

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

*85-летию
Сибирского государственного
индустриального университета
посвящается*

**ВЕСТНИК
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

Сборник научных трудов

Издается с 1994 г. ежегодно

Выпуск 34

Москва
Новокузнецк
2015

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. 34 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянецв (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2015. – 180 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России посвящено 85-летию Сибирского государственного индустриального университета. 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. 72, табл. 39, библиогр. назв. 193.

Редакционная коллегия: Арнс 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; Юсфин Ю.С., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РЭА (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянецв 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., СПбГУ, 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

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	85
<i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Е.А. Будовских, Н.А. Козырев</i>	
Особенности формирования, структура и свойства композиционных покрытий и конструкционной керамики с наноразмерным карбидом кремния	86
<i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, А.К. Гарбузова</i>	
Исследование условий электроосаждения и физико-механических свойств покрытий никель – карбид титана	101
<i>К.А. Ефимова, А.К. Гарбузова, Г.В. Галевский, В.В. Руднева</i>	
Моделирование процессов синтеза высокотемпературных соединений титана	113
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ	124
<i>А.М. Анасов</i>	
Изучение процесса влияния излучения оптического квантового генератора на степень физической однородности стали с использованием явления акустической эмиссии.....	125
<i>В.Н. Цвигун, В.Н. Кузнецов, В.М. Нефедов, Р.С. Койнов, С.В. Коновалов</i>	
Изучение механизмов питтинга, спаллинга и других контактно-усталостных дефектов рельсов. Сообщение 2. О направлении роста поперечных подповерхностных трещин под воздействием контактной нагрузки.....	147
<i>Цвигун В.Н., Кузнецов В.Н., Коновалов С.В.</i>	
Изучение механизмов питтинга, спаллинга и других контактно-усталостных дефектов рельсов. Сообщение 3. Исследование трещиностойкости рельсовой стали в условиях сложного напряженного состояния (влияние K_1 и K_2 в различных соотношениях).....	153
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ... 159	
<i>К.А. Черепанов¹, Е.Н. Темлянцева</i>	
Об использовании кремнеземистой пыли, образующейся при выплавке ферросилиция в закрытых печах, в качестве активированного минерального порошка – компонента асфальтобетонной смеси.....	160
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ	164
<i>И.В. Баклушина, Е.В. Смирнова, А.А. Шамаринов</i>	
Влияние работы куратора на качество образовательной деятельности	165
ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ И БИОГРАФИИ	169
<i>Г.В. Галевский, О.Б. Тухтабеков, М. Комрони</i>	
У истоков алюминиевой промышленности России (к 150-летию со дня рождения профессора Павла Павловича Федотьева).....	170
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	178

В.Н. Цвигун, В.Н. Кузнецов, В.М. Нефедов, Р.С. Койнов,
С.В. Коновалов

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

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПИТТИНГА, СПАЛЛИНГА И ДРУГИХ
КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ РЕЛЬСОВ.
СООБЩЕНИЕ 2. О НАПРАВЛЕНИИ РОСТА ПОПЕРЕЧНЫХ
ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ
КОНТАКТНОЙ НАГРУЗКИ

Показано наиболее вероятное направление роста поперечных подповерхностных трещин: мелкие трещины на глубине $0,25-0,5a$ будут расти вверх, но мелкие трещины на глубине $0,1a$ имеют уровень напряжений меньший чем трещины на глубине $h=0,25-0,5a$. Глубокие трещины ($h=a$ и более) будут расти в трех зонах под контактной площадкой, т.е. нижняя вершина внутренней поперечной трещины растет вниз ($K_1/K_2=65\%/35\%$); такое сочетание K_1/K_2 вызывает более быстрый рост усталостной трещины, чем при $100\% K_1$ или $100\% K_2$.

The most probable direction of growth cross-sectional subsurface of cracks is shown: the small-sized cracks on depth $0,25-0,5a$ will grow up, but the small-sized cracks on depth $0,1a$ have a stress level smaller than cracks on depth $h = 0,25-0,5a$. The steep cracks ($h = a$ and more) will grow in three zones under a bonding contact pad, i.e. the lower top of an internal cross-sectional crack grows downwards ($K_1/K_2 = 65\%/35\%$); such combination K_1/K_2 calls more fast growth of a fatigue crack, than at $100\% K_1$ or $100\% K_2$.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (проект МД-2920.2015.8) и государственного задания № 3.1496.2014/К.

Изучение смеси коэффициентов интенсивности напряжений K_1/K_2 у вершины вертикальной подповерхностной трещины (ВПТ) при контакте качения, имеет важное значение во многих задачах (даже зубы человека выходят из строя через образование конических трещин Герца (КТГ) диаметром менее $0,5$ мм при однократном сжатии твердых орехов).

Поперечные трещины – это трещины на бочке прокатного вала; это поперечные овальные трещины внутри рабочей грани головки рельса; это вскрытие или заваривание трещин, пузырей в заготовках при горячей прокатке, при обкатке роликом, рост трещин при работе подшипников качения (питтинг, спаллинг), процессах износа материалов.

Неудачи теоретических расчетов пока связаны со сложной картиной развития трехмерных трещин контактной усталости. Материал нагружен пульсирующими очень высокими напряжениями вблизи и выше предела текучести, наличие дефектов приводит к зарождению новых трещин, их ветвлению, остановке одних и ускорению роста других (растут менее энергоемкие трещины).

Для моделирования взаимодействия поперечных трещин с контактной нагрузкой от колеса (диаметром 240 мм) использовали методику работ [1, 2], рисунок 1.

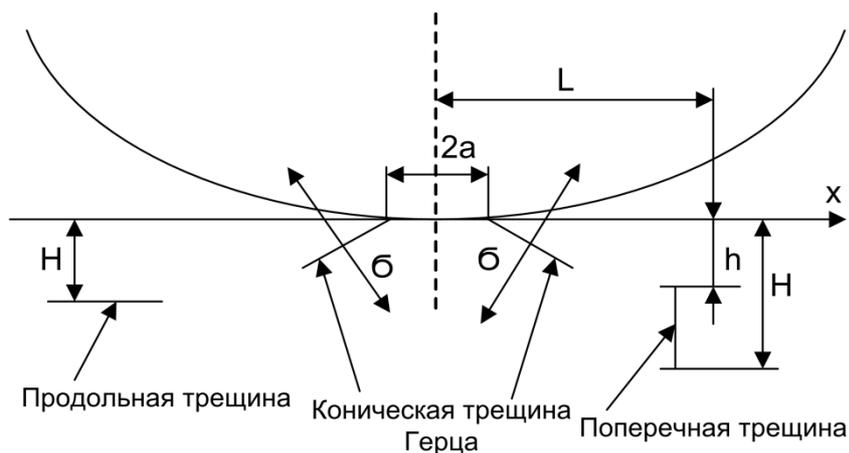


Рисунок 1 – Схема нагружения образца с поперечной трещиной на глубине H . Длина контактной площадки $2a$.

Исследовали поперечные подповерхностные трещины шириной 0,1 мм и длиной 2 мм и поверхностные трещины с наклоном 45° к поверхности катания.

1. Образцы с вертикально-ориентированной трещиной на сплошном основании, рисунок 2, а

У верхней вершины ВПТ (глубина $h = 0,25 \dots 0,5 a$) напряженное состояние ниже среднего, с преобладанием $K_1 > K_2$ на дальности от контактной площадки (КП) до вершины трещины $L=a$, $K_2 = 55 \%$, а при $L=a \dots 0,5a$, $K_2 = 60 \dots 70 \%$. Ближе к КП над вершиной ВПТ получить четкую картину изохроматического узора не удалось, – так выглядит классическая картина K_2 при сжатии – рисунок 2, а – 3.

У нижней вершины ВПТ (глубина $h=a$), рисунок 2 напряжения более высокие (на дальности до вершины $L=a$, $K_2 = 35 \%$ ($N=5$ изохром)). При дальнейшем уменьшении $L = 0,25a \dots 0a$ происходит постепенное снижение K_2 и резкое понижение K_1 , и на расстоянии $L=0,12a$, K_2 по величине даже превосходит K_1 ($N=3$). При дальнейшем уменьшении $L=0,25 \dots 0a$, происходит резкое изменение изохроматического рисунка, рисунок 2а (резкое увеличение K_1 ($N=3$)).

При $L=a$, K_2 до 10 % , при прохождении центра пятна КП за трещину картина повторяется в обратной последовательности. По-видимому, наиболее опасно с точки зрения роста трещины вниз является положение центра пятна КП на расстоянии $L=0,12a$ до $L=a$, т.е. начало накатывания колеса на трещину, при этом $K_2=35\%$.

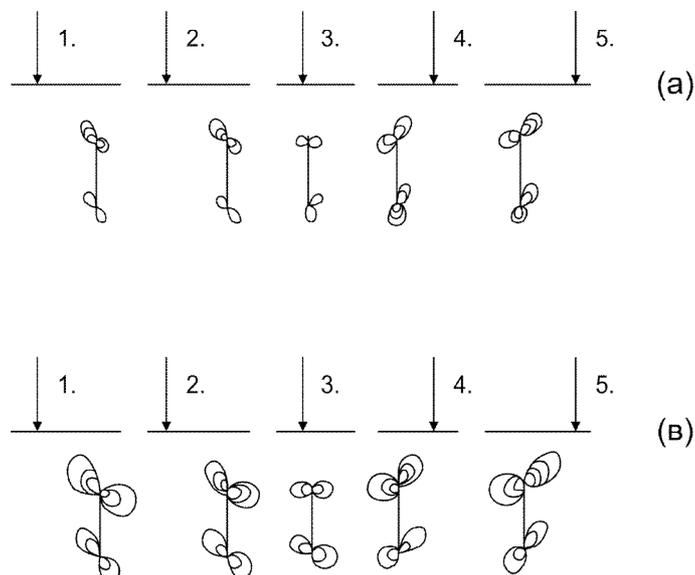


Рисунок 2 – Вид изохром при контакте колесо-пластина с подповерхностной трещиной. Контактная площадка находится на разном расстоянии от вершины трещины а) пластина расположена на сплошном твёрдом основании, в) случай, когда пластина опирается на две опоры, а трещина равноудалена от опор. Добавляются напряжения сжатия от изгиба пластины.

2. Образцы с ВПТ, с расположением трещины между двух опор

В этом случае уровень K_1 и K_2 в 2 раза выше, чем в первом случае, кривые зависимости коэффициентов интенсивности напряжений у вершины трещины от расстояния до контактной площадки более крутые, с резкими подъемами и спадами, однако все изменения подобны. Вероятность роста трещины вверх на глубине $0,25 \dots 0,5a$ больше, чем на глубине $0,1a$, т.е. главные направления роста трещины – вверх, под углом - рисунок 2 (в).

В случае, когда центр КП находится на расстоянии $L=0a$ от вершины трещины $K_2=30\%$. При незначительном изменении положения КП относительно трещины, рисунок 4, а, происходит резкое увеличение K_2 и снижение K_1 на расстоянии $0,8 \dots 0,9a$, $K_1 = K_2$, а затем доля K_2 растёт. На расстоянии $0,5a$ K_2 максимален (K_1 -минимален), число изохром $N=8 \dots 9$, $K_2=90\%$ (чистый срез), рисунок 2, в-2.

При дальнейшем уменьшении расстояния от $L=0,5a$ до $L=0,25a$, напротив, происходит резкое увеличение K_1 и в положении центра пятна контакта колесо-рельс над вершиной трещины K_2 достигает значения $2 \dots 5\%$, при максимальном значении K_1 ($N=4$).

При прохождении пятна контакта за трещину, картина повторяется в обратном порядке. Наиболее вероятным местом для роста трещины является глубина залегания верхней вершины трещины $0,25 \dots 0,5 a$ а при положении центра контакта на расстоянии $0,5a$ относительно трещины, рисунок 2, в. Измерения напряженного состояния в области нижней вершины трещины (глубина $H = 0,75a$, $H = 1,25a$) показали, что глубина $H = a$ наиболее благоприятна для роста трещины вниз. Испытания (глубина $H = a$) показали, что кривые $K_1/K_2 = f(L)$ похожи, но K_1 составляющая превосходит K_2 для случая испытания на двух опорах ($K_1 = 60 \dots 70 \%$, когда $L = a$ $K_1 = 90 \dots 93 \%$ при положении пятна контакта над трещиной).

Наиболее опасным для роста трещины положением можно считать: когда $L = a$, тогда $K_2 = 30 \dots 40 \%$ ($N = 6$) и в положении над трещиной, когда $K_2 = 7 \dots 10 \%$ ($N = 5$). При удалении от трещины картина повторяется.

Для поверхностной трещины с углом наклона к поверхности 45° были получены результаты близкие случаю ВПТ, рисунок 3, т.е. трещина будет расти вниз зигзагом, или почти вертикально.

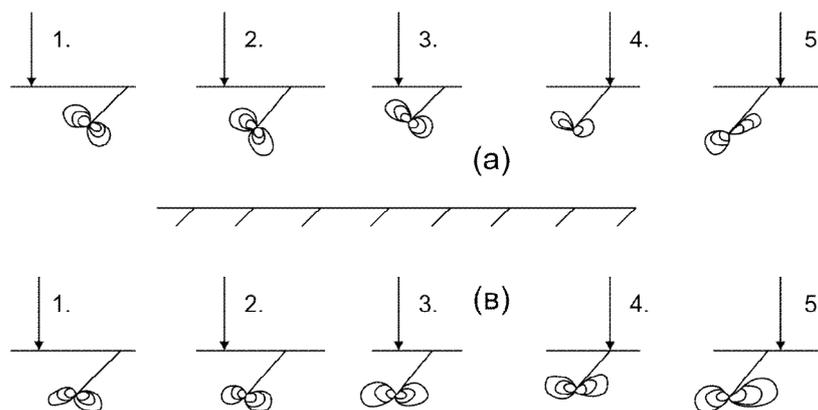


Рисунок 3 – Вид изохром при контакте колесо-пластина с поверхностной трещиной. Контактная площадка находится на разном расстоянии от вершины трещины а) без изгиба пластины, в) случай, когда пластина опирается на две опоры

3. Для создания у вершины трещины сложного напряженного состояния был разработан и создан дисковый образец, рисунок 5

Для фотоупругих исследований напряжений у вершины трещины с разным процентным соотношением K_1/K_2 был изготовлен образец из эпоксидной смолы толщиной 5 мм и диаметром 50 мм с рядом отверстий по внешнему краю образца для крепления в машине для статического растяжения. Полученные картины обсчитывали по специальной методике [1], для нахождения такого процентного соотношения K_1 и K_2 (K_2 до $30 \dots 35 \%$), которое соответствует максимально опасным значениям, определенных ранее для плоского с.

Такое соотношение K_1 и K_2 наблюдается при креплении захватов в отверстиях под углом $20 \dots 30^\circ$ к направлению распространения трещины.

С учетом этого, для исследования трещиностойкости рельсовой стали выбрана следующая схема испытания дисковых образцов:

а) чистый отрыв, $K_1 = 100\%$. Расположение захватов под углом 90° к линии роста УТ.

в) чистый сдвиг, $K_2 = 100\%$. Угол равен нулю. Для рельсовой стали это неудачная схема, т.к. часто происходит ветвление растущей УТ, отклонение от прямолинейности, поэтому далее всегда мы определяли K_2 по испытаниям образца CHISHOLM (образец с двумя надрезами и тремя отверстиями).

с) смешанный вид разрушения, когда $K_2 = 30...35\%$. Расположение линии захватов под 25° к трещине. Этот вариант показал самый быстрый рост УТ в рельсовой стали, чем при K_1 или K_2 .

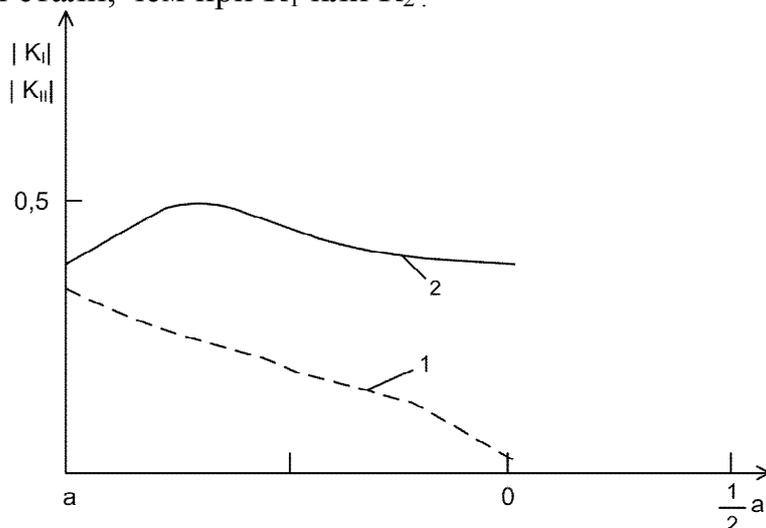


Рисунок 4а – Изменение K_1 и K_2 от расстояния до верхней вершины внутренней трещины. Глубина кончика трещины от поверхности качения $0,5a$.

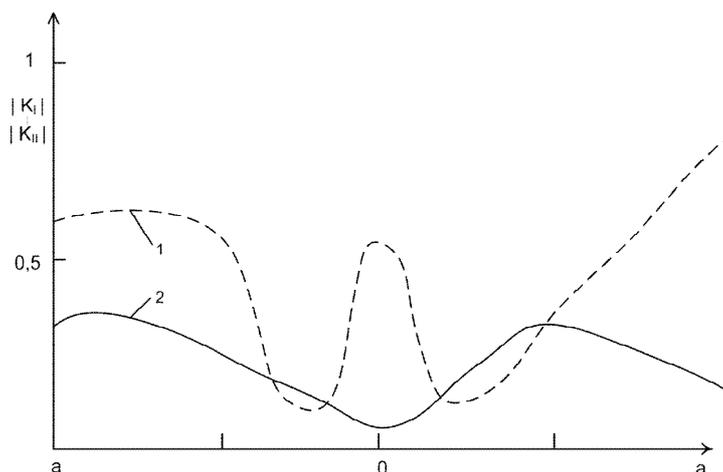


Рисунок 4в – Изменение K_1 и K_2 для нижней вершины внутренней вертикальной трещины. Глубина кончика трещины от поверхности качения $0,5a$.

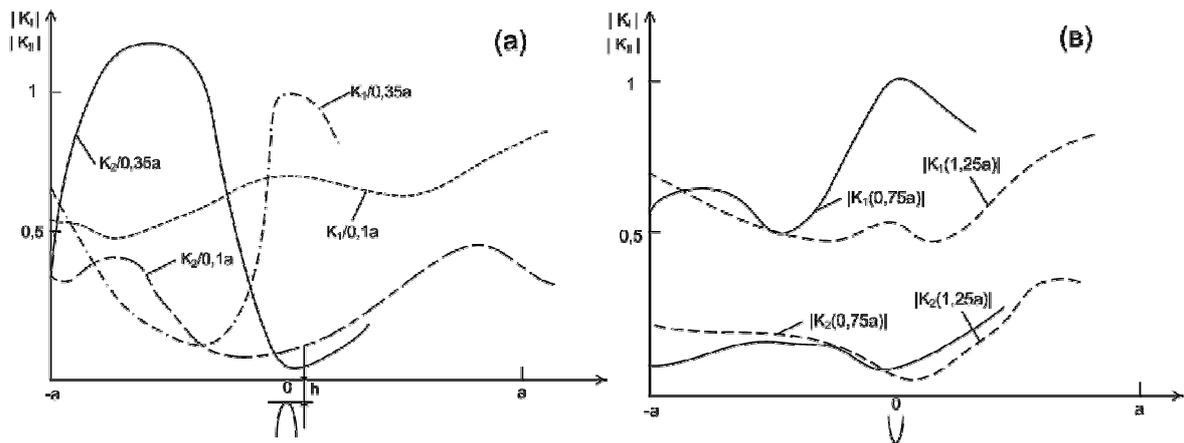


Рисунок 5 – Изменение коэффициентов интенсивности напряжений K_1 (отрыв) и K_2 (сдвиг) у вершин трещин, расположенных на глубине $h=0,35a$, $h=0,1a$, в зависимости от расстояния до контактной площадки, (а) – верхняя вершина трещины, $h=0,35a$, $h=0,1a$; (а) – нижняя вершина трещины, $h=0,75a$, $h=1,25a$

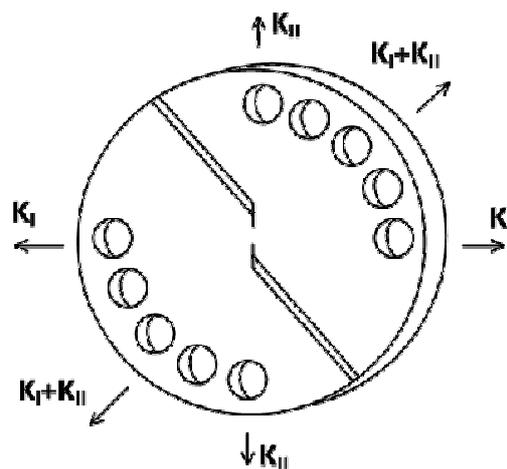


Рисунок 6 – Дисковый образец для создания у вершины трещины сложного напряженного состояния от 100%-го K_1 до 100%-го K_2

Выводы.

Изгиб образца (с вертикальной подповерхностной трещиной), на двух опорах при качении по образцу диска увеличивает значения K_1/K_2 у вершины трещины, которые максимальны не под контактной нагрузкой, а слева или справа от нее, на расстоянии $0,5a \dots 1a$, т.е. начало накатывания колеса на трещину.

На сплошном основании верхняя вершина трещины максимально нагружена на расстоянии от КП $L=0,25a \dots 1a$, а для нижней вершины трещины $0,5a \dots 1a$.

Смесь K_1/K_2 в пропорции 65 %/35 % также выявила понижение усталостной прочности рельсовой стали (ускорение зарождения УТ и ее большая (по сравнению с K_1) скорость роста усталостной трещины, при равных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цвигун В.Н., Корнеев В.А., Кузнецов В.Н. и др. Изучение механизмов развития питтинга, спаллинга и других контактно-усталостных дефектов в рельсах // Машиностроение. – 2014. – № 23. – С. 121-127.
2. Sanford R.J. A General Method For Determining mixed mode stress factors from isochromic fringe patterns // Eng. Fract. Mech. – 1979. – V. 11. – P. 621-633.

УДК 621.01

Цвигун В.Н., Кузнецов В.Н., Коновалов С.В.

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

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПИТТИНГА, СПАЛЛИНГА И ДРУГИХ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ РЕЛЬСОВ. СООБЩЕНИЕ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ (ВЛИЯНИЕ K_1 И K_2 В РАЗЛИЧНЫХ СООТНОШЕНИЯХ)

Изучено влияние смешанного вида нагружения на скорость роста усталостных трещин и вязкость разрушения K_1 и K_2 . В рельсовой стали при смеси $K_1=65\%$ и $K_2=35\%$ экспериментально найдено снижение трещиностойкости по сравнению с разрушением по типу K_1 или K_2 . Показаны перспективные методы термической обработки рельсовой стали для получения высокой вязкости разрушения и низкой скорости роста усталостной трещины.

The influence of the mixed kind of loading to growth rate of fatigue cracks and viscosity of destruction K_1 and K_2 is investigated. In rail steel at a mix $K_1 = 65\%$ and $K_2 = 35\%$ experimentally is found decrease fracture toughness on a comparison with destruction for a type K_1 or K_2 . The perspective methods of thermal processing of rail steel for obtaining high viscosity of destruction and low growth rate of a fatigue crack are shown.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-08-00686а), гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (проект МД-2920.2015.8) и государственного задания № 3.1496.2014/К.

В головке железнодорожного рельса контактно-усталостные дефекты (КУД) образуются и подрастают в условиях сложного напряженного состояния, когда свойства материала отличаются от изучаемых на стандартных образцах (это в первую очередь K_{1c} , K_{2c} , скорость роста усталостной трещины (уравнение Пэриса), предел прочности и т.д. [1, 2].

**Вестник горно-металлургической секции РАЕН.
Отделение металлургии**

Сборник научных трудов

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 22.04.2015 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 10,7 Уч.-изд.л. 11,4 Тираж 300 экз. Заказ № 210

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ