

Л. И. ВАКУЛЕНКО (Вагонное депо «Нижнеднепровск-Узел»),  
В. Г. АНОФРИЕВ (ДИИТ)

## ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

Рассмотрены вопросы относительно особенностей эксплуатации цельнокатаных железнодорожных колес с повышенным уровнем прочности и разным структурным состоянием.

*Ключевые слова:* железнодорожное колесо, сталь, прочность, структура, эксплуатация

В процессе эксплуатации железнодорожные колеса и бандажи по поверхности катания подвергаются достаточно большим суммарным пластическим деформациям [1], с высокой степенью неоднородности ее распределения [2]. Накопление дефектов кристаллического строения в углеродистых сталях сопровождается возрастанием твердости металла с одновременным снижением пластических характеристик [3]. С учетом существования предельно допустимой концентрации накопленных дефектов кристаллического строения [4], процесс пластического деформирования при приближении к указанной степени дефектности, сопровождается достаточно быстрым переходом металла в состояние с низким сопротивлением зарождению трещины.

На переход металла железнодорожных колес в хрупкое состояние, кроме степени наклепа от деформации, определенное значение имеют температура окружающей среды и режимы эксплуатации [5]. Известно, что одновременное снижение температуры деформации и повышение степени пластической деформации способствуют ускорению процессов зарождения очагов разрушения в металлических материалах с различным структурным состоянием [3]. Аналогичное за характером влияние наблюдается и при повышении скорости нагружения металла [4].

Кроме величины пластической деформации, определенное влияние на структуру и свойства металла железнодорожных колес наблюдается от степени его разогрева и условий охлаждения при эксплуатации колес. Так, при торможении подвижного состава, уже незначительные отклонения от условий одновременного срабатывания тормозных элементов, может приводить к очень быстрому нагреву металла колеса (в объемах вблизи с поверхностью катания) до достаточно высоких температур [3]. Указанное повышение температуры может достигать уровня начала развития процессов фазовых превращений, что при высоком градиенте тем-

ператур обязательно приведет к возникновению остаточных внутренних напряжений.

Длительный процесс разогрева металла при последующем торможении может сопровождаться локальным сдвигом одних объемов металла колеса относительно других, что при дальнейшей эксплуатации приведет к формированию очагов повреждения на поверхности катания колеса.

С другой стороны, даже в случае отсутствия условий проскальзывания колеса по рельсу, после прекращения торможения ускоренное охлаждение разогретого металла набегающим потоком воздуха и теплоотводом в более холодные внутренние объемы металла колеса, могут привести к смене механизма структурных превращений. Кроме диффузионного, превращение может развиваться по промежуточному или даже по сдвиговому механизмам. Учитывая ограничения по накоплению дефектов кристаллического строения, металл с указанными структурами должен достаточно быстро перейти в хрупкое состояние. На основании этого можно с уверенностью полагать, что процесс накопления дефектов кристаллического строения в металле железнодорожных колес и бандажей при эксплуатации, является вполне закономерным явлением, которое необходимо учитывать при разработке технологии их изготовления. На основании этого, перспективными представляются предложения, направленные на снижение темпа накопления дефектов при эксплуатации железнодорожных колес.

*Целью настоящей работы* является оценка влияния степени деформации по поверхности катания железнодорожных колес различной прочности на формирование повреждений при эксплуатации.

В условиях Украины, для изготовления железнодорожных колес, в основном используются стали с содержанием углерода от 0,55 до 0,65 %. По стехиометрии объемная доля структурно свободного феррита в указанных сталях

может достигать 25...30 %, остальное – перлитная составляющая (рис. 1).



Рис. 1. Структура стали с 0,6 % углерода после ускоренного охлаждения до температуры 650 °С. Увеличение 800

Учитывая аддитивный характер влияния структурных составляющих на прочностные свойства стали, диспергирование фаз сопровождается закономерным увеличением прочности металла [3]. С другой стороны, не менее значительное влияние наблюдается со стороны морфологии структурных составляющих и, в первую очередь карбидной фазы. По сравнению с цементитом глобулярной формы, который остается практически неизменным после значительных пластических деформаций, пластинчатый – наоборот, способен выдерживать значительные пластические деформации без разрушения [4]. Указанная способность цементита определяет сопротивление металла железнодорожного колеса формированию повреждений по поверхности катания. Так, с повышением дисперсности перлита возрастает энергия зарождения трещины [4], ресурс накопления дефектов кристаллического строения при холодном деформировании. На основании этого, для среднеуглеродистых сталей с перлитной структурой, которые используются для изготовления железнодорожных колес, основным структурным элементом является толщина ферритного промежутка перлитной колонии.

Одним из направлений повышения прочностных свойств, сопротивления зарождению трещин, износостойкости углеродистых сталей, кроме легирования, является использование термического упрочнения. Технология представляет собой ускоренное охлаждение элементов железнодорожного колеса, в зависимости от формы их сечения и условий нагружения при эксплуатации. Возрастание интенсивности теплоотвода при охлаждении обода железнодорожного колеса, сопровождается измельчением перлитных колоний,

уменьшением толщины ферритного промежутка перлита. Одновременно с этим, можно наблюдать уменьшение количества структурно свободного феррита. Перечисленные изменения структурных составляющих металла приводят к возрастанию прочностных характеристик железнодорожного колеса.

После достижения в определенных объемах железнодорожного колеса критической скорости охлаждения, могут начинаться формироваться участки с признаками превращения по сдвиговому механизму (рис. 2). Формирование структур по промежуточному или сдвиговому механизму является направлением по дальнейшему повышению прочности металла после исчерпания возможности упрочнения за счет использования перлитных структур.



Рис. 2. Структура углеродистой стали с 0,6 % С после ускоренного охлаждения до 575 °С. Увеличение 800

Одним из наиболее перспективных направлений достижения высокопрочного состояния в сталях, по сравнению с улучшением (закалка с отдельного нагрева с последующим отпуском), является технология термомеханического упрочнения [6]. Указанная технология основана на наследовании структурами превращения при термическом упрочнении деформированного состояния аустенита. Необходимо отметить, что стали после термомеханической обработки обладают при достаточно высоком уровне прочностных свойств, повышенным запасом пластичности и трещиностойкости. Однако, как следует из анализа экспериментальных данных [6], широкого распространения получили изделия с указанными структурами, когда условия термомеханического упрочнения может быть реализовано технологически.

Анализ технологии изготовления катаных железнодорожных колес в современных условиях указывает на достаточные трудности в реализации условий термомеханического упрочнения.

Дело в том, что в процессе отдельного нагрева после окончания горячей формообразующей деформации, состояние наклепа аустенита в железнодорожном колесе практически не сохраняется. Кроме этого, с учетом больших сечений металла (например, обод колеса) достигнуть критической скорости охлаждения на глубинах более 10...15 % от общей толщины обода, представляется достаточно трудным процессом. Таким образом, по толщине обода железнодорожного колеса, в результате термического упрочнения (принудительное охлаждение водой обода) неизбежно будет формироваться достаточно неравномерная структура. Структура, в зависимости от условий теплоотвода от поверхности будет меняться в определенной последовательности, в зависимости от нагрева до различных температур и сформированных по сдвиговому, промежуточному или диффузионному механизмам. Учитывая, что железнодорожные колеса, равно как бандажи и рельсы, в процессе эксплуатации подвергаются достаточно сложным воздействиям высоких температур нагрева и пластических деформаций [1, 2, 7], выбор оптимального структурного состояния для высокопрочных колес является достаточно сложным решением. Обусловлено приведенное положение недостаточным сопротивлением структур сформированных по сдвиговому механизму, зарождению повреждений металла колеса в сложных условиях нагружения. Кроме этого, сформированная структурная неоднородность по толщине обода железнодорожного колеса, по мере его износа в результате эксплуатации или после восстановления профиля катания, может сопровождаться переводом металла колеса по комплексу свойств от упрочненного состояния в состояние близкое к горячекатаному. На основе этого, после операции восстановления поверхности катания, неизбежно возникнут отклонения в поведении металла в процессе наклепа при эксплуатации. Можно с уверенностью ожидать изменения и в развитии процессов формирования очагов разрушения и последующего их роста. Перечисленные факторы неизбежно приведут к снижению эксплуатационной безопасности колес по сравнению с комплексом свойств, полученным сразу после термического упрочнения. На основе этого представляется целесообразным более детально рассмотреть поведение металла колеса со структурами повышенного и высокопрочного состояний в сложных условиях взаимодействия с рельсом.

Учитывая существование качественной зависимости износа колеса от твердости металла,

повышение твердости должно способствовать снижению указанной характеристики. Однако, увеличение прочностных свойств только одной составляющей пары «колесо – рельс» неизбежно приведет к росту износа другой составляющей. Анализ обобщенных данных [2] указывает на существование определенного соотношения между твердостью колеса и рельса, что определяет условия их минимального износа. Для условий минимального износа, соотношение по твердости металла колеса к твердости рельса должно составлять при проскальзывании до 1 % примерно 1,2, а для проскальзывания до 10 %: 1,0...1,1. На основании этого вопросы повышения твердости и прочностных свойств колес должны решаться только в комплексе с аналогичными решениями для рельсов. Более того учитывая, что одинаковый уровень твердости и прочностных характеристик в сталях может быть достигнут при разных структурных состояниях, дополнительным условием может быть стремление к подобию внутреннего строения металла колес и рельсов. Обусловлено приведенное положение зависимостью реакции (деформационным упрочнением) металла колес, бандажей и рельсов в месте контакта от их структурного состояния [1, 2]. Особенную актуальность приобретает указанное положение для сложных реальных условий эксплуатации, таких как циклическая смена температур, напряжений в зоне контакта, агрессивного влияния окружающей среды. Подтверждается это опытом использования железнодорожных колес с повышенной и высокой прочностью.

Так, при замене железнодорожных колес с пределом прочности до 1000 МПа (типа КП-2) на высокопрочные с пределом прочности до 1100...1400 МПа (типа КП-Т), было обнаружено повышение износостойкости на 30...40 %. Однако, как показали ходовые испытания, на колесах КП-Т существенно возросло количество дефектов по поверхности катания, таких как ползуны, выщерблины и т.д. [8]. Если учесть, что высокопрочное состояние металла колеса КП-Т достигали за счет повышения содержания углерода до 0,63...0,67 %, марганца до 0,7...0,8 %, с одновременным микролегированием ванадием (0,09...0,1 %), при уровне твердости 325...340 НВ, величина трещиностойкости, особенно при пониженных температурах, была заметно пониженной. Одно из объяснений снижения сопротивления формированию дефектов по поверхности катания в указанных колесах может быть развитие пластического течения металла в приповерхностных с ободом

об'ємах [1, 2, 8]. Действительно, если учесть что в процессе торможения тонкий слой металла в зоне контакта способен разогреваться до температур начала фазовых превращений, можно ожидать различного его поведения при высокотемпературной деформации. Экспериментально установлено, что скорость снижения прочностных свойств высокопрочной стали, начиная от температур 500...525 °С превосходит аналогичную характеристику стали КП-2 [8]. На основе этого становится понятным, что одной из причин прироста количества повреждений по поверхности катания высокопрочных колес может быть повышенная пластичность разогретого металла. Кроме роста уровня остаточных внутренних напряжений, металл железнодорожного колеса будет дополнительно подвергаться воздействию от асимметрии цикла нагружения. Таким образом, совместное влияние указанных факторов должно привести к вполне закономерному ускорению зарождения трещин различной природы происхождения. Дополнительные свидетельства роста хрупкости металла подтверждаются данными по снижению сопротивления металла высокопрочных железнодорожных колес процессам зарождения трещин усталостного характера [5, 8].

#### БИБЛІОГРАФІЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрейко, І. О. Дослідження пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс [Текст] / І. О. Андрейко, В. В. Кулик, В. І. Прокопеч // *Машинознавство*. – 2011. – № 2. – С. 30–33.
2. Дефекти залізничних коліс [Текст] / І. О. Вакуленко [та ін.]. – Дніпропетровськ: Маковецький, 2009. – 112 с.
3. Вакуленко, І. А. Морфологія структури і деформационне упрочнення сталі [Текст] / І. А. Вакуленко, В. І. Большаков. – Д.: Маковецький, 2008. – 196 с.
4. Бабич, В. К. Деформационне старіння сталі [Текст] / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, І. Е. Долженков. – М.: Металлургія, 1972. – 320 с.
5. Низькотемпературна циклічна тріщиностійкість сталей залізничних коліс [Текст] / О. П. Остап [та ін.] // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2008. – № 4. – С. 52-57.
6. Бернштейн, М. Л. Термомеханіческая обробка металів і сплавів [Текст] / М. Л. Бернштейн. – М.: Металлургія, 1968. – Т. 1, 2. – 1171 с.
7. Андрейко, І. М. Структура та опір руйнуванню сталей в різних зонах залізничних коліс [Текст] / І. М. Андрейко, О. П. Остап, В. В. Кулик // *Машинознавство*. – 2008. – № 5. – С. 18–21.
8. Остап, О. П. Проблеми експлуатаційної надійності і довговічності високоміцних залізничних коліс [Текст] / О. П. Остап, І. М. Андрейко, В. В. Кулик // *Тези доп. 71-ї Міжн. наук.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. – Д.: ДПТ, 2011. – С. 368-370.

Поступила в редколлегию 12.10.2011.  
Принята к печати 20.10.2011.

Л. І. ВАКУЛЕНКО, В. Г. АНОФРІЄВ

## ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ КАТАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ

Розглянуті питання стосовно особливостей експлуатації суцільно катаних залізничних коліс з підвищеним рівнем міцності та різним структурним станом.

*Ключові слова:* залізничне колесо, сталь, міцність, структура, експлуатація

L. I. VAKULENKO, V. G. ANOFRIEV

## THE DAMAGE AT EXPLOITATION OF HIGH STRENGTH ROLLING RAIL WHEELS

The observed question of the use of high strength rolling railway wheels with different state structures in rolling stock.

*Keywords:* railway wheels, steel, strength, structure, exploitation