

Л. И. ВАКУЛЕНКО (Вагонное депо «Нижнеднепровск-Узел», Днепропетровск),
Ю. Л. НАДЕЖДИН (ДИИТ)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СТАЛИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

В работе показано, что увеличение содержания углерода в стали облегчает процесс формирования дефектов на поверхности катания железнодорожных колес при эксплуатации.

Ключевые слова: железнодорожное колесо, сталь, углерод, структура, эксплуатация

Современный уровень развития промышленного производства сопровождается непрерывным ростом интенсивности эксплуатации железнодорожного транспорта. Одновременное повышение удельной нагрузки на колёсную пару и скорости движения транспорта, приводят к увеличению повреждаемости железнодорожных колёс и бандажей в процессе эксплуатации. Учитывая изменения состояния металла колеса в месте контакта с рельсом, при движении на участках с ускорением неизбежны эффекты проскальзывания [1]. В зависимости от интенсивности высвобождаемой энергии величина проскальзывания может достигать значительных значений. В этом случае в площади контакта, кроме нормальной составляющей, дополнительно возникают касательные напряжения. Соотношение и уровень указанных напряжений обуславливают развитие процессов трения и износа железнодорожных колёс при эксплуатации. Ограниченные размеры пятна контакта колесо – рельс, уже при незначительном проскальзывании способно обеспечивать резкий разогрев металла до относительно высоких температур в тонком поверхностном слое [2, 3]. На основании этого, для условий высоких скоростей движения железнодорожного транспорта и значительных контактных напряжений, даже кратковременное проскальзывание может быть достаточным для резкого повышения температуры до уровня начала фазовых изменений в металле колеса. В указанных объёмах металла обода колеса, неизбежное развитие процессов структурных превращений будет сопровождаться обязательным изменением комплекса свойств [4]. В зависимости от интенсивности выделяемой энергии в месте проскальзывания, длительности события и скорости охлаждения металла после завершения указанного явления, структурные изменения в приповерхностном слое обода колеса будут иметь различные последствия [5].

Учитывая разнообразие возникающих дефектов по поверхности катания колес, представляет определенный интерес анализ условий возникновения повреждений железнодорожных колес в местах так называемого «белого слоя» [5]. Проведенными исследованиями установлена природа формирования указанных участков: зарождение мартенситной фазы при охлаждении. Неизменным условием ее формирования считается достижение высоких температур нагрева при значительных по величине контактных напряжениях. На основании этого, с целью объяснения необходимости ограничения по содержанию углерода углеродистой стали, предназначенной для изготовления железнодорожных колёс различного уровня прочности, необходимо оценить условия развития качественных структурных изменений при нагреве и охлаждении металла.

Материалом для исследования служили фрагменты железнодорожных колёс КП-2 и КП-Т с характерными поверхностными повреждениями в виде выщерблин после эксплуатации. Содержание углерода в колёсной стали КП-2 составляло 0,6 %, а в КП-Т 0,69 %.

Учитывая, что процесс формирования выщерблин металла по поверхности катания колеса в определенной мере обусловлен достижением внутренними напряжениями уровня временного сопротивления разрушению, представляется необходимым изучить причины, способствующие возникновению указанных напряжений.

Так, если блокировать объёмные изменения металла при нагреве, будет происходить неизбежное увеличение внутренних напряжений. Дополнительный рост указанных напряжений может обеспечиваться развитием процессов изменения фазового состава стали. После превышения температурной нагрева критического значения начала полиморфного превращения, формирование аустенитной фазы будет сопро-

вождаться обязательным объёмным эффектом. С другой стороны, в случае теплоотвода от поверхности нагретого металла со скоростями вблизи критического значения, будут достигаться условия формирования структур по сдвиговому или промежуточному механизмам. Кроме объёмных эффектов, указанные структурные изменения сопровождаются обязательным ростом прочностных свойств и существенным снижением сопротивления зарождению трещин [6]. Учитывая высокие уровни градиента деформаций и контактных напряжений, после формирования даже незначительного по величине проскальзывания колеса по рельсу, становится достаточно для повышения температуры в металле для начала формирования аустенитной фазы. Таким образом, в тонком приповерхностном слое металла обода появляется фаза необходимая для структурных превращений по сдвиговому механизму. Действительно, если считать, что основной теплоотвод от нагретого участка обода, даже в случае не учета обдува обода набегающим потоком воздуха, обеспечивается присутствием соседних холодных объёмов, условия указанных структурных превращений могут быть достигнуты.

Так, из анализа диаграммы железо – углерод следует, что завершение превращения перлитных участков в аустенит наблюдается уже при температурах незначительно превышающих A_{c1} [7]. Для стали с 0,6 % С в изотермических условиях, при указанной температуре структура будет состоять примерно из 75 % аустенита и 25 % зерен структурно свободного феррита. Дальнейший нагрев такой стали, примерно выше $770...775\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($A_{c3} = 766\text{ }^{\circ}\text{C}$), приведёт к формированию полностью аустенитной структуры. С другой стороны, увеличение содержания углерода до значений соответствующих максимальной концентрации, как для колёс типа КП-Т (0,69 %) приведёт к более существенным изменениям фазового состава при нагреве. Так во-первых, объёмная доля аустенита после нагрева выше A_{c1} будет примерно на 10 % выше аналогичной величины стали с 0,6 % С. Следовательно, после нагрева до одинаковых температур (выше A_{c1}), в стали с повышенным содержанием углерода доля аустенита будет составлять более 86 % и лишь 14 % это структурно свободный феррит. Во вторых, с ростом содержания углерода в стали температура завершения превращения аустенита при нагреве (A_{c3}) снижается. Таким образом, рост содержания углерода в стали для колёс типа КП-Т до

0,69 % С по сравнению с 0,6 % С будет сопровождаться не только увеличением объёмной доли аустенита, но и снижением температуры завершения аустенитного превращения: для стали с 0,69 % A_{c3} составляет значение лишь $743\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8].

На основании проведенного анализа можно с уверенностью полагать, что в сталях с повышенным содержанием углерода, при проскальзывании колеса по рельсу, будет не только возрастать объёмная доля аустенитной фазы, но и формироваться более толстый слой аустенита. Подтверждается приведенное положение ростом объёмной доли аустенита по стехиометрии и снижением температуры A_{c3} с увеличением концентрации углерода в стали.



0 20 40 60 80 100 мм

Рис. 1. Внешний вид выщерблены, сформированной при эксплуатации железнодорожного колеса с содержанием углерода 0,69 %

После завершения проскальзывания, начинается этап охлаждения разогретого объёма металла обода колеса. Скорость охлаждения обеспечивается теплоотводом от нагретой поверхности набегающим потоком воздуха (при движении колеса) и холодными, более удаленными от поверхности объёмами металла. Учитывая рост склонности стали к формированию структур по сдвиговому механизму с увеличением содержания углерода, представляет интерес оценить условия возникновения указанных структур при охлаждении металла после проскальзывания.

Так, с ростом содержания углерода в аустените его стабильность при охлаждении возрастает [7]. На основании этого, критическая скорость охлаждения для формирования мартенситной структуры должна снижаться. Температура начала мартенситного превращения (M_n) будет также уменьшаться (для стали с 0,69 % С $M_n = 255...300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8]). Критическая скорость

охлаждения для исследуемых сталей составляет примерно 20...25 °С/с. Не останавливаясь на деталях, оценим скорость охлаждения нагретого металла на спокойном воздухе. При скорости охлаждения в воде (V_1), для интервала температур 650...550 °С указанная характеристика составляет значение примерно 550 °С/с. Учитывая, что эффективность охлаждения на воздухе по сравнению с водой составляет 0,03 [8], для воздуха скорость охлаждения (V_2) в указанном температурном интервале, будет примерно 16,5 °С/с. Для температурного интервала начала мартенситной реакции (200...300 °С) V_2 составляет около 10 °С/с. Однако, с учетом уже не большого набегающего потока воздуха, либо пониженных температур окружающей среды (зимний период эксплуатации колёс) и дополнительного теплоотвода в более глубокие холодные слои металла обода, скорость охлаждения может уверенно достигнуть требуемых величин. На основании этого можно полагать, что незначительные добавки по содержанию углерода должны способствовать росту вероятности формирования структур по сдвиговому или промежуточному механизмам.

Наблюдаемые качественные изменения структурного состояния металла подтверждаются результатами анализа процессов формирования повреждений железнодорожных колёс различного уровня прочности [3,4]. Кроме объяснений по зависимости числа ползунов от эффекта пластификации металла, который обусловлен ускорением аустенитизации с увеличением содержания углерода в стали [2], представляется целесообразным учитывать различия в степени разупрочнения при нагреве холоднодеформированного металла с разным структурным состоянием.

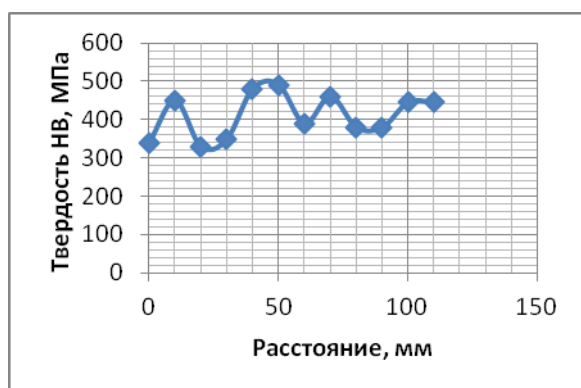


Рис. 2. Характер изменения твердости металла после формирования выщерблины

Учитывая, что при формировании выщерблины на поверхности катания колеса должно происходить изменение системы внутренних напряжений, наблюдаемое явление обязательно найдет отражение на комплексе свойств металла. Если рассматривать объемы металла, которые подвергаются значительным нагревам (ползуны – светлые участки, рис. 1) с последующим ускоренным охлаждением, прирост прочностных свойств (твёрдость рис. 2) обусловлен формированием структур мартенсито-бейнитного типа. Достаточно быстрое исчерпание ресурса накопления дефектов кристаллического строения в указанных объемах металла, при последующем (после формирования ползуна) качении колеса, возникает выщерблина. Таким образом, если при возникновении ползуна температура разогрева металла возрастает от периферийных участков к середине, последующее быстрое охлаждение должно привести к монотонному повышению твёрдости от границы к середине ползуна. Указанное положение подтверждается экспериментально (рис. 2). С другой стороны, отсутствие металла после возникновения выщерблины будет сопровождаться обязательными релаксационными процессами в холоднодеформированном металле по поверхности катания. При этом следует ожидать, что в железнодорожных колёсах с повышенным содержанием углерода, прирост твёрдости в середине ползуна должен быть выше по сравнению с низкоуглеродистым металлом, при одинаковых условиях нагрева и охлаждения [4, 5]. Следовательно, развитие релаксационных процессов с исходной мартенсито-бейнитной структурой металла должно иметь большее развитие по сравнению с пониженным содержанием углерода в стали. Представленная схема изменения твёрдости металла обода, после возникновения выщерблины наблюдается экспериментально. По поверхности катания железнодорожного колёса, металл после возникновения ползуна и формирования выщерблины имеет пониженные значения твердости по сравнению с участками без повреждений. При этом, чем выше содержание углерода и уровень твердости после эксплуатации колеса, тем больше наблюдается снижение твёрдости металла в середине выщерблины. Для колёс типа КП-Т, максимальное снижение твёрдости от значений на границе ползуна и выщерблины до середины выщерблины достигало уровня 30...40 %, в то время как для колёс типа КП-2 указанная величина примерно в 2 раза меньше.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ларин, Т. В. Износ и пути продления срока службы бандажей железнодорожных колес [Текст] / Т. В. Ларин. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – 125 с.
2. Кривошеев, В. Н. Результаты исследования эксплуатационной стойкости цельнокатаных колес пассажирских и грузовых вагонов [Текст] / В. Н. Кривошеев // В кн.: Вопросы производства и эксплуатации железнодорожных колес и осей. – Д., 1971. – С. 101–106.
3. Иванов, С. Г. Основные направления по повышению надежности и увеличению ресурса цельнокатаных колес [Текст] / С. Г. Иванов // В кн.: «Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути. Колесо – рельс 2003». – М.: Интекст, 2003. – С. 124–127.
4. Вакуленко, Л. І. Оцінка ступеня знеміцнення при відпуску загартованої колісної сталі [Текст] / Л. І. Вакуленко, Ю. Л. Надеждін // Вісник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010. – С. 259–261.
5. Дефекти залізничних коліс [Текст] / І. О. Вакуленко [та ін.]. – Д.: Маковецький, 2009. – 112 с.
6. Вакуленко, І. А. Морфологія структури і деформационне упрочнення сталі [Текст] / І. А. Вакуленко, В. І. Большаков. – Д.: Маковецький, 2008. – 196 с.
7. Кузін, О. А. Металознавство та термічна обробка металів [Текст] / О. А. Кузін, Р. А. Яцюк. – К.: Основа, 2005. – 324 с.
8. Шмыков, А. А. Справочник термиста [Текст] / А. А. Шмыков. – М.: ГНТИ, 1952. – 287 с.
9. Андрейко, І. М. Дослідження пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс [Текст] / І. М. Андрейко, В. В. Кулик, В. І. Прокопець // Машинознавство. – 2011. – № 2. – С. 30–33.

Поступила в редколлегию 06.12.2011.
Принята к печати 15.12.2011.

Л. І. ВАКУЛЕНКО, Ю. Л. НАДЕЖДІН

ОЦІНКА ВПЛИВУ ВМІСТУ ВУГЛЕЦЮ В СТАЛІ НА ФОРМУВАННЯ ДЕФЕКТІВ НА ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

В роботі показано, що збільшення вмісту вуглецю в сталі полегшує процес формування дефектів на поверхні кочення залізничних коліс при експлуатації.

Ключові слова: залізничне колесо, сталь, вуглець, структура, експлуатація

L. I. VAKULENKO, Yu. L. NADEZH DIN

ESTIMATE INFLUENCE OF CONTENT CARBON ON THE FORMATION DEFECTS ON THE SURFACE RAIL WHEELS AT EXPLOITATION

The observed questions of estimate influence content of carbon in steel on the formation defects on the surface rail wheels at exploitation.

Keywords: rail wheel, steel, carbon, structure, exploitation