

УДК 669.15

МЕХАНИЗМЫ ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**С.И. ГУБЕНКО, С.И. ПИНЧУК, Е.В. БЕЛАЯ**Национальная металлургическая академия Украины
г. Днепропетровск

Интерес к изучению механизма износа железнодорожных колес при эксплуатации связан с необходимостью сокращения потерь, разработки эффективных методов прогнозирования долговечности колес, обеспечения надежности их работы в реальных условиях, в том числе экстремальных, т.е. при больших нагрузках, высоких скоростях, повышенных температурных нагрузках на затяжных спусках и др.

Комплексный подход к изучению механизма изнашивания железнодорожных колес при эксплуатации включает наряду с исследованием структурных изменений в поверхностных слоях ободьев, также анализ частиц износа и установление механизма их образования. Усталостные процессы при эксплуатации колес связаны с наличием частиц неметаллических включений вблизи поверхности катания, возникновением зоны пластической деформации и хрупких участков «белого слоя» [1] и, вероятно, с наличием образующихся в процессе эксплуатации участков коррозионных повреждений. Последнее требует специального изучения в дополнение к этой ограниченной информации, которая была получена ранее [1].

В настоящей публикации изложены некоторые результаты изучения механизма образования частиц износа при эксплуатации железнодорожных колес с плоскоконическим профилем поверхности катания. Исследовали структуру и свойства железнодорожных колес после их эксплуатации в течение пяти лет.

Для идентификации неметаллических включений и продуктов коррозии применяли металлографический, микрорентгеноспектральный, рентгеноструктурный и петрографический методы с использованием микроскопов «Neophot -21», MS-46 «Cameca», «Nanolab-7», ДРОН-2,0. Исследование частиц износа на поверхности катания проводили

металлографическим методом с использованием оптического микроскопа «Neophot -21» и растрового электронного микроскопа РЭМ-200.

Согласно данным работы [2], одной из важнейших причин образования частиц износа являются пластические сдвиги, обусловленные довольно большой степенью деформации металла вблизи поверхности катания, которая имеет неоднородный характер по ширине обода. Согласно полученным нами данным, на границах зон с разной степенью деформации и в участках интенсивной и турбулентной деформации возникают микротрещины, отслоения и частицы износа (рис. 1, а). Множество частиц износа возникает в зоне выкружки колес. Это свидетельствует о значительной локализации деформации и приводит, в конечном счете, к подрезу гребня колеса.

Частицы износа, возникшие вследствие развития интенсивной пластической деформации вблизи поверхности катания, представляют собой чешуйки или пластины разной толщины.

Согласно теории износа «отслаиванием» [3], возникающие при трении дислокации имеют максимальную плотность на некотором расстоянии от поверхности катания в глубине колеса, где и появляются протяженные микротрещины, растущие до критического размера в результате пластического течения стали. В зоне между трещинами и поверхностью катания локализуется пластическое течение стали. Здесь образуются частицы износа в виде чешуек, которые затем отслаиваются. Главную роль в этом процессе отводят пластическим актам, приводящим к накоплению дислокаций и появлению микротрещин, параллельных поверхности катания колеса. Такие микротрещины на начальных этапах не вызывают образования частиц износа. Эти микротрещины могут расти, одновременно могут образовываться новые микротрещины. Образование чешуек износа происходит путем вязкого отслоения металла при слиянии микротрещин.

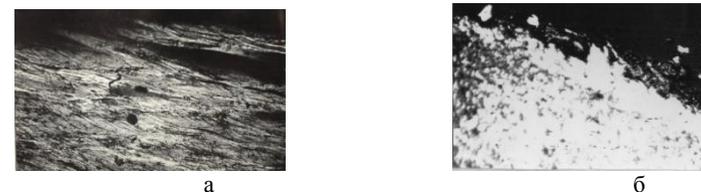


Рис. 1. Частицы износа вблизи поверхности катания в зонах интенсивной пластической деформации (а, х 100) и «белого слоя» (б, х 1000)

Приведенные в работе [2] данные о плотности дислокаций на поверхности катания свидетельствуют о развитии интенсивной деформации колес в процессе их эксплуатации. После последовательных сошлифовок с поверхностей колес на различную глубину от 100 до 200 мкм определяли плотность дислокаций. Величина этого параметра составляла примерно $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-2}$. На этой глубине величина плотности дислокаций была в 2-3 раза больше, чем непосредственно на поверхности катания, что связано, по-видимому, с выходом движущихся дислокаций при пластической деформации на свободную поверхность. Известен также факт «экранирующего» влияния внешней поверхности (в данном случае – поверхности катания колес) на движущиеся дислокации [4].

Рассматривая особенности развития пластической деформации вблизи поверхности катания колеса, следует учитывать коррозионные процессы, происходящие вследствие взаимодействия с окружающей средой, в частности, с влажной атмосферой. Происходящая на начальном этапе взаимодействия адсорбция элементов окружающей среды может вызывать адсорбционное облегчение пластической деформации стали вблизи поверхности катания колеса (эффект П. А. Ребиндера). Явление пластифицирования объясняют влия-

нием изменения поверхностной энергии на поведение деформируемого твердого тела, т. е. снижением поверхностного потенциального барьера, оказывающего влияние на поведение дислокаций в приповерхностном слое деформируемого металла, а также уменьшением сил трения и предела текучести стали [4].

Пластифицирование поверхностей катания колеса и рельса способствует сглаживанию их шероховатостей, допустимому изменению профиля поверхности катания колес на начальных этапах эксплуатации. Это ускоряет так называемый полезный износ, необходимый для «прирабатываемости» в системе колесо-рельс.

Окисление и коррозионные повреждения приводят к формированию непосредственно на поверхности катания грубых включений сложных оксидов – продуктов коррозии. Будем их называть «неметаллическими включениями», поскольку их состав и структура близки к некоторым оксидным включениям в колесной стали. Ранее проведенными исследованиями установлено [3], что наличие частиц второй фазы существенно повышает скорость образования микротрещин и их объединения в процессе роста, что увеличивает интенсивность износа – усталостного и при трении. Влажная окружающая атмосфера, содержащая различные загрязнения, оказывает отрицательное влияние на усталостную прочность поверхности катания колес.

Износ поверхности катания колеса, сопровождающийся развитием интенсивной пластической деформации, происходит послойно и каждый слой состоит из большого числа частиц износа. Частицы износа представляют собой чешуйки или пластины разной толщины. Наблюдается равномерное распределение дислокаций по толщине частиц износа [3]. Некоторые чешуеобразные частицы износа попадают в пространство между поверхностями колеса и рельса. Они могут быть обкатаны с изменением первоначальной формы, разрушены либо приобретать так называемую «плоскую» форму.

На поверхности частиц износа развиваются процессы коррозии, о чем свидетельствуют обнаруживаемые на них продукты окисления стали.

Наряду с развитием пластической деформации источником образования частиц износа на поверхности катания колеса является также так называемый «белый слой», который обладает повышенной хрупкостью [1]. На границе раздела его и основной структуры колесной стали возникают значительные напряжения, обусловленные различием физических и механических свойств зон с различной структурой. Кроме того, вблизи участков «белого слоя» имеет место локализация деформации поверхностного слоя обода колеса, что также способствует концентрации напряжений на границе «белый слой»-основная структура колесной стали. Это способствует выкрашиванию «белого слоя», вследствие чего он не является сплошным. Обычно они возникают при очень высоких давлениях. Их появление можно связать с образованием в поверхностных слоях ободьев мелких усталостных трещин, выход которых на поверхность является началом образования частиц износа [2]. Образующиеся частицы износа имеют вид осколков с острыми краями неправильной формы (рис. 1, б).

Третья причина образования частиц износа – неметаллические включения металлургического происхождения, которые являются концентраторами напряжений и деформаций в колесной стали [5].

Анализ микроструктуры колесной стали вблизи поверхности катания колес показал, что неметаллические включения и продукты коррозии способствуют неоднородному развитию деформации, появлению зон турбулентного течения и способствуют образованию зон с повышенной степенью деформации относительно среднего ее значения в разных участках по ширине обода. Поведение находящихся вблизи поверхности катания неметаллических включений под влиянием действующих напряжений зависит от их типа [5], а именно от того пластичны ли они (сульфиды) либо не подвержены пластическому формоизменению (оксиды, силикаты, карбонитриды титана). Неметаллическое включение вблизи поверхности катания колеса находится в сложном напряженном состоянии, определяемом совокупностью 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 ее деформации; напряжения трения на поверхности раздела включение-матрица. Таким образом, вблизи каждого включения формируется определенная схема напряженного состояния, в которой соотношения между величинами различных напряжений постоянно изменяются в процессе эксплуатации колеса. В этих условиях стальная матрица деформируется в контакте с включением. При высоких давлениях и циклически изменяющихся температурах 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 друг относительно друга, препятствующего их относительному перемещению.

В процессе совместной деформации системы включение-матрица вблизи поверхности катания колеса образуется характерная волокнистая зеренная структура колесной стали. 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, 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. 2, а). 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. 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 [5].

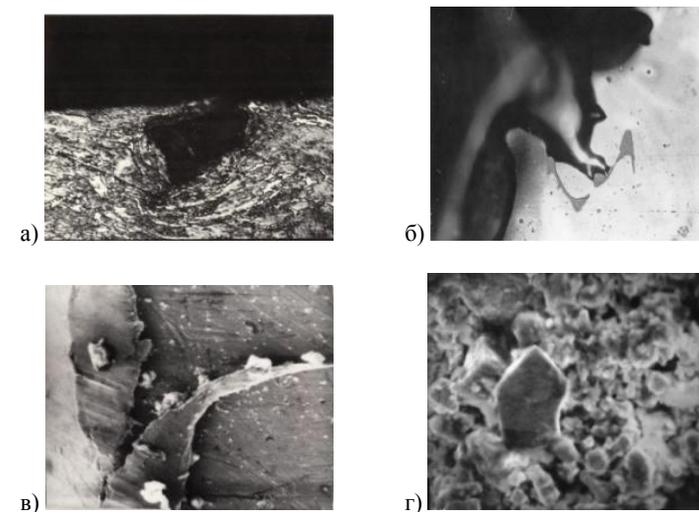


Рис. 2. Локализация деформации (а) и формирование частиц износа вблизи неметаллического включения (б, в, г): а, б –х400, в, г –х600

Необходимо учитывать еще один аспект влияния легкоплавких неметаллических включений на образование частиц износа вблизи поверхности катания колес в условиях экстренного торможения и локального разогрева поверхности катания до температур, соответствующих аустенитной области стальной матрицы, когда может произойти оплавление и даже плавление легкоплавких железо-марганцевых сульфидов и сульфидных эвтектик. То есть, возможно проявление так называемой локальной сульфидной красноломкости [5], в результате которой в участках поверхности катания, где прошло оплавление сульфидных включений, наблюдается множество частиц износа как спиральной формы, так и компактной неправильной формы (рис. 2, г). Это вызвано наличием множества микротрещин в этих зонах, а также дроблением частиц износа вследствие сильной локализации деформации.

Было установлено, что при повышении температуры до 980°C 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. Таким образом, в условиях экс-

тренного торможения подвижного состава, когда поверхность катания колеса нагревается до высоких температур, в результате расплавления сульфидных включений (рис. 2, б) происходит резкая локализация деформации стали и возникает множество трещин, т.е. происходит разрушение стали при достижении относительно невысоких степеней деформации. Жидкие прослойки легко вытягиваются параллельно поверхности катания колеса, между ними распространяются трещины, способствующие образованию частиц износа. В результате наволакивания зерен стальной матрицы на включения, расслоения вдоль межфазных границ включение-матрица стали под действием сил трения и в результате 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 частицы износа имеют вид петель, спиралей, аналогичных стружкам при резании (рис. 2, в). Такую форму они принимают благодаря остаточным напряжениям, связанным с неоднородным распределением дислокаций по толщине частиц износа, образовавшихся вблизи включений [3]. По данным работы [1], такие частицы износа предшествуют повреждению и обнаруживаются, главным образом, на поверхности катания железнодорожных колес перед локальным разрушением.

Выводы. Циклические механические и термомеханические воздействия на поверхность катания колес при эксплуатации приводят к накоплению напряжений и дефектов структуры (микротрещин, расслоений, отслоений и др.), что способствует образованию частиц износа, имеющих разную форму, источник и механизм формирования.

Механизм износа поверхности катания железнодорожных колес представляет собой сложное многофакторное явление, включающее усталостные, адсорбционные и другие компоненты.

Литература

1. Марченко Е.А. О природе износа поверхностей металлов при трении. – М.: Наука, 1979. - 118с.
2. Таран Ю.Н., Есаулов В.П., Губенко С.И. Повышение износостойкости железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2000, №2, с.42-44.
3. Suh N.P. The Delamination Theory of Wear. *Wear*, 1973, v. 23, n 1, p. 111 – 124.
4. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. *Физико-химическая механика материалов*. - М.: Изд. Академии наук СССР, 1962. – 303 с.
5. Губенко С.И., Парусов В.В., Дервянченко И.В. *Неметаллические включения в стали*. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536с.