

УДК 629.012.3

**С. И. Губенко**

Национальная Академия металлургии Украины

**И. А. Иванов, А. А. Соболев**

Петербургский государственный университет путей сообщения

**ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ КОЛЕС**

Описаны механизмы и закономерности процесса изнашивания цельнокатанных колес. Рассмотрено влияние неметаллических включений и формирования «белого слоя» на специфику изнашивания колес.

износ, цельнокатанное колесо, неметаллические включения.

**Введение**

На практике встречается более 60 видов дефектов колесных пар (КП), которые возникают под влиянием различных факторов, и от них прямо или косвенно зависит безопасность движения. Поэтому колесные пары, у которых дефекты превышают установленные нормы, подвергаются ремонту или исключаются из инвентаря [1], [2].

Под дефектом понимается какое-либо нарушение исправного состояния колесной пары в результате износа, повреждения, поломки. Обнаруживаемые при эксплуатации и ремонте дефекты по характеру и величине условно могут быть разделены на допустимые и недопустимые. К допустимым относятся дефекты, при которых разрешается эксплуатация колесных пар, к недопустимым – дефекты, которые приводят к отказу. При наступлении отказа колесную пару либо восстанавливают при ремонте, либо исключают из инвентаря.

Краткий перечень дефектов поверхности катания колес, связанных с износом, приведен ниже.

Износ – это разрушение микрообъемов поверхностного слоя, которое при трении приводит к изменению размеров, формы и состояния поверхности. Износ зависит от условий трения, свойств материала и конструктивных особенностей трущихся пар.

Различается круговой и локальный износ. Круговой износ образуется на трущейся поверхности вращения по круговому периметру и может быть равномерным или неравномерным. Равномерный износ протекает равномерно, неравномерный – с различной интенсивностью по профилю или по круговому периметру. В результате кругового равномерного износа образуется прокат, в результате неравномерного износа по круговому периметру – неравномерный прокат. Неравномерный круговой износ по профилю приводит к образованию ступенчатого проката, вертикального подреза гребня колеса, седлообразного проката, кольцевых выработок на поверхности катания колеса. Локальный (местный) износ характеризуется образованием плоского места (площадки) на поверхности катания колеса и называется ползуном.

Изменение состояния поверхности катания, вызванное деформацией, изменением структуры металла под влиянием силовых и тепловых воздействий, называют повреждением. Повреждения могут быть термомеханическими и механическими.

Термомеханические повреждения возникают при одновременном действии тепловых и силовых нагрузок на колесную пару. К термомеханическим повреждениям относятся «белый слой» на поверхности катания обода колеса и др.

Многообразие условий работы пар трения колесо–рельс позволяет утверждать, что общим подходом может быть представление об усталостной природе разрушения поверхностных слоев [3]– [5].

Усталостные процессы связаны с возникновением вблизи поверхности катания зоны пластической деформации и участков «белого слоя», который отличается хрупкостью, а также с наличием вблизи поверхности катания частиц неметаллических включений и образовавшихся в процессе эксплуатации участков коррозионного повреждения стали [3], [4].

Происходящие структурные изменения вызывают появление дефектов усталостного происхождения (трещин, частиц износа), которые приводят к разрушению обода, а также к изменению профиля колеса в результате смещения слоев металла вдоль поверхности катания. Таким образом, механизм износа поверхности катания представляет совокупность механических, теплофизических и химических явлений и связан с образованием частиц износа и микротрещин в местах интенсивной пластической деформации, в участках «белого слоя» и вблизи частиц неметаллических включений и продуктов коррозии стали.

## 1 Материалы и методики исследований

Исследован механизм износа нескольких колес с плоскоконическим диском, химический состав которых приведен в таблице 1. Колеса 1 и 2 проработали около пяти лет под пассажирским составом и были сняты с эксплуатации по предельному износу ободьев.

Для исследований влияния срока службы на структурные и фазовые изменения, происходящие в процессе эксплуатации, были выбраны четыре колеса одной партии, проработавшие разный срок под пассажирским составом: 3–1,5 года, 4–2,5 года, 5–4 года, 6–5,5 года.

Идентификацию неметаллических включений и продуктов коррозии проводили несколькими методами: металлографическим («Neophot-21») – светлое и темное поле, поляризованный свет; петрографическим [6]; микрорентгеноспектральным (MS-46 «Самеса», «Nanolab-7»); рентгеноструктурным (ДРОН-2,0). Исследование частиц износа на поверхности катания рассматриваемых колес проводили металлографическим методом с помощью оптического микроскопа «Неофот-21» и растрового электронного микроскопа РЭМ-200.

## 2 Результаты исследований и их обсуждение

Вдоль всей поверхности катания встречаются микротрещины и расслоения, приводящие к формированию и отслоению частиц износа, а также к хрупкому разрушению в зоне выкружки, что на практике вызывает массовые подрезы гребней колес. Образование частиц износа имеет разные причины, а конечная видимая форма частиц износа зависит от условий их образования.

Одной из главных причин формирования частиц износа является протекание пластических сдвигов с довольно большой степенью деформации, которая имеет неоднородный характер [3], [4]. Именно на границах зон

ТАБЛИЦА 1. Химический состав исследованных колес и колесной стали

Номер колеса	Содержание элементов, %							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
1	0,59	0,72	0,34	0,025	0,012	0,14	0,15	0,20
2	0,65	0,79	0,36	0,027	0,010	0,13	0,18	0,18
3–6	0,58	0,74	0,34	0,025	0,011	0,14	0,17	0,21

с разной степенью деформации, а также на участках интенсивной и турбулентной деформации возникают микротрещины (рис. 1, *а*), отслоения, частицы износа (рис. 1, *б*). В зоне выкружки возникает группа частиц износа, что свидетельствует о значительной локализации деформации в этой области и приводит в конечном счете к подрезу гребня.

Частицы износа, возникшие вследствие развития интенсивной пластической деформации вблизи поверхности катания, представляют собой чешуйки или пластины разной толщины. Они характерны для нормальных условий износа [5], и их появление связано с пластической деформацией, протекающей вблизи поверхности катания колеса.

Согласно теории износа «отслаиванием» [7], при трении максимальная плотность дислокаций возникает непосредственно не на поверхности, а на некоторой глубине, где и появляются протяженные микротрещины (рис. 1, *в*), растущие до критического размера в результате пластического течения стали (рис. 1, *г*). При этом в зоне между трещинами и поверхностью катания локализуется пластическое течение стали и образуются частицы в виде чешуек, которые отслаиваются. Главная роль в этом процессе принадлежит

пластическим актам, приводящим к накоплению дислокаций и появлению микротрещин, параллельных поверхности катания колеса. Такие микротрещины определенное время не вызывают образования частиц износа, они могут расти и в это время образуются новые микротрещины. Образование чешуек износа происходит путем вязкого отслоения металла при слиянии этих микротрещин и сопровождается пластическим течением стали вблизи поверхности катания колеса.

Данные по определению плотности дислокаций на поверхности катания, приведенные в работах [3], [4], свидетельствуют о развитии интенсивной деформации в процессе эксплуатации колес. Для сравнения после шлифовки поверхностного слоя в среднем на 100–200 мкм определяли плотность дислокаций в колесах 1, 2, 3 и 5. Следует отметить, что порядок этого параметра оставался примерно на том же уровне (это  $10^{10}$ – $10^{11}$  см<sup>-2</sup>). Однако на глубине 100–200 мкм от поверхности катания величина плотности дислокаций во всех случаях была примерно в 2–3 раза выше, чем непосредственно на поверхности катания. Такое различие в плотности дислокаций связано с выходом движущихся дислокаций на свободную поверхность при пла-

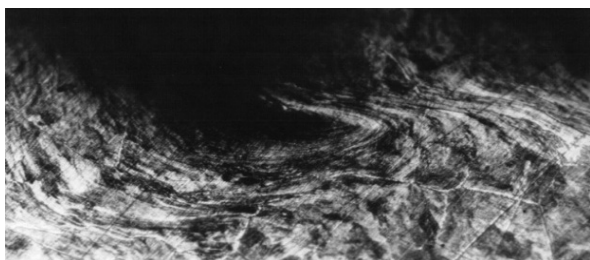
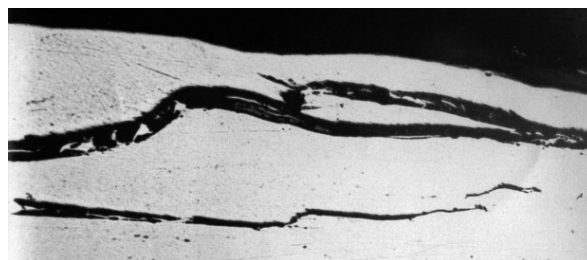
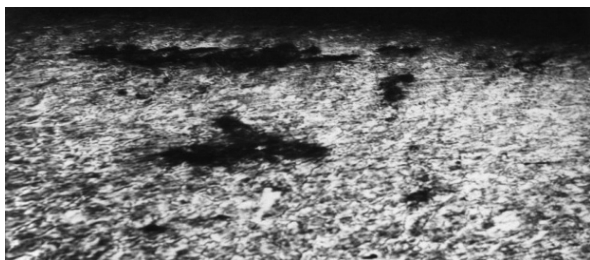
*а)**б)**в)**г)*

Рис. 1. Частицы износа вблизи поверхности катания в зоне интенсивной пластической деформации: *а* –  $\times 100$ , *б–г* –  $\times 200$

стической деформации. Кроме того, известен факт «экранирующего» влияния внешней поверхности (в нашем случае – поверхности катания колеса) на движущиеся дислокации [7]. При пластической деформации вблизи поверхности катания на движущиеся дислокации действует так называемое поляризационное напряжение

$$\sigma_i = \frac{Gb}{4\pi(1-\mu)}, \quad (1)$$

где  $G$  – модуль сдвига колесной стали;  $b$  – вектор Бюргерса дислокаций;  $\mu$  – коэффициент Пуассона колесной стали.

Этой силе противостоят напряжение трения  $\sigma_{тр}$  и изменение поверхностной энергии, когда дислокации перемещаются от поверхности [7]. Приравняв уравнение (1) к силам трения, получаем решение уравнения для толщины частицы износа:

$$a_{ч} = \frac{G \cdot b}{4\pi(1-\mu)\sigma_{тр}}. \quad (2)$$

Напряжение трения вблизи поверхности катания можно приблизительно выразить следующим образом:

$$\sigma_{тр} \approx G\varepsilon^2 c, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – степень деформации стали;  $c$  – концентрация примесных атомов;  $G$  – модуль сдвига колесной стали.

Очевидно, что рассматривая особенности развития пластической деформации колесной стали вблизи поверхности катания колеса, следует учитывать взаимодействие этой поверхности с окружающей атмосферой, приводящей, как было показано выше, к образованию коррозионных повреждений. Известно, что начальный этап коррозии включает адсорбцию атомов элементов из окружающей влажной среды, что может вызывать эффект адсорбционного облегчения пластической деформации вблизи поверхности катания колеса (эффект П. А. Ребиндера) [8].

Явление пластифицирования поверхностных слоев объясняют влиянием изменения

поверхностной энергии на поведение деформируемого твердого тела (снижением поверхностного потенциального барьера, оказывающего влияние на поведение дислокаций в приповерхностном слое деформируемого металла), а также уменьшением сил трения и предела текучести стали [8]. По-видимому, пластифицирование поверхности катания способствует на начальных этапах эксплуатации железнодорожного колеса сглаживанию шероховатостей на поверхностях катания колеса и рельса, допустимому изменению профиля поверхности катания колеса, что ускоряет так называемый полезный износ, необходимый для ускорения процесса прирабатываемости в системе колесо–рельс.

Для образования поверхностных дефектов (частиц износа) в условиях переменного действия напряжения необходимо достижение предельного состояния деформационного упрочнения стали, и этот этап деформации ускоряется под действием поверхностно-активной среды [8]. При образовании и отслоении частиц износа, когда идет усталостное разрушение поверхности катания колеса и появляются новые «свежие» поверхности развивающихся трещин, на них происходит адсорбция активных элементов окружающей влажной среды. Такое адсорбционное проникновение поверхностно-активных компонентов внутрь трещин происходит с достаточно высокими скоростями [8], что приводит к снижению поверхностной энергии трещин (а значит и работы их образования) и облегчает тем самым дальнейшее их развитие в процессе пластической деформации стали. Кроме того, в результате адсорбционных процессов на поверхности частиц износа развивается коррозия стали, поэтому на них нередко видны продукты окисления.

Известно, что влажная среда проникает внутрь образовавшихся трещин под влиянием капиллярного давления с достаточно высокой скоростью [9]. Термодинамическая неизбежность процесса проникания поверхностно-активных веществ в трещины объясняется понижением поверхностной энергии внутри трещины под влиянием адсорбции [9]. Таким образом, влажная окружающая среда,

содержащая к тому же различные смазки, загрязнения и т. д., оказывает отрицательное влияние на усталостную прочность поверхности катания колеса из-за адсорбционного и коррозионного эффектов.

Согласно данным работы [7], частицы износа, представляющие собой чешуйки или пластины разной толщины, образуются при равномерном распределении дислокаций по толщине этих частиц-чешуек.

После образования этих чешуеобразных частиц некоторые из них попадают между двумя скользящими поверхностями колеса и рельса, в результате они могут быть обкатаны с изменением формы или разрушены либо остаться прежнего размера и «плоской» формы.

Износ поверхности катания колеса, сопровождающийся развитием интенсивной пластической деформации, происходит послойно, и каждый слой состоит из большого числа чешуек – частиц износа. Их количество  $N$  в каждом слое пропорционально числу микротрещин, образовавшихся при пластической деформации. Скорость слияния микротрещин и критическая степень деформации, необходимые для образования свободных частиц износа, зависят от глубины зоны пластической деформации с максимальной плотностью дислокаций  $h_{кр}^k$ . То есть  $h_{кр}^k$  необходима для снятия полного слоя, содержащего  $N$  частиц износа. Аналогично расчетам, проведенным в работах [2], [7], [10], [11], общий износ поверхности катания при развитии интенсивной пластической деформации можно выразить следующим образом:

$$W = K \cdot L \cdot h_{п.д}^k, \quad (4)$$

где  $K$  – фактор износа поверхности катания колеса при пластической деформации в условиях трения в системе колесо–рельс;  $L$  – приложенная нагрузка;  $h_{п.д}^k$  – глубина зоны пластической деформации.

$$K = \frac{b}{4\pi} \left( \frac{k_k \cdot G_k}{\sigma_{тр} \cdot h_{кр}^k \cdot (1 - \mu_k)} + \frac{k_p \cdot G_p}{\sigma_{тр} \cdot h_{кр}^p \cdot (1 - \mu_p)} \right),$$

где  $b$  – вектор Бюргерса;  $k_k, k_p$  – константы, зависящие от шероховатости поверхности

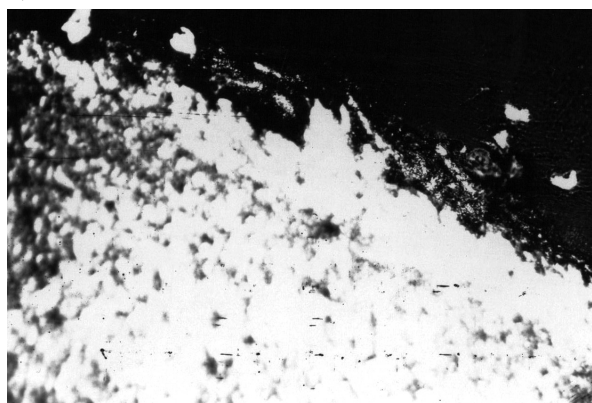
колеса и рельса;  $G_k, G_p$  – модуль сдвига колесной и рельсовой стали;  $\sigma_{тр}$  – напряжение трения;  $h_{кр}^k, h_{кр}^p$  – глубина зоны пластической деформации с максимальной плотностью дислокаций колеса и рельса;  $\mu_k, \mu_p$  – коэффициент Пуассона колесной и рельсовой стали.

Скорость износа уменьшается, когда снижается интенсивность пластической деформации в поверхностном слое обода колеса.

Вторым источником образования частиц износа на поверхности катания колеса является так называемый «белый слой», который обладает повышенной хрупкостью [3], [4]. На границе его раздела с основной структурой колесной стали возникают значительные напряжения, обусловленные различными физическими и механическими свойствами зон с различной структурой. Кроме того, вблизи участков «белого слоя» обнаруживается локализация деформации поверхностного слоя обода колеса, что также способствует концентрации напряжений на границе «белый слой» – основная структура колесной стали. Это способствует выкрашиванию «белого слоя», поэтому практически всегда он не является сплошным. Такие частицы износа имеют вид осколков с острыми краями неправильной формы (рис. 2, а). Они обычно возникают при очень высоких давлениях, и их появление можно связать с образованием в поверхностных слоях ободьев мелких усталостных трещин, выход которых на поверхность является началом образования частиц износа [5].

Следует отметить, что под хрупким «белым слоем» сталь пластически деформируется и на границе этих структурных составляющих возникают силы отталкивания, действующие на движущиеся дислокации [7], что приводит к формированию вблизи границы раздела этих структурных зон области с повышенной плотностью дислокаций, обеспечивающей деформационный наклеп. Это может в свою очередь привести к появлению микротрещин как вдоль границы «белый слой» – деформированная структура стали, так и на некотором расстоянии от нее, аналогичных приведенным на рис. 1, в и параллельных поверхности катания

а)



б)

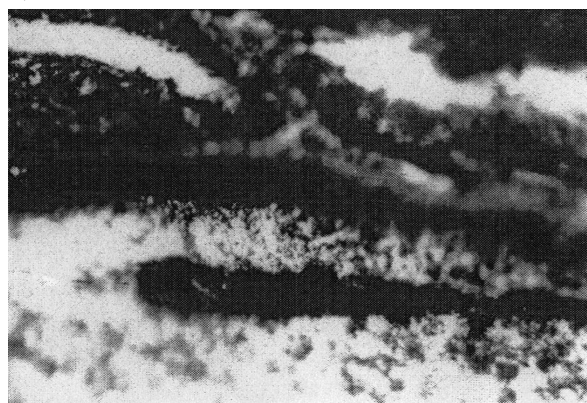


Рис. 2. Частицы износа (а) и выкрашивание «белого слоя» (б);  $\times 1000$

колеса (рис. 2, б). Трансформация таких микротрещин в частицы износа происходит аналогично описанному выше процессу.

Третьей причиной образования частиц износа являются неметаллические включения, которые имеют металлургическое происхождение и являются концентраторами напряжений и деформаций в колесной стали [12]–[14]. Образованию трещин и частиц износа способствуют также окисление и коррозионное разрушение поверхности катания, причем эти процессы приводят к формированию непосредственно на поверхности катания грубых включений сложных оксидов. Далее продукты коррозии для удобства также будем называть неметаллическими включениями, поскольку их состав и структура близки к некоторым оксидным неметаллическим включениям в колесной стали.

Проведенными ранее исследованиями установлено: наличие частиц второй фазы существенно повышает скорость образования микротрещин и их объединения, что увеличивает интенсивность износа (усталостного и при трении) [7]. Авторы связывают это с тормозящим влиянием частиц на движущиеся дислокации и полагают, что влияние включений на формирование частиц износа является одним из наиболее важных механизмов формирования дефектов при износе. Глубина формирования дефектов при этом определяется глубиной нахождения частиц неметаллических включений от внешней поверхности.

В работах [12]–[14] установлено, что неметаллические включения различных типов вызывают неоднородное развитие пластической деформации при различных температурах, скоростях и способах деформации. Анализ микроструктуры колесной стали вблизи поверхности катания колес показал, что неметаллические включения и продукты коррозии колесной стали способствуют неоднородному развитию деформации, появлению зон турбулентного течения (рис. 3, а) и способствуют образованию зон с повышенной степенью деформации относительно среднего ее значения в разных участках по ширине обода. Поведение неметаллических включений, находящихся вблизи поверхности катания под влиянием действующих напряжений, зависит от их типа. Они пластичны (сульфиды) либо не подвержены пластическому формоизменению (оксиды, силикаты, карбонитриды титана). Закономерности развития процессов пластической деформации во включениях те же, что и в металлах или металлических сплавах при учете гомологических температур.

Неметаллическое включение, находящееся вблизи поверхности катания колеса, находится в сложном напряженном состоянии, определяемом системой контактных, динамических и циклических напряжений. На него действуют нормальные сжимающие напряжения от контактного давления системы колесо–рельс, продольные сдвиговые напряжения, возникающие в стальной матрице при

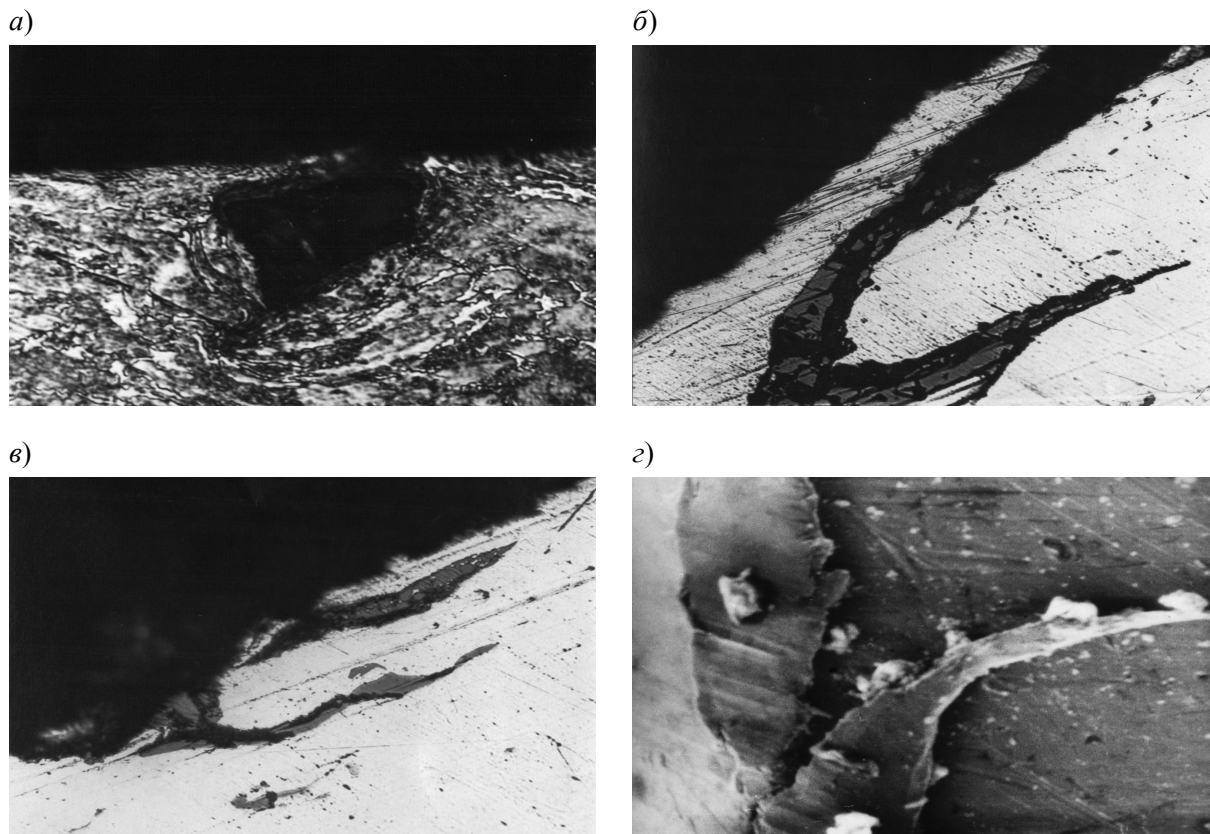


Рис. 3. Локализация деформации (а) и формирование частиц износа вблизи неметаллических включений и продуктов коррозии колесной стали (б–з) на поверхности катания железнодорожных колес: а, б –  $\times 400$ ; в, з –  $\times 200$

ее деформации, а также напряжения трения на поверхности раздела включение–матрица. Величина нормальных напряжений зависит от условий эксплуатации колеса, сдвиговых – от пластичности матрицы колесной стали, определяемой температурой и ее структурой.

Возникающий в процессе эксплуатации колеса градиент температур вблизи поверхности катания приводит к неоднородному распределению деформаций в стальной матрице и сил, действующих на включение. Включения оказываются окруженными пространственно неоднородным полем внутренних напряжений, имеющих свои дальнедействующие поля.

Таким образом, вблизи каждого включения формируется определенная схема напряженного состояния, в которой соотношения между величинами напряжений постоянно изменяются в процессе эксплуатации колеса, в этих условиях стальная матрица деформи-

руется в контакте с включением. В условиях высоких давлений и циклически изменяющихся температур взаимодействие контактирующих поверхностей включения и стальной матрицы происходит путем установления механического контакта и развития диффузионных процессов.

Механический контакт устанавливается в результате сглаживания неровностей поверхностей включения и матрицы колесной стали путем развития контактного трения их поверхностей друг относительно друга, препятствующего их относительному перемещению. Такое трение является кинематическим сухим трением скольжения, так как реализуется без какой-либо смазки при поступательном перемещении зерен стальной матрицы по поверхности недеформируемого включения или между движущейся стальной матрицей и пластичным включением. В работах [12]–[14] проанализированы условия

формирования сил трения на межфазной границе включение–матрица.

Для случая деформирующейся системы стальная матрица–включение установлен закон трения, учитывающий влияние сил притяжения между молекулами трущихся тел, а также составляющие, обусловленные типом и строением межфазных границ, связанные с определенной поверхностной энергией и с трением, возникающим при перемещении (скольжении) межфазных дислокаций и дисклинаций:

$$F = \mu \left[ N + S \left( \frac{p_o + \gamma_{в-м}}{D_{в}} + \frac{b\tau_{д}}{\ell_1} + \frac{\omega\tau_{д}}{\ell_2} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\gamma_{в-м}$  – удельная поверхностная энергия границы включение–матрица;  $\ell_1$  и  $\ell_2$  – длина подвижных межфазных дислокаций и дисклинаций соответственно;  $b$  – вектор Бюргера межфазных дислокаций;  $\omega$  – вектор поворота межфазных дисклинаций;  $\tau_{д}$  – касательное напряжение деформационного происхождения, действующее вдоль межфазной границы;  $D_{в}$  – размер включения. Величины коэффициента трения  $\mu$  и давления, вызванного силами межмолекулярного притяжения  $p_o$ , в уравнении (5) зависят от химического и фазового состава, а также типа кристаллической решетки матрицы и включения.

Силы трения сдерживают течение стальной матрицы вокруг включения и распределены по границе раздела неравномерно. Эта неравномерность обусловлена в первую очередь неравномерным распределением нормальных и касательных напряжений, действующих на включение вблизи поверхности катания колеса. Силы трения на границе раздела включение – стальная матрица определяются температурой и степенью деформации, формой и размером включения и увеличиваются с понижением температуры, увеличением внешних напряжений и размера включения. Влияние температуры в уравнении (5) выражается через коэффициент трения, значения которого различны для разных температур. Влияние размера и формы включения проявляются через площадь контакта  $S$ . Влияние степени деформации в уравнении

(5) проявляется в первую очередь через увеличение плотности межфазных дефектов.

Контактное трение усиливает неоднородность деформации матрицы колесной стали вблизи включений, поскольку в каждой точке поверхности контакта возбуждаются элементарные касательные силы трения, что вызывает появление дополнительных касательных напряжений на межфазной границе включение–матрица, противоположных направлению скольжения матрицы относительно включения. Это может оказать влияние не только на уровень напряжений, действующих на включение, но и на схему напряженного состояния [12]– [14].

В процессе контактного взаимодействия включений и стальной матрицы возможно вращение включений (рис. 3, а), что обусловлено большими силами трения на межфазных границах. Вращение включений вызывает моментные напряжения, способствующие локальным пластическим поворотам в матрице и сопровождающиеся вихревым течением матрицы в контакте с включением вблизи поверхности катания.

В процессе совместной деформации системы включение–матрица вблизи поверхности катания колеса образуется характерная волокнистая зеренная структура колесной стали. Во время деформации на каждое зерно перлита и феррита действуют нормальные сжимающие силы от контактного взаимодействия колесо–рельс, в результате в стали возникают релаксирующие касательные напряжения, под действием которых матрица течет в направлении качения, а зерна перлита и феррита приобретают вытянутую форму.

Стальная матрица соприкасается с включением, и на межфазной границе возникают силы трения, препятствующие ее течению. Волокна деформирующейся матрицы огибают включение, которое может поворачиваться движущейся матрицей в направлении ее течения; в результате возникают моментные напряжения и образуется характерная вихревая зеренная структура (см. рис. 3, а).

Волокна матрицы огибают включение с одной стороны, если оно непосредственно выходит на поверхность катания, либо с



двух сторон, если оно находится вблизи поверхности катания. В первом случае волокна матрицы постепенно «наезжают» на включение (рис. 3, б), которое служит тормозом для движущихся волокон, выгибаются и нередко закручиваются в петли или спирали. Во втором случае волокна матрицы огибают включение с двух сторон, при этом возможно расслоение вдоль межфазных границ раздела включение–матрица (рис. 3, в).

Происходит неоднородная деформация: те волокна, которые столкнулись с включением, останавливаются и в этом месте возникает повышенная концентрация напряжений, а находящиеся выше и ниже слои матрицы деформируются в направлении течения матрицы колесной стали. При этом на границах включение–матрица концентрируются сжимающие и сдвиговые напряжения, способные разрушить включение, если они превысят предел прочности включений при сжатии (рис. 3, б).

При ускоренном торможении в условиях резкого повышения температуры следует учитывать возможную роль проскальзывания вдоль межзеренных границ в аустените и межфазных границ включение–матрица в развитии деформации вблизи поверхности катания колеса [12]–[14]. Кроме того, повышается пластичность стальной матрицы, находящейся в аустенитном состоянии, поскольку происходит миграция границ зерен и субграниц под действием деформирующих напряжений, таким образом развивается динамическая рекристаллизация.

Известно, что при скольжении дислокаций происходит локальный разогрев металла. Поэтому даже не при экстренном торможении состава включения, вызывающие локализацию пластических сдвигов и поворотов, а также тормозящие своей поверхностью развитие этих процессов как барьеры на пути движения дислокаций, способствуют дополнительному локальному разогреву матрицы. Это может вызывать процессы динамического возврата в матрице вблизи включений при холодной деформации. Следует отметить, что неметаллические включения нередко являются центрами локаль-

ного обезуглероживания стали, что вызывает структурную неоднородность и влечет за собой неоднородное развитие пластических сдвигов, а также образование микротрещин и частиц износа.

Необходимо рассмотреть еще один аспект влияния легкоплавких неметаллических включений на образование частиц износа вблизи поверхности катания железнодорожных колес в условиях экстренного торможения и локального разогрева поверхности катания до температур, соответствующих аустенитной области, когда может произойти оплавление и даже плавление легкоплавких железо-марганцевых сульфидов и сульфидных эвтектик. Таким образом, возможно проявление так называемой локальной сульфидной краснотомкости, природа которой изучалась, в том числе и в колесной стали, в работах [12]–[14].

Было установлено, что при повышении температуры до 980 °С и выше сульфиды и их эвтектики оплавляются вначале у границ раздела со стальной матрицей, затем полностью расплавляются и появляются полости, заполненные расплавом. Оплавление включений вызывает локализацию деформации в прилегающих участках матрицы, что в свою очередь стимулирует рост полостей и образование трещин между ними.

Степень деформации стали  $\epsilon_{кр}$ , при достижении которой вблизи таких включений возникают микроразрушения, зависит от типа включения и температуры, однако в случае плавления она резко уменьшается по сравнению с  $\epsilon_{кр}$  для твердых включений, что свидетельствует о проявлении краснотомкости. В случае оплавления включений скорость роста полостей резко возрастает.

Таким образом, в условиях экстренного торможения поездного состава, когда поверхность катания колеса нагревается до высоких температур, в результате расплавления сульфидных включений (рис. 4, а) происходит резкая локализация деформации стали и возникает множество трещин, т. е. происходит разрушение стали при достижении относительно невысоких степеней деформации. При этом нарушаются условия

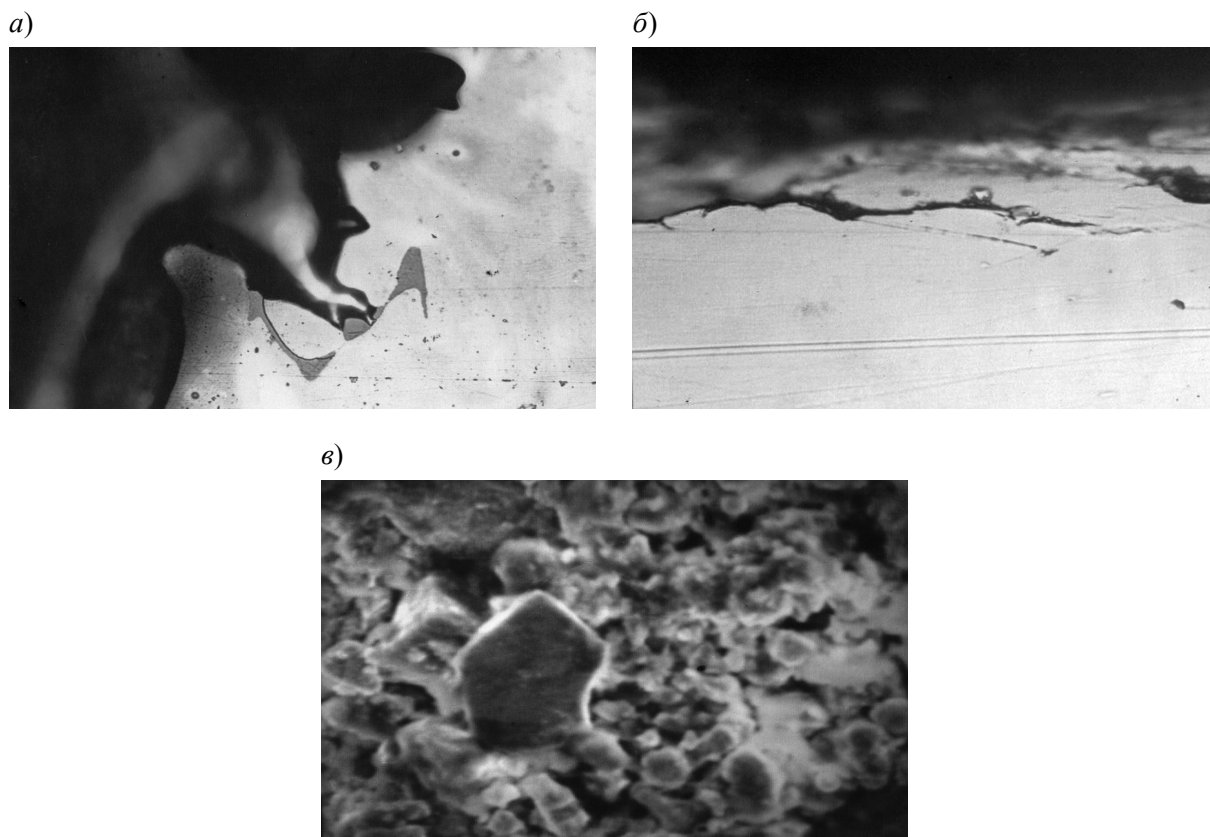


Рис. 4. Образование частиц износа в зонах сульфидной краснеломкости на поверхности катания железнодорожных колес ( $\times 600$ )

течения стальной матрицы вблизи включений и контактного трения вдоль межфазных границ включение–матрица, как было описано выше для твердых включений. Жидкие прослойки легко вытягиваются параллельно поверхности катания колеса (рис. 4, б), между ними распространяются трещины, способствующие образованию частиц износа.

В результате действия трех механизмов – наволакивания зерен стальной матрицы на включения, расслоения вдоль межфазных границ включение–матрица стали под действием сил трения и вследствие различия пластического поведения включений и матрицы, а также оплавления сульфидных включений образуются частицы износа, которые в процессе роста выгибаются.

Вблизи неметаллических включений и продуктов коррозии колесной стали частицы износа имеют вид петель, спиралей, аналогичных стружкам при резании (рис. 3, з).

Такую форму они принимают благодаря остаточным напряжениям, связанным с неоднородным распределением дислокаций по толщине частиц износа, образовавшихся вблизи включений [7]. По данным работы [5], эти частицы износа предшествуют повреждению и обнаруживаются главным образом на поверхности катания перед локальным разрушением.

Что касается локальной сульфидной краснеломкости стали, то на участках поверхности катания, где прошло оплавление сульфидных включений, наблюдается множество частиц износа как спиральной формы, так и компактной неправильной формы (рис. 4, в), что вызвано наличием множества микротрещин в этих зонах, а также дроблением частиц износа вследствие сильной локализации деформации.

Рассматривая влияние продуктов коррозии как готовых неметаллических включе-

ний на образование частиц износа, следует учитывать еще один аспект влияния внешней среды, связанный с коррозионными процессами, на развитие усталостного разрушения на поверхности катания железнодорожного колеса. Известно, что начальный этап коррозии включает адсорбцию атомов элементов из окружающей среды, вызывающую эффект адсорбционного понижения прочности изделия (эффект Ребиндера) [8].

Возникающие в поверхностном слое обода (вблизи поверхности катания) пластические сдвиги, термоциклирование в процессе торможения и взаимодействие с окружающей атмосферой создают условия для интенсивного развития диффузионных процессов, которые способствуют более интенсивной адсорбции элементов из окружающей среды по сравнению с другими элементами железнодорожного колеса. Очевидно, что на поверхности катания железнодорожного колеса происходят адсорбционно-усталостные явления, приводящие к зарождению усталостных трещин и частиц износа и сопровождающие их рост и отслоение [5].

Наличие межфазных границ включение–матрица стали с их дефектной структурой и межфазными напряжениями [13], а также образование в них микротрещин, несомненно, способствует локализации проявления эффекта адсорбционного понижения прочности поверхности катания железнодорожного колеса вблизи неметаллических включений, который энергетически характеризуется понижением работы образования новых поверхностей твердого тела в процессе деформации и разрушения под влиянием образования на них адсорбционного слоя [8].

По-видимому, для межфазных границ включение–матрица особенно актуальна силовая трактовка эффекта адсорбционного понижения прочности, связанная с возникновением расклинивающих усилий в этих границах, способствующих прониканию адсорбционного слоя в глубь от поверхности трения (поверхности катания), что в свою очередь способствует отслоению включений от стальной матрицы и формированию частиц износа.

## Заключение

Анализ микротрещин, отслоений и частиц износа, а также механизмов их образования показал, что износ поверхности катания железнодорожных колес представляет собой сложное явление. Он происходит по нескольким механизмам (усталостному, адсорбционному, коррозионному, износу при трении) и является многофакторным процессом. Многократное циклическое термомеханическое воздействие на поверхность катания колеса при взаимодействии ее с рельсом приводит к накоплению напряжений и дефектов (микротрещин, расслоений, отслоений), что способствует образованию частиц износа, имеющих разную форму, источник и механизм формирования.

Наиболее распространенные частицы износа представляют собой чешуйки или пластины разной толщины. Образование таких чешуек износа происходит путем вязкого отслоения. Они характерны для нормальных условий износа, и их появление связано с пластической деформацией вблизи поверхности катания колеса.

При хрупком разрушении участков «белого слоя» образуются частицы износа в виде осколков с острыми краями неправильной формы. Их появление связано с образованием в поверхностных слоях ободьев мелких усталостных трещин, выход которых на поверхность является началом образования частиц износа.

Вблизи неметаллических включений и продуктов коррозии колесной стали частицы износа имеют форму петель и спиралей. Они образуются вследствие локализации деформации вблизи включений и наволакивания металла матрицы на включения, а также в результате расслоения межфазных границ включение–матрица. Такие частицы обнаруживаются главным образом на поверхности катания перед локальным разрушением.

В случае проявления локальной сульфидной краснотомкости образуется множество частиц износа как спиральной формы, так и компактной неправильной формы, что вызвано наличием множества микротрещин в

этих зонах, а также дроблением частиц износа вследствие сильной локализации деформации.

### Библиографический список

1. **Эксплуатация** и ремонт колесных пар вагонов / А. Ф. Богданов, В. Г. Чурсин. – М. : Транспорт, 1985. – 270 с.

2. **Ресурс** и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог : монография / ред. проф. И. А. Иванов. – М. : ИНФРА-М, 2011. – 264 с.

3. **Структурные** изменения в ободьях железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания / Ю. Н. Таран, В. П. Есаулов, С. И. Губенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 9. – С. 101–105.

4. **Повышение** износостойкости железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания / Ю. Н. Таран, В. П. Есаулов, С. И. Губенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 2. – С. 42–44.

5. **О природе** износа поверхностей металлов при трении / Е. А. Марченко. – М. : Наука, 1979. – 118 с.

6. **Петрография** неметаллических включений / Т. И. Литвинова, В. П. Пирожкова, А. К. Петров – М. : Металлургия, 1972. – 460 с.

7. **The Delamination Theory of Wear** / N. P. Suh // Wear. – 1973. – V. 23, n 1. – P. 111–124.

8. **Физико-химическая** механика материалов / В. И. Лихтман, Е. Д. Щукин, П. А. Ребиндер. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 303 с.

9. **Прочность** стали в коррозионной среде / Г. В. Карпенко. – М. ; Киев : Машгиз, 1963. – 187 с.

10. **Теория** и методы исследования коррозии металлов / Г. В. Акимов. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1945. – 195 с.

11. **Микрогеометрия** и контактное взаимодействие поверхностей / Я. А. Рудзит. – Рига : Зинатне, 1975. – 210 с.

12. **Неметаллические** включения в стали / С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.

13. **Трансформация** неметаллических включений в стали / С. И. Губенко. – М. : Металлургия, 1991. – 225 с.

14. **Неметаллические** включения и качество стали / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – Киев : Техника, 1980. – 168 с.

УДК 621.313.5; 621.365.9

**К. К. Ким**

Петербургский государственный университет путей сообщения

**С. Н. Иванов**

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

**М. А. Шпилев, А. А. Ткачук, Н. Ю. Куличенко**

Петербургский государственный университет путей сообщения

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЯ

Повышение эффективности производства и снижение себестоимости конечной продукции может быть достигнуто за счёт внедрения новых технических устройств, к которым можно отнести электромеханические перекачивающие устройства на основе теплогенерирующих электромеханических преобразователей энергии (ТЭМП).

электроотопление, электромеханический преобразователь, обмотка, цилиндр.