

2015 № 2

ISSN 2313-1020

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕГОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**МАТЕРИАЛЫ ВТОРОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

г. Новосибирск, 25 марта 2015 г.

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

ANNUAL SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL COLLECTED ARTICLES

**Proceedings of the Second International
Scientific and Practical Conference**

Novosibirsk, 25 March 2015

НОВОСИБИРСК

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Зверев Е.А., Чесов Ю.С., Вахрушев Н.В., Трегубчак П.В., Зарубин Б.Ю. Структурные особенности износостойких плазменных покрытий после воздействия токами высокой частоты	347
Видин Д.В., Лашинина С.В. Проблема повышения жаростойкости деталей цепных мельниц	354
Столяров В.В. Влияние комбинированных схем деформации на структуру и механические свойства титановых сплавов	358
Громов В.Е., Алсараева К.В., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В. Фрактография поверхности усталостного разрушения силумина, подвергнутого электронно-пучковой обработке	363
Максимов А.Б., Гуляев М.В. Поверхностное упрочнение сталей для изделий шахтного оборудования	370
Цвигун В.Н., Коновалов С.В., Нефедов В.М., Койнов Р.С. Анализ распространения поперечных подповерхностных трещин в рельсах под воздействием контактной нагрузки	375
Попова А.А., Яковлев В.И., Ситников А.А., Логинова М.В., Собачкин А.В. Зависимость структурно-напряженного состояния композита от времени механоактивации и от состава порошковой смеси «гидроксипатит-никелид титана»	381
Бондарь О.В. Технологические особенности применения инструментальных высокохромистых штамповых сталей холодного деформирования в машиностроении	386
Собачкин А.В., Ситников А.А., Яковлев В.И., Свиридов А.П., Яковлева Н.А. Исследование параметров частиц алюмоматричного композиционного материала при газодетонационном напылении	391
Прудников А.Н., Попова М.В., Прудников В.А. Оценка воздействия термоциклической деформации и последующей термической обработки на электрофизические свойства низкоуглеродистой стали	396
Абабков Н.В., Ерофеев А.Ю. Оценка состояния металла поверхностного слоя реактора синтеза карбамида, подверженного коррозионному износу спектрально-акустическим методом	401
Чесов Ю.С., Зверев Е.А., Плотникова Н.В., Вахрушев Н.В., Ваганов А.С., Бандюров И.В. Структура износостойких плазменных покрытий из никель-керамической смеси	405
Габец Б.А., Каргин В.В., Марков А.М., Габец А.В. Исследование триботехнических свойств специального чугуна ЧМН-35М	410

Materials Science in Machine Building

Zverev E.A., Chesov Yu.S., Vakhrushev N.V., Tregubchak P.V., Zarubin D.Yu. Structural features of wear-resistant plasma coatings after high frequency current action	347
Vidin D.V., Laschinina S.V. The problem of increasing heat-resistance of chain mill parts	354
Stolyarov V.V. Influence of combined deformation techniques on the structure and mechanical properties of titanium-based alloys	358
Gromov V.E., Alsaraeva K.V., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V. Fractography of fatigue failure of the silumin surface subjected to electron-beam processing	363
Maksimov A.B., Gulyaev M.V. Surface hardening of steels for mining equipment components	370
Tsvigun V.N., Konovalov S.V., Nefedov V.N., Koynov R.S. Analysis of transverse subsurface cracks in rails under contact loads	375
Popova A.A., Yakovlev V.I., Sitnikov A.A., Loginova M.V., Sobachkin A.V. Dependence of the composite structural stress state on the time of mechanical activation and on the composition of the hydroxyapatite - titanium nikilid powder mixture	381
Bondar O.V. Technological features of high-chrome die steel application in machine building	386
Sobachkin A. V., Sitnikov A. A., Yakovlev V. I., Sviridov A. P., Yakovleva N. A. Investigation of parameters of aluminum matrix composite material particles during detonation-gas spraying	391
Prudnikov A.N., Popova M.V., Prudnikov V.A. Impact assessment thermocyclic deformation and subsequent heat treatment on the electrical properties of lowcarbon steel	396
Ababkov N.V., Erofeev A.U. The assessment of the metal surface layer state of the urea synthesis reactor exposed to corrosion wear by the spectral-acoustic method	401
Chesov Yu.S., Zverev E.A., Plotnikova N.V., Vakhrushev N.V., Vaganov A.S., Bandyurov I.V. The structure of wear-resistant plasma coatings based on the nickel-ceramic mixture	405
Gabets D. A., Kargin V. V., Markov A. M., Gabets A.V. Investigation of the ChMN-35M cast-iron tribological properties	410

УДК 621.01

**АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН
В РЕЛЬСАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОНТАКТНОЙ НАГРУЗКИ***

В.Н. ЦВИГУН, канд. техн. наук, инженер
С.В. КОНОВАЛОВ, доктор техн. наук, доцент
В.М. НЕФЕДОВ, ст. преподаватель
Р.С. КОЙНОВ, инженер
(СибГИУ, г. Новокузнецк)

Коновалов С.В. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru

Выполнен анализ распространения поперечных подповерхностных трещин в материале на примере рельсов при действии контактной нагрузки. Показано наиболее вероятное направление роста поперечных подповерхностных трещин: мелкие трещины на глубине, равной (0,25 – 0,50) полудлины контактной площадки будут расти вверх, но мелкие трещины на глубине 0,1 полудлины контактной площадки имеют уровень напряжений меньший, чем трещины на глубине верхней вершины, равной (0,25 – 0,50) полудлины контактной площадки. Глубокие трещины (при глубине верхней вершины трещины равной полудлине контактной площадки и более) будут расти в трех зонах под контактной площадкой, т.е. нижняя вершина внутренней поперечной трещины растет вниз (при отношении коэффициентов интенсивности напряжений при отрыве и сдвиге K_1/K_2 , равном 65 %/35 %); такое сочетание K_1/K_2 вызывает более быстрый рост усталостной трещины, чем при $K_1=100$ % или $K_2=100$ %.

Ключевые слова: усталость, трещина, рельс, контактная нагрузка, деформация.

Введение

Известно, что от взаимодействия контактной пары «колесо – рельс» зависит функционирование железнодорожных составов [1-4]. Поэтому изучение отношения коэффициентов интенсивности напряжений при отрыве и сдвиге (K_1/K_2) у вершины вертикальной подповерхностной трещины при контакте качения имеет важное значение во многих задачах. Сложная картина роста контактных трещин затрудняет решение проблем питтинга и спаллинга для прокатных валков, рельсов, колес, подшипников качения, шестерен, упрочнения ударами шаров после лазерного нагрева, после обкатки роликами и др. ситуаций. К сожалению, проблемы, возникающие при теоретических расчетах, связаны со сложной картиной развития трехмерных трещин контактной усталости. Это связано с тем, что 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).

Связи с этим настоящая работа посвящена оценке коэффициентов интенсивности напряжений при отрыве и сдвиге K_1 и K_2 у вершин трещин при контакте качения и поиску опасных зон с высокими напряжениями, а также анализу направлений распространения трещины в головке рельса.

* 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.

Методика исследований

Для моделирования взаимодействия поперечных трещин с контактной нагрузкой от колеса (диаметром 240 мм) использовали методику работы [2], схема которой приведена на рис. 1. Примем длину контактной площадки за $2a$, глубину верхней и нижней вершины трещины обозначим как h и H . Исследование проводили с поперечными подповерхностными трещинами шириной 0,1 мм и длиной 2 мм и поверхностными трещинами с наклоном 45° к поверхности катания.

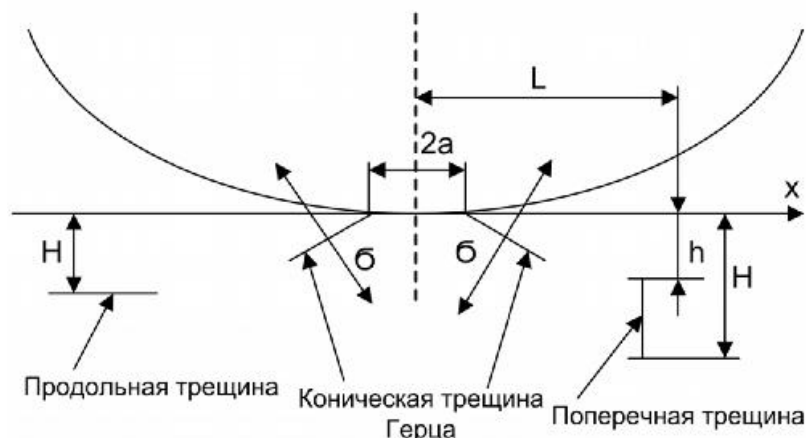


Рис. 1. Схема нагружения образца с поперечной трещиной на глубине H .

Исследование [3] проводили на эпоксидных пластинах размером $180 \times 15 \times 1,2$ мм, в которых создавали поперечные трещины (от отверстия диаметром 0,1 мм с помощью алмазной пасты на молибденовой проволоке длиной 200 мм и диаметром 0,1 мм создавали трещину длиной 2 мм, с радиусом 0,05 мм). На КСП-7 (координатно-сигхронном поляриметре) перемещали образец, по которому перекатывалось колесо диаметром 240 мм, $2a = 8$ мм (свободное качение).

Обработка результатов проводилась по методике, приведенной в [5].

Результаты и обсуждение

Анализ результатов, полученных на образцах с вертикально ориентированной трещиной на сплошном основании

На рис. 2 приведены изохромы, возникающие при контакте «колесо – пластина с подповерхностной трещиной». У верхней вершины внутренней поперечной трещины (ВПТ) (ее глубина h составляет от $0,25a$ до $0,5a$) 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.

У нижней вершины ВПТ (глубина $h=a$) 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 $L=0,25a - 0a$, происходит резкое изменение изохроматического рисунка (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 $K_2 = 35\%$.

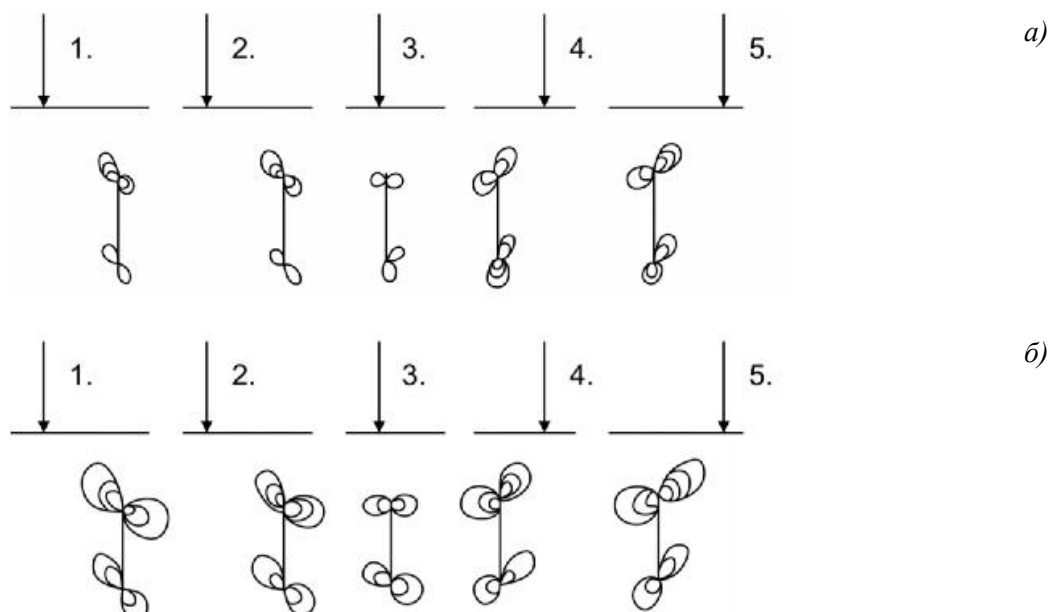


Рис. 2. Схематическое изображение изохром при контакте колесо-пластина с подповерхностной трещиной. Контактная площадка находится на разном расстоянии от вершины трещины: а) пластина расположена на сплошном твёрдом основании, б) случай, когда пластина опирается на две опоры, а трещина равноудалена от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

При перекачивании колеса над вершиной трещины (рис. 2) на 180 градусов поворачиваются площадки главных напряжений, а изменение количества изохром (максимальное их количество) указывает на направление по биссектрисе между изохромами у вершины трещины. При этом будет хаотическое распространение трещины, зигзагообразность роста. При циклическом сжатии и при качении будут отличия. В нашем случае, являющимся статическим: трещина будет увеличиваться вверх слева и справа от центра КП (около 0,8а), а по центру КП – нет (наоборот, $K_2=100\%$). В условиях сжатия, а вершина трещины расширяется, ультразвуковые волны на настоящих рельсах четко указывают на закругление верхней вершины трещины дефекта № 21 под пуансоном – колесом. Вниз трещина будет открываться и расти в 3^х зонах: слева и справа от центра КП (0,7 – 0,8)а и по центру КП (но при качении – под углом 20° к вертикали).

Анализ результатов, полученных на образцах с внутренней поперечной трещиной

В этом случае исследования образцов с внутренней поперечной трещиной 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 0,25а...0,5а больше, чем на глубине 0,1а, т.е. главные направления роста трещины – вверх, под углом (рис. 3).

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

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

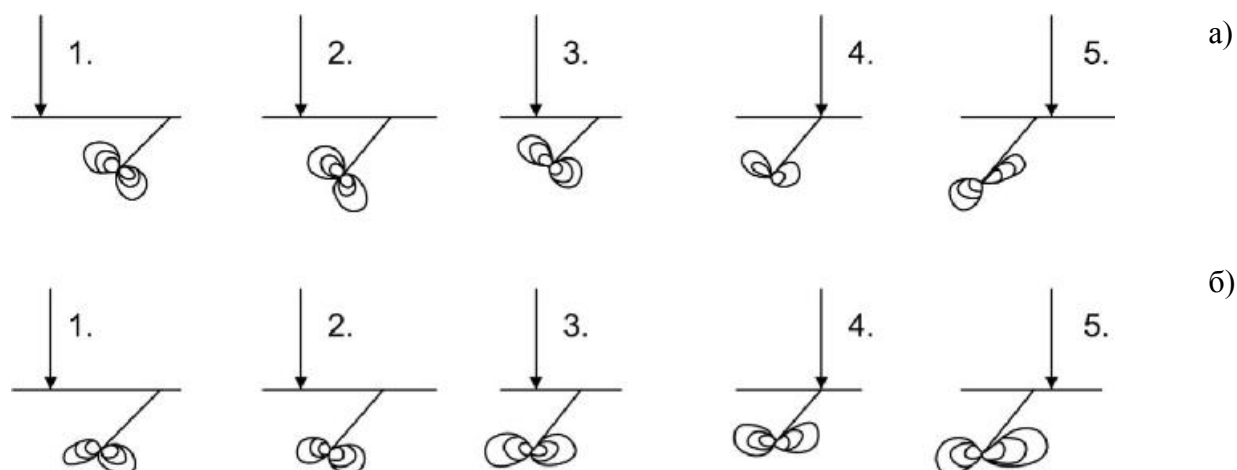


Рис. 3. Вид изохром при контакте колесо-пластина с поверхностной трещиной. Контактная площадка находится на разном расстоянии от вершины трещины: а) без изгиба пластины, б) случай, когда пластина опирается на две опоры.

При прохождении пятна контакта за трещину, картина повторяется в обратном порядке. Наиболее вероятным местом для роста трещины является глубина залегания верхней вершины трещины $0,25a \dots 0,5a$ при положении центра контакта на расстоянии $0,5a$ относительно трещины. 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) (рис. 4).

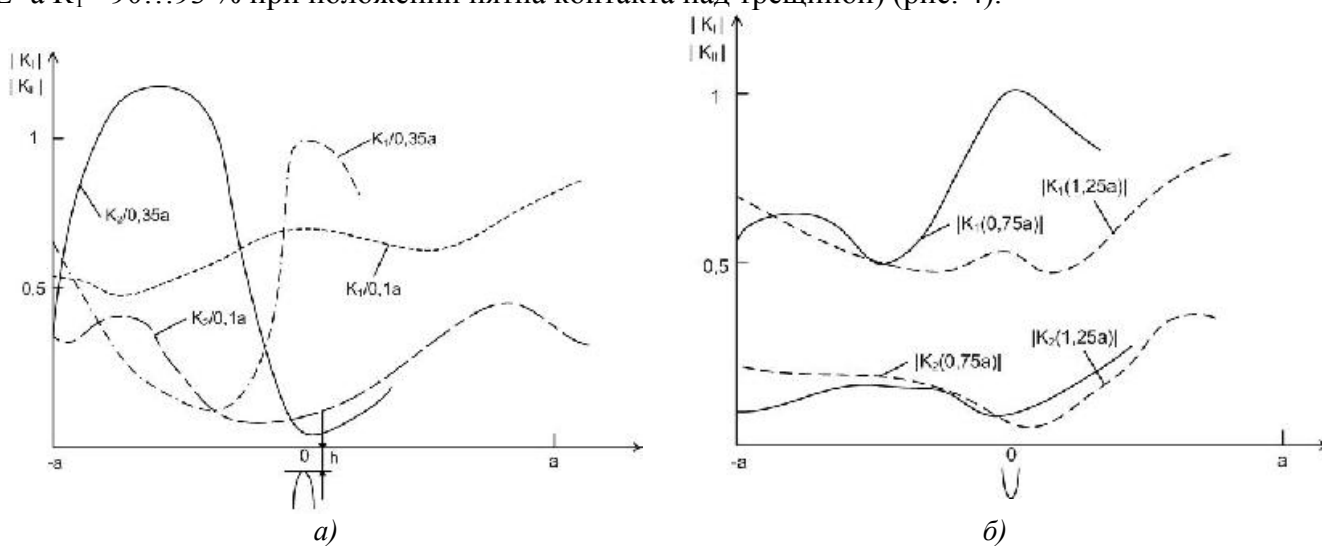


Рис. 4. Изменение коэффициентов интенсивности напряжений K_1 (отрыв) и K_2 (сдвиг) у вершин трещин, расположенных на глубине $h=0,35a$, $h=0,1a$, в зависимости от расстояния до контактной площадки: (а) – верхняя вершина трещины, $h=0,35a$, $h=0,1a$; (а) – нижняя вершина трещины, $h=0,75a$, $h=1,25a$

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. В соответствии с рис. 4, K_1 на глубине $0,1a$ меньше, чем на глубине $0,35a$.

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

Для создания у вершины трещины сложного напряженного состояния был разработан и создан дисковый образец, приведенный на рис. 5.

Для исследований фотоупругих 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 анализировали для нахождения такого процентного соотношения K_1 и K_2 (K_2 до 30...35 %), которое соответствует максимально опасным значениям. Такое соотношение K_1 и K_2 наблюдается при креплении захватов в отверстиях под углом 20...30° к направлению распространения трещины.

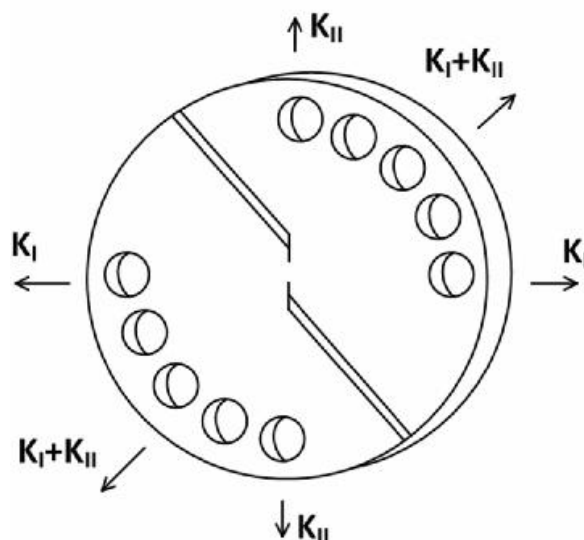


Рис. 5. Дисковый образец для создания у вершины трещины сложного напряженного состояния от 100%-го K_1 до 100%-го K_2

Таким образом, 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.
- б) 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 типа CHISHOLM.
- в) 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 .

Установлено, что при нагрузке на образец 6,3 кН (K_1) скорость усталостной трещины была равной $0,42 \times 10^{-5}$ мм/цикл, при нагрузке на образец 8,5 кН (K_2) скорость усталостной трещины была равной $0,12 \times 10^{-5}$ мм/цикл, а при смешанном характере нагружения (K_1/K_2) – 5,5 кН и $1,7 \times 10^{-5}$ мм/цикл, соответственно.

Выводы

Показано, что 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 0,5а...1а, т.е. начало накатывания колеса на трещину.

Установлено, что на сплошном основании верхняя вершина трещины максимально нагружена на расстоянии от КП $L = 0,25а...1а$, а для нижней вершины трещины – 0,5а...1а.

Соотношение K_1/K_2 в пропорции 65 %/35 % также выявило 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. Борц А.И., Шур Е.А., Рейхарт В.А. К вопросу о качестве и условиях испытаний рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2012. № 1. С. 14-19.
2. Харрис У. Дж., Захаров С. М., Ландгрэн Дж. и др. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса: Пер. с англ. – М.: Интекст, 2002. – 408 с.
3. Джонсон К.Л. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
4. 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.
5. Sanford R.J. A General Method For Determining mixed mode stress factors from isoxromic fringe patterns // Eng. Fract. Mech. 1979. V. 11. P. 621-633.

ANALYSIS OF TRANSVERSE SUBSURFACE CRACKS IN RAILS UNDER CONTACT LOADS

Tsvigun V. N., Ph.D. (Engineering), Engineer

Konovalov S.V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru

Nefedov V. N., Senior Lecturer

Koynov R. S., Engineer, e-mail: koynov_rs@mail.ru

Siberian State Industrial University, 42 Kirov Street, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

The analysis of the transverse subsurface crack propagation in the material on the example of rails under the contact load action is made. It is shown that small cracks at a depth of 0.25 - 0.50 of the contact area half-length will grow up, but small cracks at a depth of 0.1 of the contact area half-length have a stress level less than cracks at a depth of the upper crack tip of 0.25 - 0.50. Deep cracks (at a depth of the upper crack tip equal to the contact area half-length and more) will grow in three directions under the contact area, i.e. the lower tip of the inner transverse crack grows downwards, with the K_1 / K_2 stress intensity factor ratio in separation and shear being equal to 65% / 35%. This ratio of K_1 / K_2 causes a faster fatigue crack growth than with $K_1 = 100\%$ or $K_2=100\%$.

Keywords

fatigue, crack, rail, contact load, deformation