

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

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

Отделение металлургии

*Сборник научных трудов*

*Издается с 1994 г. ежегодно*

Выпуск 39

Москва  
Новокузнецк  
2017

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. 39 / 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, 2017 – 244 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. 99, табл. 46, библиогр. назв. 224.

*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; 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., 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., 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., АО «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, 2017

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

- 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
- Кулаков С.М. д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
- Лавров В.В. д-р техн. наук, проф., УрФУ, г. Екатеринбург
- Немчинова Н.В. д-р техн. наук, проф., НИ ИрГТУ, г. Иркутск
- 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., АО «ВНИИЖТ», г. Москва

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ .....   | 7  |
| МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....   | 8  |
| <i>К.С. Ёлкин, Д.К. Ёлкин, А.И. Карлина</i>   |    |
| Теоретические основы и практика восстановительной плавки кремния .....  | 9  |
| <i>В.А. Крюковский, Г.А. Сиразутдинов, М.Я. Минцис, П.В. Поляков</i>  |    |
| Анализ отечественного опыта развития технологии и совершенствования<br>оборудования в электролитическом производстве алюминия.....  | 15 |
| <i>О.Б. Рахманов, А.В. Аксенов, Н.В. Немчинова, М.М. Солихов,<br/>Е.А. Черношвец</i>  |    |
| Флотация золотосодержащей руды месторождения «Иккижелон»<br>(Республика Таджикистан) .....  | 23 |
| <i>В.М. Павловец, Р.О. Ракуц</i>  |    |
| Анализ способов аэродинамического воздействия на комкующиеся<br>материалы .....   | 29 |
| <i>В.М. Павловец, М.К. Шабалина</i>   |    |
| Активация процесса окомкования железорудных материалов механическими<br>устройствами .....  | 37 |
| <i>В.О. Синельников, Д. Калши, М. Шуцки</i>   |    |
| Математическое моделирование процесса разбрызгивания шлака на<br>футеровку кислородного конвертера .....  | 44 |
| <i>В.Б. Деев, Е.С. Прусов, Э.Х. Ри, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько,<br/>К.В. Пономарева</i>  |    |
| Жидкотекучесть модифицированного заэвтектического силумина,<br>содержащего железо.....  | 50 |
| <i>В.Б. Деев, Э.Х. Ри, Е.С. Прусов, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева,<br/>А.И. Куценко</i>   |    |
| Влияние различных тепловых и электромагнитных воздействий на процесс<br>кристаллизации металлических расплавов .....  | 54 |
| <i>Г.Г. Крушенко, В.П. Назаров, О.А. Платонов, С.Н. Решетникова</i>   |    |
| Повышение качества литых деталей двигателя летательного аппарата .....  | 59 |
| <i>С.К. Аринова, А.З. Исагулов, Св.С. Квон, В.Ю. Куликов, Е.П. Щербакова,<br/>А.М. Достоева</i>   |    |
| Исследование структуры отливок из жаропрочных сплавов, полученных<br>способом ЛГМ.....  | 65 |
| <i>А.А. Уманский, М.В. Филиппова, М.В. Темлянцев, А.В. Головатенко,<br/>А.С. Симачев</i>  |    |
| Разработка теоретических основ повышения энергоэффективности процессов<br>пластической деформации сложнолегированных сталей специального<br>назначения при их обработке давлением ..... | 73 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>М.А. Полякова, А.Е. Гулин</i>  |     |
| Повышение механических свойств среднеуглеродистой проволоки при альтернативном волочении .....  | 83  |
| <i>Н.В. Щукина, Н.А. Черемискина, Н.Б. Лошкарев, В.В. Лавров</i>  |     |
| Улучшение теплотехнических показателей работы кольцевой печи ОАО «ЧТПЗ» .....   | 90  |
| <i>В.Г. Григорьев, С.В. Тепикин, А.А. Кузаков, А.П. Пьянкин, Е.В. Тимкина, А.А. Пинаев</i>  |     |
| Автоматическая подача сырья в производстве алюминия .....   | 97  |
| <i>С.М. Кулаков, А.И. Мусатова, В.Н. Кадыков</i>  |     |
| Графическое моделирование функционирования производственных систем в металлургии .....  | 105 |
| <b>ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b> .....  | 114 |
| <i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Г.Н. Черновский</i>  |     |
| Использование кремнеземсодержащей пыли электроплавки металлургического кремния и высококремнистых ферросплавов в производстве карбида кремния ..... | 115 |
| <i>Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, С.Г. Галевский</i>   |     |
| Плазмосинтез карбида циркония: научные и технологические основы и особенности наносостояния .....   | 136 |
| <i>В.И. Чушенков, Ю.Л. Крутский, Т.С. Квашина</i>   |     |
| Получение карбидов ванадия и хрома для легирования твердого сплава WC-CO .....  | 154 |
| <b>ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ</b> .....   | 162 |
| <i>А.М. Dostayeva, D.U. Smagulov, N.V. Nemchinova</i>   |     |
| Phase transformations in alloys of the Al-Zr-Fe-Si system .....   | 163 |
| <i>Е.С. Прусов, В.Б. Деев, Е.М. Рахуба</i>  |     |
| Влияние температурно-временной обработки расплава на структуру и свойства эвтектических композитов системы Al-Si-Mg .....                           | 170 |
| <i>Е.Н. Сафонов</i>   |     |
| Формирование и характеристики зоны упрочнения при плазменной закалке заэвтектоидных сталей .....  | 175 |
| <i>В.Н. Цвигун, Е.А. Шур, Р.С. Койнов</i>   |     |
| Подповерхностные усталостные трещины («крылья бабочки») при контакте качения .....  | 183 |
| <b>ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ</b> ..  | 191 |
| <i>С.Г. Коротков, Я.Е. Сазонова</i>   |     |
| Оценка мероприятий по защите атмосферного воздуха в теплоэнергетике   | 192 |

|  |            |
|--|------------|
| <i>В.Г. Григорьев, С.В. Тепикин, А.Д. Шемет, Д.В. Высотский, А.А. Кузаков, А.Ю. Тенигин</i>  |            |
| Газоочистная установка ОК Русал: новые технологические и конструкторские решения.....  | 197        |
| <i>Т.В. Свиридова, О.Б. Боброва, О.Ю. Ильина</i>   |            |
| Ресурсосберегающая технология переработки шлака сталеплавильного производства.....   | 206        |
| <i>Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, М.Н. Рыбина</i>  |            |
| Оценка технологической целесообразности использования пылевых отходов производства обожженных анодов в электротермии металлургического кремния ..... | 211        |
| <i>Е.М. Булыжёв, В.Н. Кокорин, П.В. Еменев, В.Ф. Григорьев</i>   |            |
| Утилизация нефтесодержащей окалины прокатных производств .....   | 218        |
| <i>Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, В.В. Сомов, А.Э. Бараускас, А.А. Яковлева</i>  |            |
| Выщелачивание фтора из отработанной катодной футеровки алюминиевых электролизеров .....  | 222        |
| <i>А.К. Соловьев, М.П. Польшинцев</i>  |            |
| Реконструкция системы аспирации ленточного конвейера подачи твердого топлива.....  | 230        |
| <i>А.И. Полтояйнен, А.Ю. Шупик</i>   |            |
| Применение кремнеземистой пыли в стройиндустрии .....  | 237        |
| <b>К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ.....</b>   | <b>242</b> |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балановский А.Е. Основные вопросы теории плазменного поверхностного упрочнения металлов (Обзор, часть первая) // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 12. – С 18 – 30.
2. Дьяченко С.С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах. М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
3. Christian J.W. The theory of transformations in metals and alloys. Oxford: Pergamon Press, 2002. – 617 p.
4. D.V. Shtansky, K. Naka, Y. Onomori. Perlit to austenite transformation in an Fe – 2,6 Cr – 1 C alloy // Acta mater. – 1999. – Vol. 47. № 9. – P. 2619 – 2632.

УДК 621.01

В.Н. Цвигун<sup>1</sup>, Е.А. Шур<sup>1</sup>, Р.С. Койнов<sup>2</sup>

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

АО «ВНИИЖТ», г. Москва

### ПОДПОВЕРХНОСТНЫЕ УСТАЛОСТНЫЕ ТРЕЩИНЫ («КРЫЛЬЯ БАБОЧКИ») ПРИ КОНТАКТЕ КАЧЕНИЯ

Статья посвящена исследованию контактно-усталостных дефектов типа «крылья бабочки». Проанализированы причины, особенности и условия образования дефектов.

The article is devoted to the study of contact fatigue defects such as "butterfly wings". The causes, peculiarities and conditions of defects formation are analyzed.

Обозначения:

КУД – контактно-усталостные дефекты;

УТ – усталостная трещина;

КП – контактная площадка.

Контактно-усталостные дефекты (КУД), образующиеся при контакте качения в рельсах, подшипниках приводов ветроэлектростанций, авиатурбин и других высоконагруженных механических систем часто имеют вид, обозначенный в литературе как «крылья бабочки» [1-10]. Эти КУД образуются на глубине  $0,1-0,5(a)$ , где  $(a)$  – радиус контактной площадки (КП), прямо под треком качения роликов, шаров или колес. Стартуют подповерхностные усталостные трещины (УТ) от дефектов микроструктуры: неметаллических вклю-

чений (чаще всего от сложных оксидов), скоплений грубых карбидов или пор. Здесь, на этой глубине, в районе включения, действует трехмерное сжатие, но возле включения могут действовать местные напряжения растяжения. Эти подповерхностные усталостные трещины (УТ) имеют характерный вид (рисунок 1): нижние и верхние крылья имеют разные углы наклона к поверхности катания (каждое из крыльев трещин направленно растет по своей линии (вверх или вниз), проведенной от края включения к области максимальных давлений на КП ролика или шара при качении, т.е. УТ растет вдоль линии максимального сжатия при качении и при определенном положении ролика относительно дефекта (смотрите рисунок 1). Это фаза максимальных касательных напряжений при качении ролика (или шара) над этим включением или другим дефектом.

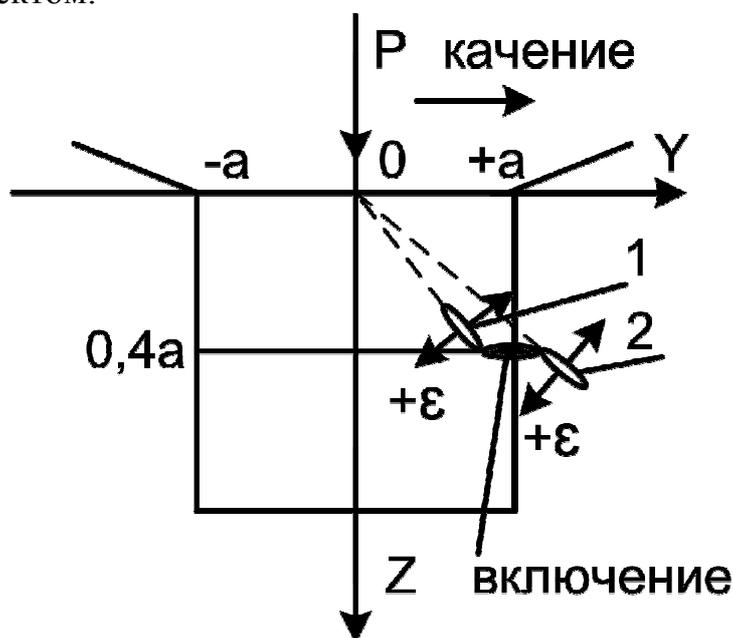


Рисунок 1 – Схема роста «крыльев бабочки» (1) и (2) от неметаллического включения под действием деформации удлинения (+e), под углом к поверхности катания.

Наличие продольных деформаций растяжения в условиях трехстороннего сжатия часто бывает достаточно для роста УТ. Слева и справа от центра КП при качении шара происходит непрерывное вращение на 180 градусов площадок главных напряжений (рисунок 2). Имеется угол, при котором эти напряжения экстремальны, что и определяет ориентацию «крыльев бабочки». Обычно трещина быстрее растет вперед, в направлении качения, но в условиях трехмерного сжатия возможны исключения, т.е. рост и остановки одних и появление новых УТ.

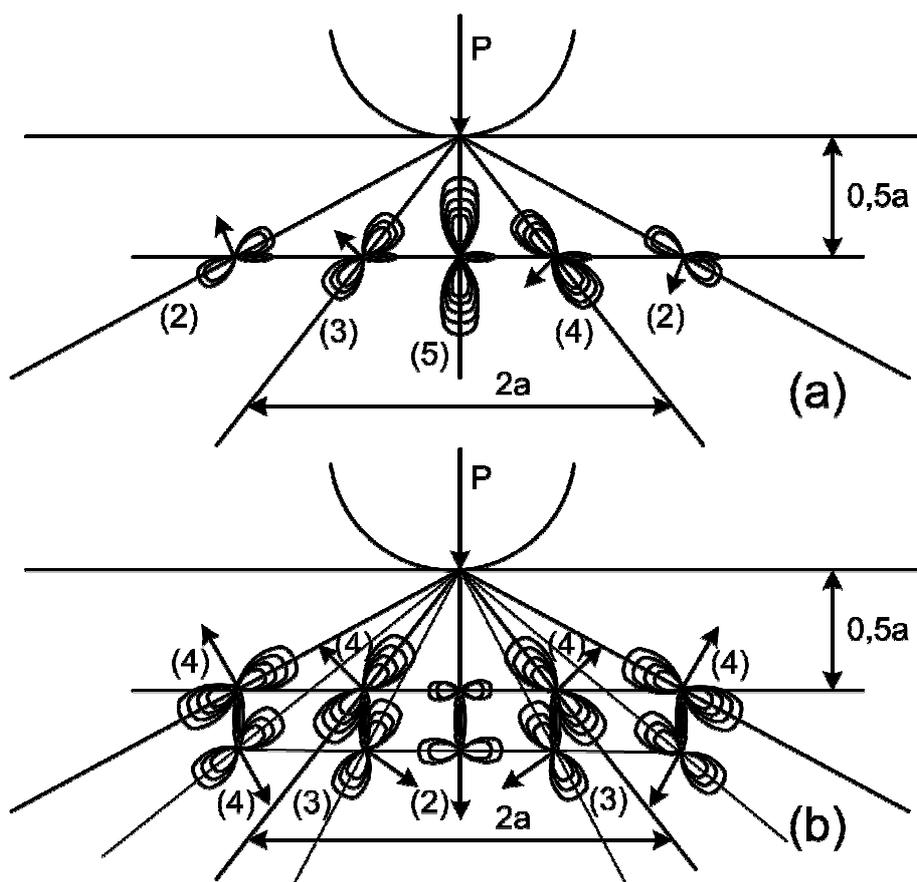


Рисунок 2 – Схематическое изображение изохром у вершин УТ при разном расстоянии до индентора (вертикальное индентирование). Продольные трещины (а) и поперечные трещины (б). Стрелка возле изохром указывает наиболее вероятное направление роста трещины нормального отрыва, а цифра в скобках – количество изохром (уровень напряжений).

Расчеты МКЭ напряженного состояния зоны контакта с шаром показывают наличие подповерхностных зон деформаций удлинения, которые обеспечивают рост сдвиговых УТ в зоне неравномерного трехмерного сжатия.

Наши экспериментальные результаты, фотоупругое моделирование взаимодействия искусственно созданных УТ с контактной нагрузкой при качении, определение при этом доли продольного сдвига и отрыва на разном расстоянии от КП, позволили определить ориентацию подрастания УТ [1-3].

При нормальном вдавливании шара диаметром 8 мм в полиэтиленовую пластину (пластина толщиной 1 мм зафиксирована между двумя прозрачными накладками толщиной 8 мм из полиметакрилата) хорошо выявляются самые первые 3-4 линии сдвига на глубине менее  $0,7a$  ( $a$  – радиус КП) (рисунок 3 элемент 5). Далее начинается удлинение этих коротких первых пластических сдвигов вверх и вниз (это правая система сдвигов). Затем добавится, с ростом усилия вдавливания, левая такая же система линий скольжения (сдвигов) и сформируется в итоге классическая картина упруго-пластических сдвигов (рисунок 4 а). В соответствии с теорией пластичности [11], под КП (рисунок 3), при вдавливании шара в полуплоскость имеются следующие зоны: 1 – зона затрудненной деформации; 2 – область пластической деформации, при

которой происходит сжатие по высоте ( $z$ ) и растяжение по осям ( $x$ ) и ( $y$ ) в продольном и поперечном направлениях на глубине  $0,5-1,0$  ( $a$ ); 3, 4 – области упругой деформации сжатия в продольном направлении и утолщения по высоте, 5 – образование первых линий скольжения (и впоследствии сдвиговых трещин), от которых стартуют линии сдвигов вверх и вниз, а на их пересечениях получаются ступенчатые трещины и прямоугольные поры-дефекты Цвигуна (рис. 4 б).

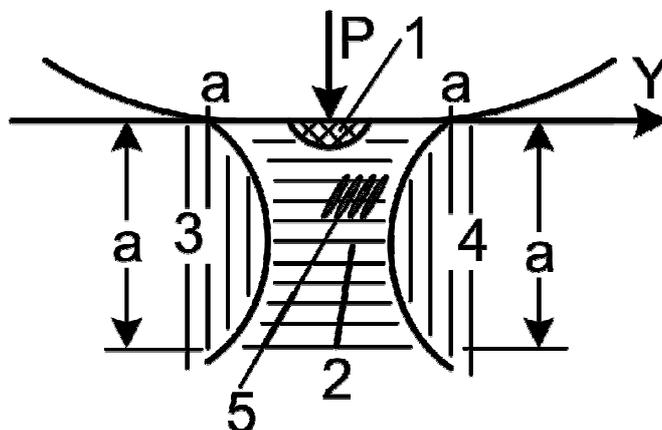


Рисунок 3 – Упруго-пластическая деформация при вдавливании шара. 1 – область затрудненной деформации. 2 – область пластической деформации. 3,4 – область упругой деформации. 5 – первые линии сдвигов

При вдавливании шара под КП радиусом ( $a$ ) формируется на глубине ( $h$ ) перекресток деформаций. Измеряя экспериментально эти два параметра, можно определить по их соотношению как велика склонность данной системы нагружения к упруго-пластическому расслоению материала, в виде трещин, которое начинается при отношении  $h/a \leq 0,2$  [12]. При очень тяжелых условиях циклического нагружения при качении роликов в подшипниках качения ветрогенераторов мощностью 2 МВт это отношение равно  $0,7-0,8$ . Это приводит к появлению вблизи КП типовых КУД, которые растут вдоль и под углом к поверхности качения. При очень больших значениях числа циклов нагружения, достигающей сотен миллионов, в качестве фокусов трещин начинают работать все более мелкие концентраторы напряжений.

Качение шарика подшипника сопровождается возникновением в кольце напряжений в виде картины изохром (рисунок 5 изображение 2). В этом случае УТ, которая зародилась вблизи поверхности катания, будет расти как указано пунктирной линией – в глубину, с наклоном в сторону качения. При нормальном вдавливании (рисунок 3 изображение 1) максимальное давление в центре КП и вертикально вниз от поверхности, но при качении площадка прилипания находится в передней части КП, а при торможении – позади середины отпечатка. Наклон линии максимального давления вызывает наклон площадок главных напряжений под поверхность качения и наклон изохром (рисунок 5 изображения 2, 3). В любой точке линии изохромы одно главное напряжение направлено вдоль изохромы, а другое поперек.

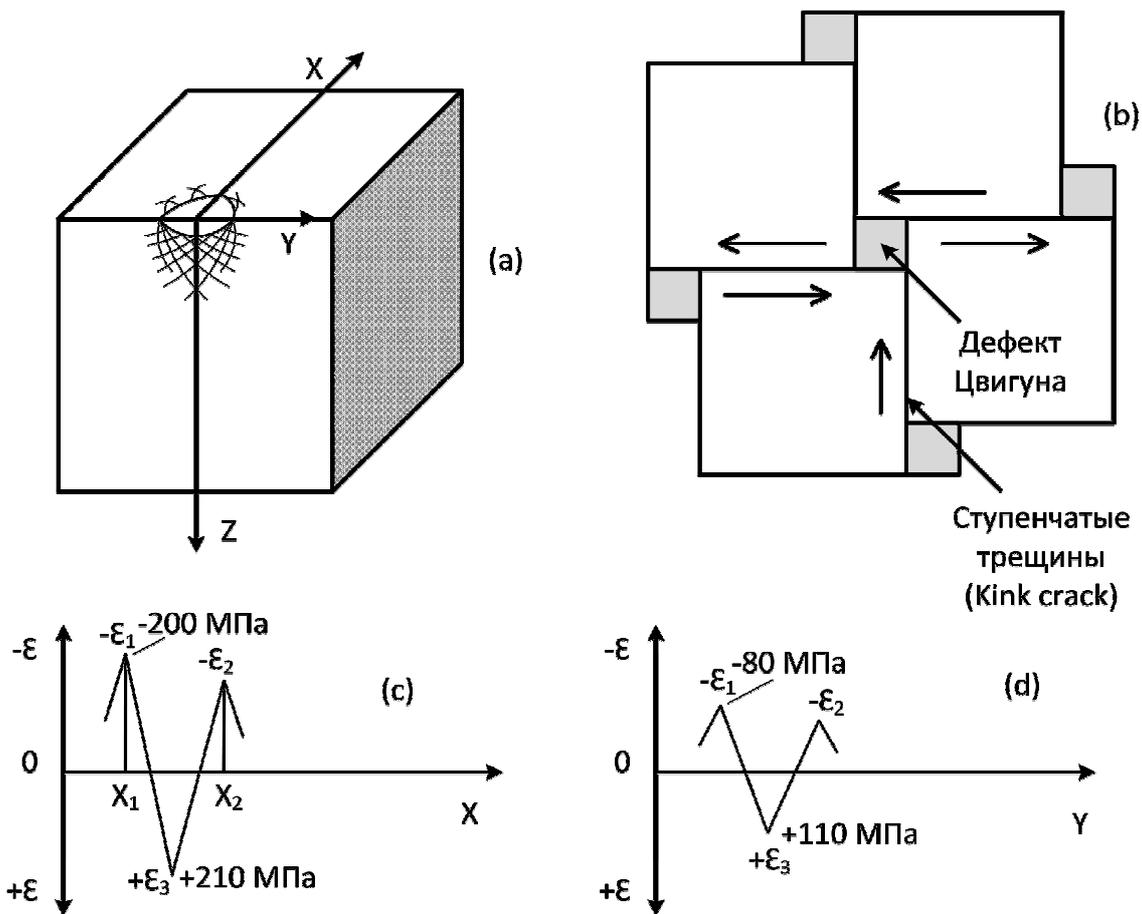


Рисунок 4 – Подповерхностные деформации при вдавливании шара в полуплоскость (а); образование ортогональных пор на пересечении плоскостей сдвига (b); продольные (c) и поперечные (d) подповерхностные деформации при контакте качения вдоль оси X.

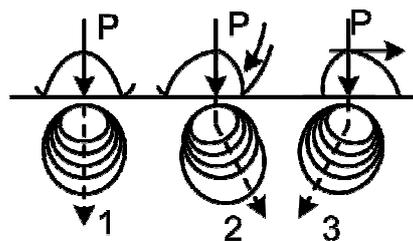


Рисунок 5 – Схематическое изображение изохром под поверхностью нагруженного шара. УТ будут расти в направлении пунктирных линий. 1 – нормальное вдавливание, без качения; 2 – качение шара вправо; 3 –скольжение шара вправо при ториожении.

Разрушения в контакте при сжатии имеют много малоизученных особенностей (рисунок 4 а). Например - если угол между пересекающимися линиями сдвигов меньше 90 градусов, то здесь действуют растягивающие напряжения, а больше 90, то сжимающие. Криволинейные логарифмические полосы сдвига на пересечениях образуют полости (рисунок 4 b), размеры которых увеличиваются по мере увеличения усилия сжатия, без проявления заметного реверса при разгрузке. Этими порами-дефектами Цвигуна можно

объяснить снижение плотности и прочности материала при сжатии, зарождение трещин при расклинивании плоскостей сдвига при развороте криволинейных прямоугольных блоков. Материал исходный превращается, после таких сдвигов, в подобие гранитной брусчатки, такой конгломерат на сжатие плохо, но работает, а на растяжение – не работает. По этим порам, трещинам кислород и водород могут проникать к вершинам капиллярных трещин, процессы коррозии, окисления, охрупчивания активизируются.

Продольные и поперечные УТ при контакте качения [1-3] подрастают в тот момент, когда КП находится рядом с вершиной УТ, и напряжения от контактной нагрузки могут суммироваться с остаточными или изгибными напряжениями. Это влияние [1,2] хорошо заметно, когда одна и та же пластина из эпоксидной смолы с продольной и поперечной подповерхностной УТ установлена на сплошной опоре и при качении по ней диска в верхнем слое пластины не возникают напряжения сжатия от изгиба и когда она установлена на две опоры и в ней возникает продольное сжатие в районе КП. Это продольное сжатие примерно на 20 % снижает уровень рабочих напряжений у вершины продольной УТ, и, наоборот – у поперечной УТ эти напряжения суммируются. По нашим опытам, контактную прочность нескольких слоев тонких пластин можно повысить так, что вообще не появится ни одной трещины, если между слоями будет смазка. В этих же условиях нагружения без смазки трещины образуются.

Поскольку включения имеют строчечную форму, вытянутую вдоль прокатки, то можно, рассматривать несколько мелких, рядом расположенных включений, как одну короткую горизонтальную подповерхностную трещину. Применим результаты (рисунки 2 а, б). Для этого длину трещины уменьшим многократно, от четырех изохром останется две, которые направлены на центр КП (рисунок 1).

Когда рост УТ начинается на гладкой поверхности стального образца, трещина сначала растет под углом 45 градусов (причина в том, что прочность стали на срез составляет всего 58 % от прочности на растяжение), из точки зарождения по направлению действия максимальных касательных напряжений, а не растягивающих напряжений, поскольку сталь в отсутствии достаточно длинного концентратора напряжений сначала начинает деформирование сдвигом и разрушается от сдвиговых трещин. Этот процесс альтернативного разрушения у вершины УТ происходит при каждом импульсе циклического нагружения и при развитии фокуса зарождения УТ. Остается много тупиковых, более не растущих УТ, где прочность материала оказалась на несколько процентов выше, чем на растущей магистральной трещине. УТ могут расти своими многими вершинами, но с разными скоростями, что хорошо измеряется расстояниями между усталостными бороздками. По мере удлинения сдвиговой УТ она меняет механизм и растет перпендикулярно растягивающим напряжениям или деформациям, т.к. заработал концентратор напряжений и достигнуты напряжения нормального отрыва.

На рисунке 1 от включения УТ может расти вдоль поверхности качения, и получится горизонтальная продольная УТ. При росте трещины (как показано на рисунке 2 а) под воздействием 90 %  $K_1$  и 10 %  $K_2$  имеет максимум изохром – 5. Она будет расти передней и задней вершинами в направлении медианы между этими двумя изохромами. В случае короткой УТ или при ее зарождении будет работать другая схема усталостного разрушения, когда УТ растет по обоим усам пластических деформаций - в нашем случае это две изохромы вверх и вниз. В этом случае для хрупкого материала, когда микродеформаций сдвигом почти нет или они ограничены, идет коалесценция пунктирных трещин на пути роста основной УТ. Вначале происходит ветвление УТ, а потом остановка и закрытие второстепенных УТ. Для зарождения УТ требуются большие напряжения, чем для ее роста. Поэтому поворот такой розетки изохром на 180 градусов за один проход ролика над включением, означает, что будет испытана прочность материала во всех направлениях и начнется растрескивание в сторону сочетания экстремальных напряжений и нижнего уровня прочности. Прямо под роликом на треке катания есть слой раскатанных, расплюснутых, похожих как кирпичную кладку зерен, которые за счет обкатывания, удлиняют поверхностный слой и формируют остаточные напряжения сжатия около 150 МПа. В результате этих явлений появляется возможность роста длинных подповерхностных УТ, которые пересекают наклонные УТ от питтинга и происходит отделение длинных фрагментов. Наклепанные слои и остаточные напряжения в этих верхних слоях оказывает на подповерхностные трещины сдерживающее влияние в направлении их роста к поверхности. Однако КУД, которые образовались вблизи поверхности, беспрепятственно растут из верхнего слоя КП в более нижние. Когда появляется острая УТ, ранее существующее напряженное состояние сильно меняется.

В заключение отметим, что микросдвиги происходят с высокой частотой, что в сочетании со значительными перемещениями стенок трещин приводит к нагреву, а в результате теплоотвода возникают аустенито-мартенситные пленки как на поверхностях трения, так и на поверхности трещин.

Суммируя, дефекты типа «крылья бабочки» типичны при контактном нагружении многих материалов (керамики, камней, высокопрочных сталей и т.д.), в которых пластическая деформация у вершины трещины незначительна, затруднены сдвиги у вершины УТ и идет коалесценция параллельных квазихрупких трещин. Сами дефекты типа «крылья бабочки» - это трехмерная комбинация двух типов трещин – сдвиговых и трещин отрыва. При этом имеется и опасная из-за низкой вязкости разрушения и быстрого роста УТ комбинация 65 %  $K_1$  и 35 %  $K_2$  [3]. При качении шара по желобу шарикоподшипника вокруг включения, расположенного на глубине, происходит на 180 градусов поворот линии, по которой действует максимальное усилие сжатия и при определенном наклоне этой линии подрастает дефект типа «крыльев бабочки».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изучение механизмов развития питтинга, спаллинга и других контактно-усталостных дефектов в рельсах / В. Н. Цвигун [и др.] // *Машиностроение*. – 2014. – № 23. – С. 121–127.
2. Изучение механизмов питтинга, спаллинга и других контактно-усталостных дефектов рельсов. Сообщение 2. О направлении роста поперечных подповерхностных трещин под воздействием контактной нагрузки / В. Н. Цвигун, В.Н. Кузнецов, В.М. Нефедов, Р.С. Койнов, С.В. Коновалов // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов*. – Москва ; Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2015. – Вып. 34. – С. 147–153.
3. Изучение механизмов питтинга, спаллинга и других контактно-усталостных дефектов рельсов. Сообщение 3. Исследование трещиностойкости рельсовой стали в условиях сложного напряженного состояния (влияние K1 и K2 в различных соотношениях) / В.Н. Цвигун, В.Н. Кузнецов, С.В. Коновалов // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов*. – Москва ; Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2015. – Вып. 34. – С. 153–158.
4. Gegner, J. Tribological Aspect of Rolling Bearing Failures [Electronic resource] / J. Gegner. – URL: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/21928.pdf>.
5. Mobasher S. all-Effect of non-metallic inclusions on butterfly wing initiations, crack formation and spall geometry in bearing steels // *International Journal of FATIGUE*. – 2015. – V.80, 11. – pp. 203-215.
6. Evans M., Wang T., Jones H., Wood R. *Tribology International*. – 2013. – v.65. – pp. 146-160.
7. Evans M. White structure flaking in wind turbine // *Materials Science and Technology*. – 2012. – v.28. – pp. 3-22.
8. Grabulov A., Zandbergen H. TEM and Beam investigations of subsurface cracks and WEA formed in a deep groove ball bearing caused by rolling contact fatigue (RCF) // *Material Science & Technology*. – 2008. – pp. 682-695.
9. Gegner J., Nierlich W. The bearing axial cracks root cause hypothesys of frictional Surface crack initiation // *SKF report*. – URL: [www.nrel.gov/wind/pdfs](http://www.nrel.gov/wind/pdfs). – 2011. – p. 110.
10. Alfredsson B. A Study on Contact Fatigue Mechanisms. Doctoral Thesis. –2000. – p.33. Stockholm.
11. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ляшков В.Б. Деформация металла при прокатке. – Свердловск: *Металлургиздат*, 1956. – 288 с.
12. Челышев Н.А. Распространение пластических деформаций в цилиндрических телах при осадке // *Известия Вузов. Черная металлургия*. – 1958. – № 2. – с. 122-132.

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

*Сборник научных трудов*

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 25.12.2017 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 13,2 Уч.-изд.л. 14,1 Тираж 300 экз. Заказ № 753

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