

В.П. ЕСАУЛОВ, д-р техн. наук, профессор, НМетАУ (Украина)

Ю.С. ПРОЙДАК, д-р техн. наук, профессор, НМетАУ (Украина)

С.И. ГУБЕНКО, д-р техн. наук, профессор, НМетАУ (Украина)

А.В. СЛАДКОВСКИЙ, д-р техн. наук, профессор, Силезский политехнический ун-т, (Польша)

М.ИСЬКОВ, асп., НМетАУ (Украина)

В.М. РУБАН, асс., НМетАУ (Украина)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Досліджено структурні і хімічні зміни поблизу поверхні катання залізничних коліс з різним профілем цієї поверхні, що відбуваються в процесі експлуатації. Установлено вплив структурних змін у сталі на формування мікроруйнувань і знос поверхонь катання. Показано переваги комплексно-криволінійного профілю поверхні катання.

Исследованы структурные и химические изменения вблизи поверхности катания железнодорожных колес с разным профилем этой поверхности, происходящие в процессе эксплуатации. Установлено влияние структурных изменений в стали на формирование микроразрушений и износ поверхностей катания. Показаны преимущества комплексно-криволинейного профиля поверхности катания.

The structural and chemical changes near the tread surface of the railway wheels with the different tread profiles during operation were investigated. The influence of the structural changes in steel on forming of the micro-destructions and tread wearing was determined. The advantages of the complex-curvilinear tread surface were shown.

### **Введение**

Качество колесного металла во многом определяет безопасность движения поездов. Железнодорожное колесо имеет сложную конфигурацию. Оно служит опорой экипажа, направляющим элементом при движении и тормозным барабаном. Каждый из его элементов (обод, диск, ступица) имеет свои функции и испытывает присущие ему напряжения. На колесо действует сложный комплекс вертикальных и боковых нагрузок от тяговых, направляющих и боковых сил, значительную часть которых составляют инерционные силы от необрессоренных деталей. При эксплуатации колесо находится в сложном напряженном состоянии, определяемом системой контактных, динамических 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 изучение структурных изменений, происходящих в поверхностных слоях, и анализ частиц износа. Резко возросший в последние годы 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 (большие нагрузки, высокие скорости, повышенные тем-

пературные нагрузки на затяжных спусках и т.д.).

### Объект и методики исследования

Важную роль в понимании механизма износа колес играет исследование изменений, происходящих в процессе эксплуатации в поверхностных слоях ободьев. Эти изменения связаны с развитием пластических сдвигов от действия внешних нагрузок, тепловых напряжений при торможении, а также образованием «белых слоев» при нагреве металла от тепла торможения и резкого охлаждения при отключении тормозов. Исследованы изношенные колеса разных конструкций: стандартные колеса с плоскоконической поверхностью катания, имеющей уклоны 1:20 и 1:7 (колесо 1) [1], а также колесо с комплексно-криволинейной поверхностью катания, разработанное в ДМетИ (колесо 2) [1]. Колеса проработали более 5 лет под пассажирским составом. Химический состав стали исследованных колес приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав сталей исследованных колес (об.%)**

ко- лесо	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
1	0,59	0,72	0,31	0,025	0,012	0,14	0,15	0,20
2	0,57	0,78	0,34	0,023	0,012	0,14	0,16	0,21

Из колес вырезались поперечные темплеты и в этом сечении изучали характер их структуры по ширине обода. Микроструктурный анализ проводили на оптическом микроскопе «Neophot-21». Характер тонкой структуры стали и плотность дислокаций в поверхностном слое определяли при электронно-микроскопических исследованиях (просвечивающий электронный микроскоп «Tesla»), а также рентгеноструктурным анализом.

При визуальном осмотре колеса 1 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 напыла произошло искажение профиля колеса в процессе эксплуатации (рис. 1, а).

От ползуна в глубинные слои обода расходятся многочисленные трещины, сопровождающиеся зонами смятия металла, а также коррозионным разъеданием стали. Макро-

структурный анализ поперечного темплета колеса 2 с комплексно-криволинейной поверхностью катания не выявил искажения профиля колеса (рис. 1, б). На поверхности имеются небольшие ползун, следы коррозионного разрушения и небольшой наплыв металла на наружную боковую грань обода.

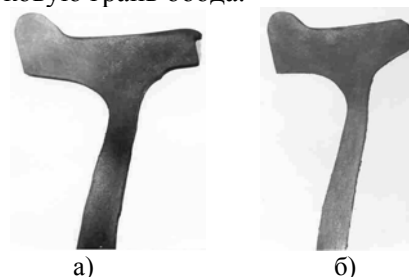


Рис.1. Макроструктура колес 1 (а) и 6 (б) с изношенным ободом

При исследовании изменения химического состава стали вблизи поверхности катания содержание элементов определяли лазерным спектральным анализом на установке МСЛ-3, проводя сошлифовки параллельно поверхности катания через 5 мкм.

### Результаты исследования и их обсуждение

Микроструктура ободьев всех колес вблизи поверхности катания характеризуется наличием зоны деформированных зерен и участков «белого слоя». 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 [2].

В зоне выкружки колеса 1 зерна значительно вытянуты и измельчены (рис. 2, а); при выходе на поверхность катания зерна крупнее, степень вытянутости их несколько снижается и становится все меньше при подходе к середине поверхности катания (рис. 2, б). При удалении от середины поверхности катания к противогребневой боковой стороне степень вытянутости зерен вновь возрастает и становится значительной у края обода. Характер структуры в этой части поверхности катания свидетельствует о значительном течении стали в этой зоне, приведшем к изменению профиля колеса. В

зоне напыла обнаружены расслоения, ориентированные параллельно поверхности катания (рис. 2, в). Как правило, они располагаются на границе между областями с резко различной микроструктурой и разделяют зоны вытянутых и равноосных зерен. Напыл происходил постепенно, слоями, которые при своем смещении деформировались. При этом в них возникли хрупкие трещины, способствующие разрушению металла в слоях. На самом краю напыла на боковую грань обода нависают лепестки с сильно деформированной структурой (рис. 2, г). Они также свидетельствуют о послойном механизме напыла. Между этими слоями, а также между напывшимся металлом и боковой гранью видны трещины.

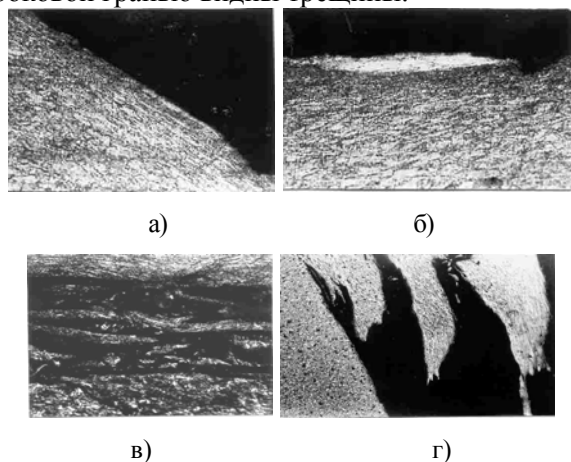


Рис. 2. Микроструктура разных участков изношенной поверхности катания колеса 1;  $\times 200$

Значения величин степени вытянутости зерен  $\epsilon$ , глубины зоны пластических сдвигов  $h$  и плотности дислокаций  $\rho_{\perp}$  в разных участках поверхности катания колеса 1 приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения параметров микроструктуры  $\epsilon$ ,  $h$  и  $\rho_{\perp}$  на поверхности катания колеса 1**

$\epsilon$ , %			$h$ , мкм			$\rho_{\perp}$ , см <sup>-2</sup>		
выкружка	середина	напыл	выкружка	середина	напыл	выкружка	середина	напыл
65... 75	22... 25	90	300	30	600	$9,22 \cdot 10^{11}$	$3,732 \cdot 10^9$	$9,60 \cdot 10^{11}$

Следует отметить, что при эксплуатации на поверхности катания в условиях деформационных процессов при трении качения образу-

ются текстуры качения, которые реализуются в результате совместного действия нормальных и контактных напряжений. Примеры таких текстур, которые выявлены в колесе 1, а потом и в других колесах с плоскоконическим профилем поверхности катания:  $(223) [03\bar{2}]$ ,  $(212) [5\bar{2}6]$ ,  $(112) [\bar{1}3\bar{2}]$ ,  $(221) [1\bar{1}\bar{1}]$ . В деформированном слое металла на поверхности катания сформировалась типичная дислокационная ячеистая субструктура с легкой ориентировкой стенок ячеек в направлении трения - полосовая субструктура (рис. 3). Физическое уширение линий  $(110)$  меняется по глубине от поверхности катания, что связано с разной плотностью дислокаций.

Глубина зоны деформированных зерен по ширине обода колеса 1 неодинакова. Наиболее глубоко пластическая деформация распространилась в месте выкружки гребня и зоне напыла 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.

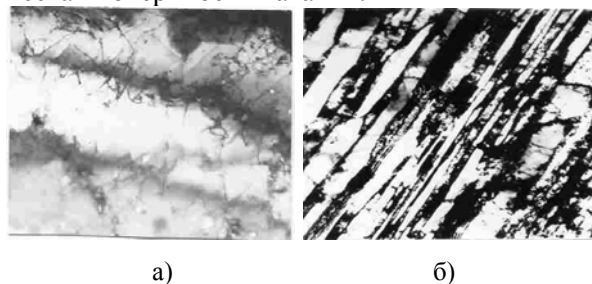
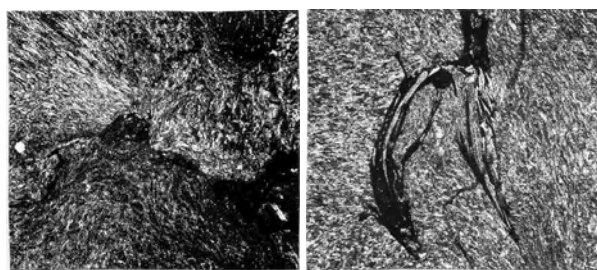


Рис.3. Дислокационная субструктура стали вблизи поверхности катания;  $\times 20000$

Участки "белого слоя" представляют собой бесструктурный мартенсит (гарденит) – это хрупкая структурная составляющая, которая выкрашивается в процессе работы колеса (см. рис. 2, б). 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.

Характер микроструктуры колеса 1 вблизи поверхности катания в направлении качения аналогичен рассмотренной выше для поперечного сечения, однако, степень вытянутости зерен в продольном направлении значительно выше. При изучении структуры в плоскости катания обнаруживается сложный характер течения стали в поверхностном слое (рис. 4). В

зоне напыла есть области с изогнутыми и закрученными зернами, где течение стали носило явно вихревой, турбулентный характер.



а) б)

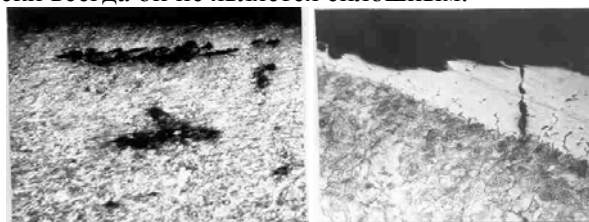
Рис. 4. Микроструктура изношенного обода колеса 1 в плоскости качения; х 200

Исследование микроструктуры ободьев в зонах напыла показало, что смещение металла с уклона 1:20 на уклон 1:7 нецелесообразно, так как напыл происходит слоями и сопровождается сложным турбулентным течением стали. Это влечет за собой повышенный износ, появление трещин, расслоений и зон неоднородной деформации, отколов, напылов на горочных замедлениях. Следовательно, существующая геометрия поверхности катания с уклонами 1:20 и 1:7 далека от геометрического совершенства и требует замены на криволинейную поверхность, у которой, как показал опыт многолетних испытаний, напыл происходит в значительно меньшей степени. Эти же недостатки в большей или меньшей мере присущи и другим коническим поверхностям катания.

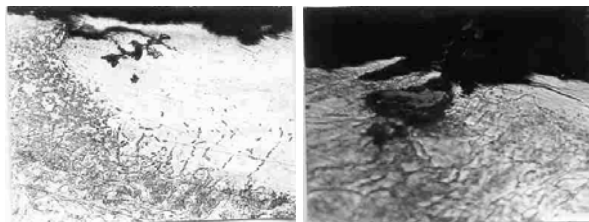
Проведено изучение механизма износа поверхности катания колес с плоскоконическим профилем. Вдоль всей поверхности катания встречаются микротрещины и расслоения, приводящие к формированию и отслоению частиц износа или хрупкому разрушению в зоне выкружки, что на практике вызывает массовые подрезы гребней колес. Большое количество частиц износа обнаруживается по всей ширине обода и способствует подрезу гребня и интенсивному напылу, а значит интенсивному износу колеса. Образование частиц износа имеет разные причины.

Одной из главных причин является протекание пластических сдвигов с довольно большой степенью деформации, которая имеет неоднородный характер. Именно на границах зон с разной степенью деформации возникают микротрещины, отслоения, частицы износа (рис. 5, а). Так называемый, «белый слой» обладает повышенной хрупкостью (рис. 5б), кроме того, на границе его раздела с основной

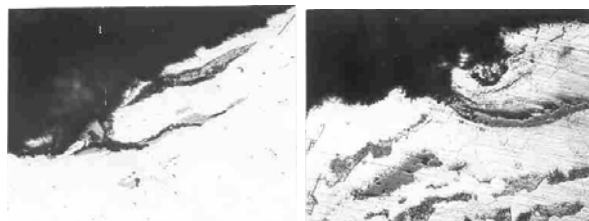
структурой возникают значительные напряжения, обусловленные различными физическими и механическими свойствами зон с различной структурой. Это способствует выкрашиванию «белого слоя» (рис. 5, в), поэтому он практически всегда он не является сплошным.



а) б)



в) г)



д) е)

Рис. 5. Микротрещины и расслоения вблизи поверхности катания

Образованию трещин и частиц износа также способствует окисление и коррозионное разрушение поверхности катания, причем окисление следует отнести к образованию грубых неметаллических включений на поверхности катания. При наличии в поверхностном слое неметаллических включений, которые имеют металлургическое происхождение, они становятся концентраторами напряжений. Вблизи включений в исходном состоянии уже существует повышенная концентрация напряжений [3]. В процессе развития пластических сдвигов зерна стали огибают включение (рис. 5, г), что приводит к неоднородному развитию деформации и накоплению напряжений, которые ведут к образованию микротрещин (рис. 5, д) и разрушению самих включений. Около неметаллических включений при экстренных торможениях возникают и значительные термические напряжения, которые достигают критической величины и также способствуют зарождению трещин и частиц износа. Следует отметить, что неметаллические вклю-

чения нередко являются центрами локального обезуглероживания стали, что вызывает структурную неоднородность и влечет за собой неоднородное развитие пластических сдвигов, а также образование микротрещин (рис. 5, е) и частиц износа.

Таким образом, 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 отрыва (рис. 6 а, б).

Наиболее распространенные частицы износа представляют собой чешуйки или пластины разной толщины. Они характерны для нормальных условий износа [4] и их появление связано с пластической деформацией. Согласно теории износа «отслаиванием» при трении максимальная плотность дислокаций возникает непосредственно не на поверхности, а на некоторой глубине, где и появляются протяженные трещины, которые растут до критического размера, образуя отслаивающиеся чешуйки. Главная роль в этом процессе относится к пластическим актам, приводящим к накоплению дислокаций и появлению трещин, параллельных поверхности. Образование чешуек износа происходит путем вязкого отслоения.

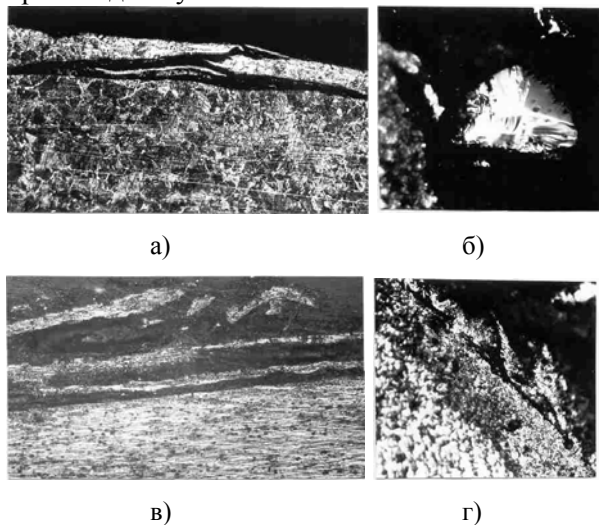


Рис.6. Частицы износа вблизи поверхности катания

Иногда частицы износа выглядят в виде петель, спиралей, аналогичных стружкам при резании (рис. 6, в). Такие частицы предшествуют повреждению и обнаруживаются, главным образом, на поверхности катания перед локальным разрушением. Обнаружены также частицы износа в виде осколков с острыми краями неправильной формы (рис. 6, г). Такие

частицы 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.

Результаты анализа микротрещин, отслоений и частиц износа показали, что износ поверхностей катания железнодорожных колес имеет несколько механизмов и является многофакторным процессом.

Проведены сравнительные исследования структурных изменений вблизи комплексно-криволинейной поверхности катания изношенного обода (колесо 2). В зоне выкружки зерна вытянуты и измельчены (рис. 7, а), при выходе на поверхность катания степень вытянутости зерен уменьшается (рис. 7, б). При удалении от середины поверхности катания степень вытянутости зерен вновь возрастает (рис. 7, в) и становится значительной у самого края обода. У наружной боковой грани обода произошел небольшой наплыв (рис.7, г), где обнаружены расслоения, участки окисленной стали и микротрещины.

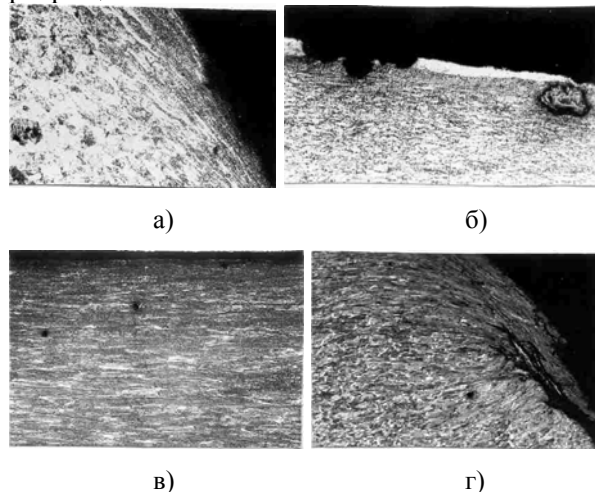


Рис. 7. Микроструктура вблизи поверхности катания изношенного обода колеса 2 в поперечном сечении; х200

В табл. 3 показаны параметры зоны структурных изменений в колесе 2. Как и у колес с плоско-конической поверхностью катания, у колеса 6 наиболее глубоко зона деформации распространилась в местах выкружки и наплыва. Характер изменения микротвердости стали по ширине обода аналогичен. Резкий скачок микротвердости на расстоянии  $2/3$  ширины от гребня связан с наличием участка «белого слоя». Результаты определения плотности дислокаций показали, что их количество также

максимально в зонах выкружки и наплыва (табл. 5).

Таблица 3

**Значения параметров микроструктуры  $\epsilon$ ,  $h$  и  $\rho_{\perp}$  на поверхности катания колеса 2**

$\epsilon$ , %			$h$ , мкм			$\rho_{\perp}$ , см <sup>-2</sup>		
выкружка	середина	наплыв	выкружка	середина	наплыв	выкружка	середина	наплыв
60	10	80	180	20-40	420	$6,54 \cdot 10^{10}$	$6,41 \cdot 10^8$	$8,0 \cdot 10^{11}$

Микроструктура стали в плоскости катания характеризуется наличием равноосных зерен и пятен «белого слоя», лишь в зоне наплыва зерна вытянуты. Зон турбулентного течения стали не наблюдали.

Сравнительный анализ микроструктуры колес с плоско-коническим (колесо 1) и комплексно-криволинейным профилем поверхности катания (колесо 2) показал, что качественно структурные изменения в ободьях одинаковы, но параметры этих зон различны и зависят от конструкции колеса (геометрии поверхности катания). Исследование структурных изменений указывает на несовершенство плоско-конической поверхности катания (с уклонами 1:20 и 1:7), способствующей неоднородному развитию пластических сдвигов в поверхностном слое и неодинаковой степени деформации зерен в различных зонах. Протекание интенсивных пластических сдвигов в условиях действия довольно высоких контактных напряжений приводит к интенсивному износу колес с плоскоконическим профилем поверхности катания. Особенно опасны процессы, протекающие в зоне выкружки и приводящие к подрезу гребней. Эта проблема в настоящее время очень актуальна.

Следует отметить, что пластические сдвиги вблизи поверхности катания нельзя рассматривать только как отрицательное явление. На первых порах они способствуют приработке колес, вызывают наклеп (упрочнение в процессе эксплуатации – своеобразное автоупрочнение), что позволяет обеспечить повышенную твердость и износостойкость ободьев.

Возникающие в поверхностном слое обода пластические сдвиги, термоциклирование в

процессе торможения и взаимодействие с окружающей атмосферой создают условия для интенсивного развития диффузионных процессов, которые могут повлечь изменение химического состава стали. Анализ показал, что химический состав стали в процессе эксплуатации меняется неравномерно. На расстоянии от поверхности катания 5 мкм максимум выгорания элементов приходится на выкружку и прилегающую к ней область вплоть до середины обода, причем на этом расстоянии различие в химическом составе стали незначительно. При переходе к наружному краю обода содержание элементов (кроме углерода) постепенно возрастает и у самого края почти выходит на уровень среднего состава стали. Изменение содержания элементов в зоне выкружки по сравнению с химическим составом стали, % (объемн.):  $\Delta C=0,37$ ,  $\Delta Mn=0,34$ ,  $\Delta S=0,018$ ,  $\Delta Si=0,16$ ,  $\Delta P=0,008$ ; у края обода в зоне наплыва:  $\Delta C=0,13$ ,  $\Delta Mn=0,02$ ,  $\Delta S=0,008$ ,  $\Delta Si=0,01$ ,  $\Delta P=0,002$ . Таким образом, максимальное «выгорание» в зоне выкружки у поверхности катания по элементам составило 63% С, 48% Mn, 72% S, 47% Si, 77% P, в зоне наплыва – 22% С, 4% Mn, 32% S, 3% Si, 17% P. При последующих сошлифовках содержание элементов постепенно возрастает, однако неравномерный характер их «выгорания» сохраняется. На расстоянии 20 мкм от поверхности катания в зоне выкружки и в прилегающих областях вплоть до середины и при приближении к его краю содержание элементов достигает уровня среднего состава стали.

Глубина зоны «выгорания» элементов составляет в зависимости от места по ширине обода 20...30 мкм. Наблюдаемый характер изменения состава стали связан со структурными изменениями в тонком поверхностном слое. Наиболее сильно элементы «выгорают» в местах интенсивных пластических сдвигов и ярко выраженного «белого слоя», причем эти два структурных фактора выступают в комплексе, так как не обнаружено интенсивного «выгорания» элементов в зоне наплыва в других колесах в тех участках поверхности катания, где не было «белого слоя» и зоны пластических сдвигов.

Изменение химического состава стали в поверхностном слое обода обусловлено наличием свободной поверхности (поверхность катания), служащей стоком для атомов примесей и дефектов кристаллического строения, движением дислокаций и вакансий в процессе пластических сдвигов, облегчающих диффузию, повы-

шением температуры стали при интенсивном торможении и разницей химических потенциалов элементов в стали и атмосфере.

По-видимому, температурное поле по ширине обода в процессе эксплуатации колес, особенно при торможении, имеет неравномерный характер, что способствует неоднородности диффузионных процессов. Действие обнаруженного явления на надежность и безопасность движения глубоко не изучено. Необходимы исследования по оптимизации «выгорания» с точки зрения надежности эксплуатации колес, изучению влияния на этот процесс уровня контактных напряжений в колесах с разной геометрией поверхности катания, системы тормозов, коэффициента сцепления колеса с рельсом и т.д. Ясно одно, что изменение химического состава стали в тонком поверхностном слое способствует снижению прочност-

ных свойств, твердости, износостойкости поверхности катания и этот слой необходимо периодически удалять, что и происходит при переточках.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.П.Есаулов, А.И.Козловский, А.Т.Есаулов, М.И.Староселецкий. Конструкции железнодорожных колес мира. – Д.: Сич, 1997. – 428 с.
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. Губенко С.И. Трансформация неметаллических включений в стали. – М.: Металлургия, 1991. – 225 с.
4. Марченко Е.А. О природе износа поверхностей металлов при трении. – М.: Наука, 1979. – 118 с.