

УДК 621.7-4:669:539.4

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Л. И. МАРКАШОВА, В. Д. ПОЗНЯКОВ, А. А. ГАЙВОРОНСКИЙ,
Е. Н. БЕРДНИКОВА, Т. А. АЛЕКСЕЕНКО*

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Представлены результаты исследований металла у поверхности катания цельнокатанных железнодорожных колес после эксплуатации. Показано, что наибольшие изменения структуры (фазовых составляющих, зеренной, субзеренной и дислокационной структур, фазовых выделений и т. п.) по ширине рабочей поверхности колес происходят в зоне перехода к гребню и распространяются на глубину до 200...300 мкм (от поверхности катания). Аналитической оценкой изменения свойств прочности и трещиностойкости металла различных зон колес по результатам структурных исследований установлено, что отдельным зонам присущи значительное упрочнение приповерхностных слоев, резкое повышение локальных внутренних напряжений до уровня теоретической прочности и, соответственно, снижение трещиностойкости.

Ключевые слова: *поверхность катания железнодорожных колес, длительная эксплуатация, структурно-фазовые параметры, механические свойства.*

В связи с увеличением количества железнодорожных перевозок и возрастанием нагрузок становится актуальным повышение надежности и долговечности подвижного состава. Особенно остро эта проблема касается отдельных тяжело нагруженных базовых деталей и механизмов ходовых частей вагонов и локомотивов, основным элементом которых является колесо, непосредственно контактирующее с рельсом. Причем при общем износе в процессе эксплуатации всей поверхности катания колеса все же наиболее интенсивно изнашивается рабочая поверхность гребня, что определяется условиями эксплуатации и функционирование пары трения-качения “колесо–рельс”. Изношенный профиль восстанавливают на специализированных предприятиях железнодорожного транспорта методом механической обточки, или, что экономически более выгодно, предварительной восстановительной наплавкой поверхности гребня. Однако, несмотря на определенные успехи в этом направлении, все же актуальным остается снижение степени износа колес. На производстве для этого применяют технологические меры, главная из которых – повышение прочности колес, что, в свою очередь, зависит от химического состава колесной стали и условий термообработки колес при их производстве. В Украине и странах СНГ используют, в основном, высокопрочные колеса из стали марки 2 (ГОСТ 10791-89) с содержанием углерода от 0,55 до 0,65%. Предел прочности металла таких колес (на глубине 20 мм от поверхности катания) $\sigma_B = 930 \dots 1130$ МПа при относительных удлинениях $\delta_5 \geq 8\%$ и сужении $\psi \geq 14\%$, т.е. колесная сталь отличается низкой пластичностью. Поэтому при эксплуатации возможно охрупчивание металла, что обусловит образование специфических повреждений (трещин, отслоений металла) на поверхности катания колес. Однако данные о влиянии условий эксплуатации на свойства колесной стали ограничены. Практически отсутствуют исследования, которые могли бы позволить, во-первых, более обоснованно подойти к разработке новых высокопроч-

ных сталей для изготовления таких колес, а, во-вторых – выработать требования к подготовке поверхности катания колес при восстановительной наплавке. Поэтому цель настоящей работы – изучить особенности структурно-фазовых изменений в металле у поверхности катания железнодорожного колеса после длительной эксплуатации, роль каждого из структурных факторов (фазовых составляющих, зеренной, субзеренной и дислокационной структур, фазовых выделений и т. п.) в изменении прочности и трещиностойкости колесной стали.

Материал и методика. Исследовали образцы из цельнокатаных железнодорожных колес после эксплуатации (сталь состава: 0,57% С; 0,67 Мn; 0,33 Si; <0,02 V; 0,027 P; 0,029% S). Схематически зоны поверхности катания (1К–4К) и основного металла (ОМ) обода железнодорожного колеса изображены на рис. 1а.

Структурно-фазовые и концентрационные изменения, характер тонкой структуры, распределение и плотность дефектов кристаллической решетки в различных зонах рабочей поверхности площадки катания и по глубине металла колес изучали с помощью комплексных методов: оптической металлографии, аналитической растровой (СЭМ-515 фирмы PHILIPS) и просвечивающей микродифракционной (JEM-200СХ фирмы JEOL) электронной микроскопии.

Экспериментальные результаты, полученные на различных структурных уровнях (от зеренного до дислокационного), позволили аналитически оценить конкретный (дифференцированный) вклад отдельных структурно-фазовых параметров (фазового состава, размеров зерна, субзерна, плотности дислокаций и т.п.) в изменение общих (интегральных) значений механических характеристик – прочности ($\sigma_{0,2}$), трещиностойкости (K_{Ic}), а также локальных внутренних напряжений (τ_B), являющихся потенциальными источниками зарождения и распространения трещин в исследуемых структурных микрообластях [1–5]. При этом принимали, что значение $\sigma_{0,2}$, согласно уравнению Арчарда, включающему известные зависимости Холла–Петча, Орована и др. [6–15], состоит из таких составляющих: $\Sigma\sigma_{0,2} = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_4 + \Delta\sigma_5 + \Delta\sigma_6$, где $\Delta\sigma_0$ – сопротивление решетки металла движению свободных дислокаций (напряжение трения решетки или напряжение Пайерлса–Набарро); $\Delta\sigma_1$ – упрочнение твердого раствора легирующими элементами и примесями (твердорастворное упрочнение); $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$ – упрочнение вследствие изменения размеров зерна и субзерна, согласно зависимости Холла–Петча (зернограничное и субструктурное упрочнение); $\Delta\sigma_4$ – упрочнение за счет перлита; $\Delta\sigma_5$ – дислокационное, обусловленное междислокационным взаимодействием; $\Delta\sigma_6$ – дисперсионное, вызванное дисперсными частицами по Оровану.

Расчетные значения вязкости разрушения [16] определяли по зависимости $K_{Ic}^* = (2E\sigma_T\delta_k)^{1/2}$, где E – модуль Юнга; σ_T – расчетное упрочнение; δ_k – критическое раскрытие трещины, равное среднему размеру субзерен.

Изменение внутренних напряжений (τ_B) оценивали по известной зависимости [17, 18] $\tau_B = Gbh\rho / [\pi(1-\nu)]$, где G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса; h – толщина фольги ($2 \cdot 10^{-5}$ см); ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность дислокаций.

Результаты и их обсуждение. После изучения фазовых составляющих (феррита; перлита), их объемной доли (V , %), размера зерен (D_{gr}), а также изменений микротвердости (HV) различных зон металла железнодорожного колеса у рабочей поверхности площадки катания и в ОМ установили следующее.

В микроструктуре ОМ (на глубине $\delta = 1000 \mu\text{m}$ от поверхности площадки катания) обнаружены (рис. 1б) равноосные зерна феррита при $D_{gr} = 10 \dots 70 \mu\text{m}$, $HV = 2100 \text{ MPa}$ и $V = 44\%$ и перлита при $D_{gr} = 20 \dots 100 \mu\text{m}$, $HV = 2540 \text{ MPa}$, $V = 54\%$, а также ферритные оторочки по границам зерен толщиной $6 \dots 7 \mu\text{m}$ ($V = 2\%$).

По всей протяженности площадки катания (на глубине $\delta = 0 \dots 15 \mu\text{m}$ от поверхности катания) в основном структура представляет собой мелкодисперсную

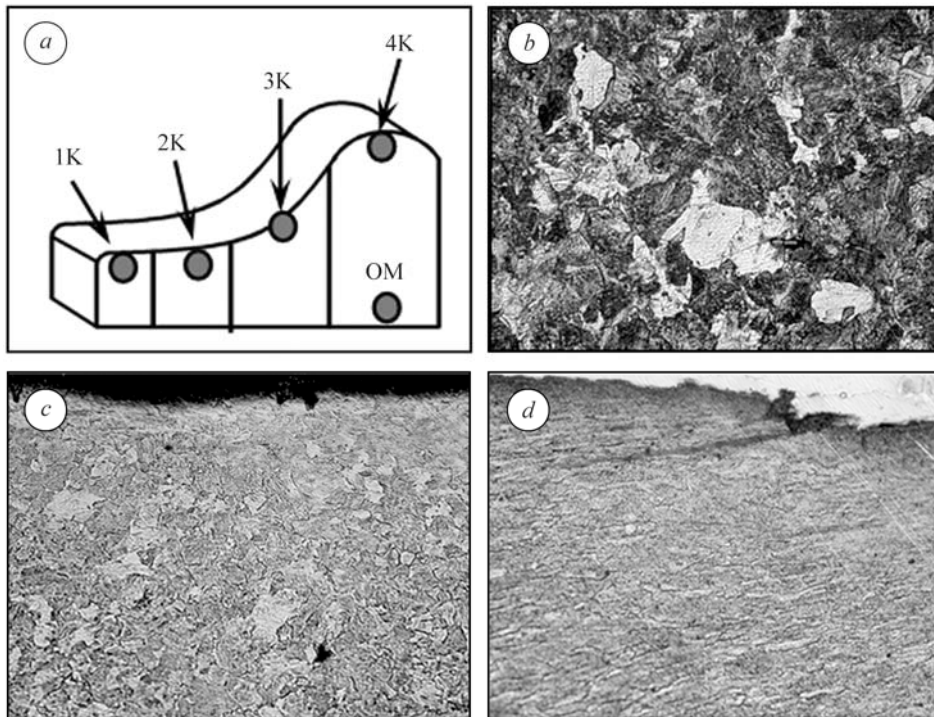


Рис. 1. Схема (а) расположения зон у поверхностях площадки катания (1К–4К) и основного металла (ОМ), а также микроструктура металла обода железнодорожного колеса после длительной эксплуатации: *b* – ОМ; *c, d* – зоны 1К и 3К (×500).

Fig. 1. Schematic (a) of the arrangement in the investigated zones of roll surface (1K–4K) and microstructure of the railway wheel metal after long-time operation: *b* – base metal; *c, d* – zones 1K and 3K (×500).

ферритно-карбидную смесь (рис. 1*c, d*). На глубине $\delta = 15 \dots 250 \mu\text{m}$ формируются полосовые структуры, параллельные внешней поверхности, что свидетельствует о наклепе. Причем они характерны для зоны 2К и, особенно, для зоны 3К (рис. 1*d*). В зоне 3К (переход от площадки катания к гребню колеса) в микроструктуре металла на глубине $15 \dots 100 \mu\text{m}$ присутствуют наиболее протяженные полосовые структуры (длиной $l = 30 \dots 70 \mu\text{m}$ и шириной $h = 1,5 \dots 2,5 \mu\text{m}$) деформированного феррита и тонкопластинчатого перлита (рис. 2). Коэффициент их формы ($\alpha = l/h$) составляет от 12 до 20, при этом угол наклона полос деформации (относительно поверхности катания) около $10 \dots 12 \text{ grad}$. По мере перехода к ОМ (на глубине $\delta = 100 \dots 250 \mu\text{m}$) он увеличивается до $36 \dots 38 \text{ grad}$ при уменьшении коэффициента их формы в 2–3 раза ($\alpha = 4 \dots 10$). При переходе от площадки катания (зона 2К) к гребню железнодорожного колеса (зона 3К) интегральная микротвердость HV повышается в 1,5–1,7 раза (рис. 2), а в приповерхностных слоях в этой зоне обнаружено большое количество микротрещин длиной $20 \dots 350 \mu\text{m}$ (рис. 1*d*). На расстоянии $\delta = 250 \dots 800 \mu\text{m}$ от поверхности катания полосовые структуры переходят в хаотически разориентированную структуру, а интегральная микротвердость приближается к микротвердости ОМ.

В структуре металла выявлены также неметаллические включения – железомарганцевые сульфиды с содержанием 28...78% Fe; 12...42% Mn; 10...30% S (рис. 3). Причем в приповерхностных слоях раскатанные включения длиной до $160 \mu\text{m}$ сопоставимы по размерам и расположению с микротрещинами (рис. 1*d* и рис. 3*a*). В ОМ их длина до $15 \mu\text{m}$ (рис. 3*b*).

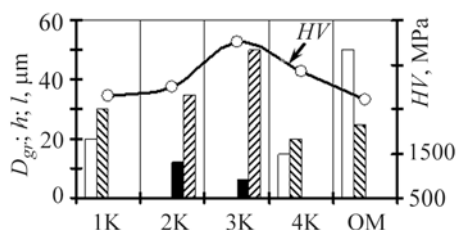


Рис. 2. Размер зерна (D_{gr}) феррита (заштрихованные столбики) и перлита (светлые); параметры h (темные) и l (заштрихованные) деформированных зерен феррита и перлита, а также интегральные значения микротвердости HV (\circ) металла в разных зонах эксплуатированного колеса.

Fig. 2. Value of the grain size (D_{gr}) of ferrite (dashed columns) and pearlite (light), parameters h (dark) and l (dashed) of the deformed ferrite, and pearlite grains, and also the integral values of microhardness HV (\circ) of the metal in different zones of the used wheel.

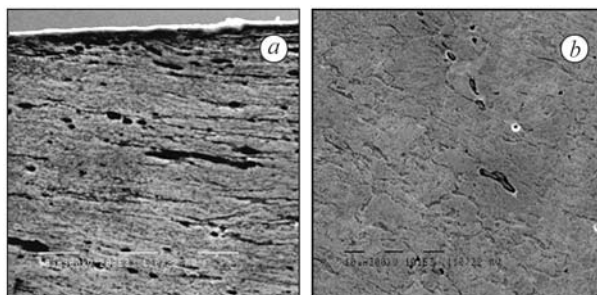


Рис. 3. Морфология неметаллических включений: a – приповерхностные слои металла ($\delta = 0 \dots 70 \mu\text{m}$); $\times 2020$; b – ОМ; $\times 1010$.

Fig. 3. Morphology of non-metallic inclusions: a – subsurface metal layers ($\delta = 0 \dots 70 \mu\text{m}$); $\times 2020$; b – base metal; $\times 1010$.

Сопоставление структурных состояний различных зон площадки катания (1К–4К) свидетельствует, что наименьшим сопротивлением трещинообразованию характеризуется металл зоны 3К на глубине от поверхности катания колеса до $250 \mu\text{m}$, что, по-видимому, вызвано структурными концентраторами напряжений, обусловленными неметаллическими включениями, и резкой переориентацией полосовых структур.

Тонкой структуре ОМ свойственна дисперсность субзеренной структуры ($0,3 \dots 0,5 \times 0,6 \dots 1,2 \mu\text{m}$), равномерное распределение дислокаций при сравнительно невысокой их плотности $\rho = (4 \dots 9) \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ (рис. 4а, б). В приповерхностных слоях зоны 2К ($\delta = 0 \dots 100 \mu\text{m}$) она несколько повышается (от $1 \cdot 10^{10}$ до $(4 \dots 6) \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$) без существенного дробления структуры (как зеренной, так и субзеренной), т.е. отсутствуют значительные градиенты по размерам структурных элементов и плотности дислокаций, а также структурные признаки локальных концентраторов внутренних напряжений (скопления дислокаций), которые могли бы стать очагами зарождения приповерхностных трещин. В поверхностных слоях зоны 3К ($\delta = 0 \dots 50 \mu\text{m}$) зафиксировано существенное дробление (фрагментация) феррито-перлитной структуры (до $0,13 \dots 0,67 \mu\text{m}$) (рис. 4с, д) и резкий рост плотности дислокаций ($\rho = 6 \cdot 10^{10} \dots (3 \dots 4) \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$), что более чем на порядок превышает таковую ОМ. Следует отметить формирование локальных очагов с очень высокой плотностью дислокаций ($\rho \sim (3 \dots 4) \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) в зонах переориентации перлитных полос от направления параллельно поверхности катания к ориентации в ОМ (рис. 4е, ф) и в зонах контакта крупнозернистых элементов структур, существенно отличающихся по свойствам, например, цементит–феррит, а также около раскатанных неметаллических включений сульфидного типа (рис. 4г, х). Таким образом, при эксплуатации железнодорожных колес у поверхности катания на глубине до $200 \mu\text{m}$ при интенсивном упрочнении металла в приповерхностных слоях формируются очаги зарождения и распространения трещин, структурно инициируемые мощными локальными дислокационными скоплениями в характерных структурных областях.

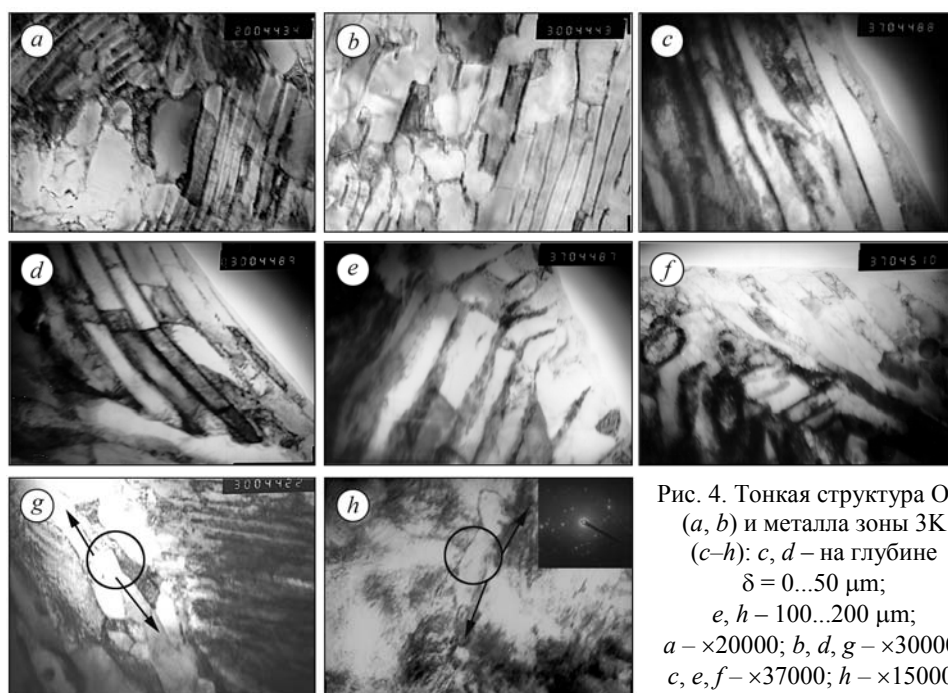


Рис. 4. Тонкая структура ОМ (a, b) и металла зоны 3К (c-h): c, d – на глубине $\delta = 0...50 \mu\text{m}$; e, h – 100...200 μm ; a – $\times 20000$; b, d, g – $\times 30000$; c, e, f – $\times 37000$; h – $\times 15000$.

Fig. 4. Fine structure of the base metal (a, b) and metal of zone 3K (c-h): c, d – at depth $\delta = 0...50 \mu\text{m}$; e, h – 100...200 μm ; a – $\times 20000$; b, d, g – $\times 30000$; c, e, f – $\times 37000$; h – $\times 15000$.

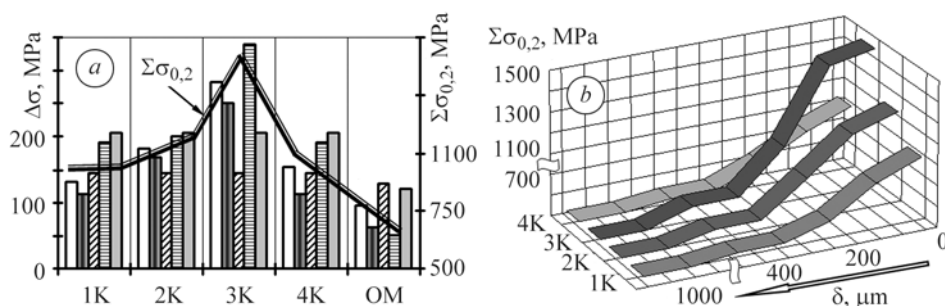


Рис. 5. Вклад различных составляющих ($\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_6$) структурного упрочнения в расчетное значение предела текучести ($\Sigma\sigma_{0,2}$) металла в различных зонах (1К–4К, ОМ) колеса после эксплуатации (a) и его изменение в зависимости от удаления от поверхности катания (b): □ – $\Delta\sigma_2$; ■ – $\Delta\sigma_3$; ▨ – $\Delta\sigma_4$; ▩ – $\Delta\sigma_5$; ■ – $\Delta\sigma_6$.

Fig. 5. Contribution of different components ($\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_6$) of structural strengthening to the calculated value of yield stress ($\Sigma\sigma_{0,2}$) of the metal in different zones (1K–4K, base metal) of the wheel after operation (a), and its variation with the distance from the roll surface (b): □ – $\Delta\sigma_2$; ■ – $\Delta\sigma_3$; ▨ – $\Delta\sigma_4$; ▩ – $\Delta\sigma_5$; ■ – $\Delta\sigma_6$.

Сравнением механических свойств ($\sigma_{0,2}$) на глубине до 200 μm и ОМ (при аналитической оценке вклада различных параметров структуры) обнаружено, что общий уровень $\Sigma\sigma_{0,2}$ по всем зонам площадки катания повышается в среднем на 65%, что связано с возрастанием вклада дислокационного (до 200...350 МПа), зеренного (до 140...280 МПа) и субструктурного (до 120...250 МПа) упрочнений (рис. 5a). В зоне 3К суммарное упрочнение $\Sigma\sigma_{0,2} = 1300...1500$ МПа, что в 1,7–2,4 раза выше, чем в ОМ. Это обусловлено влиянием диспергирования (фрагментации) структуры ($\Delta\sigma_3 = 150...375$ МПа), а также повышением плотности дислокаций ($\Delta\sigma_5 = 280...400$ МПа) в деформированных приповерхностных слоях (рис. 5a, b).

Роль структурных факторов проявляется также в изменении вязкости разрушения металла приповерхностных слоев железнодорожных колес в процессе эксплуатации. Установлено (рис. 6), что значение K_{1C}^* металла по всей зоне площадки катания на глубине δ до 200 μm снижается в среднем на 30%. Существенное его уменьшение (на 50%) при значительном повышении прочности приповерхностных слоев характерно для наиболее напряженной зоны площадки катания (3К).

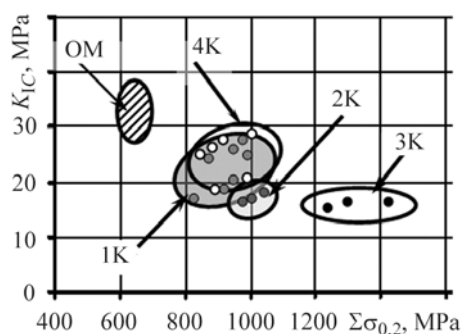


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Изменение расчетных прочности ($\Sigma\sigma_{0,2}$) и вязкости разрушения (K_{1C}^*) металла в наиболее нагруженных приповерхностных слоях ($\delta = 0 \dots 200 \mu\text{m}$) различных зон (1К–4К) в сравнении с ОМ колеса после эксплуатации.

Fig. 6. Variations in the calculated yield stress ($\Sigma\sigma_{0,2}$) and fracture toughness (K_{1C}^*) of metal in the most loaded subsurface layers ($\delta = 0 \dots 200 \mu\text{m}$) of different zones (1К–4К) compared to the base metal of the used wheel.

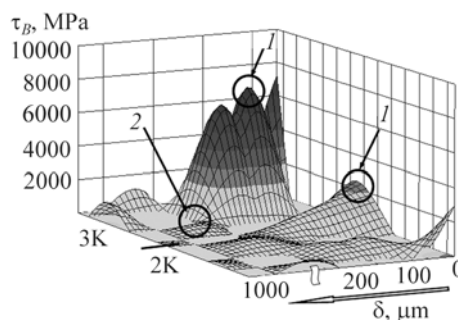


Рис. 7. Fig. 7.

Рис. 7 Локальные внутренние напряжений (τ_B), формирующиеся в приповерхностных слоях ($\delta = 0 \dots 200 \mu\text{m}$) металла колеса (зон 2К и 3К), и их изменение при удалении от поверхности катания: 1 – границы сопряжения цементит/феррит; 2 – феррит/перлит.

Fig. 7. Local internal stresses (τ_B), forming in the subsurface layers ($\delta = 0 \dots 200 \mu\text{m}$) of the wheel metal (zones 2К and 3К), and their variation with distance from the roll surface: 1 – boundaries of conjugation cement/ferrite; 2 – ferrite/pearlite.

ВЫВОДЫ

Установлено, что после эксплуатации железнодорожных колес в металле у поверхности катания на глубине до 1 mm формируются дисперсные структуры (феррито-карбидная смесь); параллельные к поверхности катания полосовые структуры с переориентацией по глубине; раскатанные неметаллические включения, на границах которых плотность дислокаций повышается до $(3 \dots 4) \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2}$.

Наиболее заметно структура металла изменения изменяется в зоне перехода от площадки катания к гребню, максимально на глубину до 200...300 μm , что приводит к значительному упрочнению приповерхностных слоев (в 1,7–2,3 раза), снижению уровня вязкости разрушения (на 50%) и резкому повышению (в 3–4 раза) локальных внутренних напряжений по сравнению с исходным металлом, что объясняет наличие микротрещин в металле приповерхностных слоев. Для повышения надежности колес, подвергаемых восстановительной наплавке, необходимо предварительно удалять поверхностный слой металла в месте наплавки на глубину не менее 1,0 mm, что исключит образование здесь трещин.

РЕЗЮМЕ. Подано результати дослідження металу біля поверхні кочення суцільнокатаних залізничних коліс після експлуатації. Показано, що найбільше структура (фазові складники зеренної, субзеренної та дислокаційної структур, фазові виділення тощо) по ширині робочої поверхні коліс змінюється в зоні переходу до гребеня та на глибину до

200...300 μm (від поверхні кочення). Аналітичною оцінкою зміни міцності та тріщиностійкості металу різних зон коліс виявлено, що окремим зонам відповідає значне зміцнення приповерхневих шарів, різке збільшення локальних внутрішніх напружень до рівня теоретичної міцності та, відповідно, зменшення тріщиностійкості.

SUMMARY. The results of investigation of the metal near the roll surfaces of continuously-rolled railway wheels after operation are presented. It is shown that the major changes in a structure (phase components, grain, sub-grain and dislocation structures, phase precipitates etc.) in the width of the wheel working surface occur in the zone of transition from the roll surface to the flange and propagate to a depth of 200...300 μm (from the roll surface). As established by analytical evaluation of changes in strength and crack resistance properties of metal in different zones of the railway wheels on the basis of structural examinations, the individual zones correspond to substantial strengthening of the sub-surface layers, dramatic increase in local internal stresses to the value of theoretical strength and, accordingly, decrease in crack growth resistance.

1. *Влияние термических циклов сварки и внешнего нагружения на структурно-фазовые изменения и свойства соединений стали 17Х2М* / Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, В. Д. Позняков и др. // Автомат. сварка. – 2009. – №7. – С. 21–29.
2. *Критерий оценки механических свойств соединений разнородных материалов* / Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, В. В. Арсенюк, Е. Н. Бердникова // Сб. Междунар. конф. “Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах”; 16–20 сент. 2002 г., пос. Кацивели, Крым, Украина. – К.: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2002. – С. 107–113.
3. *Структурный подход к оценке механических свойств в ЗТВ соединений сталей и сплавов* / Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, В. В. Арсенюк и др. // Там же; 13–17 сент. 2004 г. – К., 2004. – С. 174–179.
4. *Структурные факторы, определяющие свойства прочности, пластичности и разрушение сварных соединений* / Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, В. Д. Позняков и др. // Там же; 27–30 мая 2008 г. – К., 2009. – С. 87–94.
5. *Структурный критерий оценки прочности, пластичности, трещиностойкости металлов, сплавов, композиционных материалов и их сварных соединений* / Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, В. Д. Позняков и др. // Зб. праць IV Міжнар. конф. “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”, черв. 2009 р. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 447–451.
6. *Сузуки Х.* О пределе текучести поликристаллических металлов и сплавов // Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1967. – С. 255–260.
7. *Эшби И. Ф.* О напряжении Орована // Физика прочности и пластичности. – М.: Металлургия, 1972. – С. 88–107.
8. *Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М.* Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 307 с.
9. *Конрад Г.* Модель деформационного упрочнения для объяснения влияния величины зерна на напряжение течения металлов // Сверхмелкое зерно в металлах / Под ред. Л. К. Гордиенко. – М.: Металлургия, 1973. – С. 206–219.
10. *Армстронг Р. В.* Прочностные свойства металлов со сверхмелким зерном // Там же. – С. 11–40.
11. *Petch N. J.* The cleavage strength of polycrystalline // J. Iron and Steel Inst. – 1953. – **173**, № 1. – P. 25–28.
12. *Orowan E.* Dislocation in Metals. – New York: AIME, 1954. – 103 p.
13. *Ashby M. F.* Mechanisms of deformation and fracture // Adv. Appl. Mech. – 1983. – **23**. – P. 118–177.
14. *Келли А., Николсон Р.* Дисперсное твердение. – М.: Металлургия, 1966. – 187 с.
15. *Ebelling R. and Ashby M. F.* Yielding and flow of two phase copper alloys // Phil. Mag. – 1966. – **13**, № 7. – P. 805–809.
16. *Романив О. Н.* Вязкость разрушения конструкционных сталей. – М.: Металлургия, 1979. – 176 с.
17. *Теоретическое и экспериментальное исследование дисклинаций* / Н. А. Конева, Д. В. Лычагин, Л. А. Теплякова, Э. В. Козлов – Л.: Изд-во ЛФТИ, 1986. – 116 с.
18. *Conrad H.* Effect of grain size on the lower yield and flow stress of iron and steel // Acta Metallurgica. – 1963. – **11**. – P. 75–77.

Получено 20.07.2011