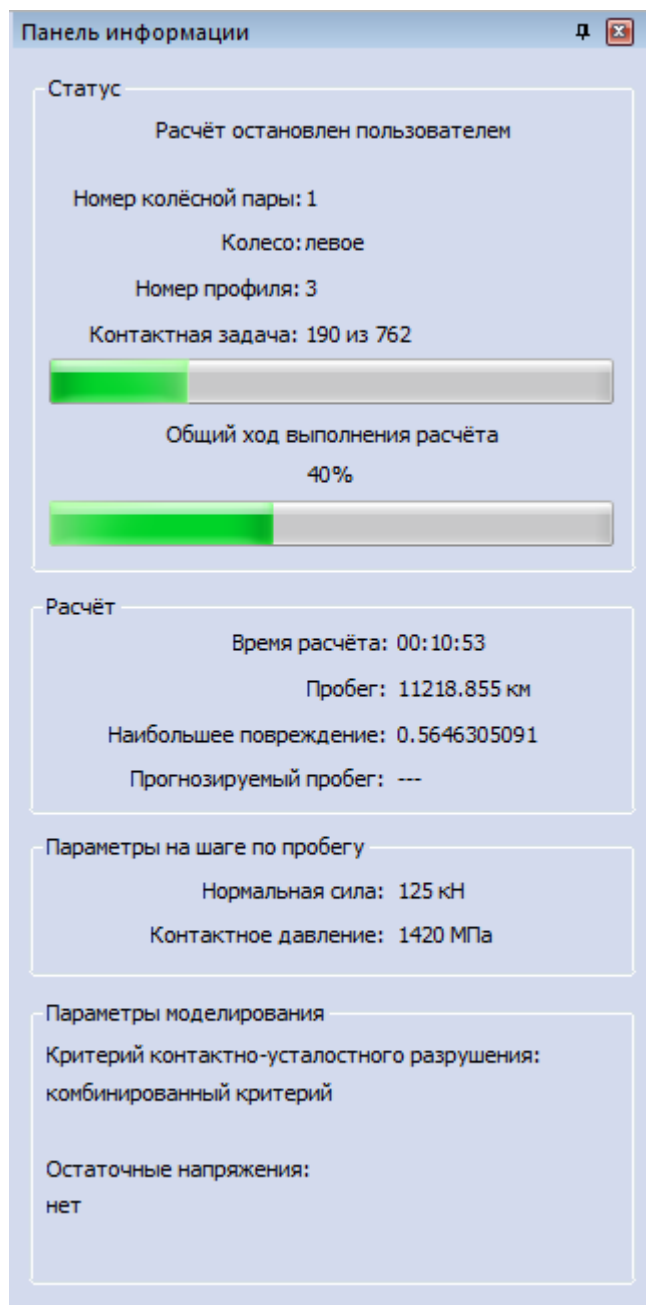



Рис. 1.48. Панель информации

1.4.6. Сохранение результатов расчёта

Сохранить результаты расчёта можно с помощью меню **Файл | Сохранить** или кнопки  на панели инструментов **Стандартная**. Во время выполнения расчёта данная опция неактивна.

Замечание. Результаты автоматически сохраняются после завершения расчёта для каждой *итерации износа колеса*.

Результаты расчёта сохраняются в двух файлах. Оба файла имеют то же название, что и файл проекта контактной усталости **rcf**, и располагаются в папке с исходными данными.

Первый файл – бинарный, имеет расширение ***.rcfresults**. Данные из этого файла используются для отображения результатов расчёта в модуле **UM RCF Wheel** и загружаются программой автоматически при открытии файла проекта контактной усталости.


Второй файл – текстовый, имеет расширение ***.csv**. Этот файл позволяет открыть результаты расчёта в таблицах **Excel**.

Кроме того, в процессе расчёта в папке с исходными данными создаётся файл протокола в текстовом формате, в котором содержится информация о ходе выполнения расчёта.

1.4.7. Удаление результатов расчёта

Удалить результаты расчёта можно следующими способами:



– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Удалить результаты расчёта**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;

– нажать клавишу **Delete** на клавиатуре.

Опция доступна, если расчёт выполнялся.

1.4.8. Представление результатов расчёта

После выполнения расчёта для первой *итерации износа колеса* становятся доступными опции, позволяющие перемещаться по списку *итераций износа колеса* в двух направлениях: от первой к последней и обратно. Воспользоваться этими опциями можно с помощью меню **Расчётная схема | Предыдущий профиль** и **Расчётная схема | Следующий профиль**, либо кнопок  и  на панели инструментов **Расчётная схема**, либо кнопок **PgDn** и **PgUp** на клавиатуре. При этом на **Панели информации** и в рабочей области окна отображаются результаты расчёта для выбранной *итерации износа колеса*.

В поле **Статус** на **Панели информации** выводится общая информация: номер колёсной пары, колесо – левое или правое, номер профиля – номер *итерации износа колеса*, общее количество и количество решённых контактных задач на данной *итерации износа колеса*, общий ход выполнения расчёта в процентах (рис. 1.48).

При анализе результатов расчёта прежде всего представляют интерес значение наибольшего накопленного повреждения в точке колеса и пробег, которые можно посмотреть на **Панели информации** в поле **Расчёт** (рис. 1.48). Если расчёт выполнялся до достижения предела накопленных контактно-усталостных повреждений и этот предел не был достигнут, прогнозируемый пробег, отображаемый в том же поле, показывает, сколько километров ещё могло бы пробежать колесо при достигнутом уровне накопленных повреждений. Прогнозируемый пробег определяется с помощью деления пробега на наибольшее накопленное повреждение.

Точку колеса с наибольшим повреждением можно обозначить на расчётной схеме в рабочей области окна с помощью режима **Максимальное повреждение** (см. п. 1.4.4.6). Глубину залегания этой точки под поверхностью катания колеса можно определить с помощью режима **Сетка** (см. п. 1.4.4.1), исходя из того, что размер стороны конечного элемента сетки равен 1 мм. Распределение накопленных контактно-усталостных поврежде-

ний в поперечном сечении колеса позволяют наглядно представить режимы **Повреждения в цвете** (см. п. 1.4.4.3) и **Изолинии** (см. п. 1.4.4.5).

Файл с расширением ***.csv**. (см. п. 1.4.6) позволяет открыть результаты расчёта в таблицах **Excel** и построить графики для оформления отчёта.

С помощью результатов из первого блока данных можно построить график зависимости накопленной повреждённости в опасной точке материала колеса от пробега. Пример такого графика приведен на рис. 1.49.

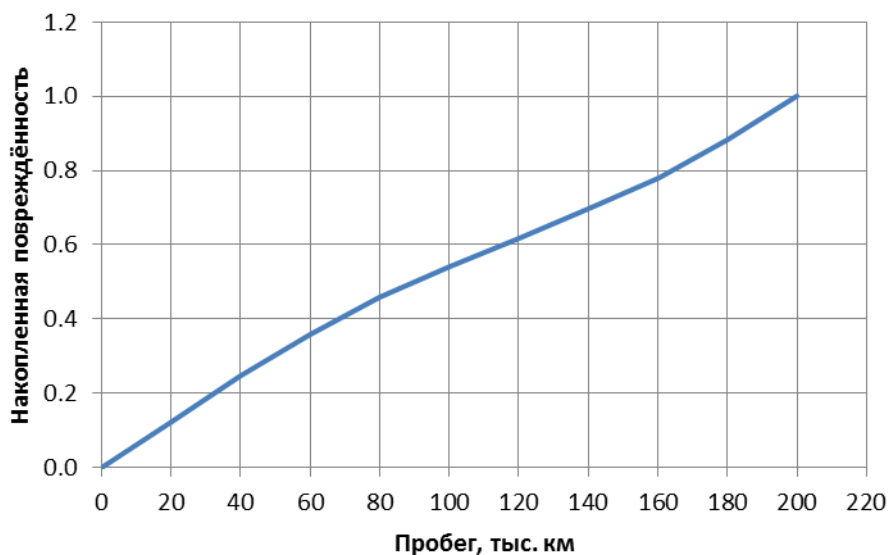


Рис. 1.49. График зависимости накопленной повреждённости в опасной точке материала колеса от пробега

Данные из второго блока позволяют построить эпюру накопленной повреждённости в опасном сечении колеса. Под опасным сечением будем понимать окружное сечение колеса, содержащее опасную точку, т.е. точку с наибольшей накопленной повреждённостью. Для построения эпюры используются значения накопленной повреждённости в узлах конечноэлементной сетки радиального сечения фрагмента колеса, принадлежащих опасному сечению. Пример такой последовательности узлов показан на рис. 1.50а. Осью абсцисс является ось x в системе координат, представленной на рис. 1.36. На рис. 1.50б построен график зависимости накопленной повреждённости в узлах опасного сечения колеса от их координаты x .

Также второй блок содержит данные, позволяющие построить поверхность накопленной повреждённости в радиальном сечении фрагмента колеса. По абсциссе откладывается координата x узла в соответствии с системой отсчёта, представленной на рис. 1.36. По ординате – глубина залегания узла под поверхностью катания. По аппликате откладывается значение накопленной повреждённости в узлах конечноэлементной сетки радиального сечения фрагмента колеса. Пример такой поверхности показан на рис. 1.51.

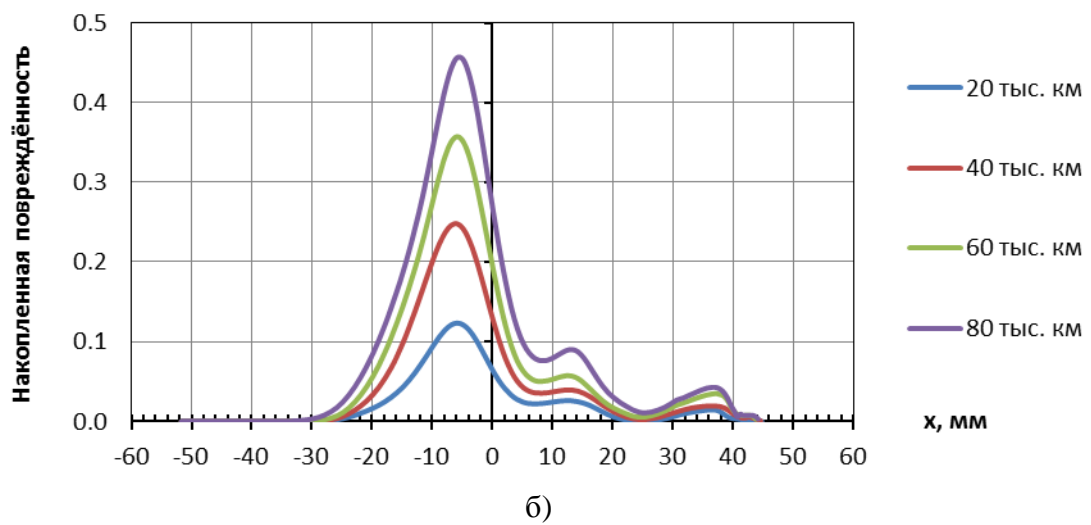
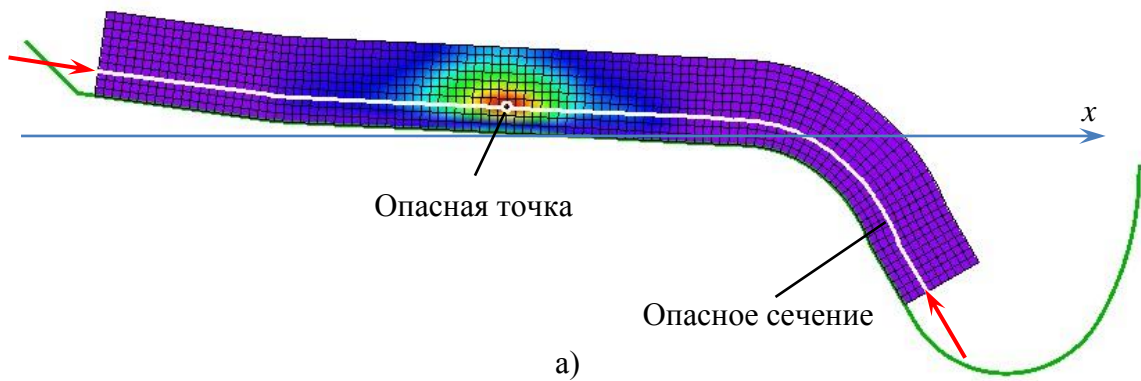


Рис. 1.50. Эпюра накопленной поврежденности в опасном сечении колеса

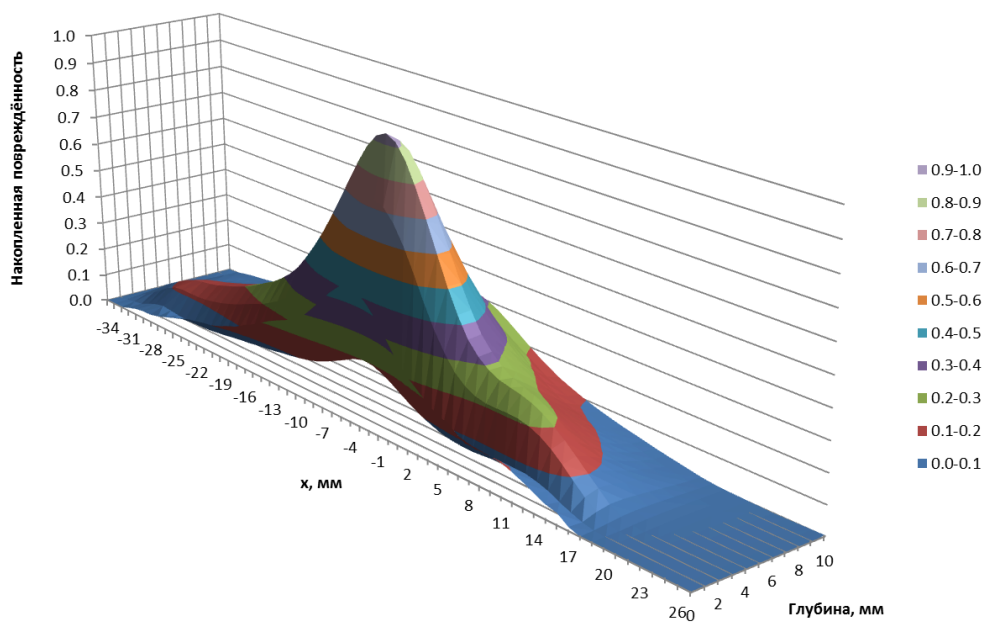


Рис. 1.51. Поверхность накопленной поврежденности в радиальном сечении фрагмента колеса

1.4.9. Пример моделирования накопления повреждений в колесе

Рассмотрим пример моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в колесе грузового вагона на тележках модели 18-100. Модель вагона поставляется вместе с УМ и доступна в библиотеке [{Данные УМ}\samples\Rail_Vehicles\simple_18_100](#).

Загрузите модель в **UM Simulation**. Откройте **Инспектор моделирования объекта**.

На вкладке **Интегратор | Параметры моделирования** задайте следующие значения:

- **Численный метод** = Park;
- **Погрешность** = $1E-7$;
- **Расчет матриц Якоби** = да;
- **Матрицы Якоби для контакта колесо/рельс** = да.

На вкладке **Ж.-д. экипаж | Контакт | Контактные силы** задайте значения:

- **Модуль упругости** = $2E+11$;
- **Коэффициент Пуассона** = 0.3.

Перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Износ** и загрузите проект эволюции из файла *Wheel RCF Test.ecf*. Задайте необходимое **Число потоков** и поставьте флажок в пункте **Расчет эволюции профиля колеса** (рис. 1.52). Запустите моделирование с помощью кнопки **Интегрирование**.

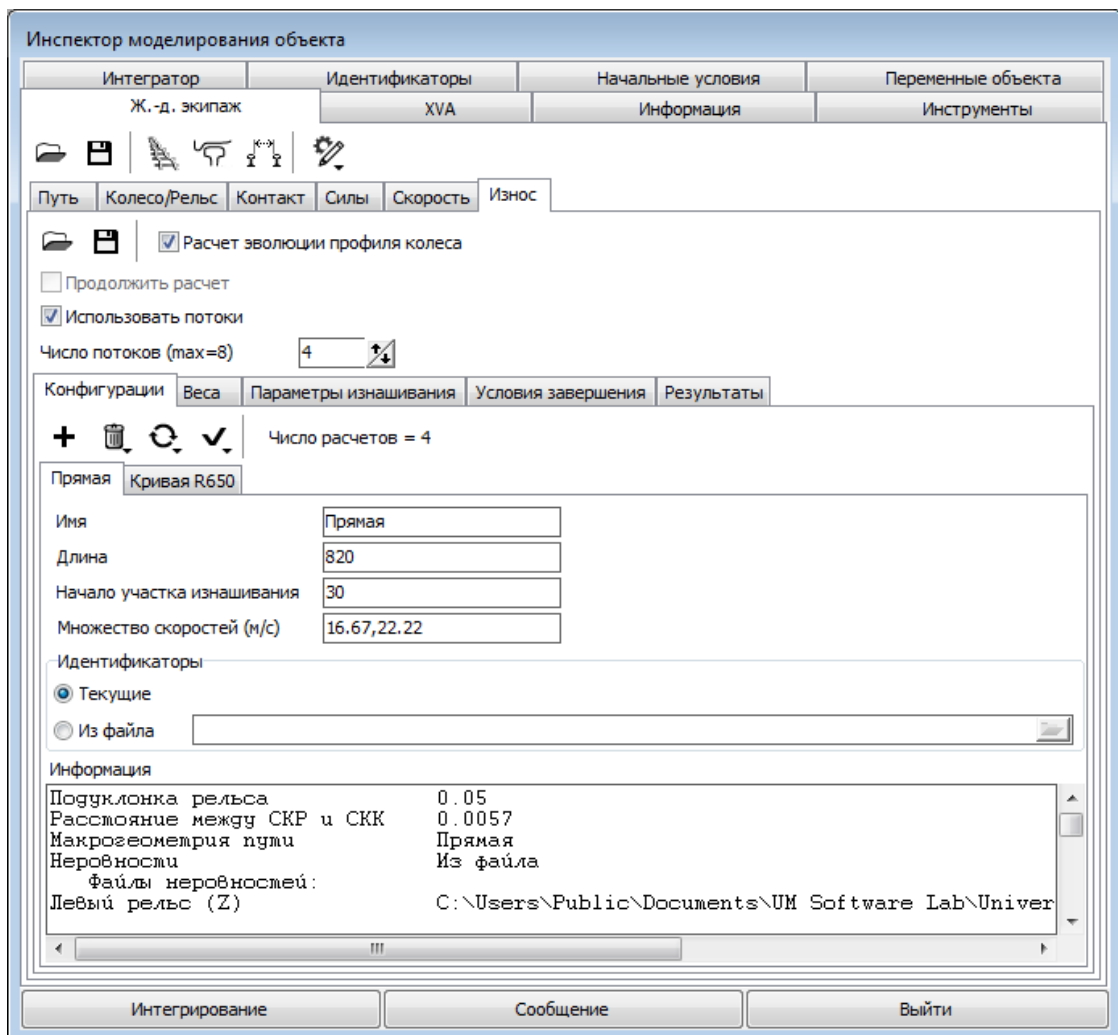


Рис. 1.52. Настройки проекта эволюции профиля колеса

В соответствии с настройками проекта эволюции выполнено моделирование движения вагона по двум участкам пути: прямой и кривой с радиусом 650 м. На каждом участке вагон двигался с двумя скоростями: 16,67 и 22,22 м/с.

В результате моделирования созданы данные для пяти *итераций износа* левого колеса первой колёсной пары, общий пробег составляет 25 000 км, пробег на каждой итерации – 5 000 км. Файл проекта контактной усталости находится в папке

[{Данные УМ}\samples\Rail_Vehicles\simple_18_100\WearResultRCF\simple_18_100.rcf](#)

Откройте проект контактной усталости в модуле **UM RCF Wheel** любым из способов, указанных в п. 1.4.1. Измените настройки проекта на вкладках **Расчёт** и **Материал**, как показано на рис. 1.53 и рис. 1.54. Параметры на вкладке **Остаточные напряжения** оставьте без изменений. Сохраните настройки проекта, щёлкнув кнопку **ОК** в окне диалога **Параметры**. Запустите моделирование с помощью кнопки **Запустить расчёт** (см. п. 1.4.5).

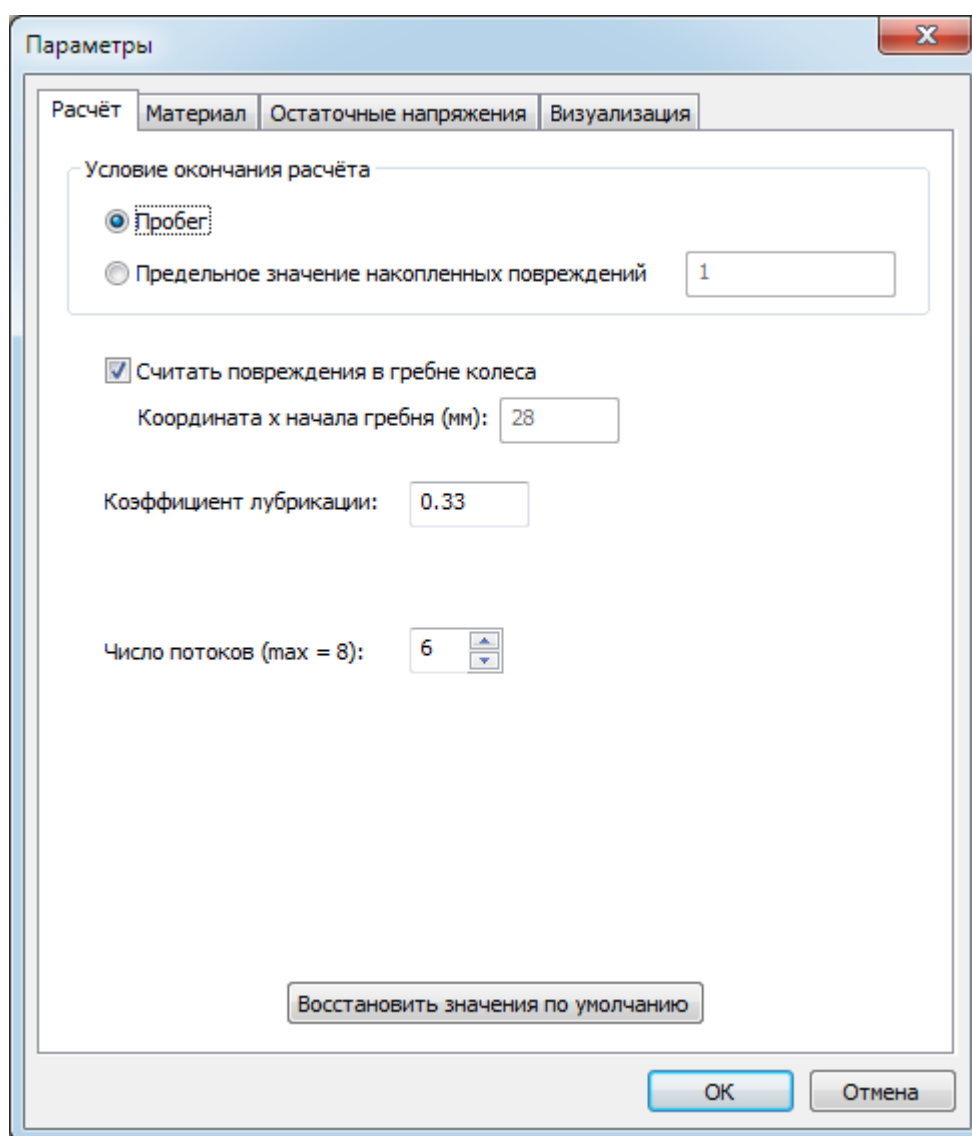


Рис. 1.53. Настройка параметров проекта контактной усталости на вкладке **Расчёт**

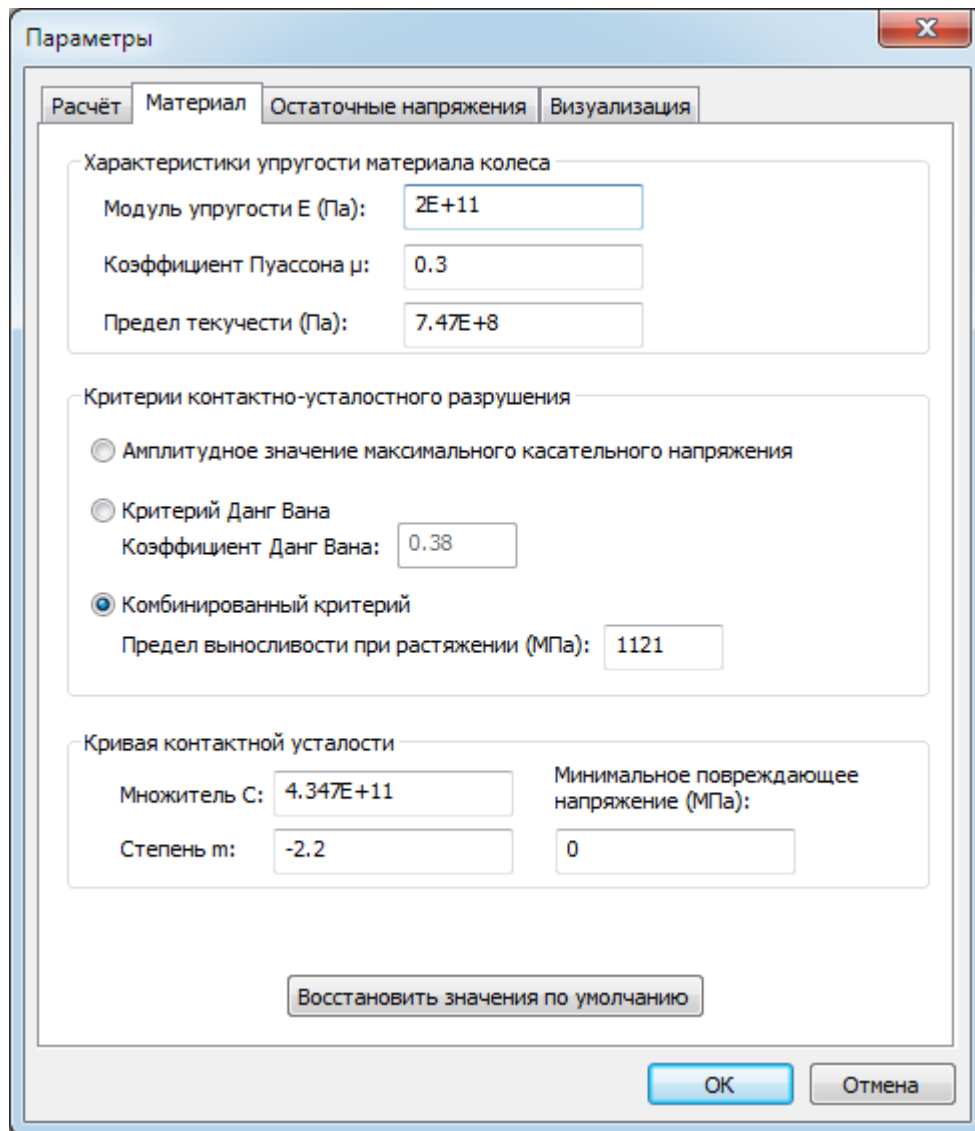


Рис. 1.54. Настройка параметров проекта контактной усталости на вкладке **Материал**

Различные возможности представления результатов расчёта описаны в п. 1.4.8. На рис. 1.55, рис. 1.56 и рис. 1.57 показаны результаты моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в материале колеса грузового вагона.

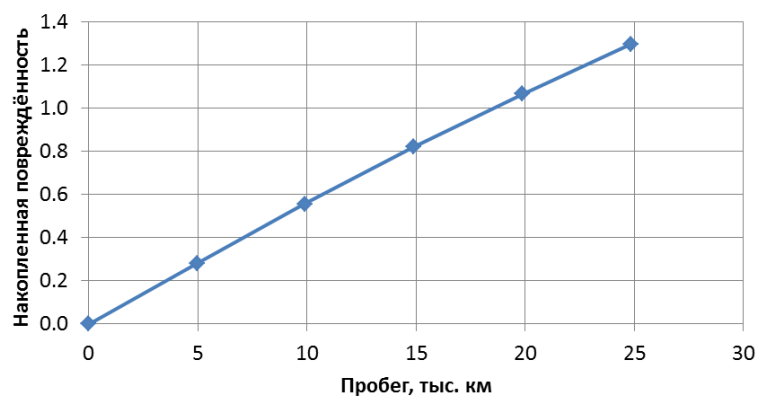


Рис. 1.55. Накопленная повреждённость в опасной точке материала колеса

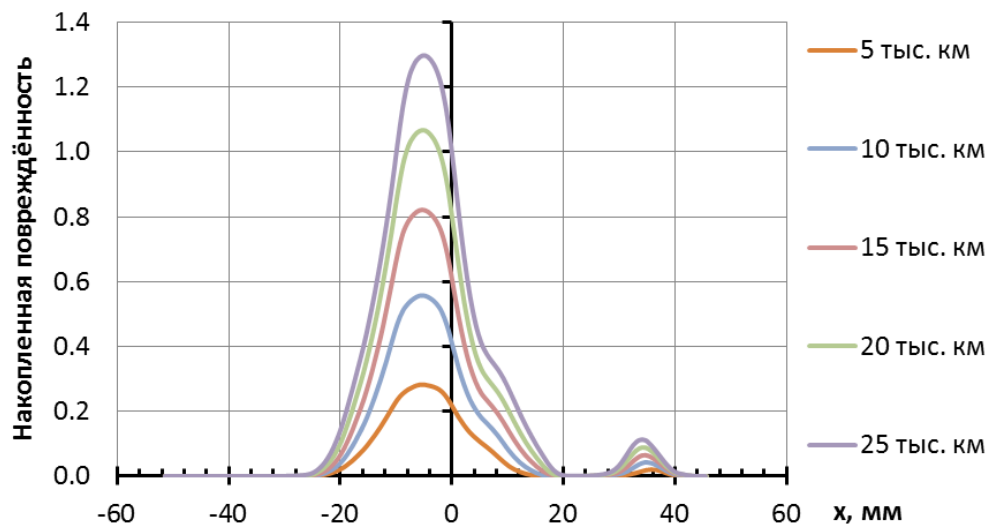


Рис. 1.56. Эпюра накопленных контактно-усталостных повреждений в опасном сечении колеса

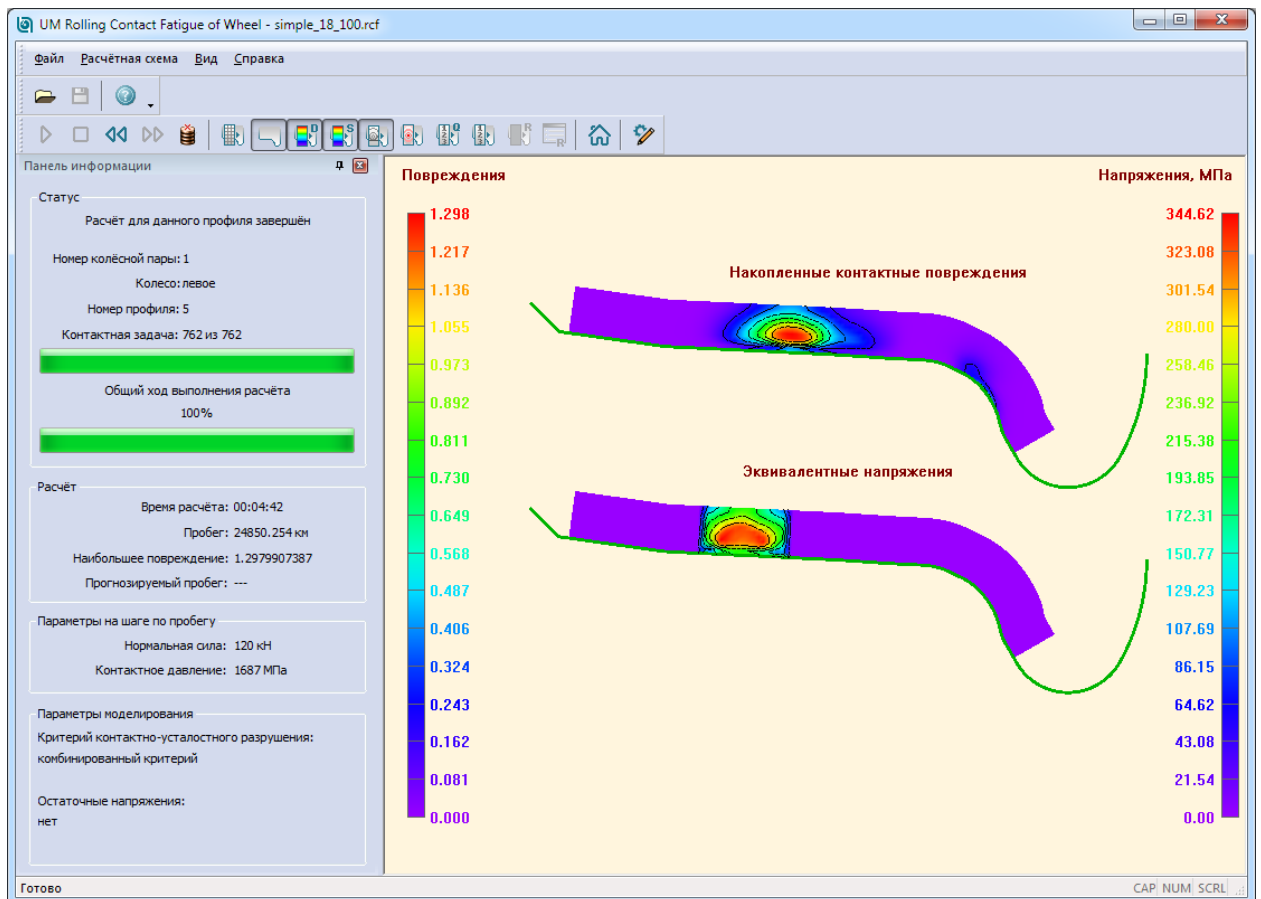


Рис. 1.57. Результаты моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в материале колеса грузового вагона

1.5. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в модуле **UM RCF Rail**

Образование контактно-усталостных повреждений на определённом участке рельса происходит в результате циклического нагружения и зависит от пропущенного тоннажа. Характер нагружения при одном и том же значении пропущенного тоннажа может существенно различаться в зависимости от видов железнодорожных экипажей, проходящих по этому участку, их количественного соотношения, степени загрузки и скорости движения. Кроме того, даже экипажи одного вида могут иметь разные диаметры колёс, профили поверхностей катания колёс и другие параметры, что также влияет на характер нагружения. Моделирование динамики движения железнодорожных экипажей в **УМ** позволяет создавать блоки нагружения с учётом перечисленных выше факторов.

Для моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в материале рельса предварительно выполняется моделирование динамики движения железнодорожных экипажей либо на прямом участке пути, либо на участке пути в кривой. Задаётся число поперечных сечений рельса, в которых вычисляются контактные силы от каждого колеса проходящего экипажа. Количество таких сечений должно быть достаточным, чтобы статистические данные о силах и положении колеса на рельсе были представительными. В модуле **UM RCF Rail** накапливаемые усталостные повреждения в этих сечениях суммируются и приписываются одному поперечному сечению, которое далее будем называть *контрольным сечением рельса*.

При моделировании процесса накопления контактно-усталостных повреждений нельзя указать точку, в которой накопление повреждений будет идти наиболее интенсивно. Даже если контактирующие тела не будут взаимно перемещаться, а будет переменной нормальная сила, например, в задаче Герца будут меняться размеры полуосей эллиптического пятна контакта, а значит и положения опасных точек, как на поверхности контакта, так и в подконтактном слое.

Следовательно, расчёты необходимо проводить для некоторого множества точек, расположенных в области, прилегающей к контакту. При применении метода конечных элементов в качестве таких точек могут использоваться узлы конечноэлементной модели. Для корректного решения контактной задачи размеры расчётной схемы тел должны быть такими, чтобы выполнялось условие малости размеров контактного пятна. Но при большом количестве степеней свободы системы потребуется значительное время для решения контактной задачи и определения напряжений в узлах, а выполнять такие расчёты необходимо многократно.

Исходя из соображений, изложенных выше, в модуле используется фрагмент конечноэлементной модели колеса, прилегающий к контакту. Его размеры берутся такими, чтобы напряжения на гранях, которыми он выделяется, были сравнительно малыми.

1.5.1. Исходные данные

Данные, необходимые для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в модуле **UM RCF Rail**, создаются в процессе моделирования динамики движения железнодорожных экипажей в модуле **UM Loco** ([Глава 8](#)) с помощью инструмента

UM Loco/Rail Profile Wear Evolution (Глава 16). На рис. 1.58 показано окно **Инспектора моделирования объекта** с настройками проекта эволюции профиля рельса.

В группе параметров **Контактно-усталостная долговечность** необходимо выставить флажок в пункте **Сохранять данные для расчета контактно-усталостной долговечности**. В выпадающем списке пункта **Рельс** можно выбрать рельс, для которого нужно моделировать процесс накопления контактно-усталостных повреждений: левый, правый или левый и правый. В ячейке **Число сечений** задаётся число поперечных сечений рельса, в которых будут вычисляться контактные силы от каждого колеса проходящего экипажа.

В результате после завершения моделирования динамики движения железнодорожных экипажей в папке **RailWear**, находящейся в папке проекта эволюции профиля рельса, будет создан бинарный файл с расширением ***.rld**. В той же папке будут находиться файлы с результатами моделирования износа и настройками проекта эволюции. Файл с исходными данными **rld** содержит в названии имя файла профиля рельса и его идентификацию – левый "l" или правый "r".

The image shows a screenshot of the 'UM Simulation' software interface, specifically the 'Rail Profile Evolution' settings window. The window has several tabs: 'Общие', 'Альтернативы', 'Износ профиля рельса', 'Выполнение', and 'Результаты'. The 'Износ профиля рельса' tab is active, and within it, the 'Параметры контакта колесо-рельс' sub-tab is selected. The settings are organized into several sections:

- Параметры изнашивания:** Includes 'Число итераций' (1), 'Тоннаж за итерацию' (5000), 'Ширина интервала накопления износа (мм)' (1), and 'Интервал усреднения износа вдоль пути' (empty). There is a checked checkbox for 'Весь участок изнашивания'.
- Участок изнашивания:** Includes 'Начало участка изнашивания' (30) and 'Конец участка изнашивания' (310).
- Контактно-усталостная долговечность (highlighted in red):** Includes a checked checkbox for 'Сохранять данные для расчета контактно-усталостной долговечности', a dropdown menu for 'Рельс' set to 'левый', and 'Число сечений' (280).
- Сохранять список переменных каждую:** Set to 1 iteration.
- Модель изнашивания:** Includes radio buttons for 'Арчарда' (selected), 'Шпехта', and 'Карта износа'.
- Параметры:** Includes 'Коэффициент износа (м³/Дж)' set to 1.6E-13.

Рис. 1.58. Настройки проекта эволюции профиля рельса в **UM Simulation**

В файле с исходными данными **rld** сохраняются профили рельса, полученные в результате износа. Количество профилей зависит от числа итераций, заданных в проекте эволюции. Для каждого номера профиля хранится следующая информация:

- модуль упругости и коэффициент Пуассона материала рельса;
- количество точек профиля рельса и их координаты;
- тоннаж, количество численных экспериментов, статистический вес эксперимента, масса, проходящая через расчётное сечение;

- количество циклов нагружения;
- сведения о контакте для каждого цикла нагружения – координаты узлов сетки на поверхности пятна контакта и значения сил в узлах сетки.

Замечание. На жёстком диске должно быть достаточно места. В зависимости от настроек проекта эволюции каждый файл с исходными данными **rld** может занимать до нескольких гигабайт.

На рис. 1.59 показана система отсчёта, в которой задаются координаты точек профиля рельса без учёта подуклонки.

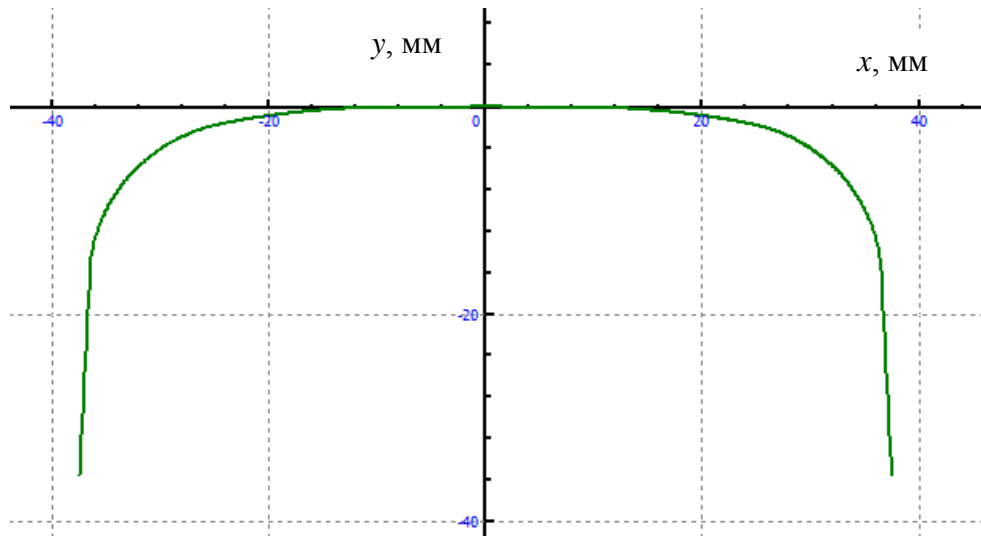


Рис. 1.59. Система отсчёта для задания координат точек профиля рельса

1.5.2. Создание конечноэлементной модели рельса

При решении отдельных задач, связанных с контактом колеса и рельса, размеры элементов используемых сеток выбраны такими, чтобы обеспечить минимальные затраты машинного времени при достаточной точности решения. Профили поверхностей катания колеса и рельса заданы координатами точек, расположенных с шагом 0,1 мм по контурам. Для исследования напряжённого состояния в области контакта оказалось целесообразным для трёхмерных конечноэлементных расчётных схем применить сетки с размером элементов 1 мм. Тем не менее, при использовании фрагментов, включающих области, прилегающие к поверхностям контакта, таких размеров, при которых напряжения малы на поверхностях выделения фрагмента, конечноэлементная схема содержит большое число степеней свободы. В связи с этим в расчётах использовалась схема, содержащая 10 слоёв конечных элементов, отсчитанных от поверхности контакта.

Построение конечноэлементной модели фрагмента рельса начинается с построения плоской сетки из четырёхугольных конечных элементов. Она создаётся на базе узлов, расположенных на профиле рельса с шагом 1 мм (рис. 1.60). Её размер по профилю рельса составляет 87 мм. Этот размер охватывает участок профиля, на котором происходит контактирование при любых возможных положениях колеса на рельсе. Затем строится трёхмерная сетка: плоская сетка протягивается по прямой вдоль продольной оси рельса

(рис. 1.61). В продольном направлении размер сетки составляет 50 мм. Этот размер выбран с учётом того, что в любых случаях длина контактного пятна не превышает 50 мм.

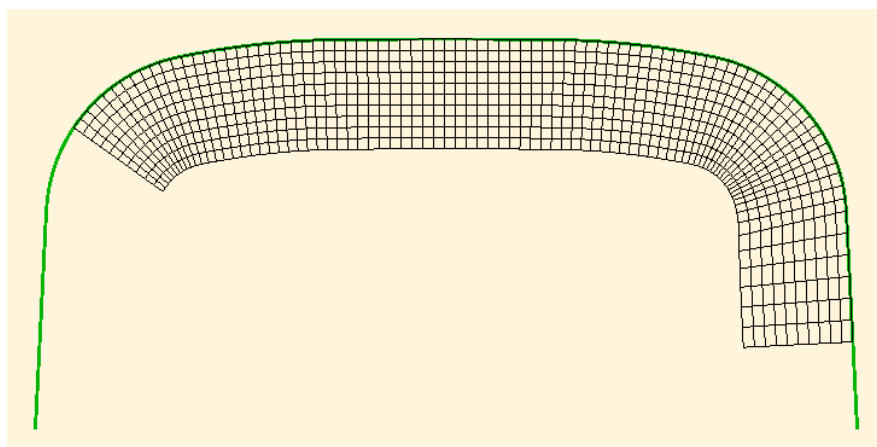


Рис. 1.60. Плоская сетка для построения конечноэлементной модели фрагмента рельса

При использовании упругого основания толщина фрагмента 10 мм обеспечивает достаточную точность решения. Наиболее вероятный размер a полуоси пятна контакта не превышает 10 мм, а точка с наибольшими касательными напряжениями располагается на глубине около $0,5a$. При выбранном размере фрагмента удаётся охватить область наибольших напряжений. Тем не менее, полученная схема характеризуется большим числом степеней свободы. Так, например, представленная на рис. 1.61 схема содержит 48 807 узлов и имеет 146 421 степень свободы. Поэтому с целью снижения затрат машинного времени в расчётах будет использоваться фрагмент этой схемы (см. п. 1.5.3. "Определение напряжений в области контакта колеса и рельса", с. 1-83).

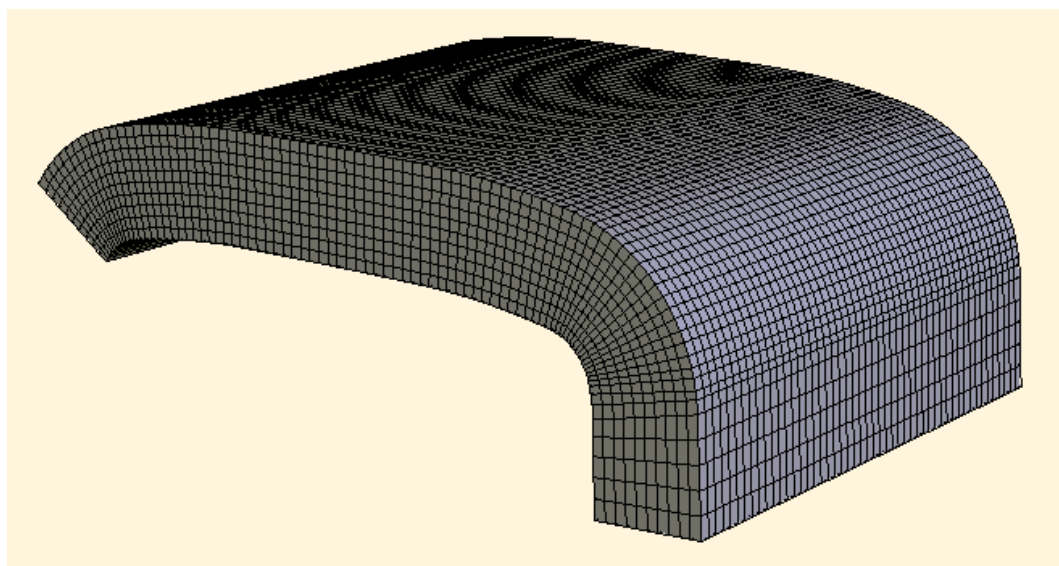


Рис. 1.61. Трёхмерная конечноэлементная модель фрагмента рельса

Формируется матрица жёсткости полученной трёхмерной конечноэлементной модели рельса, состоящей из восьмиузловых конечных элементов. На этом заканчивается подготовительный этап, и дальше начинаются расчёты для циклов нагружения.

1.5.3. Определение напряжений в области контакта колеса и рельса

Для решения задачи качения в модуле **UM Loco** используются модели контактных сил В. Кика и И. Пиотровского [32] и модель Калкера CONTACT [33] (Глава 8, п. 8.5.2.5.2. "Параметры контакта инерционного рельса"). Для модели В. Кика и И. Пиотровского требуется инструмент **UM Loco/Multi-point Contact Model**, а для использования программы CONTACT – инструмент **UM Loco/CONTACT add-on interface**.

С помощью этих алгоритмов вычисляются нормальные и касательные силы в узлах двумерной сетки, расположенной на поверхности контакта. Сетка создаётся следующим образом: пятно контакта разбивается на полосы одинаковой ширины, ориентированные по направлению качения, затем каждая полоса разбивается на одинаковое количество элементов, имеющих в пределах полосы одинаковые размеры (Глава 8, п. 8.4.1.2.2.3. "FASTSIM"). Определяются силы на площадке каждого элемента. Вычисленные силы приписываются центру тяжести элемента. Число полос и элементов задаётся пользователем. Поскольку в процессе качения колеса по рельсу пятна контакта меняют свою форму и размер, шаг сетки в двух направлениях также меняется для каждого нового контакта.

Для определения напряжений в узлах конечноэлементной модели фрагмента рельса необходимо приложить силы, полученные в результате решения контактной задачи, к узлам, расположенным на поверхности контакта. Однако узлы сетки, созданной при решении задачи быстрыми алгоритмами, не совпадают с узлами конечноэлементной сетки. Поэтому после загрузки исходных данных выполняется расчёт сил в узлах конечноэлементной сетки, расположенных на поверхности контакта, с помощью линейной интерполяции. При этом взаимное положение сеток друг относительно друга однозначно определяется координатами точек профиля рельса, на основе которого эти сетки создаются.

Процедура определения напряжений в узлах конечноэлементной модели рельса для каждого цикла нагружения начинается с того, что из исходной конечноэлементной схемы (см. п. 1.5.2) выделяется фрагмент (рис. 1.62а). Размеры сетки фрагмента, прилегающей к поверхности контакта, выбираются такими, чтобы они на 3 мм превышали размеры пятна контакта по каждому направлению. По толщине она имеет такой же размер, как и сетка, из которой выделяется фрагмент.

В расчётах используется схема конечноэлементного фрагмента, опирающегося на упругое основание [34], позволяющая определить напряжения и деформации в трёхмерной области, прилегающей к поверхности контакта, не прибегая ко всякого рода упрощающим предположениям таким, как: пятно имеет форму круга или эллипса, выделению критической плоскости, допущению о том, что она находится в состоянии плоской деформации. Использование такого фрагмента позволяет существенно снизить затраты машинного времени [34, 35, 36, 37].

При создании исходной конечноэлементной схемы вычисляются компоненты её матрицы жёсткости. На узлы, расположенные на всех поверхностях выделенного фрагмента, кроме поверхности контакта, накладываются упругие связи (рис. 1.62б). Жёсткость связей принимается равной 10^7 Н/м в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [37].

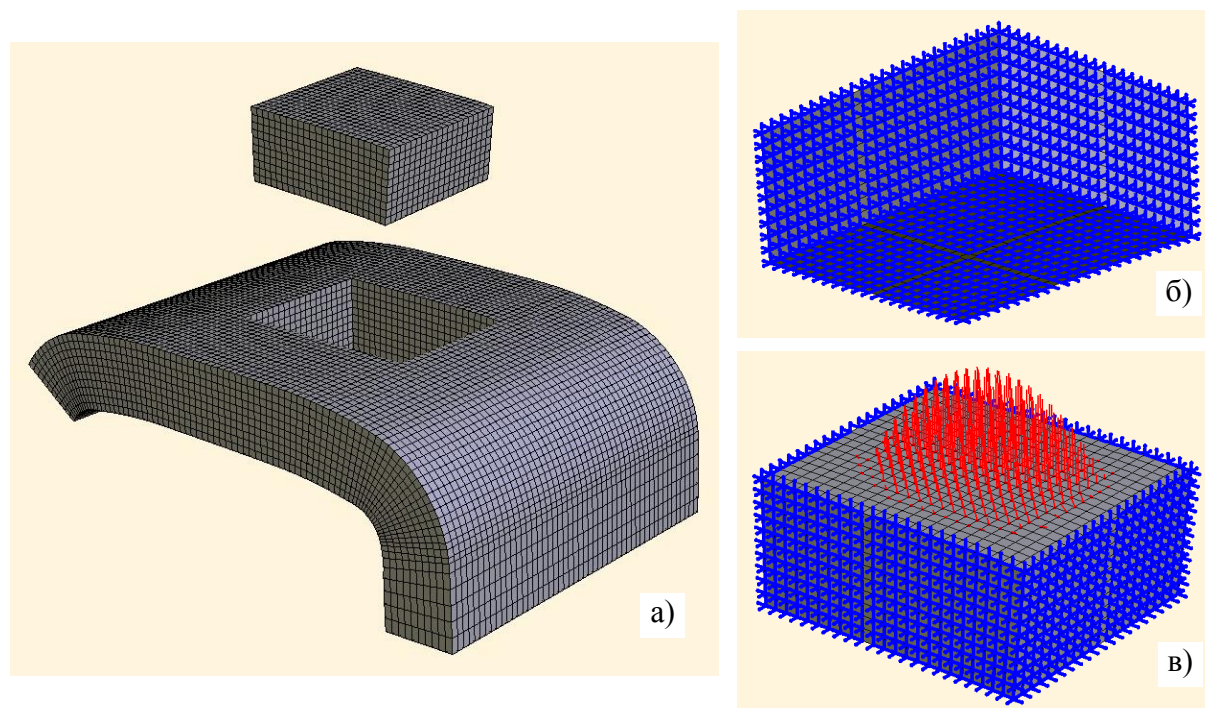


Рис. 1.62. Конечноэлементный фрагмент на упругом основании:
 а – выделение фрагмента из исходной конечноэлементной схемы;
 б – наложение упругих связей на поверхности выделенного фрагмента;
 в – приложение сил к узлам поверхности контакта выделенного фрагмента

Компоненты матрицы жёсткости ансамбля конечных элементов, прилегающих к внутреннему узлу фрагмента, берутся из матрицы жёсткости, построенной для исходной расчётной схемы. Для узлов, расположенных на поверхности фрагмента, они делятся пополам; для узлов, расположенных на рёбрах, они делятся на четыре.

К узлам выделенного фрагмента, расположенным на поверхности контакта, прикладываются узловые контактные силы (рис. 1.62в). Перемещения узлов определяются методом поузловых итераций [38].

Нормальные и касательные напряжения вычисляются для всех узлов выделенного конечноэлементного фрагмента. Количество узлов фрагмента в направлении качения рассматривается как путь i -го узла плоского поперечного сечения фрагмента (рис. 1.5). Тогда каждый узел из этой цепочки представляет собой j -ую позицию, занимаемую i -ым узлом при прохождении области, прилегающей к контакту. Вычисляется эквивалентное напряжение за цикл в соответствии с выбранным критерием контактно-усталостного разрушения (п. 1.2.5). Полученные значения критерия приписываются узлам, расположенным в плоскости симметрии конечноэлементной модели фрагмента рельса. При моделировании процесса накопления усталостных повреждений они сопоставляются с повреждающими по заданной кривой контактной усталости.

Области равных значений комбинированного критерия σ_{RCF} в цветовой заливке и изолинии критерия показаны на рис. 1.63. Наибольшее $\sigma_{RCF} = 257$ МПа получено для узла, расположенного на глубине 4 мм под поверхностью контакта.

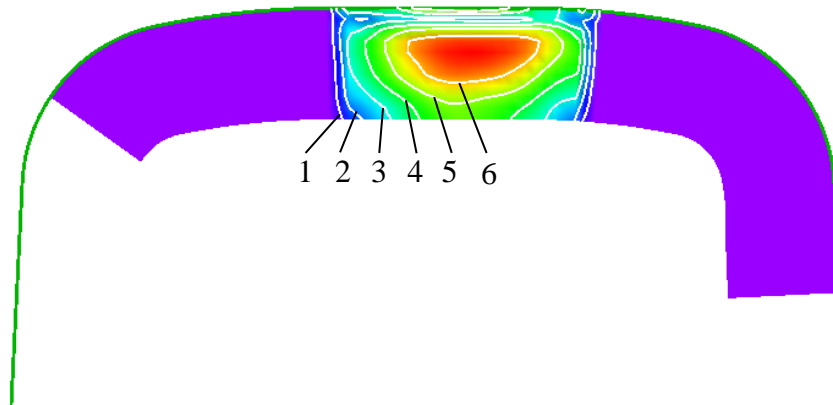


Рис. 1.63. Области равных значений комбинированного критерия σ_{RCF} в поперечном сечении рельса, проходящем по плоскости симметрии конечноэлементного фрагмента:
1-6 – номера линий равных σ_{RCF} , цена изолинии 36,71 МПа

1.5.4. Накопление повреждений в узлах конечноэлементной модели рельса

В процессе моделирования износа профиля рельса используется масштабирование, целью которого является получение значимого износа при небольшом суммарном весе экипажей, прошедших по заданному участку пути. Фактически эпюра износа умножается на масштабный коэффициент. Аналогичный подход применяется и для процесса моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в материале рельса. Зависимость (1.2) для вычисления контактно-усталостной поврежденности Q , накопленной в n -ом узле, преобразуется к виду

$$Q = \sum_{k=1}^{N_{it}} \sum_{i=1}^{N_{exp}} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{M_{it}}{M_{sect} N_i} \alpha_i \frac{1}{N_n(j)}, \quad (1.39)$$

где N_{it} – число итераций моделирования износа;

N_{exp} – количество численных экспериментов;

N_i – число циклов нагружения для i -го численного эксперимента;

M_{it} – тоннаж, назначенный одной итерации износа;

M_{sect} – масса, проходящая через расчетное сечение;

α_i – статистический вес i -го численного эксперимента;

$N_n(j)$ – число циклов до появления выщербин усталостного характера, когда значение критерия равно σ_{eq}^n .

Перечисленные выше параметры задаются в проекте сканирования. Подробная информация находится в [Главе 16](#) руководства пользователя.

С использованием зависимости (1.1) вычисляется число циклов до появления выщербин усталостного характера для узлов, расположенных в плоскости симметрии конечноэлементного фрагмента. Затем в этих узлах определяется накопленная поврежденность путём суммирования повреждений в соответствии с формулой (1.39).

В настройках программы пользователь может выбрать два варианта прекращения моделирования накопления повреждений.

1) Выбрать вариант "пропущенный тоннаж", т.е. повреждения будут накапливаться без ограничения до тех пор, пока не будут выполнены расчёты для всех итераций моделирования износа, заданных в проекте эволюции.

2) Задать предельное значение накопленной повреждённости Q .

Пользователь также может установить минимальное значение повреждающего напряжения в соответствии с выбранным критерием контактно-усталостного разрушения. При моделировании накопления контактно-усталостных повреждений цикл считается повреждающим, если значение критерия превышает этот предел. По умолчанию минимальное значение равно нулю.

1.5.5. Учёт наличия лубриканта в контакте колеса и рельса

Ранее в п. 1.2.4 уже было отмечено, что при испытаниях образцов колёсных сталей на контактную усталость без наличия лубриканта в контакте повреждения не наблюдаются даже при очень высоких давлениях. Это связано с механизмом образования трещин [19]. Как правило, испытания образцов колёсных и рельсовых сталей на контактную усталость в лабораторных условиях дают заниженное число циклов до появления повреждений, поскольку проводятся при постоянной подаче лубриканта в виде масла или воды на контактирующие поверхности. Такие условия являются более жёсткими по сравнению с реальными условиями эксплуатации колёс и рельсов. Железнодорожный транспорт широко применяется для перевозки пассажиров и грузов на магистральных железных дорогах, на трамвайных линиях и линиях метрополитена, в промышленных зонах, в горнодобывающей промышленности. В условиях эксплуатации железнодорожных путей под открытым небом естественным лубрикантом в контакте колеса и рельса является дождевая вода и конденсат. Очевидно, в зависимости от погодных условий такой лубрикант не всегда присутствует в контакте. Поэтому статистические данные показывают, что ресурс рельсов по контактно-усталостной долговечности выше, чем у лабораторных образцов.

С целью получения результатов, близких к статистическим эксплуатационным данным, в модуле **UM RCF Rail** вводится так называемый "коэффициент лубрикации" K_{lub} . Этот коэффициент задаётся пользователем. Он является безразмерным и находится в пределах от 0 до 1. Коэффициент вычисляется для конкретных условий эксплуатации железнодорожного пути. Например, если железнодорожный путь эксплуатируется под открытым небом в конкретном географическом регионе, то K_{lub} можно определить как отношение количества дождливых дней в году, характерного для этого региона, к количеству всех дней в году. В других условиях эксплуатации можно брать отношение длины участка пути с наличием лубриканта к длине всего пути.

С введением коэффициента K_{lub} при моделировании накопления контактно-усталостных повреждений в расчётах используется модифицированная форма зависимости (1.39)

$$Q = K_{lub} \sum_{k=1}^{N_{it}} \sum_{i=1}^{N_{exp}} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{M_{it}}{M_{sect} N_i} \alpha_i \frac{1}{N_n(j)}. \quad (1.40)$$

По умолчанию коэффициент лубрикации K_{lub} равен 0,33.

1.5.6. Учёт износа профиля рельса

Поскольку процессы износа и накопления контактно-усталостных повреждений неразрывно связаны, данные, необходимые для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в модуле **UM RCF Rail**, создаются с помощью инструмента **UM Loco/Rail Profile Wear Evolution** (Глава 16).

Введём понятие *итерация износа рельса*. В рамках излагаемого раздела *итерация износа рельса* – это серия расчётов, в пределах которой профиль поверхности катания рельса не меняется.

Для накопления контактно-усталостных повреждений в модуле **UM RCF Rail** используется конечноэлементная модель фрагмента рельса (п. 1.5.2). На каждой *итерации износа рельса* эта модель перестраивается. Новая конечноэлементная сетка строится на базе изношенного профиля рельса. Полученным узлам новой сетки приписываются повреждения, вычисленные путём интерполяции повреждений, накопленных в узлах сетки на предыдущей *итерации износа рельса*. Далее повторяется процедура накопления контактно-усталостных повреждений в узлах новой конечноэлементной схемы рельса.

На рис. 1.64 показано распределение накопленной повреждённости в *контрольном сечении рельса* Р65 [41], уложенного в прямом участке пути, после пропущенного тоннажа 10 и 50 млн. т.

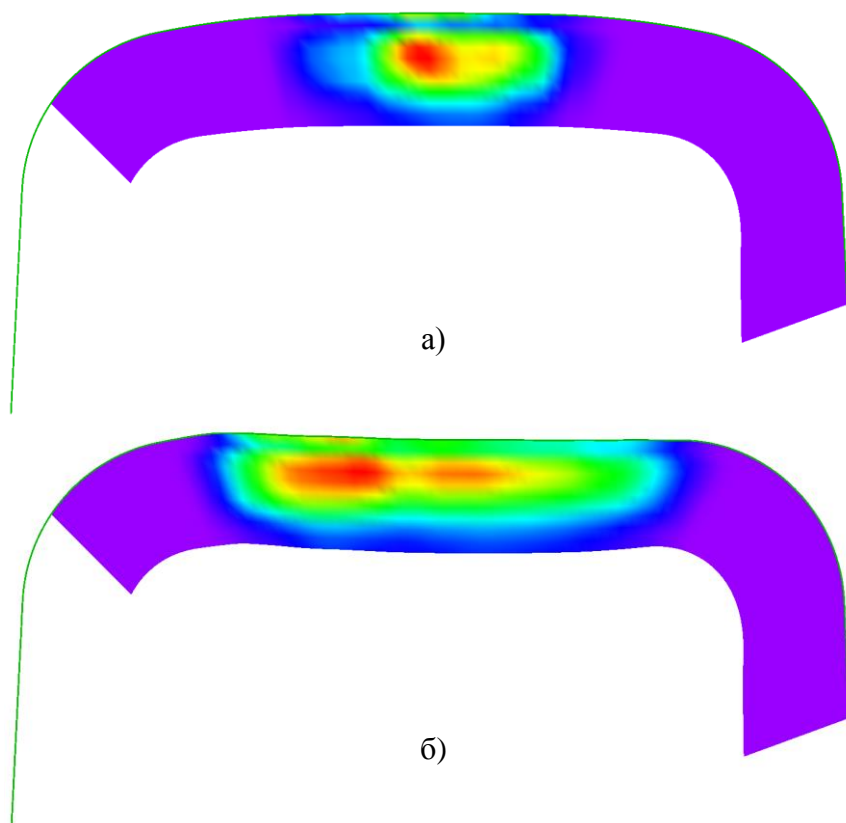


Рис. 1.64. Изохромы накопленной повреждённости в *контрольном сечении рельса* Р65 [41] в прямом участке пути после пропущенного тоннажа: а – 10 млн. т; б – 50 млн. т

Количество *итераций износа рельса*, наработанный тоннаж и тоннаж на одной *итерации износа рельса* определяются набором параметров, задаваемых в проекте эволюции профиля рельса.

Необходимая группа параметров находится на вкладке **Износ профиля рельса | Параметры изнашивания** в окне проекта сканирования.

- **Число итераций** = 100;
- **Тоннаж за итерацию** = 1E06.

Например, для заданных значений в соответствии с формулой (16.18) п. 16.2.1. "Моделирование износа профилей рельсов" [Главы 16](#) наработанный тоннаж составит

$$M_{tot} = N_{it}M_{it} = 100 \cdot 1E06 = 100 \text{ млн. т}$$

Количество контактных задач N , которые необходимо решить на одной *итерации износа рельса* при моделировании процесса накопления контактно-усталостных повреждений, определяется зависимостью

$$N = \sum_{i=1}^{N_{exp}} N_{sect}N_w,$$

где N_{exp} – количество численных экспериментов;

N_{sect} – число поперечных сечений рельса, в которых вычисляются контактные силы от каждого колеса проходящего экипажа;

N_w – количество колёсных пар экипажей, включённых в численный эксперимент.

Число расчётных сечений N_{sect} задаётся параметром **Число сечений** на вкладке **Износ профиля рельса | Параметры изнашивания** в окне проекта сканирования. Увеличение значения этого параметра делает репрезентативнее набор статистических данных о контактах колеса и рельса, получаемых в результате моделирования движения экипажей, но увеличивает затраты машинного времени на моделирование процесса накопления контактно-усталостных повреждений.

Необходимое количество *итераций износа рельса* и пропущенный тоннаж за одну итерацию определяются с помощью тестирования конкретной модели. Большое значение параметра **Тоннаж за итерацию** может привести к нарушению плавности профиля рельса на локальном участке (рис. 1.65) либо к вырождению профиля (см. п. 16.1.1.3. "Параметры изнашивания" [Главы 16](#)). Поэтому для сохранения плавности профиля рельса в процессе эволюции при моделировании износа рекомендуется увеличивать количество итераций и уменьшать пропущенный тоннаж за одну итерацию. В качестве ориентировочного значения параметра **Тоннаж за итерацию** можно рекомендовать 1 млн. т.

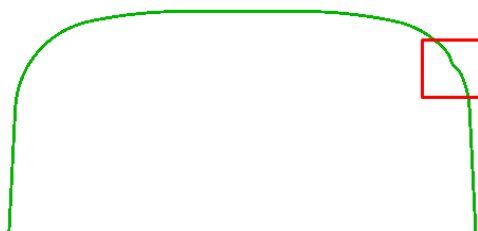


Рис. 1.65. Нарушение плавности профиля рельса на локальном участке

1.6. Работа с модулем UM RCF Rail

1.6.1. Запуск модуля

Файл с исходными данными для моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в рельсе создаётся в модуле **UM Loco** ([Глава 8](#)) с помощью инструмента **UM Loco/Rail Profile Wear Evolution** ([Глава 16](#)), см. п. 1.5.1.

В процессе или после установки **УМ** на компьютер рекомендуется ассоциировать файлы с расширением ***.rld** с файлами контактной усталости **UM RCF Rail**. В этом случае при двойном щелчке мышью на таком файле будет автоматически запускаться модуль **UM RCF Rail**.

Другой вариант запуска модуля – воспользоваться кнопкой **Пуск – Все программы | Универсальный механизм 10 | Инструменты | UM Rolling Contact Fatigue of Rail**. После запуска модуля **UM RCF Rail** пользователю необходимо самому открыть файл ***.rld** с

помощью меню **Файл | Открыть** или кнопки  на панели инструментов **Стандартная**.

1.6.2. Интерфейс модуля

На рис. 1.66 представлен интерфейс модуля **UM RCF Rail**.

В верхней части окна расположены последовательно заголовок окна, строка меню, панели инструментов **Стандартная** и **Расчётная схема**. Внизу находится строка состояния. Слева отображается **Панель информации**, она является плавающей: пользователь может закрепить её в левой или правой части окна, сделать выплывающей (скрыть), закрыть. По умолчанию **Панель информации** закреплена в левой части окна и всегда отображается при каждом запуске модуля.

Отобразить или скрыть панели инструментов и **Панель информации**, поменять их настройки, пользователь может в меню **Вид | Панели инструментов и закрепляемые окна**, либо вызвав контекстное меню, наведя указатель мыши на строку меню или любую панель инструментов и щёлкнув правой кнопкой мыши. Также пользователь может изменить внешнее оформление окна модуля с помощью меню **Вид | Вид приложения**.

Рабочая область окна предназначена для графического отображения расчётной схемы и результатов расчётов. Если данные для расчёта загружены, то в центре рабочей области по умолчанию отображаются профиль рельса и конечноэлементная сетка. Все режимы отображения можно включать или отключать, например, с помощью кнопок на панели инструментов **Расчётная схема**. Если в процессе вычислений включены режимы заливки цветом, то в центре рабочей области отображаются эквивалентные напряжения в плоскости симметрии конечноэлементного фрагмента рельса, в верхней части рабочей области – накопленная повреждённость в той же плоскости, слева – цветовая шкала для оценки уровня накопленной повреждённости, справа – цветовая шкала для оценки уровня эквивалентных напряжений.

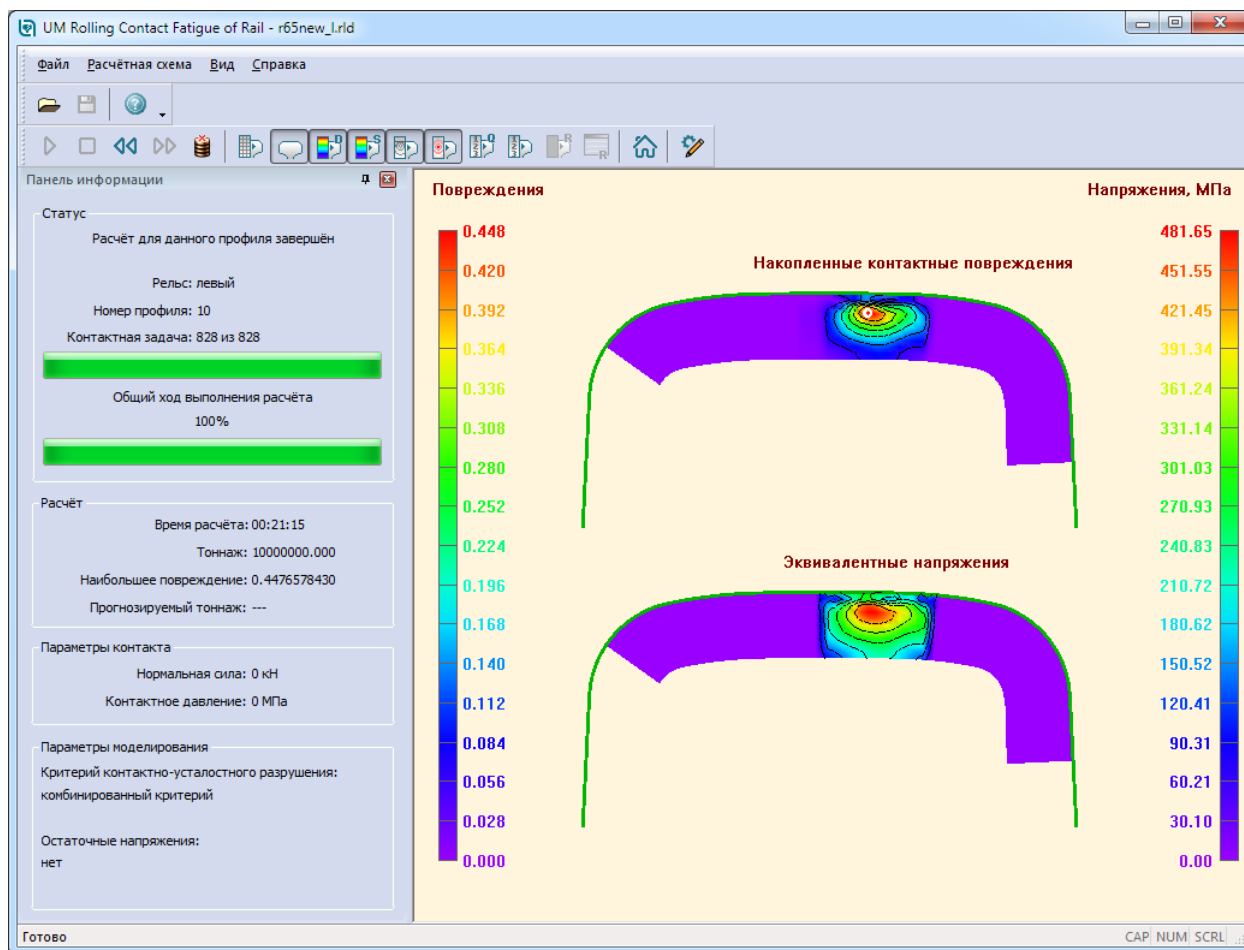



Рис. 1.66. Интерфейс модуля **UM RCF Rail**

1.6.3. Параметры

Опция «Параметры» становится активной, когда загружены данные для расчёта. После её выбора с помощью меню **Расчётная схема | Параметры...** или кнопки  на экране появится окно, показанное на рис. 1.67.

Появившееся окно диалога содержит четыре вкладки: **Расчёт**, **Материал**, **Остаточные напряжения** и **Визуализация**. Кнопка **Восстановить значения по умолчанию** позволяет вернуться к исходным значениям параметров на выбранной вкладке. Сохранение изменённых параметров происходит только после нажатия кнопки **ОК**. В противном случае изменения сохранены не будут.

1.6.3.1. Вкладка «Расчёт»

Вкладка **Расчёт** показана на рис. 1.67.

Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в модуле **UM RCF Rail** предусматривает два варианта окончания расчёта:

- 1) прохождение через *контрольное сечение рельса* всех конфигураций экипажей, заданных при моделировании динамики движения в модуле **UM Loco** (пропущенный тоннаж);
- 2) достижение предельного значения накопленных повреждений в точке рельса.

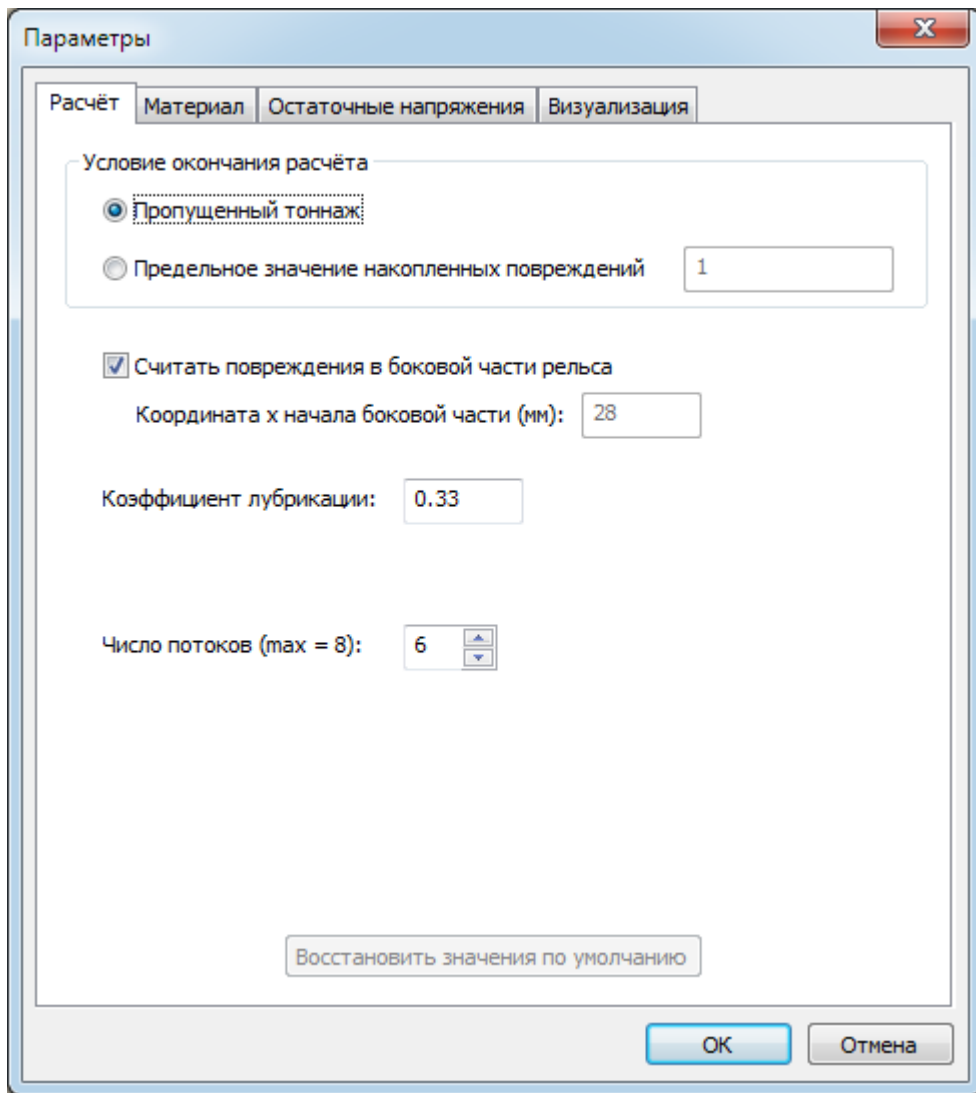


Рис. 1.67. Окно диалога **Параметры**, вкладка **Расчёт**

При выборе первого варианта расчёт будет выполняться для всех *итераций износа рельса* вне зависимости от накопленной повреждённости в точке рельса.

При выборе второго варианта пользователю необходимо задать предельное значение накопленных повреждений. Накопленная повреждённость в точке рельса вычисляется с использованием зависимости (1.40), накопление повреждений в узлах конечноэлементной расчётной схемы рассмотрено в п. 1.5.4. После достижения предельного значения накопленных повреждений расчёт будет продолжен до завершения текущей *итерации износа рельса* (см. п. 1.5.6).

По умолчанию выбран первый вариант – пункт **Пропущенный тоннаж**.

Пункт **Считать повреждения в боковой части рельса** (см. рис. 1.67).

Модуль **UM RCF Rail** позволяет не моделировать процесс накопления контактно-усталостных повреждений в боковой части рельса. По умолчанию пункт **Считать повреждения в боковой части рельса** активирован. Если пользователь выключает эту опцию, ему необходимо задать участок профиля рельса, который будет считаться боковым. Для этого предназначен параметр **Координата x начала боковой части (мм)**, см. рис. 1.67. По умолчанию значение этого параметра 28 мм. Координата задаётся в системе отсчёта,

показанной на рис. 1.59. Таким образом, часть конечноэлементной модели фрагмента рельса, координаты x узлов которой больше заданной координаты x начала боковой части, считается боковой частью рельса.

Назначение параметра **Коэффициент лубрикации** (см. рис. 1.67) подробно описано в п. 1.5.5.

Значение в ячейке **Число потоков** определяет число потоков для выполнения вычислений в параллельных потоках. Максимальное число потоков зависит от конфигурации компьютера. По умолчанию задаётся число потоков на два меньше от максимально возможного в целях сохранения производительности операционной системы во время выполнения расчётов.

Если на вкладке **Расчёт** были изменены параметры расчёта (кроме числа потоков), то после нажатия кнопки **ОК** на экране появится окно, показанное на рис. 1.68.

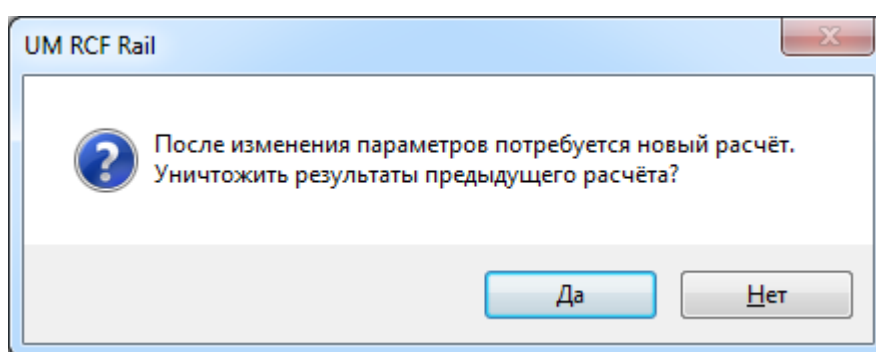


Рис. 1.68. Окно диалога – запрос на удаление результатов расчёта

Кнопка **Нет** – изменения параметров не будут сохранены.

Кнопка **Да** – изменённые параметры будут сохранены. Файлы с результатами расчёта будут уничтожены. Можно запускать расчёт с новыми параметрами.

1.6.3.2. Вкладка «Материал»

Вкладка **Материал** показана на рис. 1.69.

На вкладке задаются характеристики материала рельса: модуль упругости E (по умолчанию $2 \cdot 10^{11}$ Па), коэффициент Пуассона μ (по умолчанию 0,3), условный предел текучести σ_T (по умолчанию $8 \cdot 10^8$ Па).

Расчёт накопления повреждённости ведётся с предположением о том, что материал рельса работает в условиях упругой приспособляемости. Но в случае, когда профили колеса и рельса не гладкие вследствие износа в виде кольцевых выработок, напыла материала, в контакте могут возникать высокие давления, что при сохранении условия упругой приспособляемости приводит к получению нереально больших значений интенсивностей деформаций и напряжений. Для их ограничения используется диаграмма Прандтля: интенсивность напряжений, превышающая условный предел текучести материала, принимается равной этому пределу.

Кривая контактной усталости материала аппроксимирована функцией (1.1), см. п. 1.2.4. Значения констант материала C и m в этом выражении задаются в зависимости от

выбранного критерия контактно-усталостного разрушения. Выбрать критерий можно в поле **Критерии контактно-усталостного разрушения**.

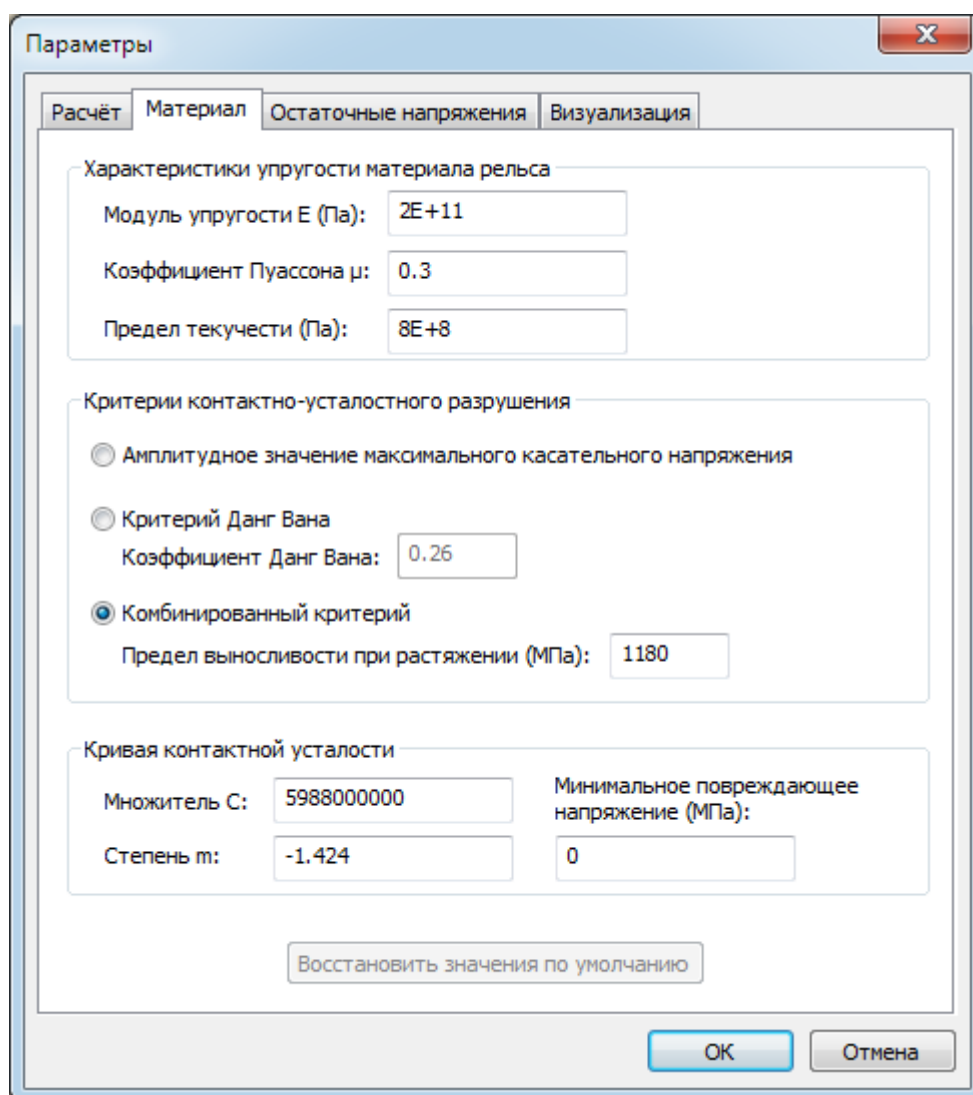


Рис. 1.69. Окно диалога **Параметры**, вкладка **Материал**

Описание критериев дано в следующих разделах:

- 1) Критерий амплитудного значения максимального касательного напряжения – п. 1.2.5.1.
- 2) Критерий Данг Вана – п. 1.2.5.2.
- 3) Комбинированный критерий – п. 1.2.5.3.

Значения констант материала C и m рельсовой стали для указанных критериев приведены в п. 1.2.9.

Пользователь также может установить минимальное значение повреждающего напряжения в соответствии с выбранным критерием контактно-усталостного разрушения. При моделировании накопления контактно-усталостных повреждений цикл считается повреждающим, если значение критерия превышает этот предел. По умолчанию минимальное значение равно нулю.

Если на вкладке **Материал** был изменён любой из параметров, то после нажатия кнопки **ОК** на экране появится окно, показанное на рис. 1.68.

Кнопка **Нет** – изменения параметров не будут сохранены.

Кнопка **Да** – изменённые параметры будут сохранены. Файлы с результатами расчёта будут уничтожены.

1.6.3.3. Вкладка «Остаточные напряжения»

Вкладка Остаточные напряжения показана на рис. 1.70.

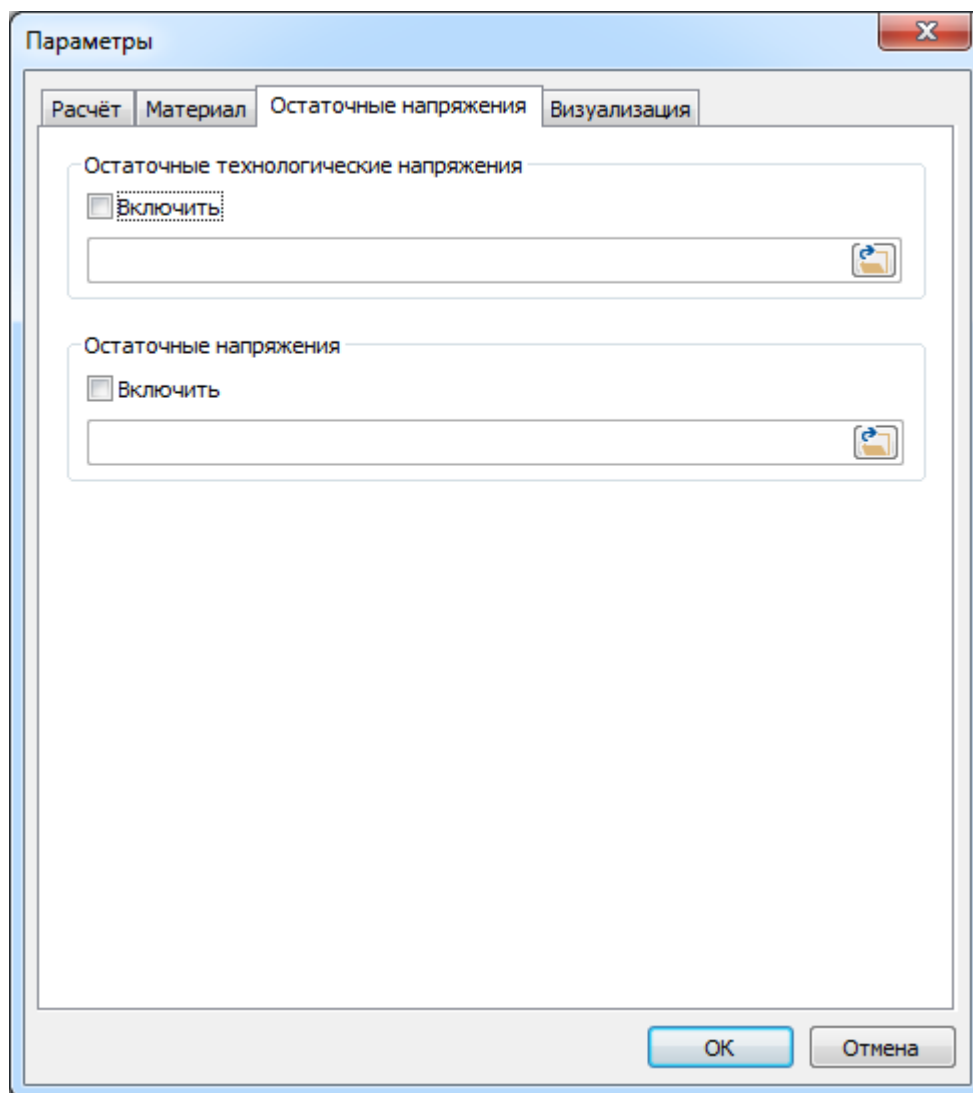


Рис. 1.70. Окно диалога **Параметры**, вкладка **Остаточные напряжения**

С помощью этой вкладки пользователь может включить в расчёт два вида остаточных напряжений: остаточные технологические напряжения в рельсе после изготовления и любой другой вид остаточных напряжений, например, возникающих в рельсе в процессе эксплуатации. Информация об остаточных напряжениях хранится в файлах текстового формата.

Подходы к моделированию процесса накопления контактно-усталостных повреждений с учётом остаточных напряжений для колеса и рельса аналогичны. Описание такого подхода даётся в п. 1.3.7.

1.6.3.4. Вкладка «Визуализация»

Вкладка **Визуализация** показана на рис. 1.71.

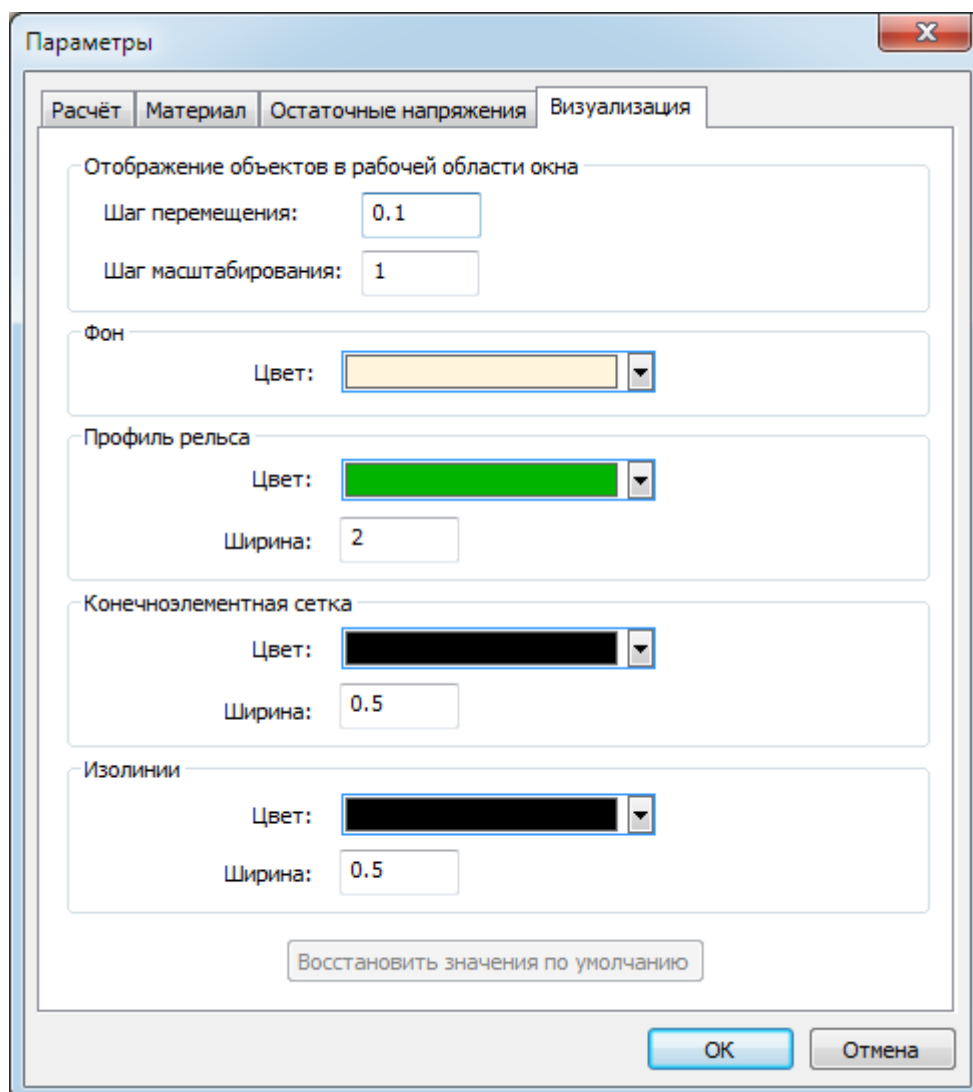


Рис. 1.71. Окно диалога **Параметры**, вкладка **Визуализация**

Расчётную схему в рабочей области окна можно перемещать в любом направлении в плоскости экрана с помощью кнопок со стрелками на клавиатуре (либо левой кнопкой мыши), увеличивать или уменьшать с помощью кнопок «Gray +» и «Gray –» (либо вращая колесо мыши). Все эти операции выполняются дискретно с заданным шагом. Поменять значения шагов можно на вкладке **Визуализация**. Шаги задаются в условных единицах.


Также на вкладке можно задать цвет фона рабочей области окна, цвет и ширину линий для отображения профиля рельса, конечноэлементной сетки, изолиний.

1.6.4. Режимы графического отображения

В модуле реализовано несколько видов графического отображения расчётной схемы и результатов расчёта, которые могут включаться или отключаться в различных сочетаниях друг с другом.

При необходимости расчётную схему в рабочей области окна можно перемещать, увеличивать или уменьшать. Вернуть схему в исходное положение можно следующими способами:

– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Исходное положение**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;


– нажать клавишу **Home** на клавиатуре;

– щёлкнуть правой кнопкой мыши в рабочей области окна, в появившемся контекстном меню выбрать пункт **Исходное положение**.

1.6.4.1. Режим «Сетка»

Включить или отключить режим отображения **Сетка** можно тремя способами:

– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Сетка**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;

– нажать клавишу **1** на клавиатуре.

В центральной части рабочей области окна отображается сетка, состоящая из четырёхугольных элементов, расположенная в плоскости симметрии конечноэлементного фрагмента рельса (рис. 1.60). Если при включённом режиме **Сетка** включён режим **Повреждения в цвете**, то аналогичная сетка отображается в верхней части рабочего окна в поперечном сечении рельса, где иллюстрируется процесс накопления контактно-усталостных повреждений.


Режим автоматически включается при загрузке данных.

Замечание. Режим отображения **Сетка** доступен всегда, если загружены данные для расчёта.

1.6.4.2. Режим «Профиль рельса»

Включить или отключить режим отображения **Профиль рельса** можно тремя способами:

– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Профиль рельса**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;

– нажать клавишу **2** на клавиатуре.


В центральной части рабочей области окна отображается профиль рельса (рис. 1.66). Если при включённом режиме **Профиль рельса** включён режим **Повреждения в цвете**, то аналогичный профиль отображается в верхней части рабочего окна, где иллюстрируется процесс накопления контактно-усталостных повреждений.

Режим автоматически включается при загрузке данных.

Замечание. Режим отображения **Профиль рельса** доступен всегда, если загружены данные для расчёта.

1.6.4.3. Режим «Повреждения в цвете»

Включить или отключить режим отображения **Повреждения в цвете** можно тремя способами:


- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Повреждения в цвете**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **3** на клавиатуре.

В верхней части рабочей области окна отображается поперечное сечение рельса, в котором с помощью заливки цветом показано распределение накопленных контактно-усталостных повреждений (рис. 1.6б). Заливка цветом осуществляется для каждого четырёхузлового элемента плоской сетки: в зависимости от значения накопленного повреждения в узле в соответствии со шкалой выбирается необходимый цвет для узла, затем полученные цвета от четырёх вершин смешиваются в плоскости элемента по линейному закону. Слева в рабочей области окна отображается цветовая шкала для оценки уровня накопленных повреждений.

Замечание. Режим отображения **Повреждения в цвете** доступен, если загружены данные для расчёта и расчёт выполнялся.

1.6.4.4. Режим «Напряжения в цвете»

Включить или отключить режим отображения **Напряжения в цвете** можно тремя способами:


- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Напряжения в цвете**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **4** на клавиатуре.

В центральной части рабочей области окна отображается поперечное сечение рельса, в котором с помощью заливки цветом показано распределение эквивалентных напряжений (рис. 1.6б). Заливка цветом осуществляется для каждого четырёхузлового элемента плоской сетки: в зависимости от значения эквивалентного напряжения в узле в соответствии со шкалой выбирается необходимый цвет для узла, затем полученные цвета от четырёх вершин смешиваются в плоскости элемента по линейному закону. Справа в рабочей области окна отображается цветовая шкала для оценки уровня эквивалентных напряжений.

Замечание. Режим отображения **Напряжения в цвете** доступен, если загружены данные для расчёта и расчёт выполнялся.

1.6.4.5. Режим «Изолинии»

Включить или отключить режим отображения **Изолинии** можно тремя способами:


- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Изолинии**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **5** на клавиатуре.

Режим предназначен для отображения линий равных значений компонента – изопараметрических линий. Режим поддерживает шесть изолиний, то есть компонент разбивается на семь уровней. Если включён режим **Напряжения в цвете**, то в центральной части рабочей области окна отображается поперечное сечение рельса, в котором показаны изолинии эквивалентных напряжений (рис. 1.66). Если включён режим **Повреждения в цвете**, то в верхней части рабочей области окна отображается поперечное сечение рельса, в котором показаны изолинии накопленных контактно-усталостных повреждений (рис. 1.66).

Замечание. Режим отображения **Изолинии** доступен, если загружены данные для расчёта, расчёт выполнялся и включён режим отображения **Повреждения в цвете** или **Напряжения в цвете**.

1.6.4.6. Режим «Максимальное повреждение»

Включить или отключить режим отображения **Максимальное повреждение** можно тремя способами:


- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Максимальное повреждение**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **6** на клавиатуре.

В верхней части рабочей области окна в поперечном сечении рельса кружком белого цвета обозначается узел, в котором накоплено наибольшее контактно-усталостное повреждение (рис. 1.66). Значение наибольшего повреждения можно посмотреть на **Панели информации** в поле **Расчёт** (рис. 1.73).

Замечание. Режим отображения **Максимальное повреждение** доступен, если загружены данные для расчёта, расчёт выполнялся, при этом наибольшее накопленное повреждение больше нуля, и включён режим отображения **Повреждения в цвете**.

1.6.4.7. Режим «Накопленные повреждения»

Включить или отключить режим отображения **Накопленные повреждения** можно тремя способами:


- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Накопленные повреждения**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **7** на клавиатуре.

Если включён режим **Повреждения в цвете**, то в верхней части рабочей области окна отображается поперечное сечение рельса, в котором точками обозначены узлы конечно-элементной сетки, рядом с каждым узлом отображается числовое значение накопленного в нём повреждения. Если включён режим **Напряжения в цвете**, то в центральной части рабочей области окна отображается поперечное сечение рельса, в котором точками обозначены узлы конечноэлементной сетки, рядом с каждым узлом отображается числовое значение эквивалентного напряжения.

Замечание. Режим отображения **Накопленные повреждения** доступен, если загружены данные для расчёта, расчёт выполнялся, и включён режим отображения **Повреждения в цвете** или **Напряжения в цвете**.

1.6.4.8. Режим «Номера узлов»

Включить или отключить режим отображения **Номера узлов** можно тремя способами:


- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Номера узлов**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;
- нажать клавишу **8** на клавиатуре.

В центральной части рабочей области окна в поперечном сечении рельса точками обозначаются узлы конечноэлементной сетки, рядом с каждым узлом отображается его номер. Если включён режим **Повреждения в цвете**, то номера отображаются рядом с узлами поперечного сечения рельса в верхней части рабочей области окна, где иллюстрируется процесс накопления контактно-усталостных повреждений.

Замечание. Режим отображения **Номера узлов** доступен всегда, если загружены данные для расчёта.

1.6.4.9. Режим «Остаточные напряжения»

Включить или отключить режим отображения **Остаточные напряжения** можно двумя способами:

- выбрать пункт меню **Расчётная схема | Остаточные напряжения**;
- щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**.

В центральной части рабочей области окна отображается поперечное сечение рельса, в котором с помощью заливки цветом показано распределение одной из компонент остаточных напряжений. Заливка цветом осуществляется для каждого четырёхузлового элемента плоской сетки: в зависимости от значения компоненты напряжения в узле в соответствии со шкалой выбирается необходимый цвет для узла, затем полученные цвета от четырёх вершин смешиваются в плоскости элемента по линейному закону. Справа в рабочей области окна отображается цветовая шкала для оценки уровня выбранной компоненты остаточных напряжений.

Выбрать компоненту остаточных напряжений для отображения можно в окне диалога **Остаточные напряжения** (рис. 1.72). Окно диалога вызывается с помощью пункта меню

Расчётная схема | Выбор компоненты либо кнопки  на панели инструментов **Расчётная схема**.

Замечание. Режим отображения **Остаточные напряжения** доступен, если загружены данные об остаточных напряжениях (см. п. 1.6.3.3).

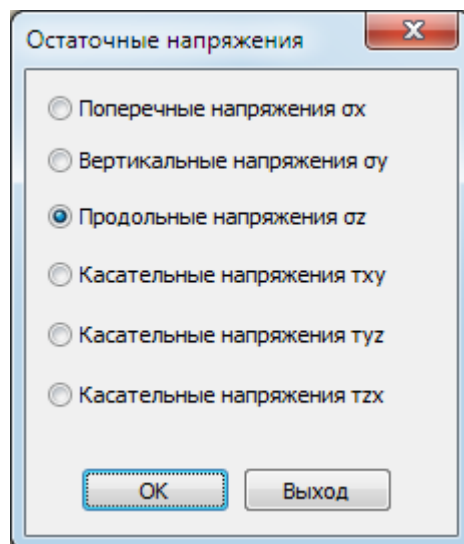



Рис. 1.72. Выбор компоненты остаточных напряжений для отображения

1.6.5. Выполнение расчёта

Запустить расчёт можно следующими способами:

– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Запустить расчёт**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;

– нажать клавишу **F9** на клавиатуре;

– щёлкнуть правой кнопкой мыши в рабочей области окна, в появившемся контекстном меню выбрать пункт **Запустить расчёт**.


Расчёт выполняется последовательно для каждой *итерации износа рельса* в соответствии с исходными данными в файле **rld**. Если условием окончания расчёта является достижение предельного значения накопленного повреждения в точке рельса, и оно достигается раньше, чем были выполнены расчёты на всех *итерациях износа рельса*, то процедура завершается, и расчёт для оставшихся *итераций износа рельса* не выполняется. Если условием окончания расчёта является пропущенный тоннаж, то расчёт выполняется на всех *итерациях износа рельса*.

Следить за состоянием расчёта позволяет **Панель информации** (рис. 1.73).

После окончания расчёта модуль выдаёт соответствующее сообщение в окне диалога на экране.

Прервать расчёт можно следующими способами:

– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Остановить расчёт**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;

– нажать клавишу **Esc** на клавиатуре;

– щёлкнуть правой кнопкой мыши в рабочей области окна, в появившемся контекстном меню выбрать пункт **Остановить расчёт**.

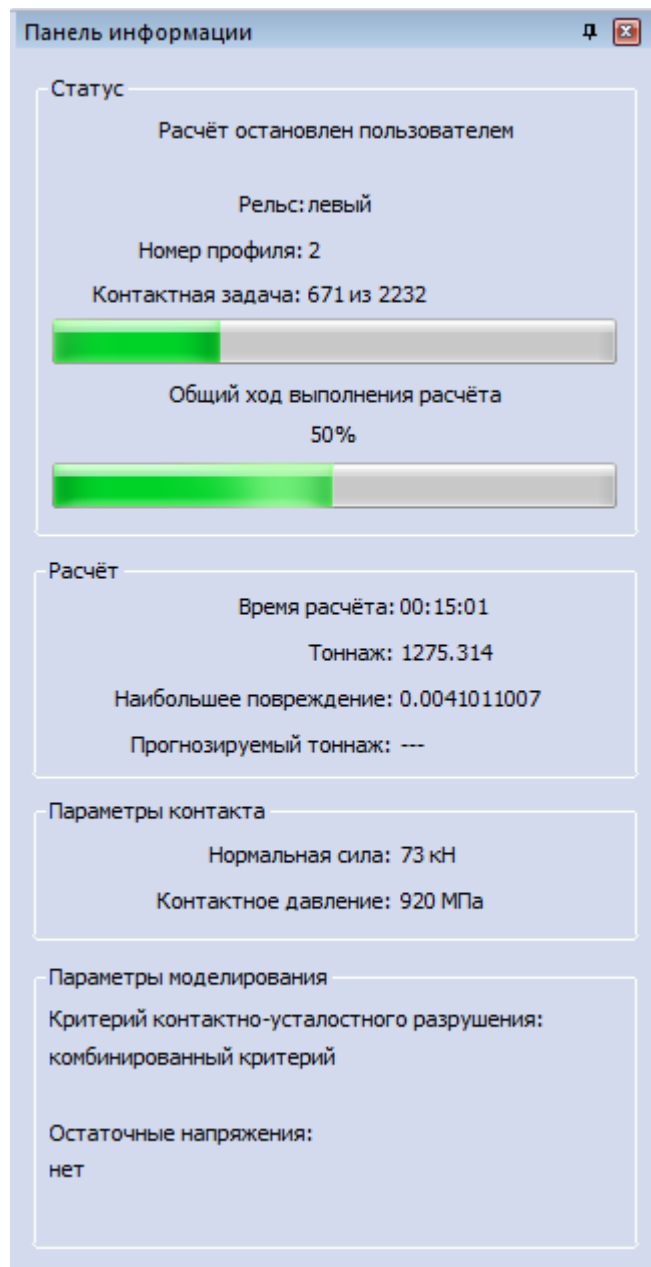



Рис. 1.73. Панель информации

1.6.6. Сохранение результатов расчёта

Сохранить результаты расчёта можно с помощью меню **Файл | Сохранить** или кнопки  на панели инструментов **Стандартная**. Во время выполнения расчёта данная опция неактивна.

Замечание. Результаты автоматически сохраняются после завершения расчёта для каждой *итерации износа рельса*.

Результаты расчёта сохраняются в двух файлах. Оба файла имеют то же название, что и файл **rld**, и располагаются в папке с исходными данными.

Первый файл – бинарный, имеет расширение ***.rrcfresults**. Данные из этого файла используются для отображения результатов расчёта в модуле **UM RCF Rail** и загружаются программой автоматически при открытии файла с исходными данными **rld**.


Второй файл – текстовый, имеет расширение ***.csv**. Этот файл позволяет открыть результаты расчёта в таблицах **Excel**.

Кроме того, в процессе расчёта в папке с исходными данными создается файл протокола в текстовом формате, в котором содержится информация о ходе выполнения расчёта.

1.6.7. Удаление результатов расчёта

Удалить результаты расчёта можно следующими способами:



– выбрать пункт меню **Расчётная схема | Удалить результаты расчёта**;

– щёлкнуть кнопку  на панели инструментов **Расчётная схема**;

– нажать клавишу **Delete** на клавиатуре.

Опция доступна, если расчёт выполнялся.

1.6.8. Представление результатов расчёта

После выполнения расчёта для первой *итерации износа рельса* становятся доступными опции, позволяющие перемещаться по списку *итераций износа рельса* в двух направлениях: от первой к последней и обратно. Воспользоваться этими опциями можно с помощью меню **Расчётная схема | Предыдущий профиль** и **Расчётная схема | Следующий профиль**, либо кнопок  и  на панели инструментов **Расчётная схема**, либо кнопок **PgDn** и **PgUp** на клавиатуре. При этом на **Панели информации** и в рабочей области окна отображаются результаты расчёта для выбранной *итерации износа рельса*.

В поле **Статус** на **Панели информации** выводится общая информация: рельс – левый или правый, номер профиля – номер *итерации износа рельса*, общее количество и количество решённых контактных задач на данной *итерации износа рельса*, общий ход выполнения расчёта в процентах (рис. 1.73).

При анализе результатов расчёта прежде всего представляют интерес значение наибольшего накопленного повреждения в точке рельса и пропущенный тоннаж, которые можно посмотреть на **Панели информации** в поле **Расчёт** (рис. 1.73). Если расчёт выполнялся до достижения предела накопленных контактно-усталостных повреждений и этот предел не был достигнут, прогнозируемый тоннаж, отображаемый в том же поле, показывает, сколько тонн брутто ещё могло быть пропущено через *контрольное сечение рельса* при достигнутом уровне накопленных повреждений. Прогнозируемый тоннаж определяется с помощью деления тоннажа на наибольшее накопленное повреждение.

Точку рельса с наибольшим повреждением можно обозначить на расчётной схеме в рабочей области окна с помощью режима **Максимальное повреждение** (см. п. 1.6.4.6). Глубину залегания этой точки под поверхностью катания можно определить с помощью режима **Сетка** (см. п. 1.6.4.1), исходя из того, что размер стороны конечного элемента сетки равен 1 мм. Распределение накопленных контактно-усталостных повреждений в по-

перечном сечении рельса позволяют наглядно представить режимы **Повреждения в цвете** (см. п. 1.6.4.3) и **Изолинии** (см. п. 1.6.4.5).

Файл с расширением ***.csv**. (см. п. 1.6.6) позволяет открыть результаты расчёта в таблицах **Excel** и построить графики для оформления отчёта.

С помощью результатов из первого блока данных можно построить график зависимости накопленной повреждённости в опасной точке материала рельса от тоннажа. Пример такого графика приведен на рис. 1.74.

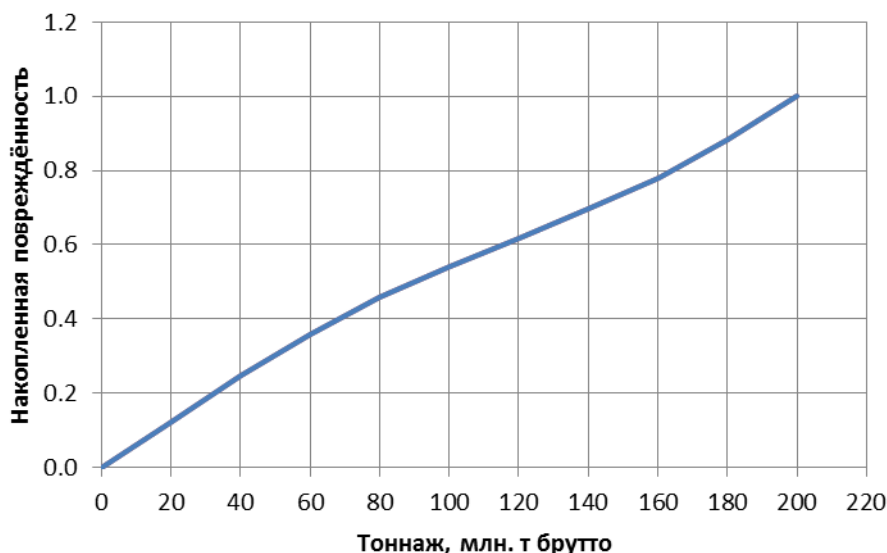


Рис. 1.74. График зависимости накопленной повреждённости в опасной точке материала рельса от тоннажа

Данные из второго блока позволяют построить эпюру накопленной повреждённости в опасном сечении рельса. Под опасным сечением будем понимать продольное сечение рельса, содержащее опасную точку, т.е. точку с наибольшей накопленной повреждённой. Для построения эпюры используются значения накопленной повреждённости в узлах конечноэлементной сетки поперечного сечения фрагмента рельса, принадлежащих опасному сечению. Пример такой последовательности узлов показан на рис. 1.76а. Ось абсцисс является ось x в системе координат, представленной на рис. 1.59. На рис. 1.76б построен график зависимости накопленной повреждённости в узлах опасного сечения рельса от их координаты x .

Также второй блок содержит данные, позволяющие построить поверхность накопленной повреждённости в поперечном сечении фрагмента рельса. По абсциссе откладывается координата x узла в соответствии с системой отсчёта, представленной на рис. 1.59. По ординате – глубина залегания узла под поверхностью катания. По аппликате откладывается значение накопленной повреждённости в узлах конечноэлементной сетки поперечного сечения фрагмента рельса. Пример такой поверхности показан на рис. 1.76.

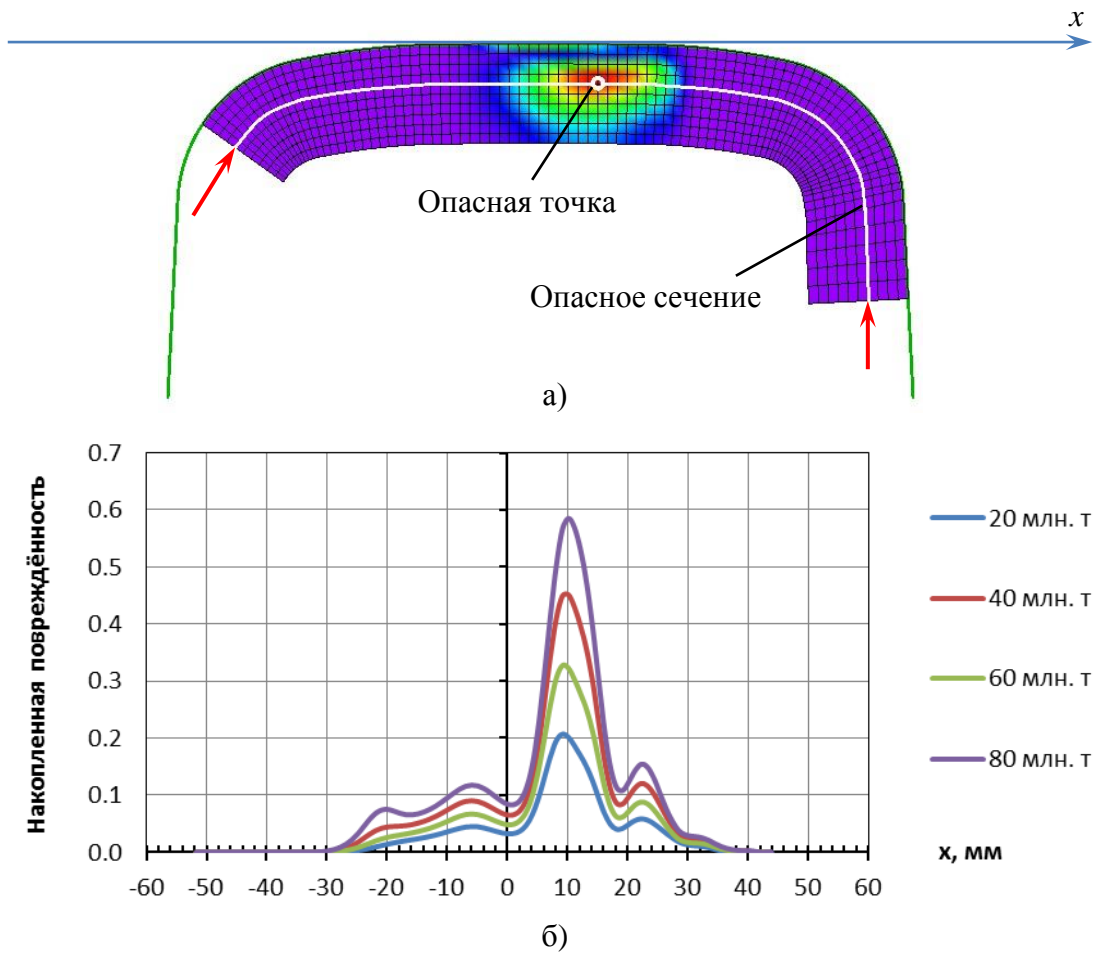


Рис. 1.75. Эпюра накопленной повреждённости в опасном сечении рельса

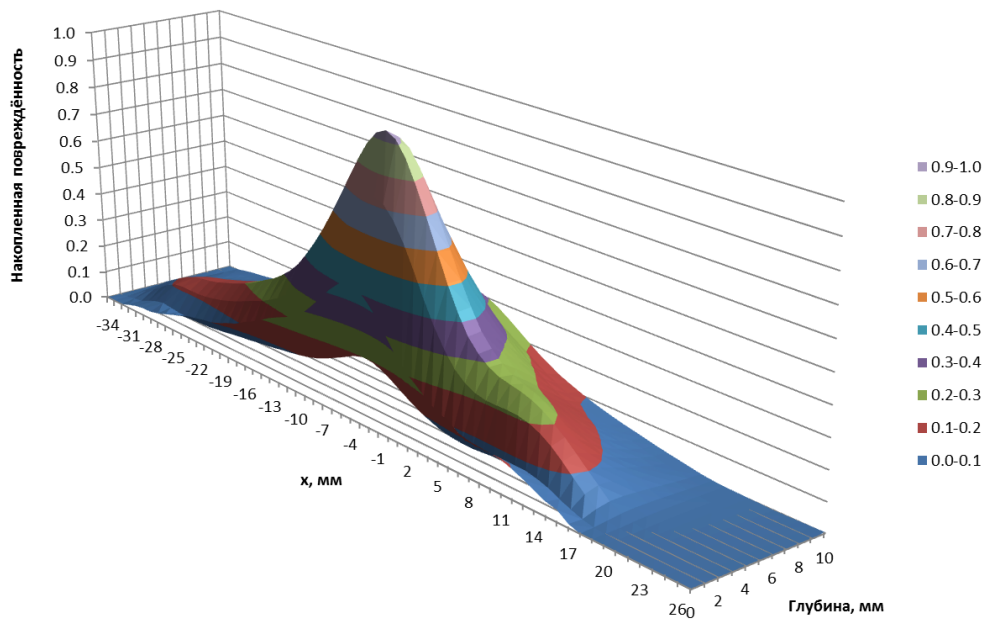


Рис. 1.76. Поверхность накопленной повреждённости в поперечном сечении фрагмента рельса

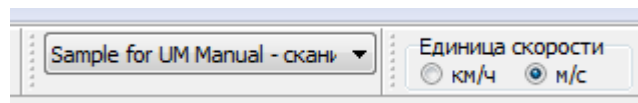
1.6.9. Пример моделирования накопления повреждений в рельсе

Рассмотрим пример моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в рельсе.

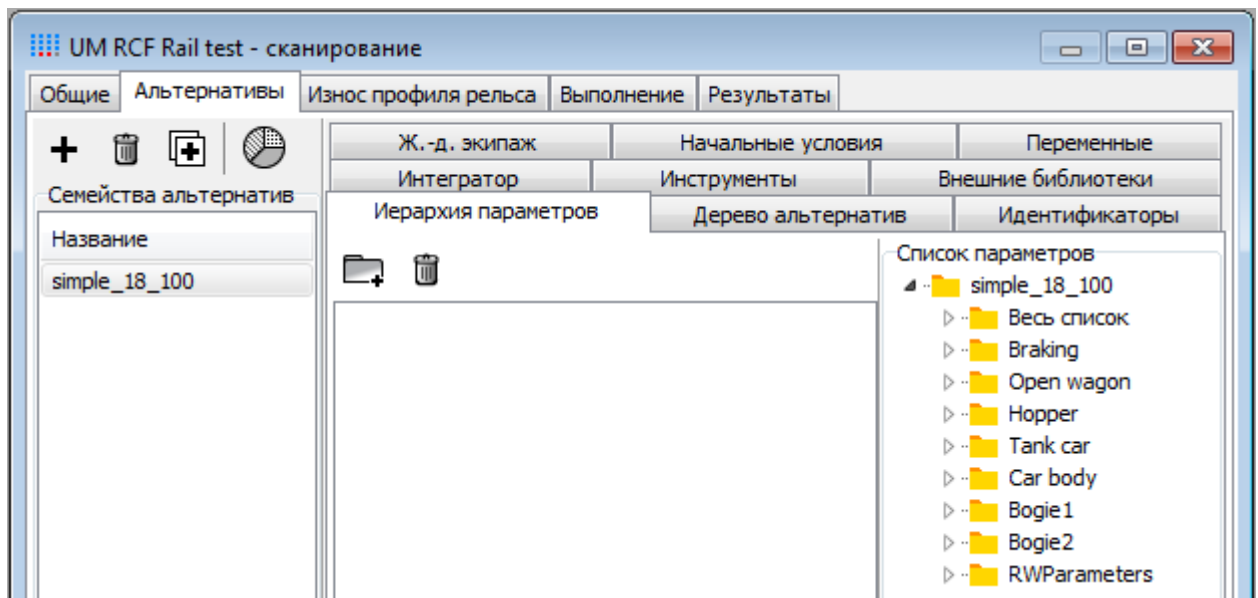
Для подготовки исходных данных выполним моделирование процесса износа рельса Р65 [41] в прямом участке пути при прохождении по нему гружёного грузового вагона на трёхэлементных тележках модели 18-100 со скоростями 40, 60 и 80 км/ч. Неровности рельсовых нитей соответствуют пути плохого качества согласно стандарту UIC. Модель вагона находится в каталоге [{Данные УМ}\samples\Rail Vehicles\simple_18_100](#).

Запустите **UM Simulation** и создайте новый проект сканирования с помощью пункта меню **Сканирование | Новый проект - износ профилей рельсов...**

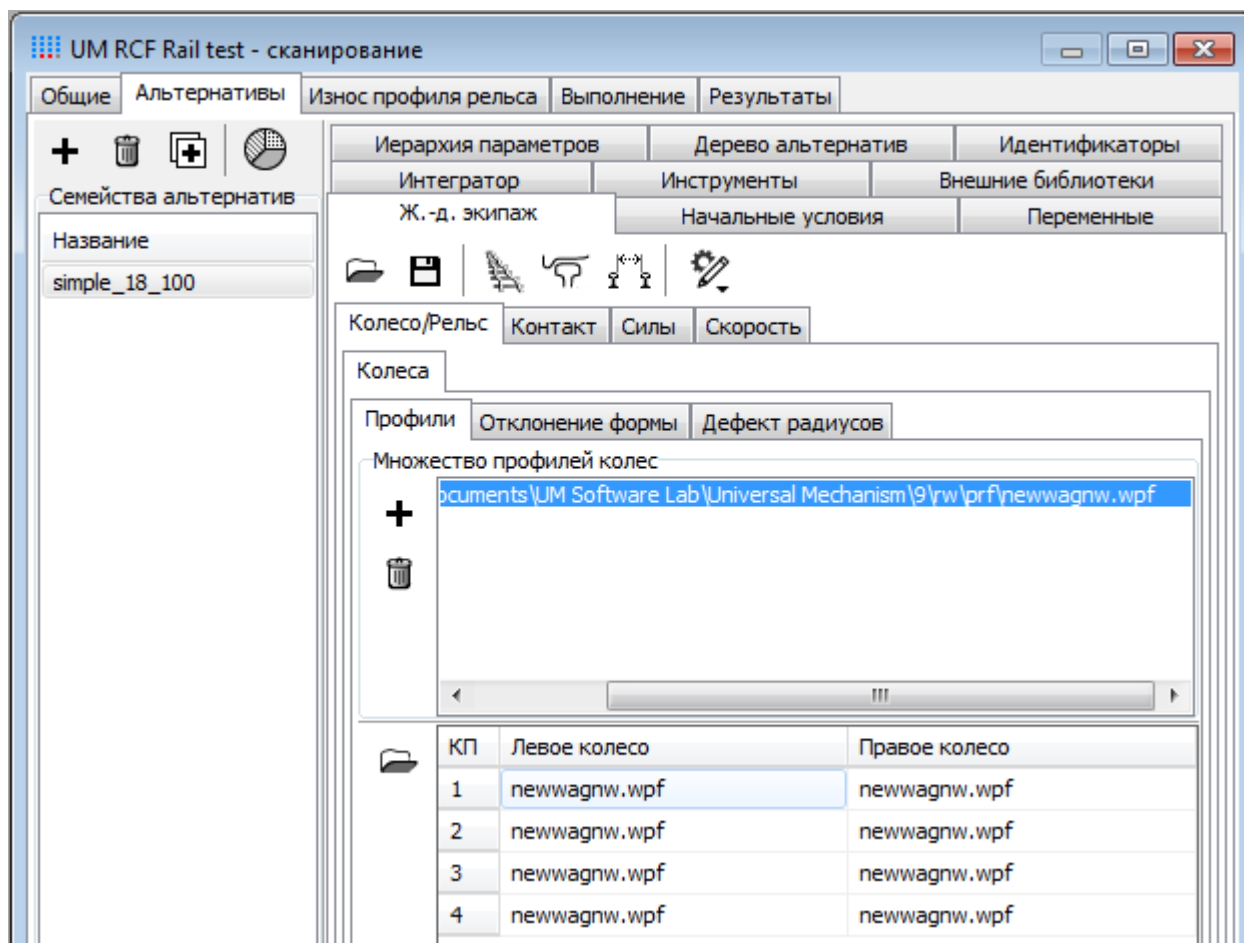
Убедитесь, что в программе задана единица измерения скорости **м/с** (метры в секунду). Установите значение **м/с** на панели инструментов **Единица скорости**.



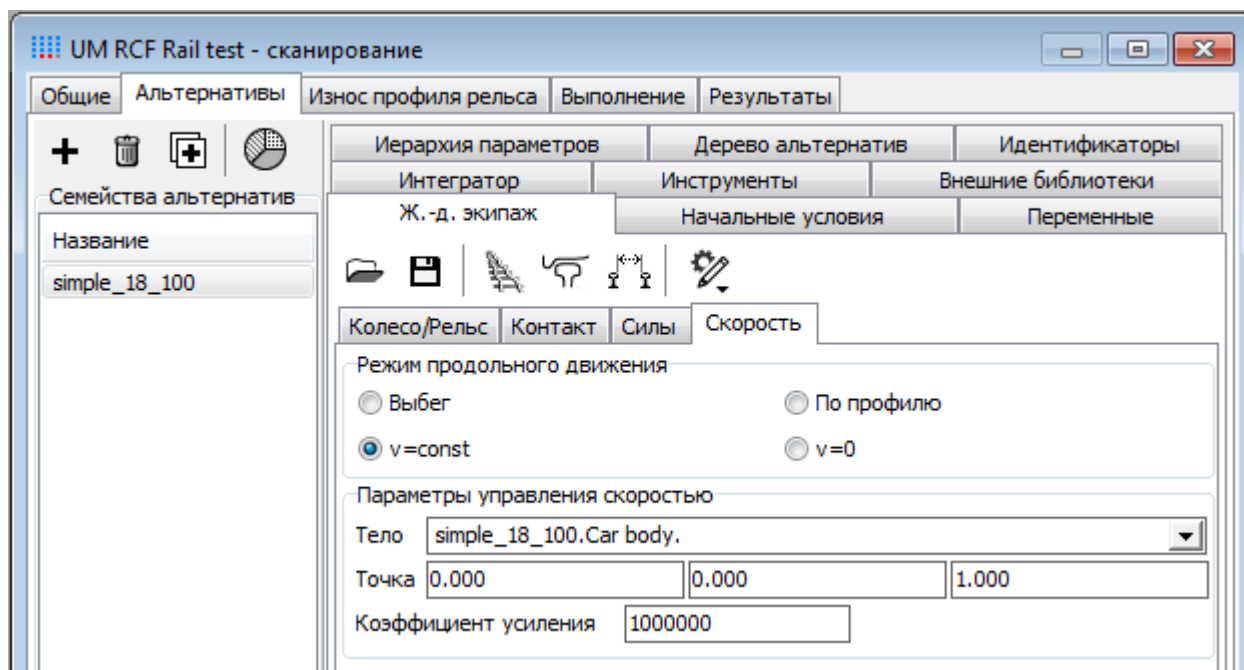
В окне проекта сканирования перейдите на вкладку **Альтернативы** и добавьте семейство альтернатив, нажав кнопку **+**. В появившемся окне открытия модели выберите модель грузового вагона *simple_18_100*. Выбранная модель появится в списке **Семейства альтернатив**.



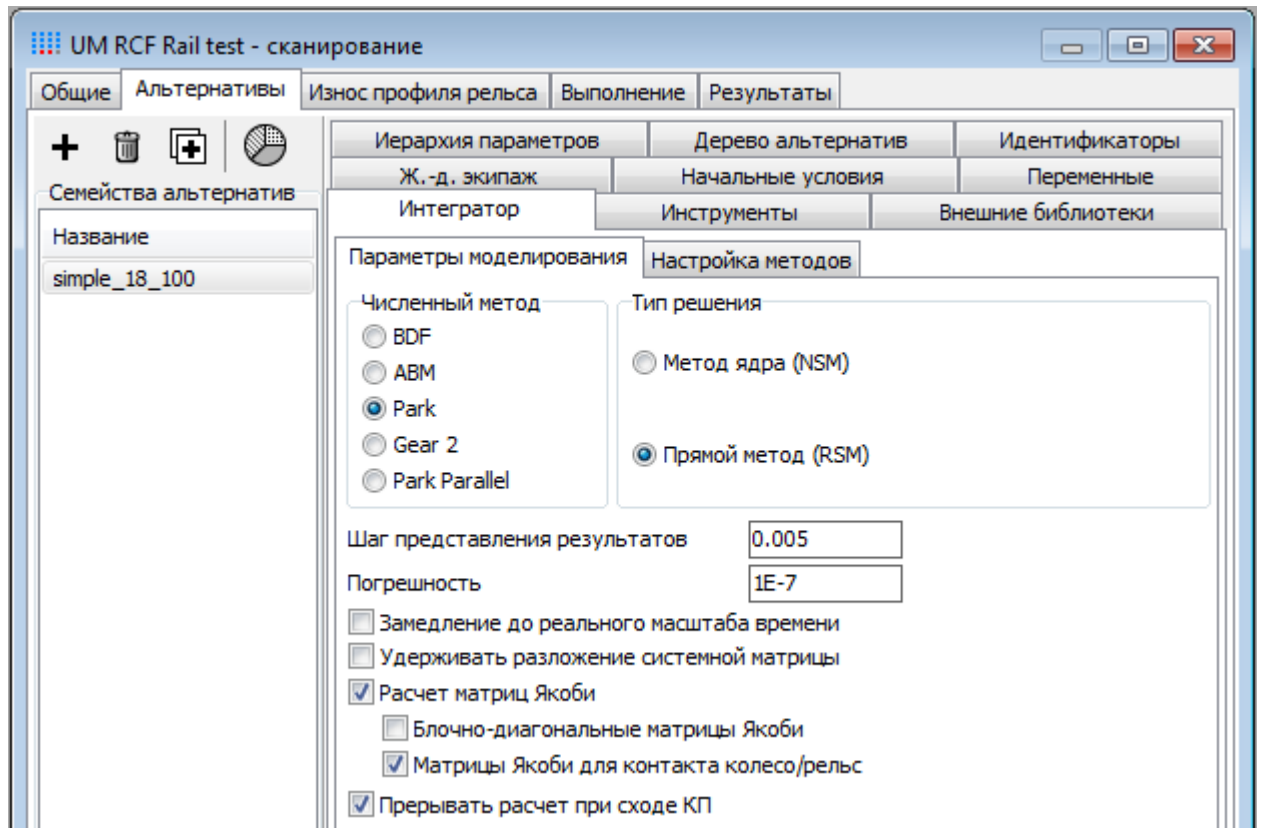
Перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Колесо/Рельс | Колеса | Профили**. Очистите список **Множество профилей колес**, удалив назначенные по умолчанию профили с помощью кнопки . С помощью кнопки **+** добавьте в список **Множество профилей колес** из каталога [{Данные УМ}\rw\prf](#) профиль *newwagnw.wpf* и назначьте его всем колёсам.



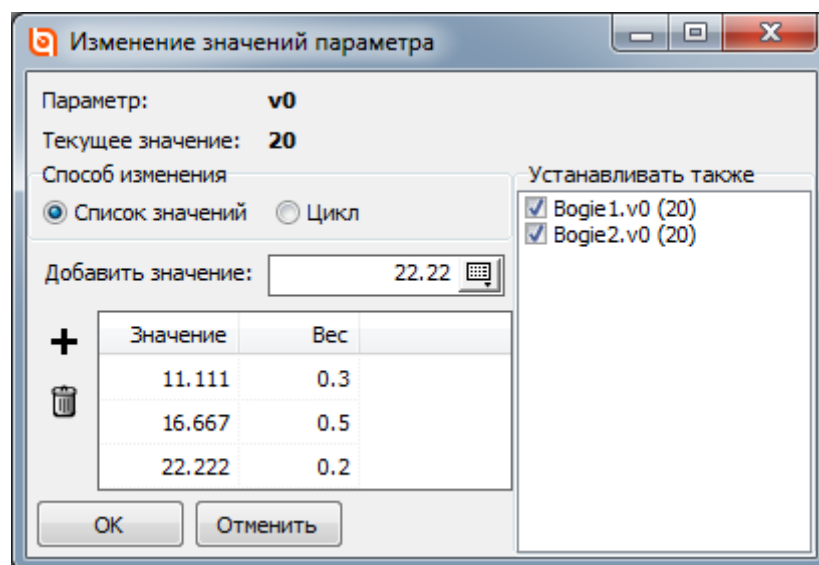
Перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Скорость** и выберите режим продольного движения $v = \text{const}$. В разделе **Параметры управления скоростью** в поле **Тело** из выпадающего списка выберите *simple_18_100.Car body*.



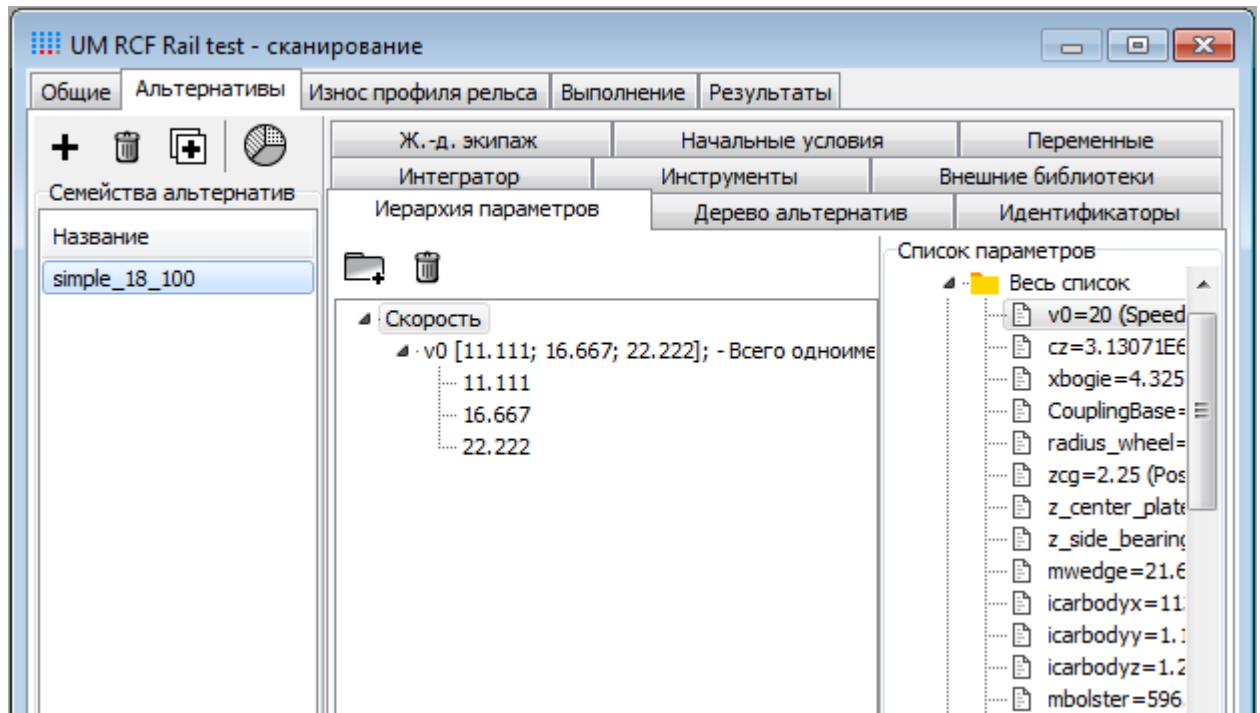
Перейдите на вкладку **Интегратор | Параметры моделирования**. В поле **Погрешность** установите **1E-7**. Включите флажки **Расчет матриц Якоби** и **Матрицы Якоби для контакта колесо/рельс**.



Перейдите на вкладку **Иерархия параметров**. Добавьте новую группу параметров с помощью кнопки и назовите её **Скорость**. В иерархическом списке **Список параметров** щёлкните на параметре **v0**. В появившемся окне **Изменение значений параметра** введите значения 11.111, 16.667 и 22.222 (м/с) и весовые коэффициенты 0.3, 0.5 и 0.2 соответственно для этих значений.

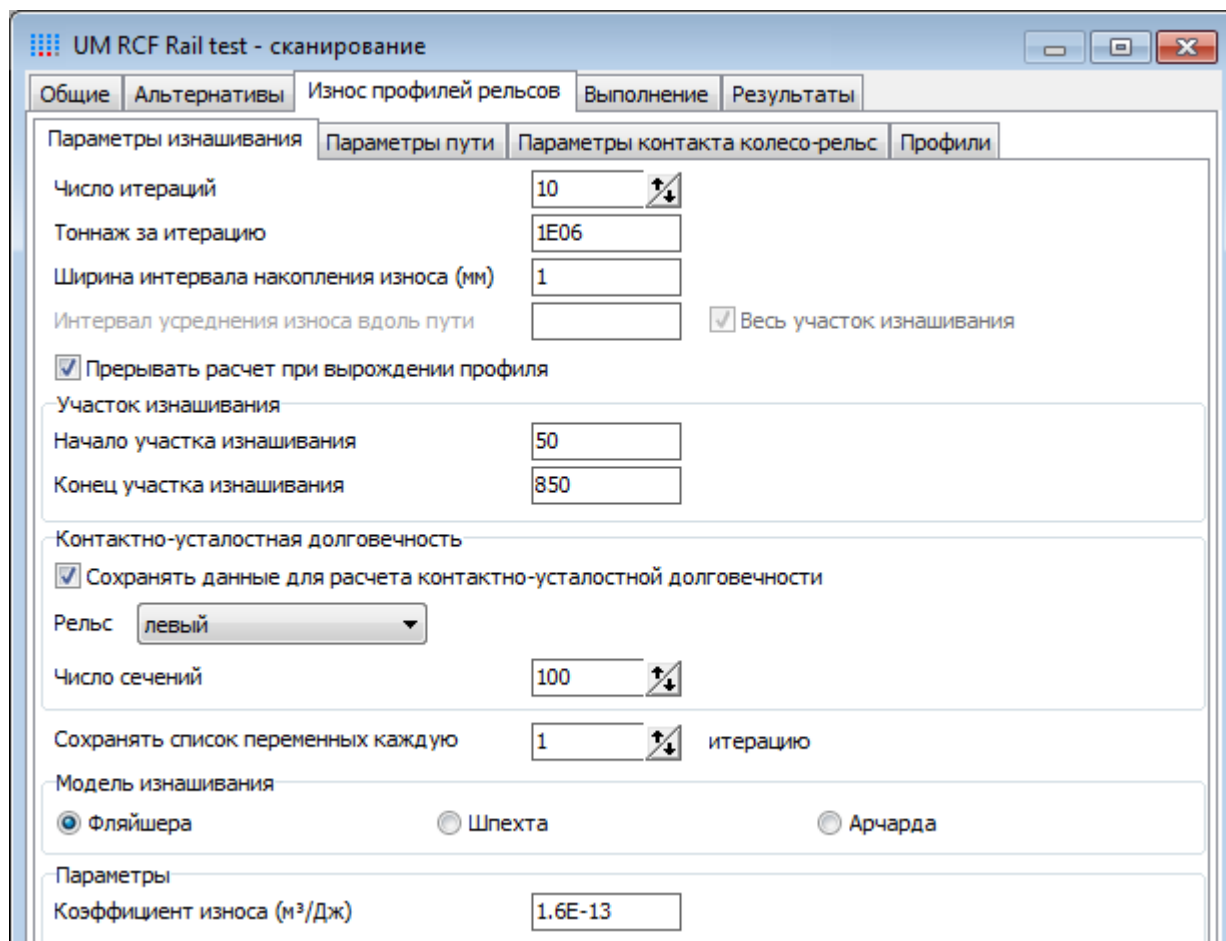


Закройте окно настройки значений параметров и вернитесь в окно описания проекта сканирования. После выполненных действий иерархия параметров для семейства альтернатив *simple_18_100* будет выглядеть, как показано на рисунке ниже.



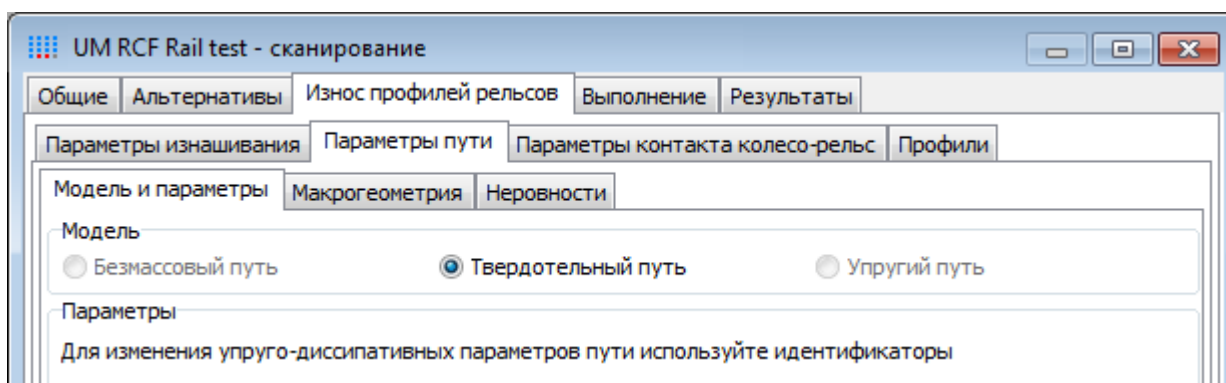
Перейдите на вкладку **Износ профиля рельса | Параметры изнашивания** и установите следующие значения для параметров изнашивания:

- **Число итераций** = 10;
- **Тоннаж за итерацию** = 10^6 ;
- **Ширина интервала накопления износа (мм)** = 1;
- **Прерывать расчет при вырождении профиля** = да;
- **Начало участка изнашивания** = 50;
- **Конец участка изнашивания** = 850;
- **Шаг сохранения списка переменных** = 1 итерация;
- **Модель изнашивания** = Фляйшера;
- **Коэффициент износа ($\text{м}^3/\text{Дж}$)** = $1.6 \cdot 10^{-13}$;
- **Сохранять данные для расчета контактно-усталостной долговечности** = да;
- **Рельс** = левый;
- **Число сечений** = 100.

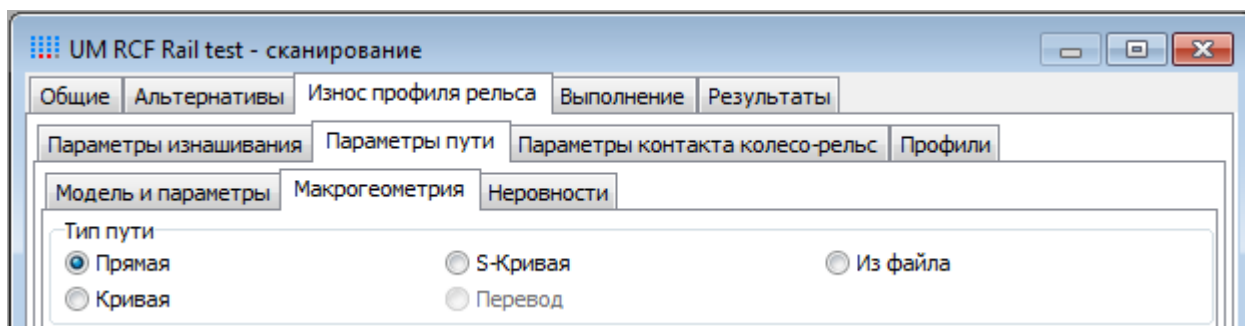



Перейдите на вкладку **Износ профиля рельса | Параметры пути | Модель и параметры** и установите следующие значения для параметров:

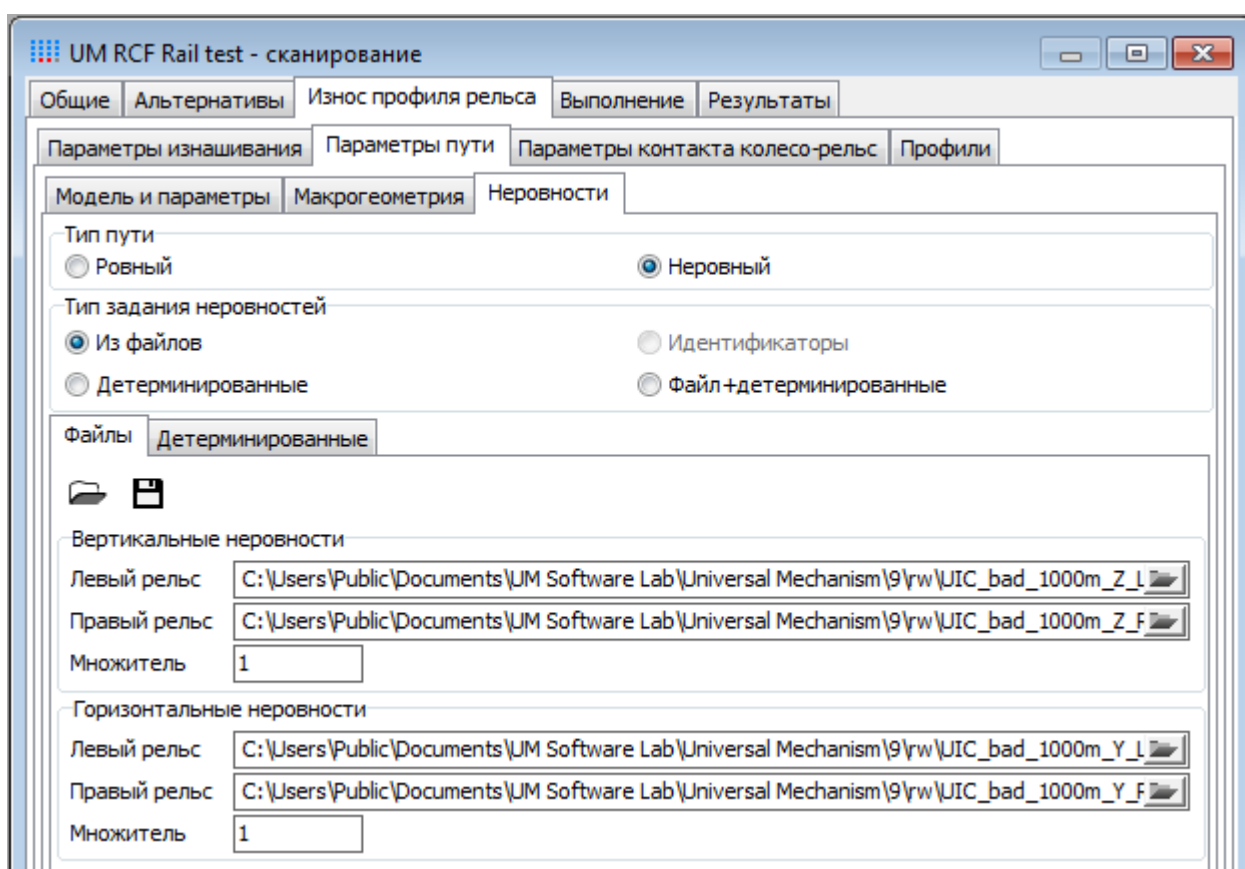
- **Модель пути = Твердотельный путь.**



Перейдите на вкладку **Износ профиля рельса | Параметры пути | Макрогеометрия** и укажите **Тип пути = Прямая.**

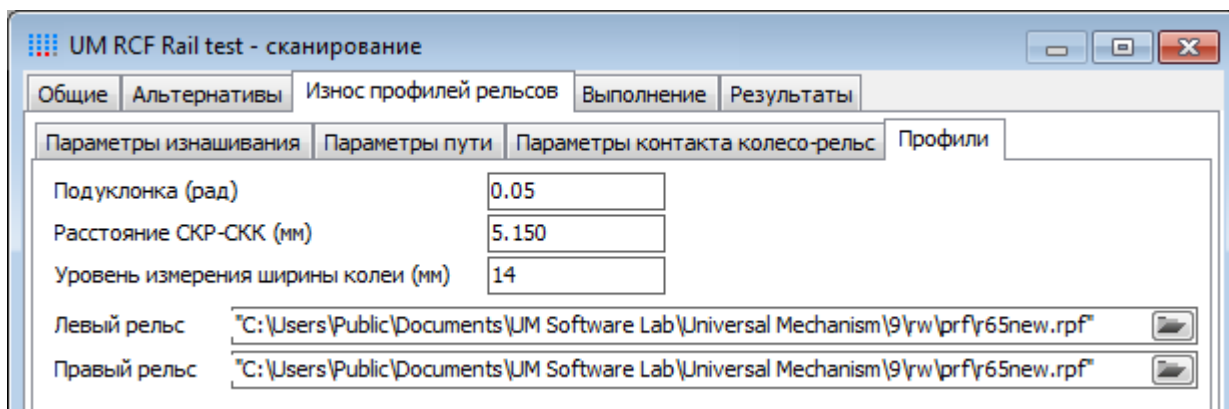


Перейдите на вкладку **Изнас профиля рельса | Параметры пути | Неровности**, установите **Тип пути** в значение **Неровный**, а **Тип задания неровностей** в значение **Из файла**. Кнопкой  **Загрузить группу неровностей из файла** назначьте рельсовым нитям группу неровностей *uic_bad_1000m.tig* из каталога [{Данные УМ}\rw](#).



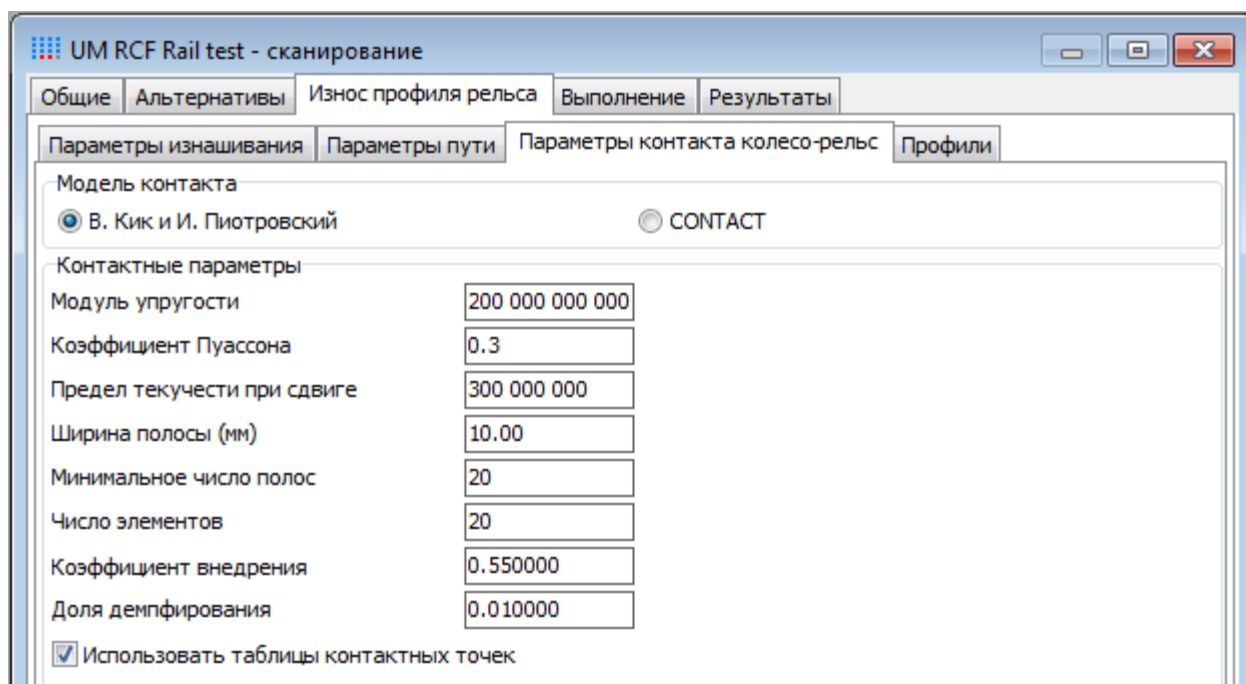
Перейдите на вкладку **Изнас профиля рельса | Профили** и назначьте обоим рельсам профиль *r65new.rpf* из каталога [{Данные УМ}\rw\prf](#). Подробнее о назначении профилей рельсов см. [Глава 8](#), п. "Назначение профилей рельсов". Установите следующие значения для параметров:

- **Подуклонка рельса (рад)** = 0.05;
- **Расстояние СКР-СКК (мм)** = 5.15;
- **Уровень измерения ширины колеи (мм)** = 14.



Перейдите на вкладку **Износ профиля рельса | Параметры контакта колесо-рельс**. Выберите модель контакта В. Кика и И. Пиотровского и установите следующие значения для контактных параметров:

- **Модуль упругости** = $2.0 \cdot 10^{11}$;
- **Коэффициент Пуассона** = 0.3;
- **Предел текучести при сдвиге** = $3 \cdot 10^8$;
- **Ширина полосы (мм)** = 10;
- **Минимальное число полос** = 20;
- **Число элементов** = 20;
- **Коэффициент внедрения** = 0.55;
- **Доля демпфирования** = 0.01.



Проект износа подготовлен. Перейдите на вкладку **Выполнение**. С помощью окна протокола убедитесь, что проект сканирования не содержит ошибок. Установите необхо-

димое количество процессов исходя из возможностей вашего компьютера. Запустите моделирование, нажав кнопку **Запустить**.

В результате моделирования созданы данные для десяти *итераций износа* левого рельса в прямом участке пути, наработанный тоннаж составляет 10 млн. т, пропущенный тоннаж на каждой итерации – 1 млн. т.

Откройте проект контактной усталости в модуле **UM RCF Rail** любым из способов, указанных в п. 1.6.1. Измените настройки проекта на вкладках **Расчёт** и **Материал**, как показано на рис. 1.77 и рис. 1.78. Параметры на вкладке **Остаточные напряжения** оставьте без изменений. Сохраните настройки проекта, щёлкнув кнопку **ОК** в окне диалога **Параметры**. Запустите моделирование с помощью кнопки **Запустить расчёт** (см. п. 1.6.5).

Различные возможности представления результатов расчёта описаны в п. 1.6.8. На рис. 1.79, рис. 1.80 и рис. 1.81 показаны результаты моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в контрольном сечении левого рельса, уложенного в прямом участке пути.

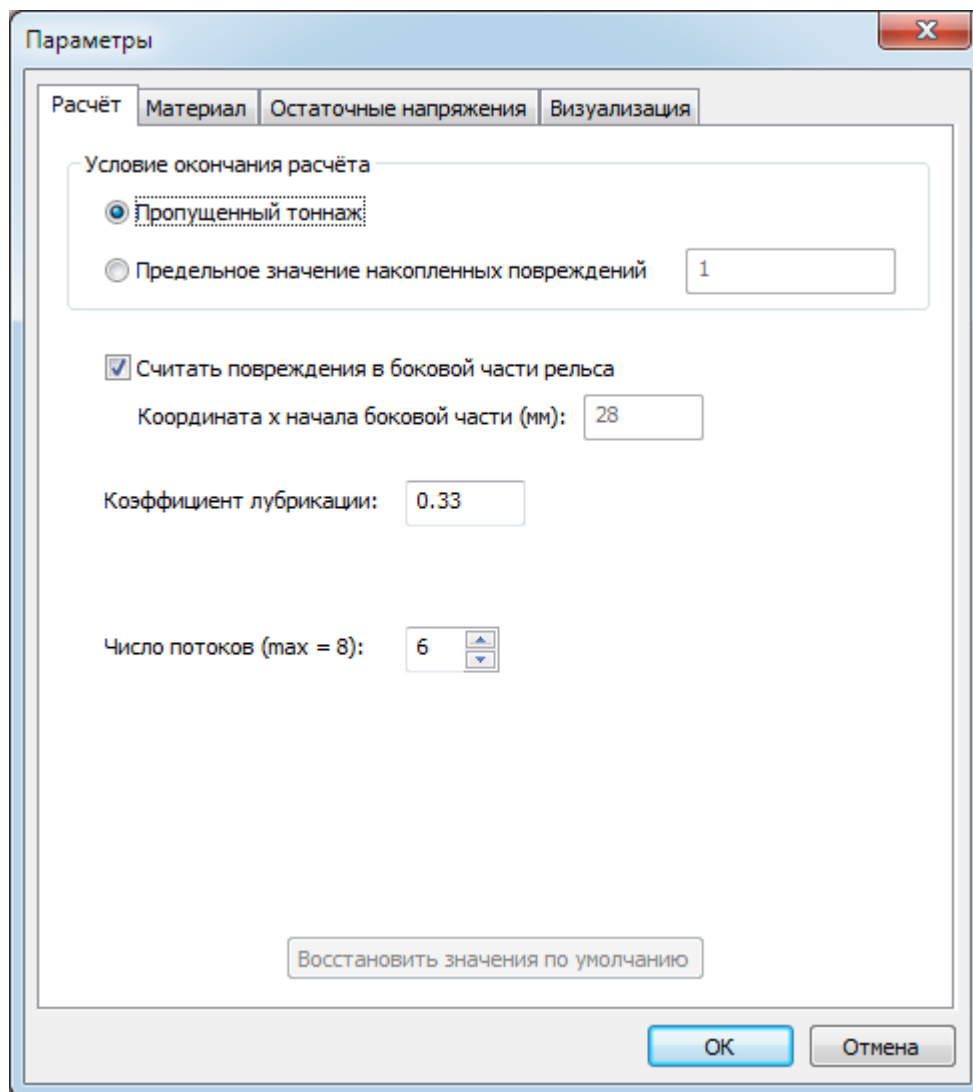


Рис. 1.77. Настройка параметров проекта контактной усталости на вкладке **Расчёт**

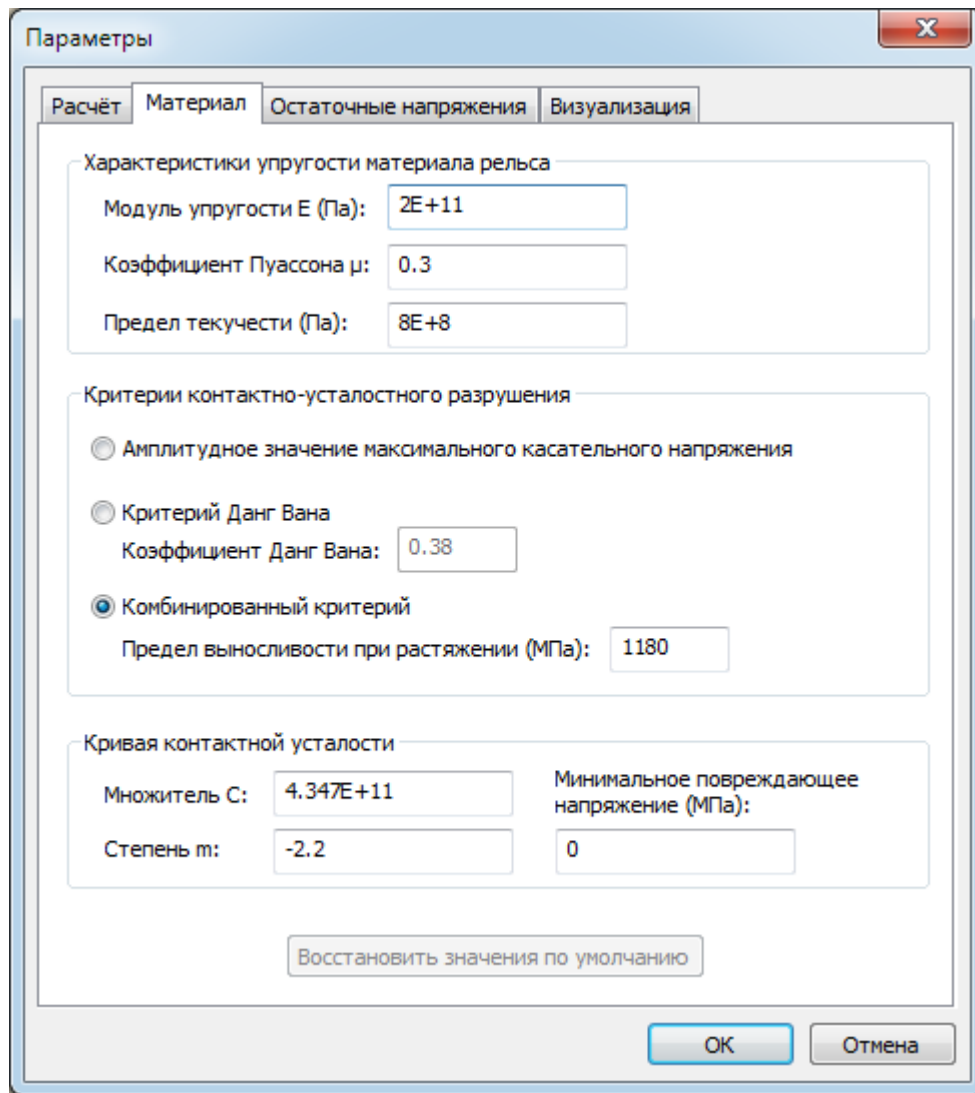


Рис. 1.78. Настройка параметров проекта контактной усталости на вкладке **Материал**

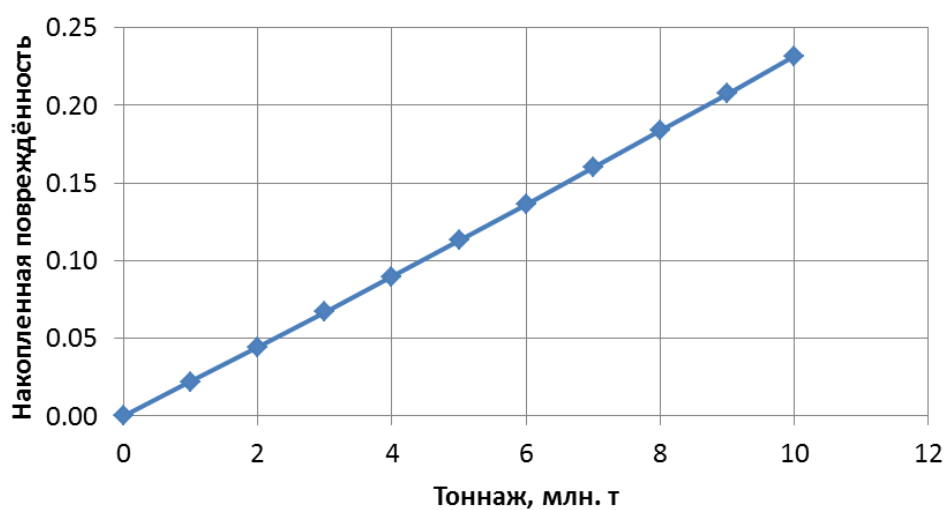


Рис. 1.79. Накопленная повреждённость в опасной точке материала рельса

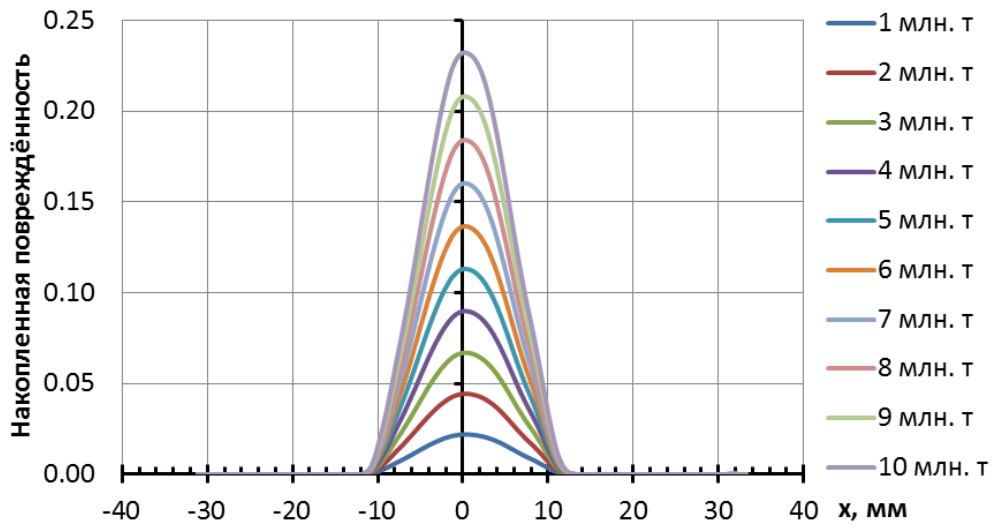


Рис. 1.80. Эпюры накопленных контактно-усталостных повреждений в опасном сечении рельса

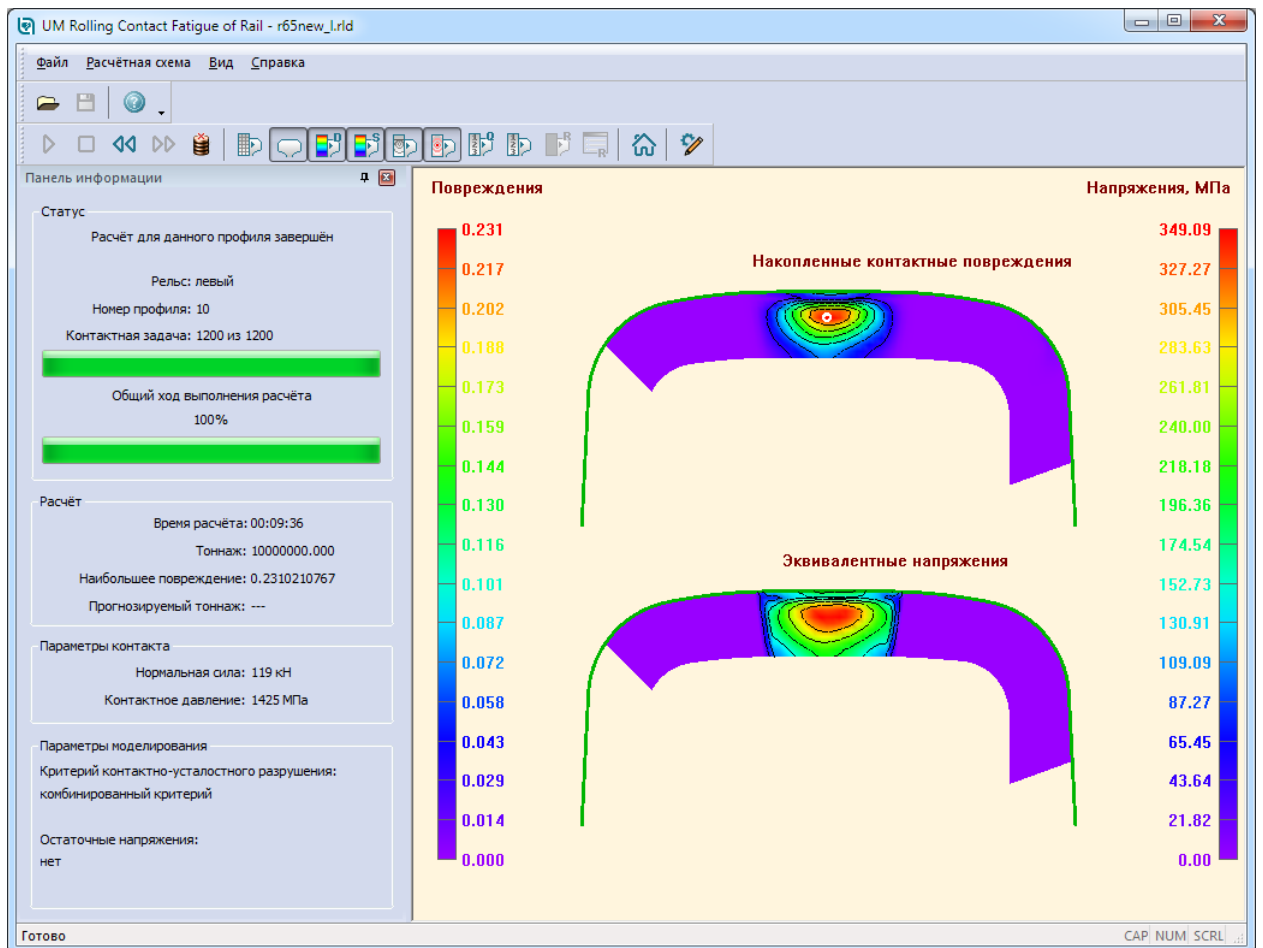


Рис. 1.81. Результаты моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в материале рельса

Список литературы

- [1] Контактно-усталостные повреждения колёс грузовых вагонов / Под ред. С.М. Захарова. – М.: Интекст, 2004. – 160 с.
- [2] Классификация неисправностей вагонных колёсных пар и их элементов. – М.: Транспорт, 1978. – 31 с.
- [3] Школьник, Л.М. Повышение стойкости вагонных колёс в эксплуатации карбонитридным упрочнением стали / Л.М. Школьник, Д.П. Марков, Ю.С. Пройдак и др. // Вестник ВНИИЖТ. – 1994. – №6. – С. 40-44.
- [4] Ekberg, A. Rolling contact fatigue of railway wheels / A. Ekberg // PhD Thesis Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden. – 2000. – P. 1-27.
- [5] Ekberg, A. Effects of imperfections on fatigue initiation in railway wheels / A. Ekberg, J. Marais // Journal of Rail and Rapid Transit. – 2000. – Vol.214. – P. 1-18.
- [6] Mutton, P.J. Rolling contact fatigue of railway wheels under high axle load / P.J. Mutton, C.J. Epp, J. Dudec // Wear. – 1997. – Vol.211. – P. 280-288.
- [7] Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо – рельс / пер. с англ. под ред. С.М. Захарова. – М.: Интекст, 2017. – 420 с.
- [8] Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов: инструкция № 2499р / ОАО "РЖД". М., 2014. 139 с.
- [9] Шур Е.А. Повреждения рельсов. М.: Интекст, 2012. 192 с.
- [10] ГОСТ 10791-2011. Межгосударственный стандарт. Колеса цельнокатаные. Технические условия.
- [11] AAR Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles. Wheels, Carbon Steel, Specification M-107/M-208, Adopted: 1962; Last Revised: 2012.
- [12] European standard EN 13262:2004+A2:2011. Railway applications – Wheelsets and bogies – Wheels — Product requirements.
- [13] TB/T2708-1996. Technical specifications of the rolled solid wheels for railway.
- [14] JIS E 5402–1:2015. Rolling Stock – Solid Wheel – Part 1: Quality Requirements, Japanese Standards Association.
- [15] Марков, Д.П. Трибологические аспекты повышения износостойкости и контактно-усталостной выносливости колес подвижного состава: дисс... докт. техн. наук / – М.: ВНИИЖТ, 1996. – 367 с.
- [16] Сакало, В.И. Критерии для прогнозирования возникновения контактно-усталостных повреждений в колесах железнодорожного подвижного состава и рельсах / В.И. Сакало, А.В. Сакало // Вестник ВНИИЖТ. – 2019. – Т.78. – №3. – С. 141-148.
- [17] Ekberg, A. Rolling contact fatigue of railway wheels – computer modeling and in-field data / A. Ekberg // Proceedings of 2nd mini conf. Contact mechanics and wear of rail/wheel systems. – 1996. – P. 154-163.

- [18] Clayton, P. Surface initiated fatigue of perlitic and bainitic steels under wear lubricated rolling/sliding contact / P. Clayton, X. Su // *Wear*. – 1996. – Vol.200. – P. 63-73.
- [19] Ларин, Т.В. Цельнокатаные железнодорожные колеса / Т.В. Ларин, В.П. Девяткин, В.Н. Кривошеев, И.В. Наумов, Е.И. Чалых.– М.: Трансжелдориздат, 1956. – 188 с.
- [20] Afferrante, L. A re-examination of rolling contact fatigue experiments by Clayton and Su with suggestions for surface durability calculations / L. Afferrante, M. Ciavarella, G. Demelio // *Wear*. – 2004. – Vol.256. – P. 329-334.
- [21] Sakalo, V. Computer modelling of process of accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels / V. Sakalo, A. Sakalo, S. Tomashevskiy, D. Kerentcev // *International Journal of Fatigue*. – 2018. – V.111. – P. 7-15.
- [22] Горячева, И.Г. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в условиях трения качения при наличии остаточных напряжений / И.Г. Горячева, Е.В. Торская // *Трение и износ*. – 2019. – Т.40. – №1. – С. 44-51.
- [23] Bernasconi, A. An integrated approach to rolling contact sub-surface fatigue assessment of railway wheels / A. Bernasconi, P. Davoli, M. Filippini, S. Foletti // *Wear*. – 2005. – Vol.258. – P. 973-980.
- [24] Kim, T.-Y. Three-dimensional elastic-plastic finite element analysis for wheel-rail rolling contact fatigue / T.-Y. Kim, H.-K. Kim // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2014. – Vol.6(No3). – P. 1593-1600.
- [25] Феодосьев, В.И. Соппротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 543 с.
- [26] Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов: в 2 ч. / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – ч.2. – 368 с.
- [27] Sakalo, V. Computer modeling of processes of wear and accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels using combined criterion / V. Sakalo, A. Sakalo, A. Rodikov, S. Tomashevskiy // *Wear* 432–433 (2019) 102900. DOI: 10.1016/j.wear.2019.05.
- [28] Серенсен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
- [29] Марков, Д.П. Трибология и её применение на железнодорожном транспорте / Труды ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2007. – 408 с.
- [30] Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
- [31] Сакало В. И., Сакало А. В. Кривые контактной усталости рельсовой стали // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 2. С. 124–135.
- [32] Kik, W. A fast, approximate method to calculate normal load at contact between wheel and rail and creep forces during rolling / W. Kik, J. Piotrowski // *Proceedings of 2nd mini conf. Contact mechanics and wear of rail/wheel systems*. – 1996. – P. 52-61.
- [33] Kalker, J.J. A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact / J.J. Kalker // *Vehicle system dynamics*. – 1982. – Vol.11. – P. 1-13.

- [34] Сакало, А.В. Метод моделирования контактных напряжений с использованием конечно-элементных фрагментов на упругом основании / А.В. Сакало // Вестник ВГТУ. – Воронеж: ВГТУ, 2009. – №9. – С. 71-76.
- [35] Sakalo V.I., Sakalo A.V. Numerical method for solving the contact problems for the solid bodies using the finite element fragments on the elastic foundation // Proc. of 1st Joint Int. Conf. on Multibody Sys. Dyn. Lappeenranta University of Technology, 2010. – P. 72-73.
- [36] Сакало, А.В. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в колесе вагона с использованием конечно-элементных фрагментов на упругом основании / А.В. Сакало // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – №4. – С. 44-49.
- [37] Сакало, А.В. Совершенствование профиля поверхности катания колеса вагона на основе критерия контактной усталости: дис.... канд. техн. наук / А.В. Сакало. – М.: МГУПС (МИИТ), 2011. – 142 с.
- [38] Сакало, В.И. Механика контактного взаимодействия колеса и рельса / В.И. Сакало, А.В. Сакало, В.С. Коссов. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2021. – 376 с.
- [39] Керенцев, Д.Е. Повышение конструкционной прочности железнодорожных колёс подвижного состава: дис.... канд. техн. наук / Д.Е. Керенцев. – Самара: СНИУ им. академика С.П. Королёва, 2016. – 173 с.
- [40] ГОСТ 11018-2011. Межгосударственный стандарт. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия.
- [41] ГОСТ Р 51685-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия.
- [42] Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
- [43] Talamini, B. Development of a standard for new passenger car wheel designs / B. Talamini, B. Perlman, J. Gordon // ASME Proc. of Int. Mech. Engineering Congress and Exhibition, Chicago, Illinois. – 2006. – P. 115-122.
- [44] AAR Manual of Standards and Recommended Practices. Wheels and Axles. Analytic Evaluation Of Locomotive Wheel Designs. Standard S-669. Adopted: 2011. – P. 125-142.