

З іншого боку вплив міді на основні фізико-механічні властивості сталі вивчено недостатньо повно, літературні дані з цього питання суперечливі. У даній роботі вивчали вплив міді на основні якісні показники сталі 20.

Досліджений метал відбирали статистичним методом з промислових плавок за результатами хімічного аналізу. Вміст міді змінювався в межах від 0,12 до 1,2%.

Сталь розливали в виливниці. Злитки після нагрівання до температури 1200 °С здійснювали прокат на круглу заготовку діаметром 100 мм.

На поверхні заготовок з підвищеним вмістом міді (1,12%) були виявлені дефекти у вигляді неглибоких тріщин.

Рентгеноспектральним мікроаналізом встановили, що тріщини заповнені міддю. Слід зазначити, що при високій швидкості охолодження поверхневої зони зливка згідно діаграмі стану залізо-мідь в цій зоні можливе розшарування розплаву і при подальшому твердінні утворюються локальні ділянки, збагачені міддю. При нагріванні зливок під прокатку відбувається окислення поверхні зливка за рахунок угару заліза, додаткове збільшення вмісту міді в поверхневому шарі, розплавлення міді та її дифузія по межах зерен вглиб заготовки.

З дослідного металу були виготовлені зразки для механічних випробувань. Аналіз результатів механічних випробувань показав, що зі збільшенням вмісту міді істотно зростають межі міцності та текучості, а також ударна в'язкість при збереженні для даної марки сталі високих пластичних властивостей. Для отримання стабільних властивостей сталі слід в процесі плавки після першого експрес-аналізу при необхідності провести додаткову присадку міді і довести її вміст до оптимального. Слід зазначити, що для легування сталі можна використовувати вторинну і відносно дешеву мідь у вигляді відходів.

Таким чином, мідь в конструкційній сталі можна розглядати як легувальний елемент, що істотно підвищує основні механічні властивості сталі.

Єдиним недоліком підвищеного вмісту міді в конструкційній сталі є схильність до утворення поверхневих тріщин при гарячій обробці тиском.

Для запобігання цьому явищу необхідно знизити швидкість кристалізації поверхневого шару зливка, що може бути досягнуто обмазкою внутрішньої поверхні виливниць ізоляційним складом зі зниженою теплопровідністю. При цьому знижується ймовірність розшарування заліза і міді при затвердінні і, відповідно, утворення локальних ділянок з підвищеним вмістом міді.

Знизити локальний вміст міді можна за рахунок гомогенізувального відпалу зливок, при якому відбуваються дифузійні процеси, які вирівнюють концентрації міді і заліза. Температура відпалу повинна бути порядку 900...950 °С, що більше ніж на 100 °С нижче температури плавлення міді.

Для зниження поверхневого угару заліза, що супроводжується збільшенням вмісту міді, нагрівання зливок при відпалі та при гарячій деформації необхідно проводити в захисній атмосфері.

**Губенко С.И.**

*(НМетАУ, г. Днепр)*

## **ОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТИЦ ИЗНОСА НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

На железнодорожное колесо действует сложный комплекс вертикальных и боковых нагрузок от тяговых, направляющих и боковых сил, значительную часть которых составляют инерционные силы от необрессоренных деталей [1]. При эксплуатации колесо находится в сложном напряженном состоянии, определяемом системой контактных, ди-

намических и циклических напряжений. Динамические напряжения возникают от давления колеса при его качении по рельсу, нагрузки при ударах о стыки рельсов и др. Контактные напряжения обусловлены взаимодействием колеса с рельсом и тормозными колодками, когда возникают касательные напряжения и напряжения от тепла трения при торможении. Тепловые напряжения, действующие в ободе и диске, являются циклическими. Все эти напряжения вызывают в колесе упруго-пластические и тепловые явления, способствуют усталостным процессам в ободе и диске, подрезу гребня и разрушению поверхности катания. В колесе при эксплуатации возникают различного рода повреждения: износ поверхности катания (изменение профиля поверхности обода по кругу катания), дефекты теплового воздействия (ползуны навары, тормозные выщербины, термические трещины), усталостное выкрашивание, хрупкие трещины.

Комплексный подход к механизму изнашивания железнодорожных колес включает не только изучение структурных изменений, происходящих в поверхностных слоях ободьев [2, 3], но также анализ частиц износа и установление механизма их образования. Многообразие условий работы пар трения позволяет утверждать, что общим подходом может быть представление об усталостной природе разрушения поверхностных слоев [4]. Интерес к изучению механизма износа связан не только с необходимостью сокращения связанных с износом потерь, но и с разработкой эффективных методов прогнозирования долговечности колес, обеспечением надежности их работы, особенно в экстремальных условиях. Механизм износа поверхности катания представляет совокупность механических, теплофизических и химических явлений и связан с образованием частиц износа и микротрещин в местах интенсивной пластической деформации и в участках "белого слоя", вблизи частиц неметаллических включений и продуктов коррозии стали [2,3].

Целью настоящей работы было изучение механизмов образования частиц износа на поверхности катания железнодорожных колес в процессе эксплуатации.

При визуальном осмотре колес с сильно изношенным ободом на поверхности катания обнаружены такие дефекты, как ползун, наволакивание металла, отслоения, наплыв металла с поверхности катания на наружную боковую грань обода, усталостно-коррозионный износ. В результате наплыва произошло искажение профиля поверхности катания в процессе эксплуатации (рис. 1, а). От ползуна в глубинные слои обода расходятся многочисленные трещины, сопровождающиеся зонами смятия металла, а также коррозионным разъеданием стали. Очевидно, максимальный износ поверхности катания происходит в зонах выкружки и наплыва.

Микроструктура ободьев колес вблизи поверхности катания характеризуется наличием зоны деформированных зерен и участков "белого слоя" (рис. 1, б, в) [3, 4]. Появление зоны деформированных зерен связано со смятием металла в контакте с рельсом от давления. Пластические сдвиги в тонком поверхностном слое прошли в условиях относительно высоких давлений и циклически изменяющейся температуры. Характер микроструктуры свидетельствует о неоднородном протекании пластической деформации по сечению обода, что связано с неоднородным распределением контактных напряжений: известно, что в зоне выкружки они выше, чем в середине поверхности катания [3, 4].

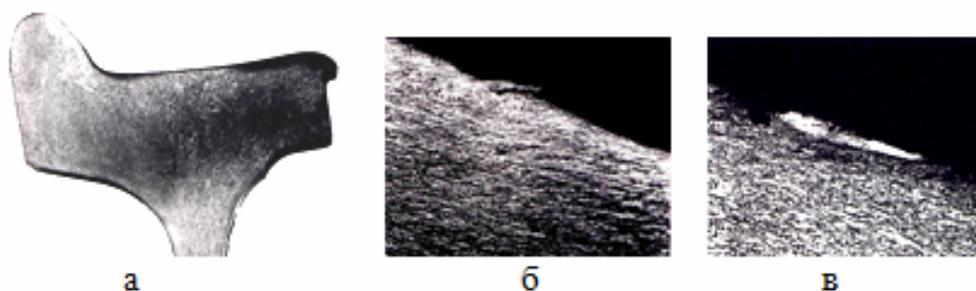


Рис. 1. Макроструктура колеса с изношенным ободом (а) и зоны структурных изменений вблизи поверхности катания (б, в – х 200)

Значения величин степени вытянутости зерен  $\varepsilon$ , глубины зоны пластических сдвигов  $h$  и плотности дислокаций  $\rho_{\perp}$  в разных участках поверхности катания колеса 1 приведены в табл. 1. Глубина зоны деформированных зерен по ширине обода неодинакова. Наиболее глубоко пластическая деформация распространилась в месте выкружки гребня и зоне наплыва у края обода. Степень вытянутости зерен позволяет судить о степени деформации стали в поверхностном слое обода. Характер изменения микротвердости аналогичен. Плотность дислокаций, определенная рентгеноструктурным методом, также не одинакова в различных местах поверхности катания (табл. 1). Участки "белого слоя" представляют собой бесструктурный мартенсит – это хрупкая структурная составляющая, которая выкрошивается в процессе работы колеса. Появляется "белый слой" вследствие нагрева тонкого поверхностного слоя от тепла торможения до температуры выше  $A_3$  и последующего резкого охлаждения после отключения тормозных колодок. Ширина "белого слоя" составляет 20...40 мкм.

Таблица 1 – Значения параметров микроструктуры  $\varepsilon$ ,  $h$  и  $\rho_{\perp}$  разных участков поверхности катания

Параметр	Место замера по ширине обода		
	выкружка	середина	наплыв
$\varepsilon$ , %	65...75	22...25	90
$h$ , мкм	300	60	600
$\rho_{\perp}$ , см <sup>-2</sup>	$9,22 \cdot 10^{11}$	$3,732 \cdot 10^9$	$9,60 \cdot 10^{11}$

Вдоль всей поверхности катания встречаются микротрещины и расслоения, приводящие к формированию и отслоению частиц износа, а также хрупкому разрушению в зоне выкружки, что на практике вызывает массовые подрезы гребней колес. Образование частиц износа имеет разные причины, а 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 [2, 3]. На границах зон с разной степенью деформации, а также в участках интенсивной и турбулентной деформации возникают микротрещины (рис. 2, а), отслоения, частицы износа (рис. 2, б). В зоне выкружки возникает множество частиц износа, что свидетельствует о значительной локализации деформации и приводит к подрезу гребня.

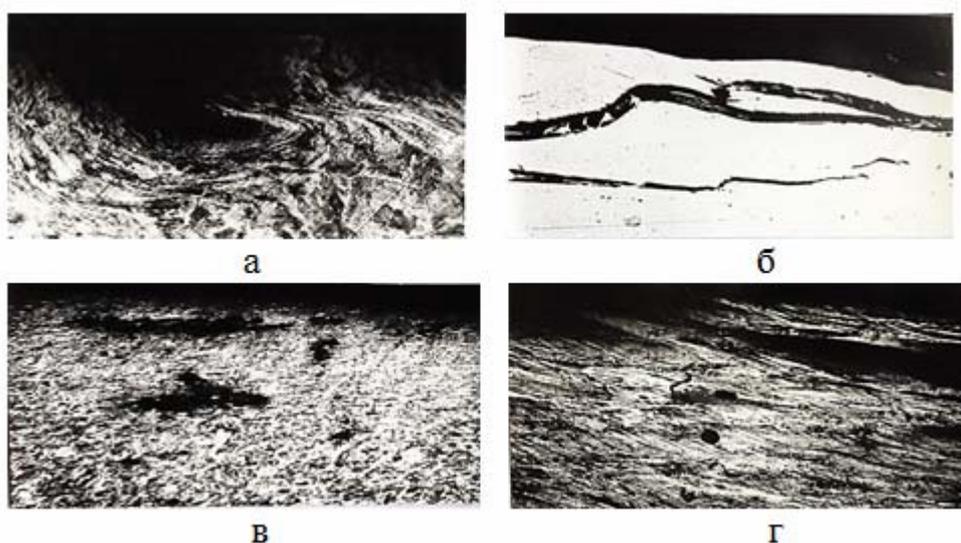


Рис. 2. Частицы износа вблизи поверхности катания в зоне интенсивной пластической деформации: а –х100, б – г –х200

Частицы износа, возникшие вследствие развития интенсивной пластической деформации вблизи поверхности катания, представляют собой чешуйки или пластины разной толщины. Они характерны для нормальных условий износа [4]. Согласно теории износа «отслаиванием» [5], при трении максимальная плотность дислокаций возникает непосредственно не на поверхности, а на некоторой глубине, где и появляются протяженные микротрещины (рис. 2, в), растущие до критического размера в результате пластического течения стали (рис. 2, г). При этом в зоне между трещинами и поверхностью катания локализуется пластическое течение стали и образуются частицы в виде чешуек, которые отслаиваются. 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 [2, 3], свидетельствуют о развитии интенсивной деформации в процессе эксплуатации колес. На поверхности катания плотность дислокаций составляла  $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Однако на глубине 100...200 мкм от поверхности катания величина плотности дислокаций 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 пластической деформации. Кроме того, известен факт «экранирующего» влияния внешней поверхности (в нашем случае – поверхности катания колеса) на движущиеся дислокации [5].

Были определены напряжения трения для частиц износа определенной толщины вблизи поверхности катания [6]. При пластической деформации вблизи поверхности катания на движущиеся дислокации действует, так называемое, поляризационное напряжение  $\sigma_i$ :

$$\sigma_i = G \cdot b / 4\pi (1-\nu) \quad (1)$$

где  $G$  – модуль сдвига колесной стали;

$b$  – вектор Бюргерса дислокаций;

$\nu$  – коэффициент Пуассона колесной стали.

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

$$a_ч = G \cdot b / 4\pi (1-\nu) \sigma_{тр} \quad (2)$$

Напряжение трения вблизи поверхности катания можно приблизительно выразить следующим образом:

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

где  $\varepsilon$  – степень деформации стали;

$c$  – концентрация примесных атомов;

$G$  – модуль сдвига колесной стали.

Рассматривая особенности развития пластической деформации колесной стали вблизи поверхности катания колеса следует учитывать взаимодействие этой поверхности с окружающей атмосферой, приводящей 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) [7]. 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 [7]. 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. Далее для образования поверхностных дефектов (частиц износа) необходимо достижение предельного состояния деформационного упрочнения стали, и этот этап деформации ускоряется под действием поверхностно-активной среды [7]. При образовании и отслоении частиц износа 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 [7], 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. Термодинамическая неизбежность процесса проникания поверхностно-активных веществ в трещины объясняется понижением поверхностной энергии внутри трещины под влиянием адсорбции. Таким образом, влажная окружающая среда, содержащая к тому же различные смазки, загрязнения и т. д., оказывает отрицательное влияние на усталостную прочность поверхности катания колеса благодаря адсорбционному и коррозионному эффектам.

Согласно данным работы [5], 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. Определены общий износ поверхности катания при развитии пластической деформации, размеры и уровень шероховатости частиц износа, скорость износа поверхности катания [6]. Очевидно, 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 [2, 3]. Вблизи участков «белого слоя» обнаруживается локализация деформации поверхностного слоя обода колеса, что способствует концентрации напряжений и выкрашиванию «белого слоя». Частицы износа имеют вид осколков с острыми краями неправильной формы (рис. 3, а). Они обычно возникают при очень высоких давлениях и их появление можно связать с образованием в поверхностных слоях ободьев мелких усталостных трещин [4].

Следует отметить, что под хрупким «белым слоем» сталь пластически деформируется и на границе этих структурных составляющих возникают силы отталкивания, действующие на движущиеся дислокации [4]. Это может привести к появлению микротрещин как вдоль границы «белый слой» – деформированная структура стали, так и на некотором расстоянии от нее, аналогичных приведенным на рис. 2, в и параллельных поверхности

катання колеса (рис. 3, б). Для трансформации таких микротрещин в частицы износа справедливы рассуждения, приведенные выше.

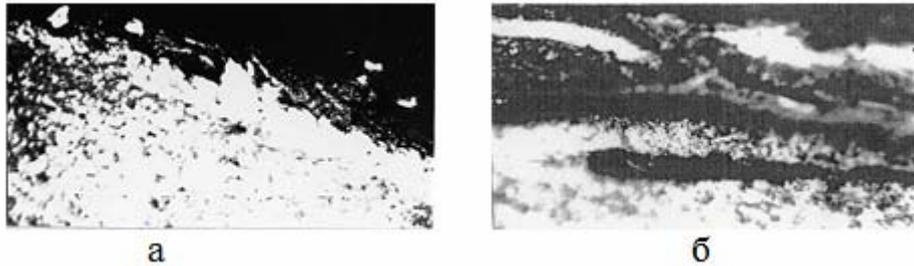


Рис. 3. Частицы износа (а) и выкрашивание «белого слоя» (б); x1000

Третьей причиной образования частиц износа являются неметаллические включения, которые имеют металлургическое происхождение и являются концентраторами напряжений и деформаций в колесной стали [7]. Образованию трещин и частиц износа также способствует окисление и коррозионное разрушение поверхности катания, причем эти процессы приводят к формированию непосредственно на поверхности катания грубых включений сложных оксидов. Наличие включений и продуктов коррозии существенно повышает скорость образования микротрещин и их объединения, что увеличивает интенсивность износа (усталостного и при трении) [7].

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. 4, а) и способствуют образованию зон с повышенной степенью деформации. 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). Неметаллическое включение, находящееся вблизи поверхности катания колеса, находится в сложном напряженном состоянии, определяемом системой контактных, динамических и циклических напряжений. Возникающий в процессе эксплуатации колеса градиент температур вблизи поверхности катания приводит к неоднородному распределению деформаций в стальной матрице и сил, действующих на включение.

В условиях высоких давлений и циклически изменяющихся температур взаимодействии 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 [8]. Проанализированы условия трения на межфазных границах неметаллическое включение-матрица стали [6]. Контактное трение усиливает неоднородность деформации матрицы колесной стали вблизи включений, что может оказать влияние не только на уровень напряжений, действующих на включение, но и на схему напряженного состояния [8]. В процессе контактного взаимодействия включений и стальной матрицы возможно вращение включений (рис. 4, а), что вызывает моментные напряжения и способствует локальным пластическим поворотам в стальной матрице в результате ее вихревого течения.

В процессе совместной деформации системы включение-матрица вблизи поверхности катания колеса образуется характерная волокнистая зеренная структура колесной стали (рис. 4, а). Волокна матрицы огибают включение, постепенно «наезжают» на него (рис. 4, б), при этом возможно расслоение вдоль межфазных границ раздела включение-матрица (рис. 4, в). При этом на границах включение-матрица концентрируются сжимаю-

щие и сдвиговые напряжения, способные разрушить включение, если они превысят предел прочности включений при сжатии (рис. 4, б).

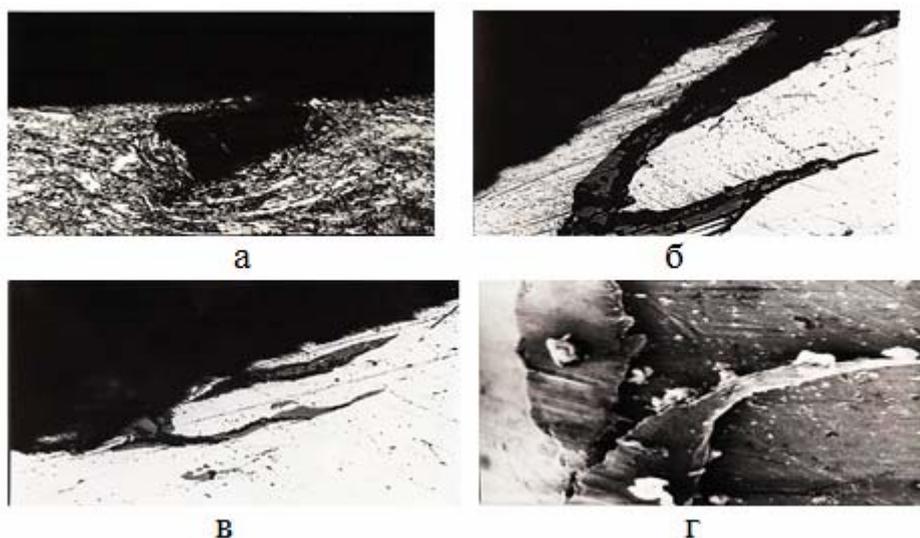


Рис. 4. Локализация деформации (а) и формирование частиц износа вблизи неметаллических включений и продуктов коррозии колесной стали (б-г) на поверхности катания железнодорожных колес: а, б –х 400, в, г –х 200

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 [8]. Следует отметить, что неметаллические включения нередко являются центрами локального 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 [8-12]. Тогда возможно проявление локальной сульфидной красноломкости, когда резко снижаются пластичность и прочность колесной стали. Если поверхность катания колеса нагревается до высоких температур сульфидные включения плавятся (рис. 5, а), 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 (рис. 5, б), между ними распространяются трещины, способствующие образованию частиц износа.

Вблизи неметаллических включений и продуктов коррозии колесной стали частицы износа имеют вид петель, спиралей, аналогичных стружкам при резании (рис. 4, г). Такую форму они принимают благодаря остаточным напряжениям, связанным с неоднородным распределением дислокаций по толщине частиц износа, образовавшихся вблизи включений [5]. По данным работы [4], такие частицы износа предшествуют повреждению и обнаруживаются, главным образом, на поверхности катания перед локальным разрушением. В случае локальной сульфидной красноломкости стали в участках поверхности катания, где прошло оплавление сульфидных включений, наблюдается множество частиц износа как спиральной формы, так и компактной неправильной формы (рис. 5, в), что вызвано наличием множества микротрещин в этих зонах, а также дроблением частиц износа вследствие сильной локализации деформации.

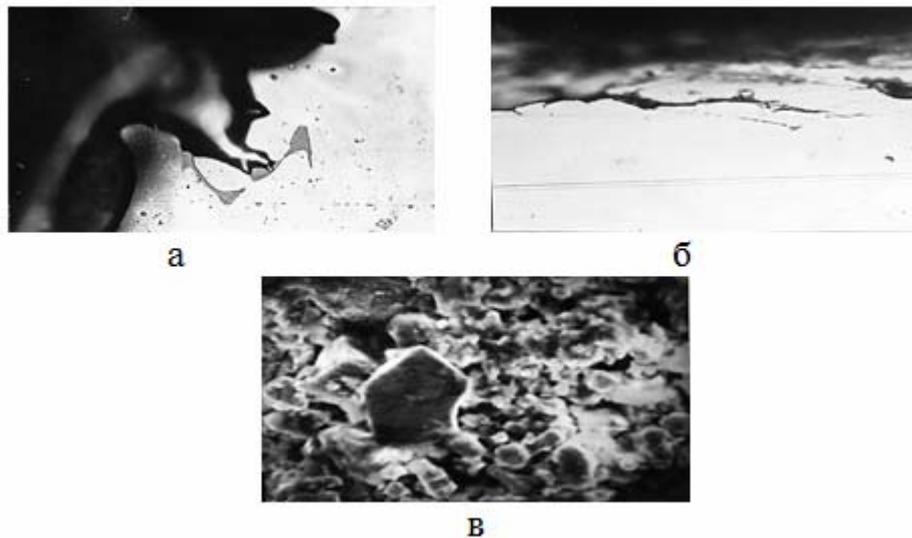


Рис. 5. Образование частиц износа в зонах сульфидной красноломкости на поверхности катания железнодорожных колес; x600

Рассматривая влияние продуктов коррозии на образование частиц износа, следует учитывать еще один аспект влияния на развитие усталостного разрушения на поверхности катания внешней среды. Выше было отмечено, что начальный этап коррозии включает адсорбцию атомов элементов из окружающей среды, что вызывает эффект адсорбционно-го понижения прочности изделия (эффект Ребиндера) [7]. 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. На поверхности катания железнодорожного колеса происходят адсорбционно-усталостные явления, приводящие к зарождению усталостных трещин и частиц износа и сопровождающие их рост и отслоение [4]. Наличие межфазных границ включение-матрица стали с их дефектной структурой и межфазными напряжениями [11], 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 [7]. 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 катания [7], что, в свою очередь способствует отслоению включений от стальной матрицы и формированию частиц износа.

**Выводы.** 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.

Результаты анализа микротрещин, отслоений и частиц износа, а также механизмов их образования показали, что износ поверхности катания железнодорожных колес представляет собой сложное явление. Он происходит по нескольким механизмам (усталостный, адсорбционный, коррозионный, износ при трении) и является многофакторным процессом.

#### Литература:

1. Конструкції залізничних коліс світу / [Есаулов В.П., Козловський А.І., Есаулов О.Т., Староселецький М.І.]. – Дніпропетровськ: Січ, 1997. – 428 с.
2. Таран Ю.Н., Есаулов В.П., Губенко С.И. Структурные изменения в ободьях железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания // Известия вузов. Черная металлургия, 1989, №9, С. 101-105.
3. 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.
4. Марченко Е.А. О природе износа поверхностей металлов при трении. – М.: Наука, 1979. – 118 с.
5. Suh N.P. The Delamination Theory of Wear. Wear, 1973, v. 23, n 1, p. 111 – 124.
6. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог / Воробьев А.А., Губенко С.И., Иванов И.А. и др./ Москва: ИНФРА-М, 2011 – 264 с.
7. Лихтман В.И., Шукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика материалов. – Москва: Изд. Академии наук СССР, 1962. – 303 с.
8. Губенко С.И., Парусов В.В., Дервянченко И.В. Неметаллические включения в стали. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
9. Губенко С.И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей. – Германия, Саарбрюкен (Saarbrücken): LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015. – 476с.
10. Губенко С.И., Ошкадеров С.П. Неметаллические включения в стали. – Киев: Наукова думка, 2016. – 528 с.
11. Губенко С.И. Межфазные границы включение-матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение-матрица и свойства сталей. Germany-Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2017. – 506 с.
12. Денисенко О.І. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки / О.І. Денисенко, В.І. Цоцко, І.М. Спиридонова, Б.Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т.9. – № 1 (2008). – С. 181-184.