Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Российская академия естественных наук

25-летию
Российской Академии
естественных наук
посвящается

ВЕСТНИК ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

Отделение металлургии

Сборник научных трудов

Издается с 1994 г. ежегодно

Выпуск 35

Москва
Новокузнецк
2015

ISSN 2073–2848

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)
ББК 34.3я4
В 387

В 387 **Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии**: Сборник научных трудов. Вып. 35 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянцев (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2015. – 241 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.
Электронная версия сборника представлена на сайте *http://www.sibsiu.ru* в разделе «Научные издания»

Ил. 95, табл. 37, библиогр. назв. 262.

Редакционная коллегия: Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянцев М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., НИ ИрГТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., ОАО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)
ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

Базайкин В.И.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Быстров В.А.	д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Галевский Г.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Деев В.Б.	д-р техн. наук, проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Козырев Н.А.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Оршанская Е.Г.	д-р пед. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Перетятько В.Н.	д-р техн. наук, проф., чл.-корр. АИН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Руднева В.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Темлянцев М.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Шур Е.А.	д-р техн. наук, проф., ВНИИЖТ, г. Москва
Якушевич Н.Ф.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ 7

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ 8

В.М. Павловец

Анализ перспективных технологических схем струйной тепловой обработки слоя влажных окатышей на транспортерной ленте 9

В.М. Павловец

Исследование влагоудаления из влажных окатышей при взаимодействии нагретой струи воздуха со слоем окатышей 15

Н.Ф. Якушевич, О.А. Полях, Г.В. Галевский, А.А. Тяжина

К вопросу о фазово-химических равновесиях в системе расплав $(Fe - Si - C)$ – шлак $(CaO - Al_2O_3 - SiO_2)$ – газ $(O_2 - SiO - CO)$ 19

М.С. Приходько, А.В. Календа

Опыт внедрения затвора типа «книжка» для разливки стали в ККЦ-2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»..... 29

М.В. Темлянцев, К.С. Коноз, Э.Я. Живаго, В.Ф. Горюшкин,В.Я. Целлермаер

К вопросу о влиянии угара стали на глубину видимого обезуглероженного слоя33

М.В. Темлянцев, А.Ю. Дзюба, Е.Н. Темлянцева, К.С. Коноз, Э.Я. Живаго, В.Ф. Горюшкин

Применение покрытий для защиты рессорно-пружинной стали марки 60С2ХА от окисления и обезуглероживания при нагреве под прокатку 38

А.В. Головатенко, А.А. Уманский, В.Н. Кадыков, В.В. Дорофеев

Разработка и совершенствование режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане..... 43

А.А. Уманский, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, В.В. Дорофеев

Исследование влияния химического состава рельсовой стали на сопротивление деформации при прокатке 52

П.К. Шуркин, Н.А. Белов, В.Б. Деев

Структура и механические свойства тонколистового проката, полученного из слитков никалина АЦ6Н0,5Ж 59

П.К. Шуркин, Н.А. Белов, В.Б. Деев

Повышение свойств отливок из никалина АЦ6Н0,5Ж с высоким содержанием свинца за счет операции горячего изостатического прессования..... 64

Т.Н. Осколкова, В.И. Базайкин, М.В. Темлянцев

Модель динамики температурного поля при обработке поверхности изделия импульсом энергии..... 69

Н.А. Козырев, Г.В. Галевский, Д.А. Титов, Н.В. Кибко, В.М. Шурупов

Изучение наплавляемого сталью 35В9Х3СФ валика..... 79

Н.А. Козырев, Г.В. Галевский, Д.А. Титов, Н.В. Кибко, В.М. Шурупов

Изучение качества наплавляемой стали 25Х5ФМС..... 85

Д.А. Титов, Н.В. Кибко, Н.А. Козырев
Микромеханические испытания стали 25Х5ФМС..... 90
Н.В. Кибко, Д.А. Титов, Н.А. Козырев
Металлографические исследования структуры и свойств стали 35В9Х3СФ..... 96
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ..... 101
А.К. Гарбузова, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Т.И. Алексеева
Применение карбида и карбонитрида титана в порошковой металлургии и композиционных материалах..... 102
Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова, Т.И. Алексеева
Разработка технологии плазменного синтеза нанопорошка диборида титана – компонента функциональных композиционных покрытий..... 112
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ 119
М.В. Филиппова, М.В. Темлянцев, В.Н. Перетятько
Межфазная деформация и микротвердость аустенитно-ферритой стали при высоких температурах 120
М.В. Филиппова, М.В. Темлянцев, В.Н. Перетятько
Высокотемпературная деформация аустенитно-ферритой стали..... 123
В.Н. Цвигун, Е.А. Шур, С.В. Коновалов, Р.С. Койнов, С.А. Куклин
Изучение механизмов питтинга, спаллинга и других контактно-усталостных дефектов в рельсах. Часть 4. Деформации и напряжения в головке рельса при контакте качения..... 126
В.Н. Цвигун, Е.А. Шур, Р.С. Койнов, С.В. Коновалов
Изучение механизмов питтинга, сполинга и других контактно-усталостных дефектов в рельсах. Часть 5. Классификация контактно-усталостных повреждений железнодорожных рельсов 147
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ... 174
Л.В. Думова, А.А. Уманский
Исследование динамики показателей социальной работы с персоналом на ведущих металлургических комбинатах России..... 175
Л.В. Думова, А.А. Уманский
Анализ уровня развития системы корпоративной социальной ответственности металлургических предприятий с использованием методики интегральной оценки показателей (на примере ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат») 183
В.А. Быстров, Т.Н. Борисова, Е.С. Вуцан, Н.Ю. Грекова, П.К. Дьяков
Управленческие решения по перганизации влияния исполнителей на снижение издержек производства..... 191
В.А. Быстров, Т.Н. Борисова, Е.С. Вуцан, Н.Ю. Грекова, П.К. Дьяков
Система управления издержками производства корпоративной организации .. 198

С.Г. Коротков, А.В. Макаров
Расчет экологического риска от организованных источников выбросов агломерационного производства..... 205
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ 209
Л.П. Авдонина
Феномен новой грамотности..... 210
Е.Г. Оршанская
Учебно-методическое обеспечение языковой подготовки бакалавров в условиях модернизации высшего образования..... 215
Д.И. Оршанский
Реализация здоровьесберегающих технологий в высшем образовании России 221
ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ И БИОГРАФИИ.....227
М.С. Письмакова, В.В. Веселовская, Г.В. Галевский
П. Эру и Ч. Холл – исследователи, металлурги, предприниматели (к 130-летию электролитического производства алюминия)..... 228
К 80-летию Николая Филипповича Якушевича..... 237
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ 239

УДК 621.01

В.Н. Цвигун, Е.А. Шур*, С.В. Коновалов, Р.С. Койнов, С.А. Куклин

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

*ВНИИЖТ, г. Москва

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПИТТИНГА, СПАЛЛИНГА И ДРУГИХ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В РЕЛЬСАХ. ЧАСТЬ 4. ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСА ПРИ КОНТАКТЕ КАЧЕНИЯ.

В статье представлены результаты исследования деформаций и напряжений в головке рельса при контакте качения.

The article presents the results of a study of deformations and stresses in the rail head during the rolling contact.

Для того, чтобы создать идеальные модели механизмов образования и развития контактно-усталостных дефектов (КУД) рельсов, необходимо знание напряжений и деформаций, возникающих в верхней части головки рельса при качении по нему колеса (т.е. там, где наиболее высокие, опасные напряжения). В подошве и шейке рельса эксплуатационные напряжения обычно не превышают 250 МПа, поэтому усталостных трещин (УТ) там практически нет.

В головке рельса, если руководствоваться теорией Герца, (она имеет для рельса 7 сильно упрощающих допущений), не должны расти УТ, т.к. в опасных областях растягивающие напряжения небольшие, значительны только касательные напряжениия на глубине более 3 мм под контактной площадкой (КП), т.е. разрушений по усталостному механизму не должно быть, если нет больших скоплений неметаллических включений. Однако, трехмерное сжатие под колесом имеет неравные по трем осям величины, что говорит о существовании: а) растягивающих деформаций вдоль осей X и Y под КП до глубин 10 мм; в) глубже, чем 10 мм – под КП возникают вторичные растягивающие напряжения, которые также имеют уровень более 200 МПа.

Расчеты в ANSYS также показывают зону двумерного растяжения вокруг периферии КП колеса (уровень 300 МПа), т.е. теория Герца не способна многие результаты объяснить и предсказать. Поэтому необходимо более подробное изучение контакта качения, поскольку моделированием трудно все учитывать.

В 1972 г. (Новокузнецк, СМИ, ПНИИЛ) [1] проведено исследование напряжений и деформаций, возникающих в рельсе Р-65 при контакте качения.

Опыты проводили на рельсоиспытательной машине ЕМС-60, рисунок 1. На машине сначала обследовали напряжения и деформации при нагрузке 100, 200, 400 кН на колесо Ø960 мм, при ходе каретки с рельсом 1м, а затем изучали изменения свойств рельсовой стали при контакте качения 0-2 млн. циклов. На рельс Р-65 (НВ260), длиной 2,4 м, наклеивали вертикальную полосу из 60 тензодатчиков (база датчиков от 1 до 20 мм). Для измерения контурных напряжений тензодатчики с базой 10 мм пригодны: изгиб рельса под колесом датчик начинает чувствовать за 300 мм, а контактные деформации (длина КП = 23 мм) за 90 мм, рисунок 2, рисунок 3. Надежный анализ осциллограмм выполнен с помощью электронного датчика положения рельса и КП.

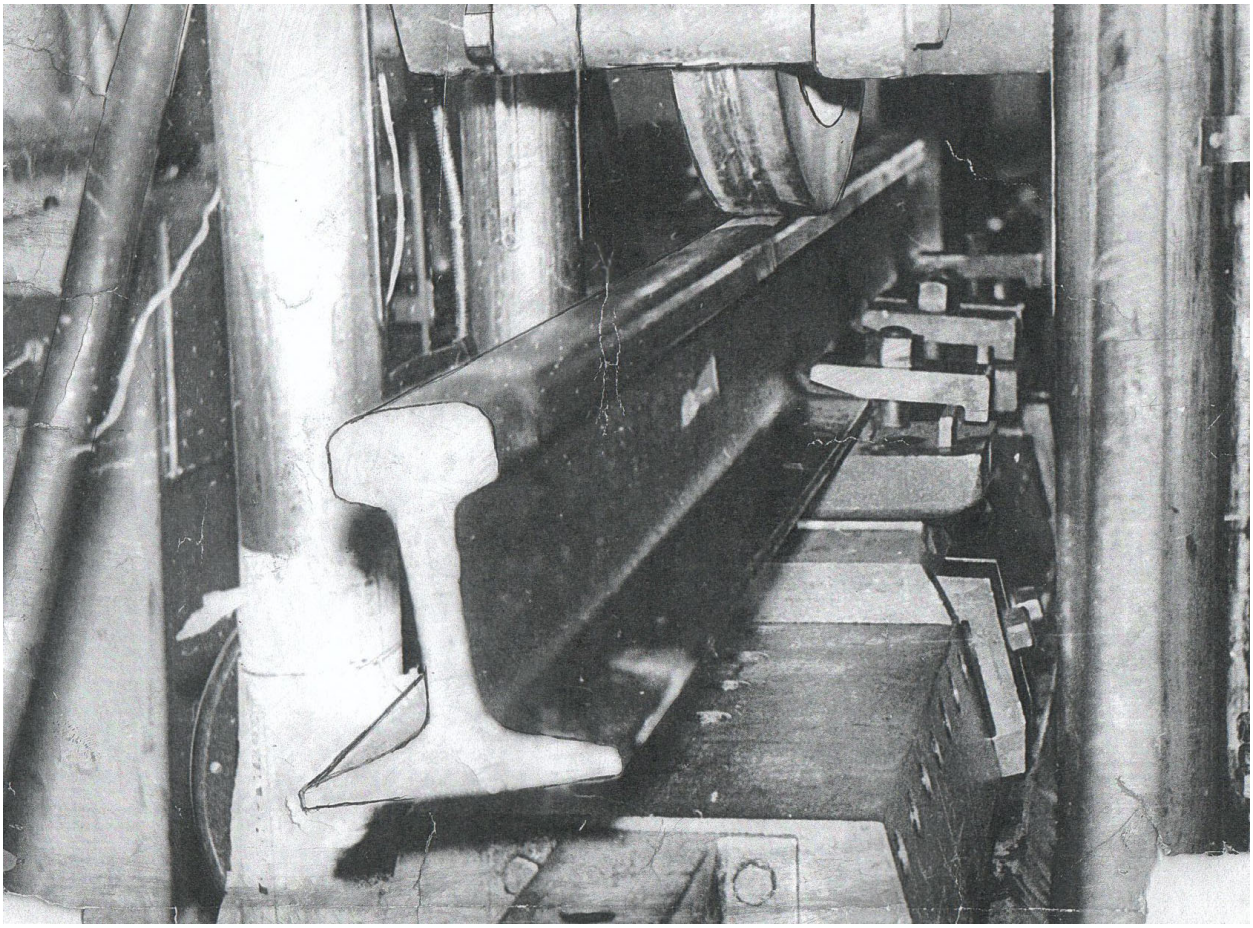


Рисунок 1 – Испытательная машина ЕМС – 60. На колесо диаметром 0,96 м можно создавать при качении нагрузку 0…600 кН. Возможно создание на колесо пульсирующей нагрузки для разрушения рельса (консольная схема)

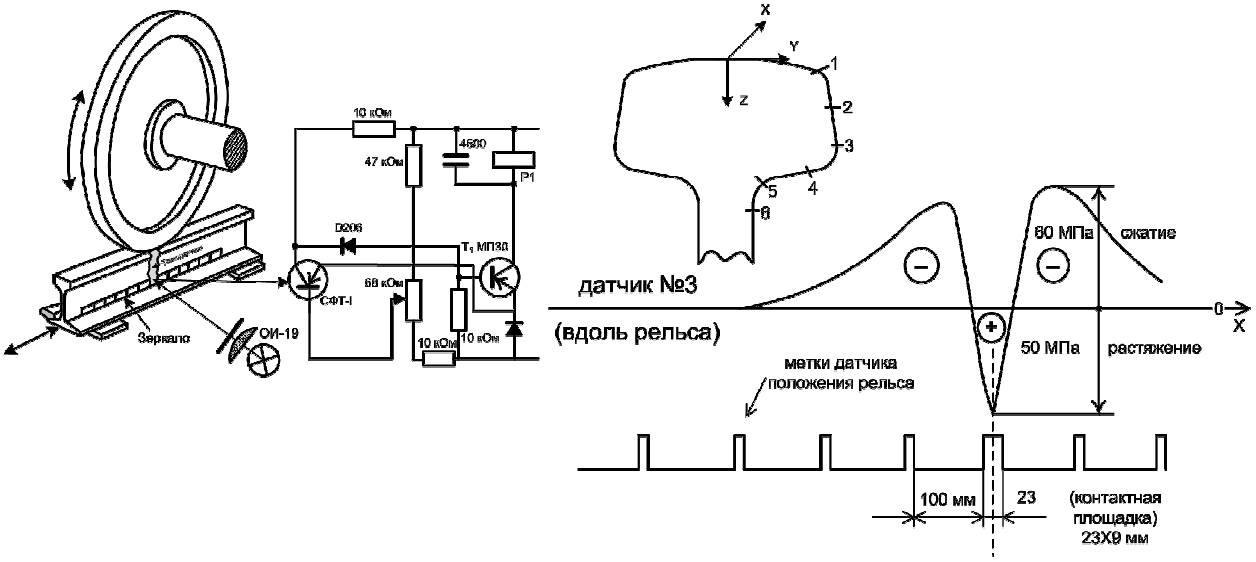


Рисунок 2 – Использование оптического датчика положения рельса относительно контактной площадки. Продольные деформации в рельсе при качении колеса (P = 180 кН, точка 3 на поверхности головки рельса). Внизу большая метка на осциллограмме соответствует длине КП = 23 мм

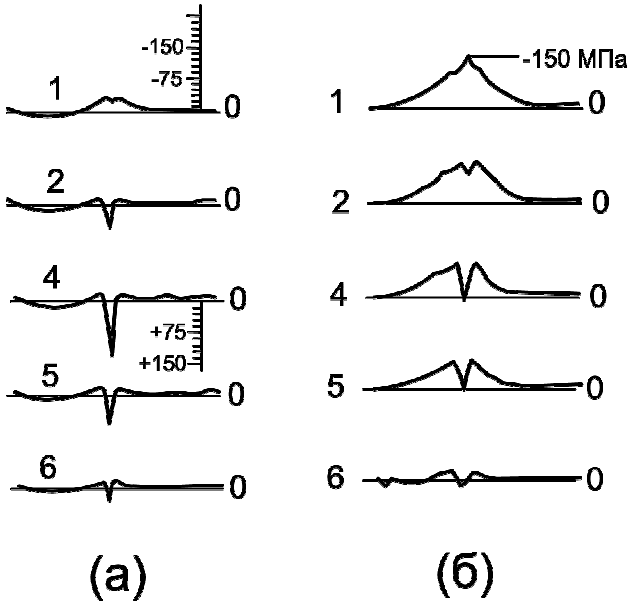


Рисунок 3 – Влияние жесткости подрельсового основания на уровень продольных контурных деформаций в головке рельса Р – 65. Сплошное подрельсовое основание (а) и (б) – пролет между шпалами 720 мм. Чистое качение (нагрузка на колесо 180 кН)

На рисунке 2 приведена осциллограмма и метки датчика положения. По осциллограммам видно, что рельс под воздействием нагрузки от колеса изгибается совсем не так, как балка под воздействием распределенной нагрузки. По анализу осциллограмм выяснили, что ось нейтральных (нулевых) деформаций изгибается вверх (в головку рельса), она не имеет разрывов, просто как

половина синусоиды заходит в головку рельса, ее приближение к КП сильно зависит от жесткости подрельсового основания, чем жестче, тем ближе. Изучение деформаций в рельсе, показало, что сам импульс деформаций металла под КП состоит из двух: от изгиба и от контактных деформаций, т.е. изгиб в головке дает сжатие, а контактные деформации- растяжение. В сумме имеем осциллограммы типа: рисунок 3.

Общая картина контурных напряжений в головке рельса хорошая (ясно, что удары по рельсу колеса с дефектом типа ползун могут достигать 500 кН), но для снижения опасных контактных деформаций под КП рельс нельзя эксплуатировать на сплошном подрельсовом основании, без полиуретановых пластин под подошвой: рельс должен иметь прогиб вниз, за счет чего идет вычитание (снижение) растягивающих деформаций из продольного сжатия от изгиба; еще прогиб рельса увеличивает длину КП и демпферные свойства рельса. На скорости качения 30 м/с частота нагружения будет 2 КГц, а вторая и третья гармоники 4 и 6 КГц. Кавитация воды возможна при 100 Гц. В подшипниках качения вибрации от дебаланса вала дают 2 и 3 гармоники, а у нас про-скальзывание колеса по рельсу – важный фактор.

Для изучения контактных деформаций в рельсе сверху на дорожку катания наклеивали тензодатчики с базой 1 мм и они при накатывании на него колеса показали только сжатие до самого обрыва датчика колесом, позже мы нашли, что полоска растяжения на периферии КП очень узкая и ее можно определить на прозрачных образцах, когда в стереомикроскоп рассматривается КП снизу, сквозь образец, сложные механизмы образования трещин в квазистатике, динамике и при контакте качения, их открытие, рост, и закрытие под индентором. В пересчете на рельс это пограничное мощное растяжение (зависит от сжатия по оси X (изгиб рельса)) будет 1-2 мм шириной. Что касается деформаций под КП то они были получены размещением тензодатчиков внутри узких пропилов в головке рельса.

На глубине 5 мм, рисунок 4, под КП в области трехмерного сжатия действуют значительные деформации удлинения вдоль рельса – 210 МПа. Это много, если учесть, что с рабочими напряжениями могут суммироваться остаточные, температурные, локальные (вокруг концентраторов) напряжения.

В исследованиях [2] процесса холодной прокатки, когда образец испытывает упруго-пластическую деформацию под прокатным валком, показано наличие значительных растягивающих деформаций нормальных к направлению максимального сжатия, поворот этих площадок на 1800 за время контакта, и оказывается, что направление наиболее вероятного роста трещин будет не строго определенным, а приблизительным, +/- 200 к направлению максимальных деформаций и напряжений растяжения. В условиях трехмерного неравномерного сжатия (оно считается как мягкое, не такое жесткое, когда есть поле больших растягивающих напряжений и есть старт и рост одной трещины-лидера, остальные трещины быстро останавливают свой рост) начинается другой сценарий: а) растут трещины, похожие на крылья бабочки от стартового дефекта (неметаллические включения). Направление роста крыльев – на

максимальное сжатие; б) образуются сдвиги, линии скольжения вдоль максимальных сил сдвига, сжимающие напряжения заворачивают эти линии скольжения, получаем логарифмические фигуры, и разрушения сложной ориентации. Далее на линиях скольжения зарождаются поры, их коалесценция и только потом образуется одна магистральная трещина. Причем трещины а) и б) могут останавливать свой рост на любой стадии, если нет условий их подрастания.

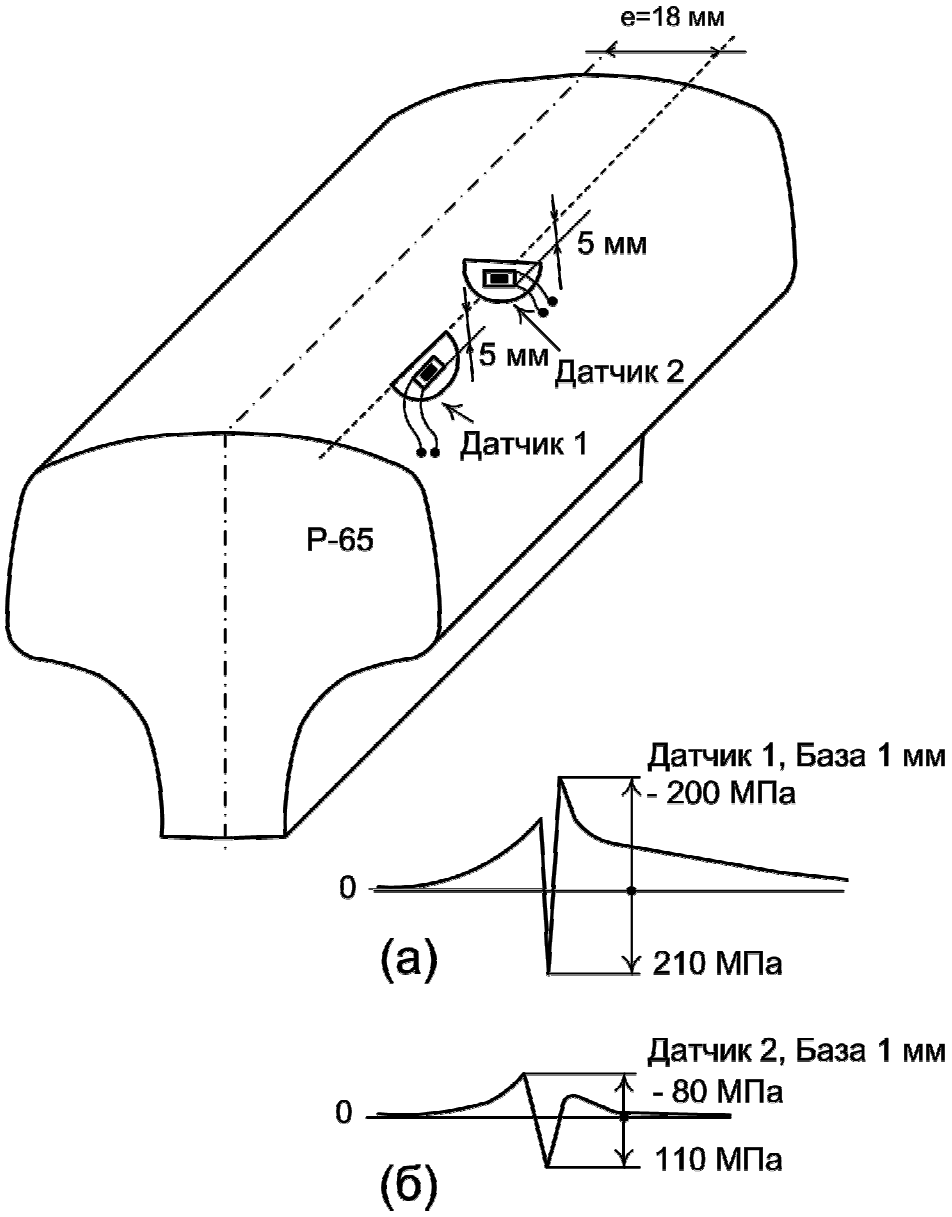


Рисунок 4 – Продольные и поперечные подповерхностные деформации в рельсе при качении колеса с нагрузкой 120 кН (e = 18 мм). Максимум деформаций удлинения расположен под КП. Деформации вдоль рельса (а) и поперек (б) представлены в единицах напряжений

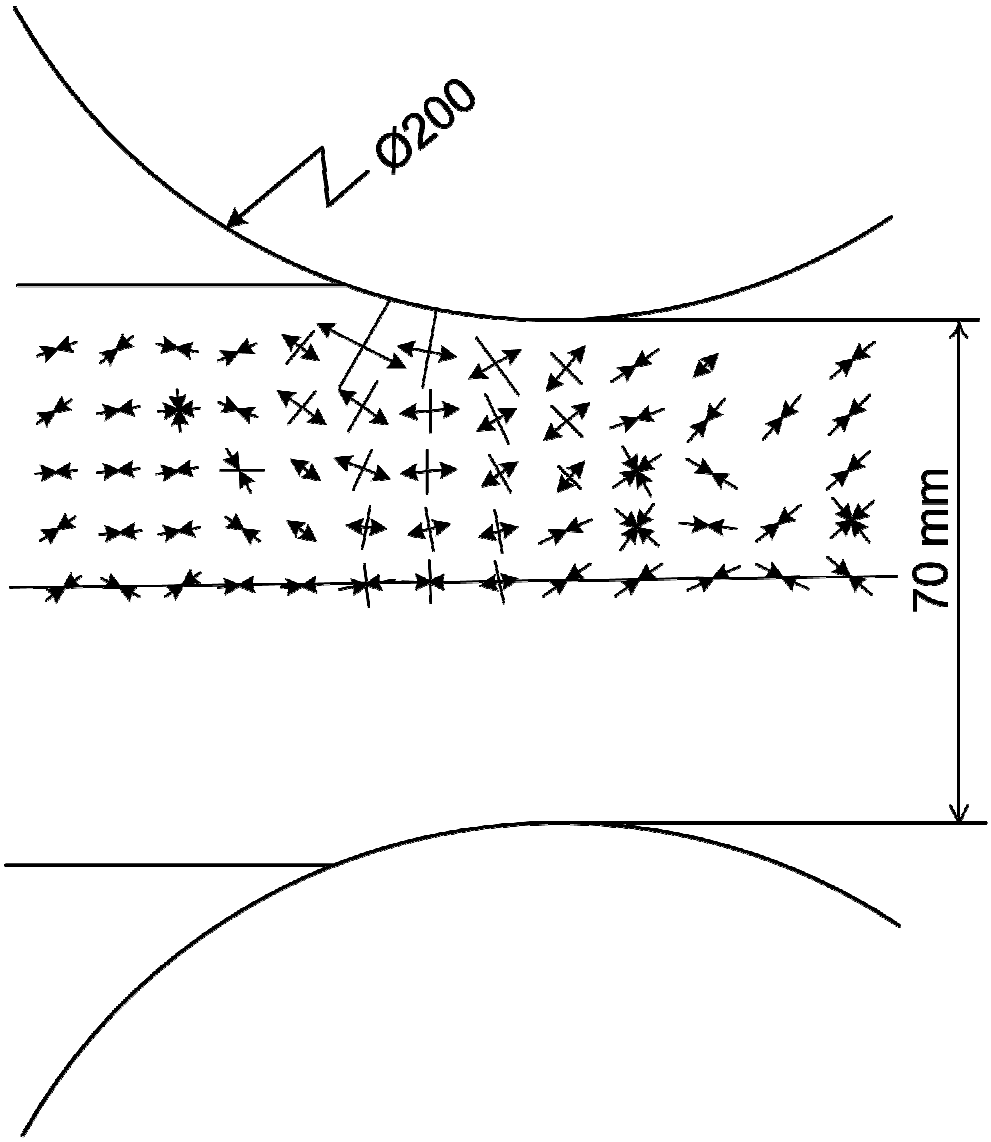
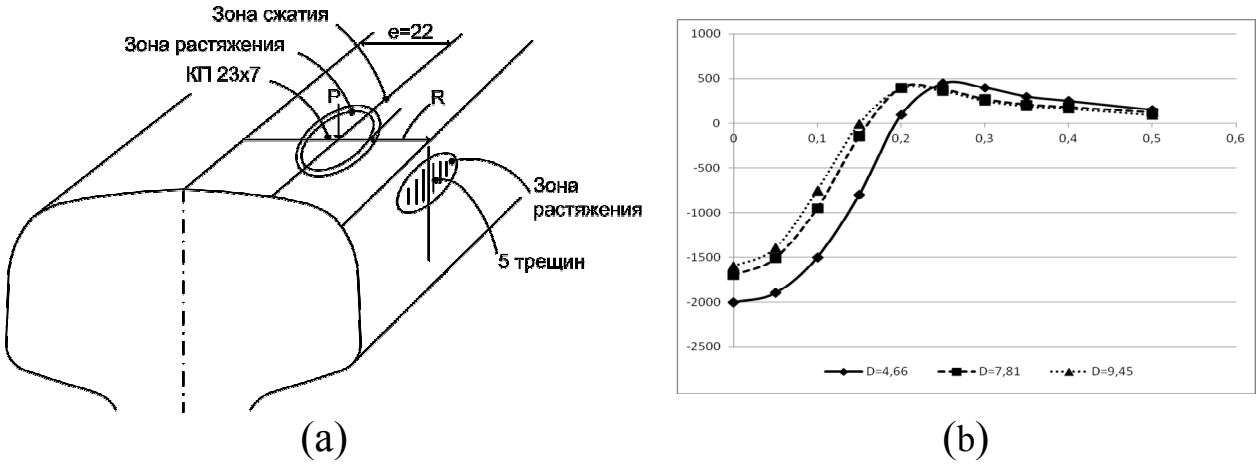


Рисунок 5 – Эксперимент при прокатке [2]. Распределение деформаций в заготовке вблизи прокатного валка Ø200 мм. Наличие стрелки у вектора – растяжение, без стрелки – сжатие. Прокатка материала сопровождается поворотом главных площадок на 180 градусов.

Очень интересной оказывается ситуация, когда мы имеем КП с большим эксцентриситетом. Мы проводили специальное исследование – индентировали шар в полимерные призмы на разном расстоянии КП от края образца. Как указано в наставлениях по измерению твердости материалов (Бринель) от края до отпечатка необходимо расстояние более 2,5 диаметров отпечатка (начинается боковое выпучивание или бочкообразование материала). Так, это область, где образуются от 5 до 7 вертикальных трещин, рисунок 6, а, от растягивающих напряжений по оси X, а средняя трещина обычно более длинная. Дальнейшее нагружение объединяет зоны растяжение вокруг периферии КП и от бокового выпучивания.



(a) (b)

Рисунок 6 – (a) вертикальное нагружение колесом рельса близко к боковой грани (отрезок R от края КП менее 10 мм) приводит к появлению растяжения на грани рельса (в брусках из ПММА возникают трещины (от 5 до 7) разной длины; (b) главные максимальные напряжения при внедрении в мрамор. Применение шаров 8 и 10 мм позволяет определить вязкость разрушения по напряжению в момент образования КТГ=394 и 340 МПа соответственно.

На рисунке 6, в представлены результаты внедрения шаров Ø5, Ø8 и Ø10 мм в мрамор. В момент образования конической трещины Герца (КТГ) по силе внедрения и диаметру КП, диаметру КТГ мы рассчитывали распределение напряжений под нагруженным шаром для мрамора и стекла. Оказалось, что в измерениях по Бринелю нежелательно применять шар Ø5 мм, а шары Ø8 и Ø10 мм дают хорошую точность измерений. Мы связываем это с тем, что чем ближе форма индентора к острой пирамиде, тем больший объем он деформирует (при одинаковой площади КП). На рисунке 6, b хорошо видна зона растяжения, где образуется КТГ (она зарождается обычно в одной точке на расстоянии 0,1 мм или менее от периферии КП, а потом начинается ее быстрый обход по периметру КП слева и справа). Если при нагружении уровень КП понизился в одну сторону, то старая КТГ остается и имеет вид незавершенного кольца или эллипса, в виде дуги. И уже на новом, соседнем месте образуется новая КТГ, и т.д. которые при качении шара нарезают поверхность в виде пересекающихся олимпийских колец. Если шар скользит без качения, он нарезает материал перед собой (впереди) в виде трещин-полуокружностей, которые пересекаются по месту наибольшей вытяжки материала в лунке индентирования – около 33% ширины трека качения.

КТГ обычно при нормальном нагружении не растут длинные (растяжение очень локально и зажато со всех сторон сжатием), но при качении все подругому: шар Ø10 мм при качении при нагрузке 250 кН имеет круглый отпечаток 0,9 мм на стекле. Трещины открываются спереди и сзади КП за 0,9мм, а сбоку – за 0,12 мм.

Внутри КП все трещины закрыты, но на некоторой глубине под поверхностью они открыты (под КП), но картина очень сложная для детального ана-

лиза. Ногтевидная трещина, самая большая, растет вглубь по середине трека катания от КТГ (здесь самое большое удельное давление), а в местах пересечений КТГ (на краях дорожки качения) действуют большие силы сдвига и материал имеет наибольшие повреждения.

Мы провели простое исследование: на машине ЕМС-60 рельс Р-65 (НВ260) подвергли обкатке колесом – всего 50 000 циклов. Рассматривая дорожку качения, хорошо видно, что боковые края дорожки не гладкие, а середина около 0,5 ширины дорожки гладкая; такая же картина остается и при циклическом сжатии шарика со стеклом центр КП, зона затрудненной деформации, не имеет даже царапин, стекло остается прозрачным.

Рельс после обкатывания на машине доломали циклическим изгибом за 50 000 циклов так, чтобы в головке рельса выросла УТ и мы смогли бы определить на треке катания место ее зарождения. Зародилось 2 одинаковых ногтевых строго поперечных УТ, длиной по 7 мм, т.е. наиболее сталь повреждается на поверхности катания, на краях КП, где при проходе КП действуют, рисунок 7, а, большие растягивающие напряжения, большой градиент напряжений множество плоскостей скольжения, приводящих к разогреву (на репликах, при увеличении х3000 раз, мы находили здесь места с частичным превращением пластинчатого цементита в глобулярный). Дополнительно, мы нашли разогрев материала-гранита при внедрении в него шара Ø8 мм, нагрузка 15 кН, время 120 с.

Под шар подложили латунную сетку с ячейкой 0,1 мм. В кратере, после нагружения, много шариков латуни Ø0,001-0,03 мм. Это для рельсов может быть причиной образования мартенсита по берегам трещин и плоскостей сдвига – с трением при ударном воздействии.

При холодной прокатке металлов изготавливают валки двух групп твердости: мягкие валки твердостью по Шору HS50 (НВ350), для них допустимое удельное давление ограничивают 1100 МПа и твердые валки HS70 (НВ450) и выше – для них удельное давление – 1300 МПа.

Снижению вероятности появления выколов (питтинга и сполинга) на прокатных валках хорошо способствует обдув валков сжатым воздухом из сопла, т.е. твердые частицы не должны попадать на опорные и рабочие валки. Для рельсовых сталей, также, как и для прокатных валков весьма сходны механизмы усталостной деградации : материал низкой твердости сначала упрочняется, а затем следует разрушение, а высокой твердости – нет периода упрочнения, а есть более медленный, по времени, механизм деградации свойств, без этапа приспособляемости [6]. При этом высокие значения сопротивления сдвигам в сочетании с высокой вязкостью разрушения позволяют иметь хорошее сопротивление износу, т.е. необходимо, чтобы рельсовая сталь имела при высокой твердости высокую вязкость разрушения и не превышалось максимальное удельное давление.

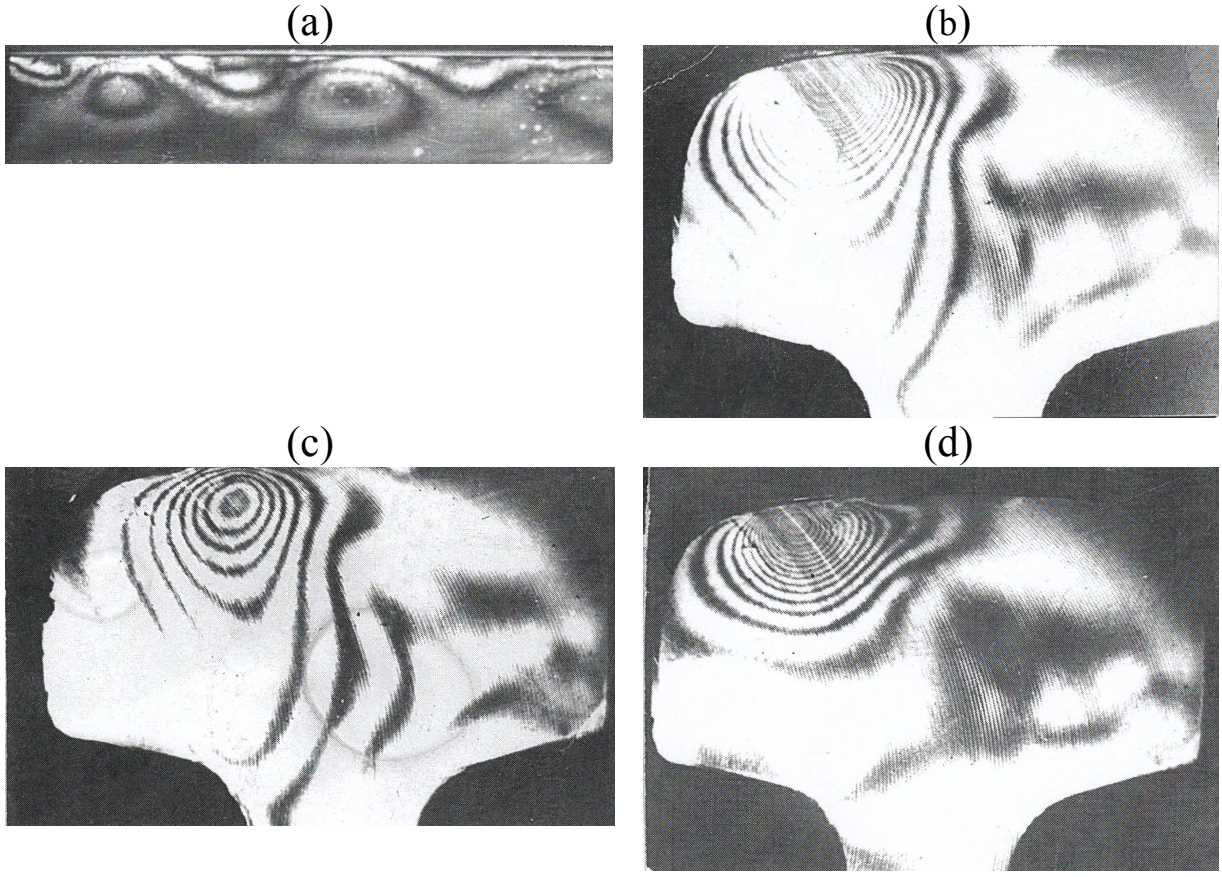


Рисунок 7 – Распределение упруго-пластических деформаций под поверхностью рельса Р65 (НВ250). Фотоупругие покрытия из эпоксидной смолы t=2,7 мм. (a) – продольные остаточные деформации в рельсе; (b) – нормальная нагрузка на колесо 180 кН, эксцентриситет 14 мм (8 изохром); (c) – нагрузка на колесо 180 кН, e = 18 мм (20 изохром); (d) – остаточные деформации после предыдущего нагружения (14 изохром)

Поэтому оценим удельные давления при контакте качения колеса по рельсу по результатам опытов на машине ЕМС-60.

С помощью фотоупругих покрытий (эпоксидная смола, толщиной 2,7 мм) – пластин размером 15х100 мм, наклеенных сбоку на частично срезанную сбоку четверть головки рельса, с эксцентриситетом 20 мм, после качения колеса наблюдается волнообразная картина остаточных деформаций рельсовой стали (НВ250), которые достигают глубины 10 мм, максимальные касательные напряжения на глубине около 7 мм т.е. при нормальном нагружении, без качения впервые пластическая деформация будет на этой глубине и на поверхности в углах (краях) КП, рисунок 7, а.

Величину максимального удельного давления на контакте колесо – рельс измеряли по отпечаткам на ватмане. Эксцентриситет нагружения брали: e = -10;+7.5; 15; 22 мм. При усилии на колесо (Ø 960 мм) равном 180 кН, размеры КП составляли: 22,7х15; 22,5х13; 23х9; 23х7 мм. Удельное давление соответственно: 1010; 1170; 1660;2090 МПа.

По формулам Джонсона [7] получается, что рельс перегружен (есть остаточная деформация в двух последних случаях), что и видно на фотоупругих наклейках на фрезерованном торце рельса Р-65. В момент нагружения покрытие (его толщина 2,7 мм) начинало отклеиваться в левом и правом углу КП, вблизи поверхности, хотя покрытие было ниже уровня верхней части рельса, а площадка (КП), ее край был отодвинут на расстояние 7 мм от торца рельса. Когда мы нагружали на большем расстоянии от торца рельса (14 и 18 мм), картина изохром была но не такая информативная, рисунок 7.

Иногда на ватмане (при отрицательном эксцентриситете) получался отпечаток КП состоящий из трех отдельных КП, в этом случае изохромы имели почкообразную форму с двумя фокусами пластической деформации.

Если удельное давление 1700 МПа, то касательные напряжения при коэффициенте трения 0,03 будут 50 МПа, т.е. без момента от привода колеса или торможения они малы и наоборот, если скользит колесо с ползуном, появится вероятность образования десятков тонких трещин на поверхности трения.

Наклеенные на торец рельса фотоупругие покрытия позволяют оценивать распределение остаточных и рабочих напряжений, рисунок 7 (b-d). Картина изохром на торце рельса, ее площадь почти дважды превышает реальную внутри рельса (там плоская деформация). Распределение остаточных напряжений, рисунок 7, г, по глубине головки рельса после статического вертикального нагружения колесом (Р=180 кН, е=18 мм) напоминает форму поперечной УТ (дефект 21) . Это зона действия до глубины 14 мм от поверхности катания рельса продольных сжимающих остаточных напряжений, что подтверждено при росте УТ в наших полнопрофильных образцах [3]. Когда УТ растет в таком образце при испытании на пульсаторе, она растет в направлении от шейки к поверхности катания рельса и со стороны рабочей грани головки рельса она растет медленнее (торможение 3мм за счет остаточных напряжений), рисунок 8.

Для рельса, бывшего в эксплуатации, нагрузка разрушения в таких образцах – рельсах имеет подъем при глубине трещины 23 мм, рисунок 8. Тензодатчики, наклеенные вблизи ВУТ, и ультразвуковой сенсор (2,5 МГц) дают информацию, что вершина УТ начинает открываться при 20 МПа и заканчивается стабильное подрастастание УТ, начинаются щёлканье и хрупкое проскальзывание при 160 МПа.

Берега УТ образуют «дверной шарнир» с углом менее двух градусов при вершине усталостной трещины (ВУТ), который при рассмотрении в микроскоп наполнен обломками с берегов УТ, которые мешают ее полному закрытию и меняют размах напряжений. Длина контакта берегов у закрытой ВУТ, судя по измерениям ультразвуком, составляет 0,5…1,5 мм.

Эволюцию остаточных напряжений и вязкости разрушения в рельсе при контакте качения мы изучали при испытаниях двух рельсов на машине EMC-60 (в каждом, примерно через 1 млн. циклов образовались по две поперечные УТ, они подрастали сверху, от дорожки качения, до длины по 25 мм). Рельс, длиной 2,4 м разметили на 12 участков по 200 мм, чтобы, сдвигая рельс, на одном рельсе получить достоверную картину изменений.

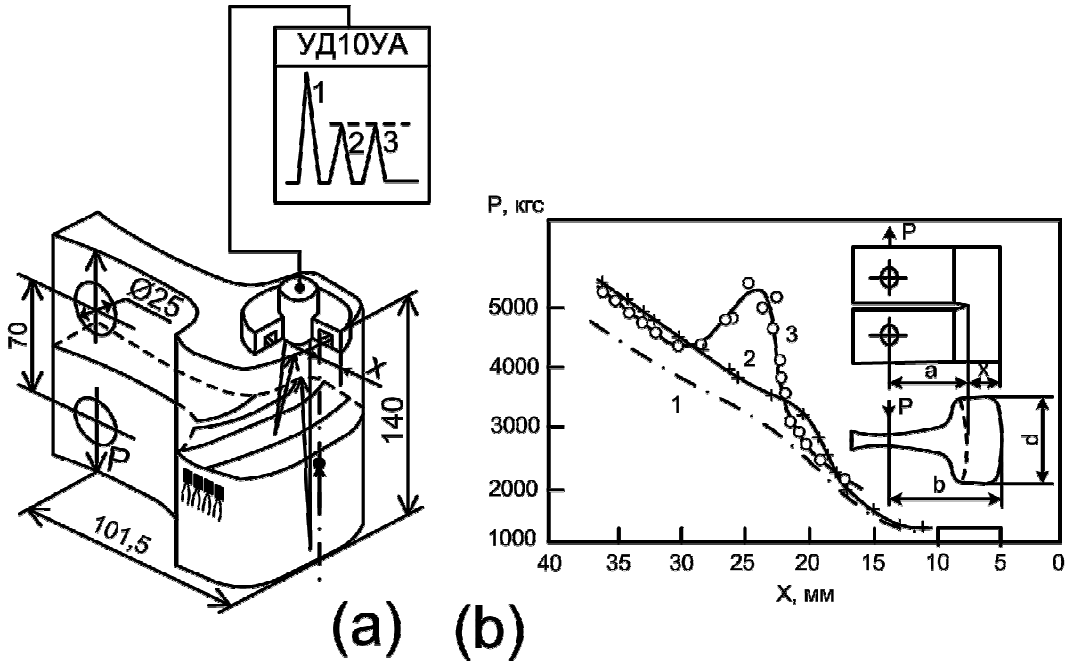


Рисунок 8 – (a) – схема испытания образцов рельсов Р65 (авт. свид. 728028/1980г.) на вязкость разрушения: 1 – начальный УЗВ импульс; 2 – импульс от УТ; 3 – импульс от дна образца; (b) – зависимость разрушающей нагрузки от глубины трещины для рельсов: 1,2 – новые, углеродистые и кремнистые (НВ250); 3 – углеродистый (НВ250) после пропуска нормативного тоннажа

Остаточные напряжения на поверхности катания рельса (вдоль и поперек рельса) после первых 2000 циклов изменились за счет поверхностной пластической деформации (независимо от исходных растягивающих поперечных (+100 МПа) и продольных (-20 МПа) напряжения стали сжимающие (-100 МПа) и (-150 МПа) соответственно и оставались неизменными до разрушения. Слой стали (18 мм) возле трека катания также показывает снижение вязкости разрушения на 20 % через 100 000 циклов (10 % долговечности) по сравнению с исходной (вдоль и поперек рельса). Испытания на вязкость разрушения были выполнены на образцах для внецентренного растяжения; большая грань образца толщиной 18 мм совпадала с поверхностью катания.

Структурные изменения микроструктуры, линии сдвига изучали на образцах из углов (краев) КП; в верхнем слое контактной дорожки катания, но эта часть исследования из-за трудоемкости и сложности была не завершена.

Чтобы оценить сплющивание металла под КП, мы поставили в расплавленное олово сетку из латуни с ячейкой 0,1 мм, на этом образце по гладкой поверхности было выполнено индентирование шара Ø8 мм (сетка хорошо видна на шлифованной поверхности); из образца олова, после его плавления, была вынута сетка и на ней можно измерить объемные деформации. Кратер и деформации под шаром представлены на рисунок 9. Размеры клетки № 1 больше, чем клетки № 10, потому, что сверху, над клеткой № 1 было 8 сплющенных полностью слоев сетки.

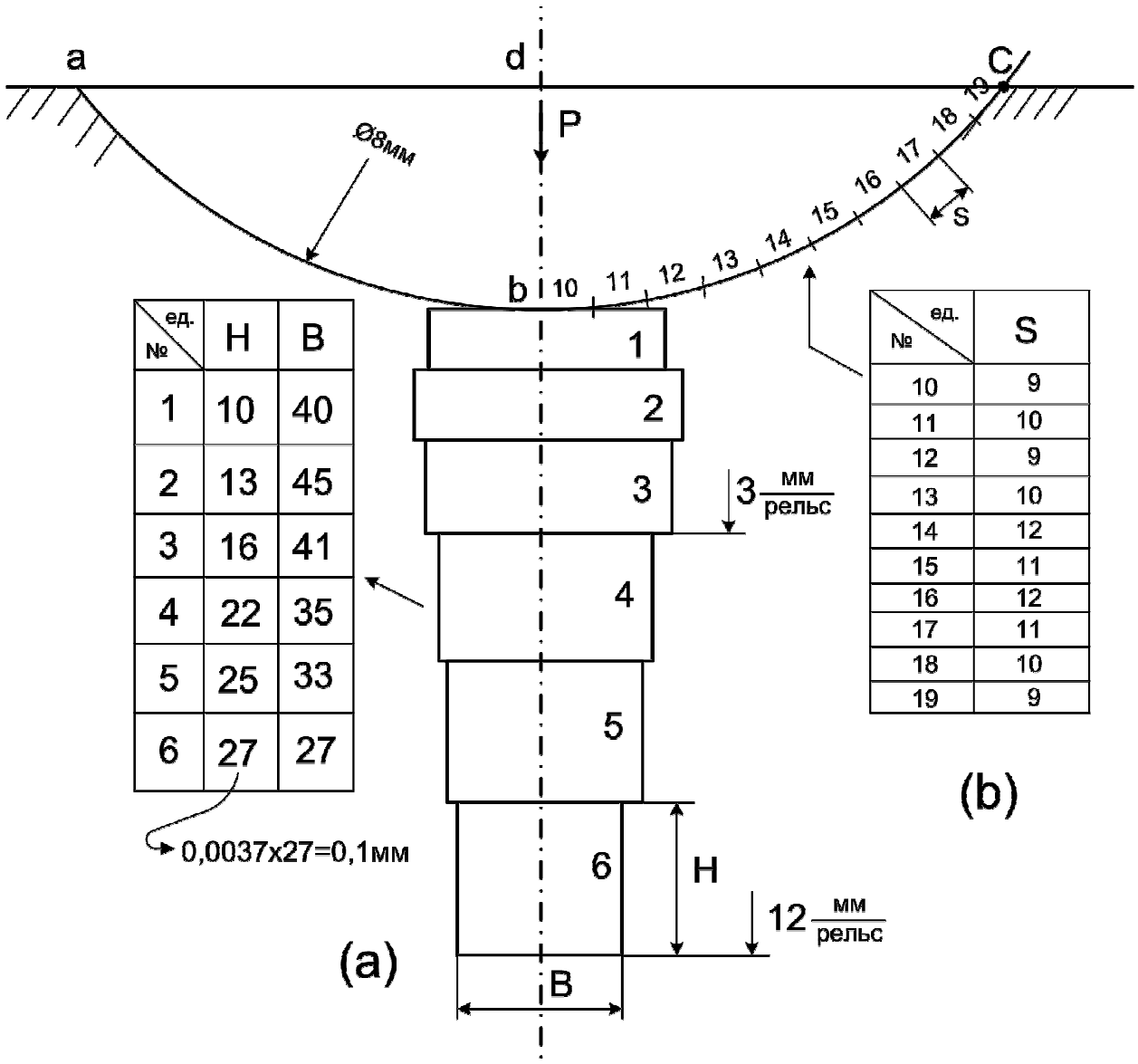


Рисунок 9 – Внедрение шара Ø 8 мм в образец (олово). (a) – Подповерхностные деформации. Исходная сетка 27x27 ед. имеет шаг 0,1 мм (остается неизменной на глубине 0,6 мм под шаром. Для рельса это глубина более 12 мм. (b) – Неравномерность деформации по диаметру кратера. Наибольшая вытяжка материала в зонах № 14-17

Отрезок (ac) кратера от внедрения шарика Ø8 мм был растянут до размеров дуги (abc), но сложным процессом, неравномерно. Нагружение начинается с точечного контакта участка 10, 11, затем 12, 13,в этот момент начинается пластическое течение, участки 10, 11 начинают погружаться вниз, но сила трения прижима не позволяет материалу в областях 10 и 11 двигаться влево и вправо, а только вниз. Образуется зона стояния (затрудненной деформации) под участками 10, 11, 12, а КП увеличивается, расширяется далее на зоны 14 и далее. Вдавливание в зоне 10 и 11, как поршень тянет за собой, удлиняет зоны 14-16 примерно на 20 %.

Это хорошо видно на видеозаписи, когда шар через сетку латуни вдавливаем в прозрачный полимер, а наблюдение ведется снизу, через толстое стекло при увеличении х 32. Верхние зоны при неглубоком кратере деформируются тогда, когда нагрузка на шар достигает величины 50 % и более от разрушающей нагрузки, когда начинается образование трещин неподалеку от точек (а) и (с) вне КП. Значительные вытяжки в зонах 14-17 позволяют объяснить явление зарождения и прохода трещин именно по этим зонам (2/3 от диаметра), несмотря на то, удельное давление в зонах 10-13 почти в 1,5-2 раза выше, т.е. выколы в шарикоподшипниках имеют вероятность зарождения выше в тех зонах, где больше исчерпана пластичность, где материал имеет больше пор на ступеньках полос скольжения и где нет мягкой схемы трехстороннего сжатия.

На нижней части рисунка 9 мы показали, что под шаром вся деформация материала заключена в верхнем слое, толщиной менее 0,9 мм, нижний кубик № 6 имеет исходный размер 0,1 мм х0,1 мм, а верхние расплющены более, чем на 50 %. При качении, в рельсе, который отработал ресурс на железной дороге, рисунок 8, есть подобный слой расплющенных и вытянутых зерен высотой 4 мм на рабочей и 3 мм на нерабочей грани головки рельса (и это при вертикальном износе 4,5 мм).

Такое раскатывание и вытягивание зерен вдоль направления качения существует в рельсах и как поперечное стягивание поверхностного слоя (рельсы НВ 250) головки, когда в кривых участках дороги КП скользит по осям X и Y . Из рассмотрения геометрии осадки материала под шариком Ø8 мм, рисунок 9, можно определить, что у рельса пластическая деформация будет до глубины 10 мм, без учета износа, а этот процесс похож на плющение, создание из зерен кирпичной кладки.

С одной стороны создается двумерное сжатие по осям X и Y и может способствовать отрыву верхнего слоя (задача Прандтля о сдвиге оползня) по границе зоны пластической деформации (из-за наличия неблагоприятных остаточных напряжений по оси Z) из-за того, что пластическая деформация удлиняет слой и коробит его. В обработке металлов давление эти явления известны, как отрыв верхних слоев при обкатке роликами.

Для более детального изучения контактных напряжений, мы выполнили компьютерное моделирование процесса нормального нагружения шаром полуплоскости и процесс выкатывания шара из лунки под действием окружного усилия.

При нормальном нагружении, рисунок 10, растяжение обозначено как векторные стрелки; есть 3 зоны (затемненные), в которых нет растяжения: одна под индентором и две эллипсовидной формы по бокам. Растягивающие напряжения непосредственно под индентором параллельны поверхности, что предполагает образование при качении вытянутых, слоистых зон. При отсутствии момента они возникают из-за двух опорных точек, рисунок 10, a, а при качении влево при одной точке опоры – левый край лунки; и при наличии момента также создается растяжение, рисунок 10, b, т.е. при качении наиболее

вероятен механизм появления трещин впереди колеса по типу КТГ (наклонных). При нормальном нагружении, рисунок 10, а, КТГ трещины образуются симметрично к периферии, под углом 22 ^{0} к поверхности катания, но при качении, они за счет сил трения, имеют углы: впереди перед шаром угол менее 20 ^{0}, а позади, наоборот, больше; при качении уровень напряжений почти в 2 раза выше.

Под колесом, которое выкатывается влево из лунки (глубиной 0,1 мм), рисунок 11, будет одно из вероятных направлений роста поверхностных трещин – под острым углом впереди КП (т.е. это КТГ), под углом 15-20 ^{0} к поверхности, стартовая точка перед передним краем КП, на расстоянии 0,2-0,4 мм от нее.

Из рисунка 11, б в местах образования КТГ видно, что это зоны больших растягивающих напряжений, мощных упруго – пластических реверсивных сдвигов, а значит имеется возможность сильного локального разогрева, что ведет к срыву передеформированных оксидных слоев. Под колесом имеем зону трехмерного сжатия, также сжатие есть чуть впереди КП, на глубине (а), где 2а – длина КП. Справа область сжатия на глубине наоборот большая по глубине, но она отстоит от проекции КП вниз почти на (2а), т.е. достаточно далеко.

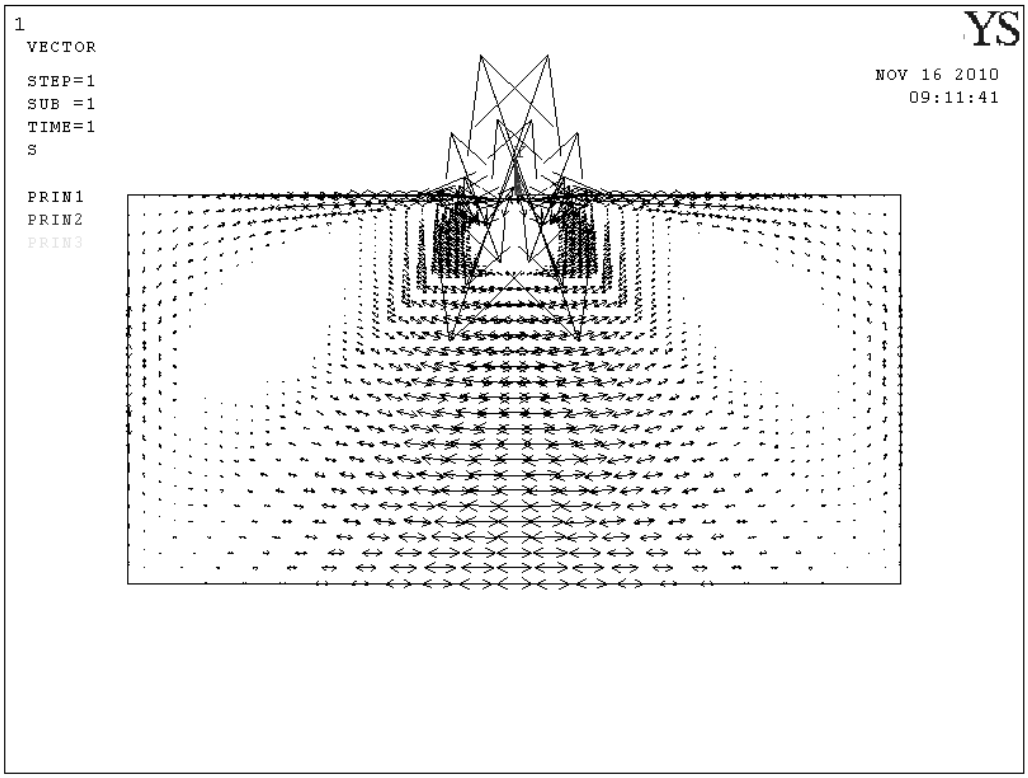
Места образования УТ – поверхность по периметру КП колеса, особенно впереди и наиболее позади колеса, когда будут возрастать силы трения торможения.

На глубине, под поверхностью, поперечная трещина будет расти нижней вершиной вниз под углом 20^0 в сторону движения (наклон векторов наибольших растягивающих напряжений. Такое объяснение мы приводили в 1981 г. [4]; при качении площадки с максимальными напряжениями имеют наклон в сторону движения.

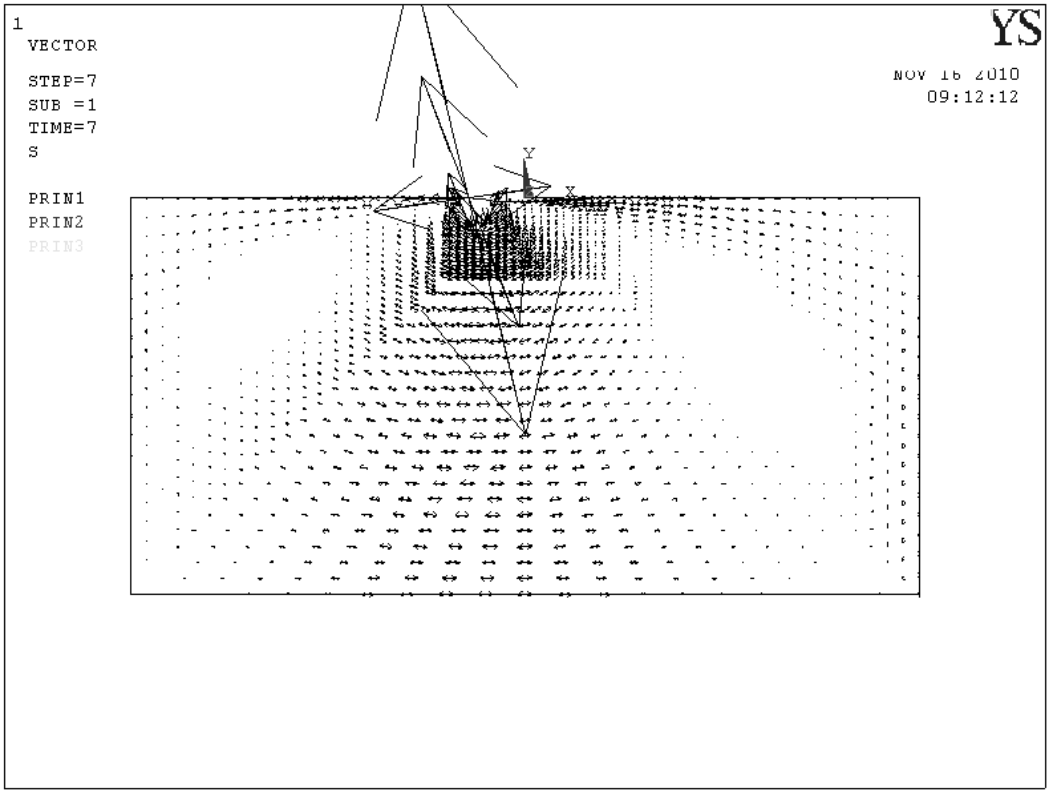
А при реверсивном качении по рельсу поперечная овальная УТ внутри головки рельса растет перпендикулярно (зигзагом) направлению прокатки.

Для изучения особенностей линий скольжения при контактном нагружении была разработана методика, когда из прозрачного полиэтилена (t=1,5 мм, размером 30х50 мм) набирается стопа толщиной 12 мм; сжимается струбциной и выполняется индентирование шаром Ø8 мм. Из стопы, на среднем образце, рисунок 12 получается картина линий скольжения и трещин, которые видны как некоторые утолщения на линиях скольжения.

Под индентором образуется небольшой кратер Ø2,7 мм (2а), ниже кратера находится зона затрудненной деформации (ЗЗД), через которую давление передается вниз. Из углов на краю КП развивается 2 системы линий скольжения. Из угловых линий скольжения (выше их крайней линии) пойдут КТГ (они есть не на всех материалах) и длина их 1,5 мм. На глубоких линиях скольжения образуются поперечные трещины 1, 2, 3, а на более мелких 4, 5, 6 – продольные трещины. Их местоположение совпадает с рисунком 10, а.

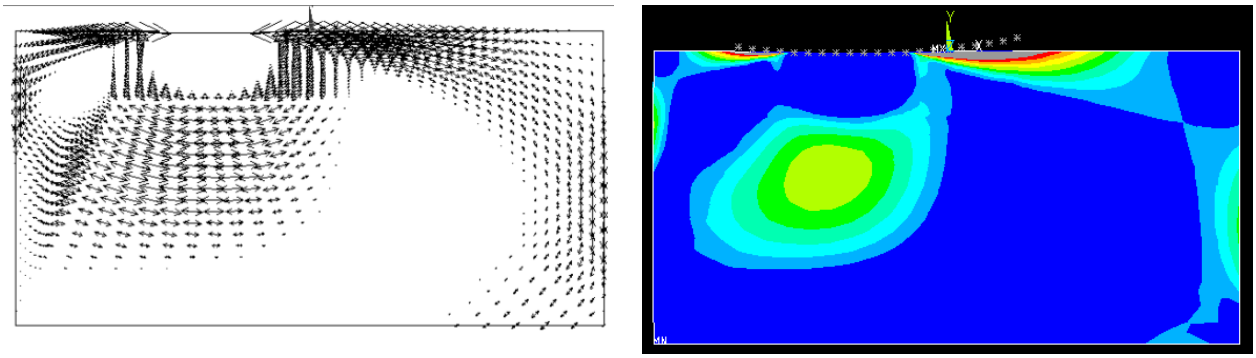


a)



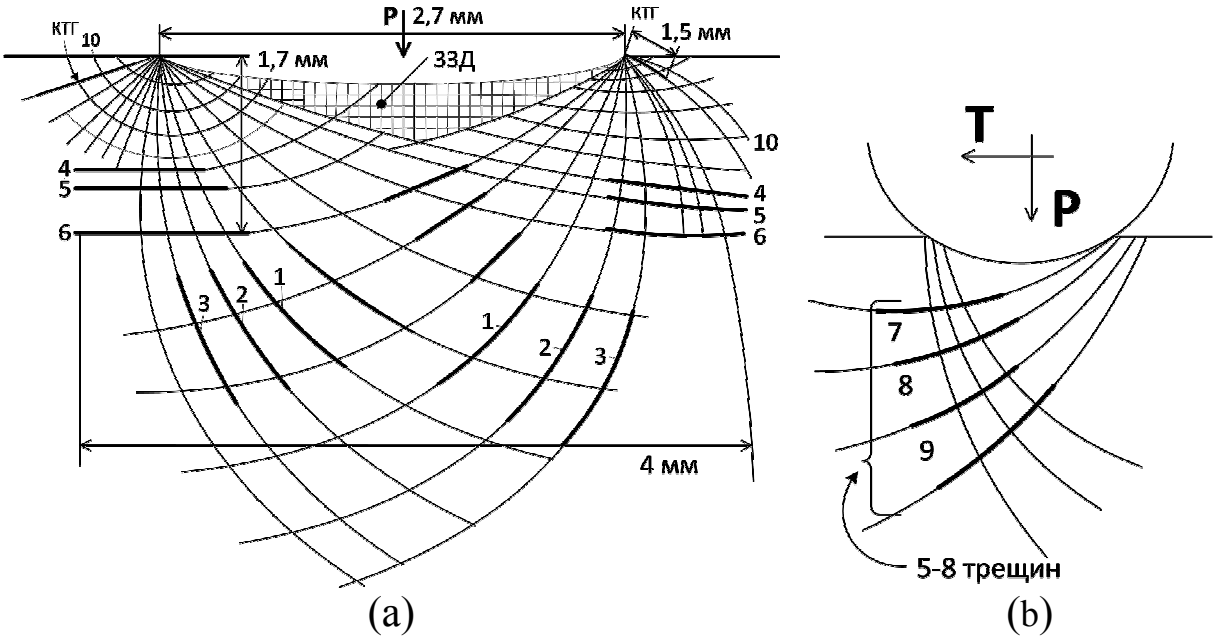
b)

Рисунок 10 – Распределение главных максимальных напряжений.
(a) – Нормальное нагружение шариком Ø14 мм. (b) – К шару Ø14 мм приложено окружное усилие 0,6 силы трения.



a) b)

Рисунок 11 – Нагрузка на колесо 150 кН. Рельс длиной 360 мм, высота 180 мм. Глубина лунки 0,1 мм. Сила трения 15 кН. Колесо перекатывается справа – налево. (a) – векторы напряжений. (b) – Контуры. В картину не включены узлы, испытывающие всестороннее сжатие (зоны затемнены).



(a) (b)

Рисунок 12 – Распределение линий скольжения в полиэтилене. (a) – Нормальное нагружение шаром Ø8 мм. (b) – движение шара влево, без качения: удар под небольшим углом к поверхности

Когда шар Ø8 мм (без возможности качения) одновременно вдавлен и перемещен на 3 мм в наклонную поверхность пакета полиэтиленовых пластин, то картина линий скольжения и трещин 7, 8, 9, (рисунок 12, b), получается другая.

Такое же движение колеса (скольжение без вращения) способно вызывать подповерхностные продольные трещины в линиях скольжения, трение и разогрев берегов трещин, появление тонких слоев мартенсита на стенках трещин.

Ранее [5] мы изучали на прозрачных моделях взаимодействие контактных и изгибных напряжений с ВУТ, рассматривали по картине изохром наиболее вероятное направление роста УТ. Суммарные результаты, рисунок 13, а – 3, показывают, что при остановке колеса продольная трещина наиболее вероятно будет расти влево и вправо, а при качении влево – трещина будет расти в секторе +/- 15 ^{0} в сторону качения.

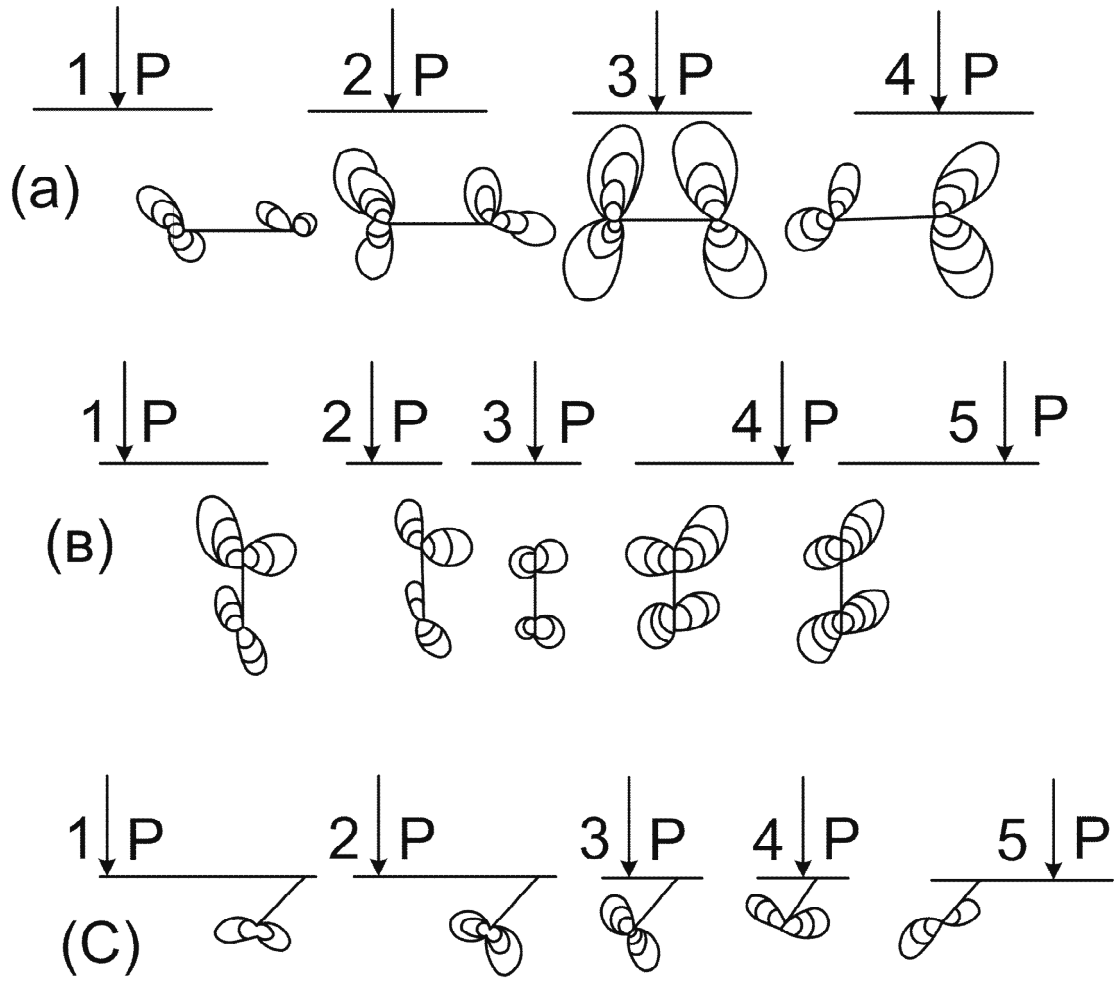


Рисунок 13 – Схематическая иллюстрация распределения изохром в пластине с трещиной. Контактная площадка находится на разном расстоянии от ВУТ: (a) – Продольная подповерхностная трещина – на сплошном жестком основании уровень напряжений выше, чем вариант на шпалах. (b) – поперечная подповерхностная трещина – изгиб между двух опор увеличивает уровень напряжений у ВУТ. (c) – Поверхностная трещина – без изгиба (сплошное основание) пластины уровень напряжений выше

Поперечная трещина, рисунок 13, b – 2 и 13, b – 4, будет при остановке расти под некоторым углом к вертикали, слева и справа от КП (изгиб рельса под колесом увеличивает уровень напряжений). Наиболее опасно, когда центр КП находится на расстоянии от 0,12а до а до проекции ВУТ. Схема имеет в

этот момент $К_2$=35 %; $К_1$=65 % , и это оказался очень тяжелый вариант для сопротивления усталости рельсовой стали.

Поверхностная трещина, рисунок 13, с – 2,3, будет более вероятно расти в сторону нагрузки вглубь под углом чуть вдоль поверхности, т.е. зигзаг будет у всех трех видов трещин, а строгие направления и повороты после определенной длины также вероятны, как и повороты после короткой трещины, когда она встречает впереди: a) большое включение, ступень с порой на плоскости сдвига; (b) другую трещину и т.д.

Основная трещина (УТ) имеет у вершины трехмерное растяжение, которое может рвать материал у концентратора заранее, еще до подхода фронта УТ, а вновь образованная поперечная трещина обычно имеет вид крыльев бабочки (вверх и вниз относительно плоскости главной УТ, так образуются ветвления, и для этого нужны только подходящие дефекты впереди УТ.

Ситуация на рисунке 13, b – 3 , по нашему мнению почти неизученная. Изохромы за счет вертикального сжатия (верхняя вершина трещины) имеют вид, не совпадающий с $К_2$ при классическом нагружении, т.е. в условиях сжатия трещина, по- видимому, верхней вершиной находится в состоянии, похожем на деформацию при осадке материала и на берегах трещины процесс непонятен.

По испытаниям этих образцов с трещинами мы пришли к новому универсальному образцу, рисунок 14, а, на котором мы проверили на прозрачной модели, что на нем можно реализовать схему от чистого отрыва до сдвига и смешанный тип (35% сдвига и 65% отрыва). Из рельсовой стали испытали такие образцы ф50 мм и толщиной 5 мм (верхний слой головки рельса).

Вариант смешанного типа разрушения 35/65 показал низкие результаты: для рельсов НВ250 $К_1$=39, $К_2$=57, $К_2/К_1$ =34; для рельсов НВ350 $К_1$=53, $К_2$=95 МПа$\sqrt{M}$.

Рост трещины по типу $К_2$ для рельсовой стали из-за пластинчатой микроструктуры, имеет низкую пластичность у ВУТ. Когда при росте УТ микротвердость меняется только в узком слое менее 100 мкм по берегам УТ при схеме $К_1$, то при $К_2$ трещина растет весьма трудно, с множественным ветвлением, образованием перемычек, и лучше исследования проводить на образцах с одной трещиной (частые остановки их роста).

В заключение оценим уровень напряжений и раскрытие 5 типов трещин, рисунок 14, b, под действием контактной нагрузки с наличием окружной силы: режим торможения или ускорения.

Исследование проведено на прозрачных в инфракрасных лучах пластинах пенопласта и полиуретана 25х70х300 мм, в которых были сделаны тонкие короткие сквозные трещины-разрезы. Длина КП 27 мм (диск Ø 400 мм).

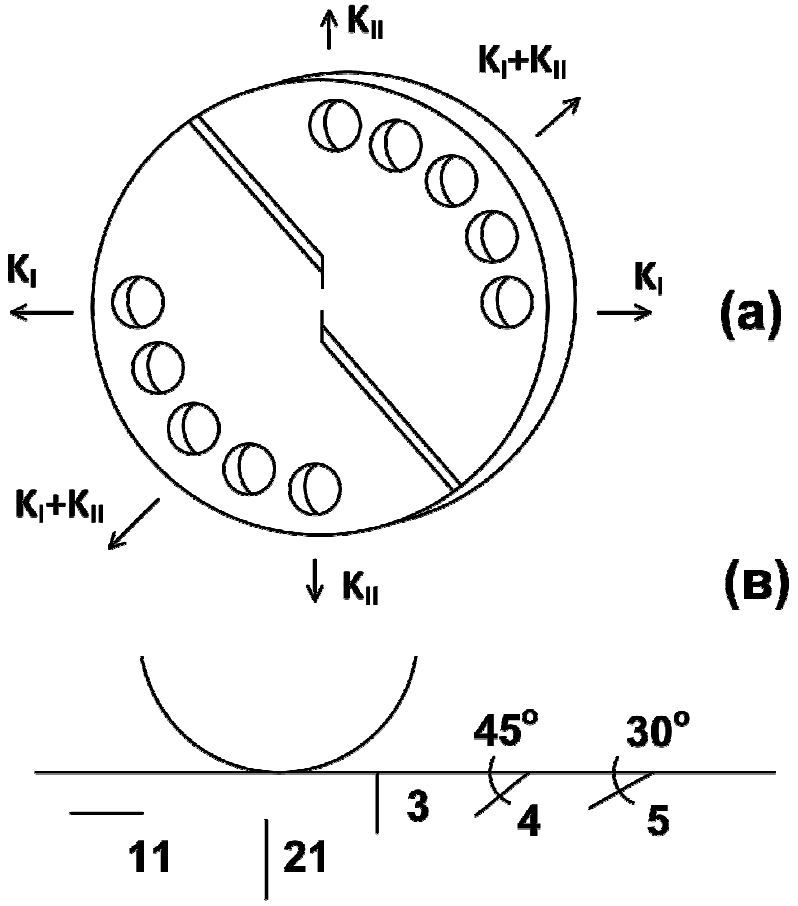


Рисунок 14 – (a) – Дисковый образец для создания у ВУТ сложного напряженного состояния. (b) – 5 типов трещин, возникающих при контакте качения

Трещина 11-1. Чистое качение. ВУТ закрывается прямо под центром КП, но дважды открывается на расстоянии +/- 11 мм от центра КП на глубине от 5 до 9 мм.

Трещина 11-2. Торможение. Торможение активно разрушает материал у ВУТ, возможен поворот трещины вниз (рост её вне края КП).

Трещина 11-3. Ускорение. Действует на заднюю ВУТ и направляет её рост вверх.

Трещина 11-4. Изгиб образца. Продольное сжатие образца (моделирует изгиб рельса под колесом) уменьшает скорость роста УТ.

Трещина 21-1. Чистое качение. Трещина закрыта прямо под КП сжатием (притупление верхней вершины трещины) сверху, а нижняя вершина трещины (ВУТ), тоже имеет низкий уровень напряжений, но трещина максимально подрастает под передней половиной проекции КП на вершину поперечной трещины, действует смесь K_1 и K_2 (один раз при качении, но при монотонном вдавливании – 2 раза).

Трещина 21-2. Торможение. Торможение открывает УТ с одной стороны, позади КП.

Трещина 21-3. Ускорение. На расстоянии +/- 1,2 a от центра КП наиболее сильно открывает нижнюю вершину УТ. При качении, рисунок 10, b, в

нижней части максимальные растягивающие напряжения действуют под углом 20^0 к горизонтали, а поэтому и дефект 21 будет расти под таким углом, т.е. нижняя часть овальной трещины отклонена нижней частью в сторону движения. Ранее считали, что дефект 21 растет при обратном изгибе рельса (между колесами тележек). Эта идея тоже хорошая, если учесть, что площадки главных остаточных остаточных напряжений (при качении в одну сторону) имеют такой же наклон. На валках для холодной прокатки стали ставят стрелки направления вращения для того, чтобы после ремонта валка не нарушалась уже сложившаяся наклонная схема остаточных напряжений. По теоремам Мелана система остаточных напряжений противодействует контактным напряжениям. Опыты на дорогах, с помощью ультразвука, дадут ответ на фазы открытия – закрытия овальной трещины 21 и других УТ.

Трещина 21-4. Изгиб рельса. Сжатие верхних слоев головки увеличивает скорость роста УТ, по сравнению со сплошным подрельсовым основанием.

Трещина 3-1 Чистое качение. Трещина вдали от КП закрыта, а открыта слева и справа от КП (вблизи). Левая а потом и правая часть трещины, ее берега по очереди опускаются вниз при перекатывании колеса. Под КП (прямо по центру КП) ситуация расплющивания приповерхностного слоя, т.е. на фотоупругих моделях все изохромы заворачивают вниз по обеим берегам трещины, их количество мало.

Трещина 3-2.Торможение. Приводит к закрытию, а затем к открытию ВУТ, возможно горизонтальное направление ее роста вдоль скольжения (торможения).

Трещина 3-4. Прогиб рельса. Прогиб несколько увеличивает уровень напряжений у ВУТ.

Трещина 4-1. Чистое качение. Когда КП приближается к ВУТ слева, то она закрывается, а справа открывается за 2,2 а. Сложная картина вблизи КП (похоже на случай 21.1). Трещина закрыта под КП (открывается вблизи, а вдали она закрыта.).

Трещина 4-2. Торможение. Движение слева закрывает трещину дальше, чем при чистом качении.

Трещина 4-3. Ускорение. Ускорение также может отклонять направление роста УТ под воздействием высоких касательных напряжений.

Трещина 4-4. Изгиб. Изгиб рельса под колесом вниз также может несколько повышать уровень напряжений у ВУТ.

Трещина 5. То же самое, что для трещины 4, но больше раскрытие ВУТ, материал выше трещины, особенно на поверхности катания раплющивается разрушается в виде чешуек, мелких обломков, некоторые попадают в раскрытую трещину, расклинивают берега УТ.

Выводы.

1. В работе показано, что наиболее нагружен 10 мм слой головки рельса, где действуют под и вблизи контакта колесо- рельс значительные эксплуатационные растягивающие напряжения и деформации (часто допускается превышение предела текучести не только на микронеровностях, но и в глубине

рабочей грани головки рельса, т.е. очень тяжелая перегрузка при контакте качения может создавать условия появления макротекучести, появляются места ослаблений материала, плоскости скольжения, часто нереверсивного, далее образуются ступени на пересечениях линий сдвигов, поры, трещины вдоль полос сдвигов, объединение трещин в характерные для подшипников или рельсов свои КУД (с небольшими вариантами). Исходный контакт в одной точке, который должен передать значительные усилия за доли секунды сопровождается скольжением с ударным характером нагружения, но площадки контакта нельзя идеализировать (часто считают, что контакт должен быть по линии или по площади); прямые наблюдения говорят о очень малых площадках, которые перемещаются, дрейфуют туда, где ниже уровень, где часто не одна точка опоры, а 2-3 и только, когда появляется третья опора, держит нагрузку устойчиво (кстати, это одна из причин образования трещин типа игрек при монотонном нагружении, эти трещины проходят через центр КП).

2. Если есть растягивающие напряжения, концентраторы в виде микротрещин, то трещина от растягивающих (изгибных) напряжений быстро приходит в очаг контактных деформаций.

С приближением центра КП колесо-рельс ближе 20 мм к боковой грани головки рельса резко увеличиваются контактные напряжения а на боковой грани рельса появляются опасные растягивающие деформации.

3. Сопротивление росту КУД можно увеличивать созданием сталей с высоким пределом текучести, высокой вязкостью разрушения, высокой твердостью, высоким сопротивлением микросдвигам и декогезии у ВУТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цвигун В.Н. Изучение напряжений и деформаций в рельсе Р – 65 на машине ЕМС-60. Отчет ПНИЛ. Сибирский металлургический институт. Новокузнецк.1972. – 70 с.

2. Chijiwa K. Experimental Method of Stress Simulation of Rolling // T.ISIJ. – V. 21. – 1981. – P. 502-511.

3. Челышев Н.А., Цвигун В.Н. Исследование стойкости рельсов поперечным усталостным изломам // Известия вузов. ЧМ. – 1977. – № 6. – С. 91-93.

4. Цвигун В.Н. Исследование вязкости разрушения рельсовых сталей и механизма развития контактно-усталостных дефектов рельсов. Кандидатская диссертация; ВНИИЖТ. – М. 1981. – 177 с.

5. Цвигун В.Н. Изучение механизмов питтинга, спаллинга и других контактно-усталостных дефектов рельсов. Часть 1. О направлении роста продольной подповерхностной трещины под воздействием контактной нагрузки. МашиноСтроение. Новокузнецк, 2014. – № 23. – С.121-126.

6. Takechi H., Namba K. Evalution of Subsurface Fatigue Damage of Work and Backup Mill Rolls // TISIJ. – 1981. – V. 21. – P. 91-99.

7. Merwin J., Johnson K.L. Analysis of Plastic Deformation in Rolling Contact // Proc. Mech. Eng. – 1963. – 177. – P. 676-690.