

УДК 621. 771.294.64:621.785.55

**ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА СНИЖЕНИЕ
ПРОЧНОСТИ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ**

И. А. Вакуленко, О. А. Чайковский*, к. т. н., доц.

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта им. акад. В. Лазаряна*

**ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства
и архитектуры»*

Постановка проблемы

В настоящее время тенденция повышения нагрузки на ось колесной пары обуславливает использование железнодорожных колес с повышенным сопротивлением процессам изнашивания. По сравнению с введением в состав сталей дополнительных легирующих добавок, определенного повышения прочностных характеристик можно достигнуть за счет использования технологий термического либо термомеханического упрочнения [1]. На основании этого вопрос определения оптимального структурного состояния металла следует рассматривать как достаточно актуальный.

При разработке технологии термического упрочнения обода железнодорожного колеса следует учитывать достаточно значительное сечение металла, что может рассматриваться как своего рода ограничение по достижению необходимой скорости охлаждения. На основании этого неизбежный градиент температур будет определять скорость охлаждения, структурное состояние и связанный с ним комплекс свойств металла. Более того, величина расстояния объемов металла от поверхности основного тепловода будет определять механизм развития процессов структурных превращений по толщине обода колеса при его принудительном охлаждении. Известные результаты анализа микроструктуры металла по сечению обода [1] подтверждают приведенное положение. В зависимости от степени приближения скорости охлаждения к критическому значению, морфология и дисперсность структурных составляющих углеродной стали будет изменяться в широком диапазоне.

С другой стороны, в процессе эксплуатации железнодорожного колеса объемы металла поблизости с поверхностью катания подвергаются достаточно значительным пластическим деформациям. На основании износа колеса, проведения работ по восстановлению его профиля катания, металл на поверхности катания будет в действительности уже соответствовать более отдаленным (от первоначальной поверхности катания) объемам, по сравнению с состоянием сразу после термоупрочнения. В этом случае при последующей эксплуатации колеса, темп прироста количества дефектов кристаллического строения и однородность их расположения будут определять условия формирования очагов повреждений, после исчерпания металлом ресурса накопления дефектов. На основании этого использование технологий, позволяющих обеспечить снижение уровня накопленных дефектов кристаллического строения в металле колеса, могут рассматриваться как направление повышения ресурса и безопасности его эксплуатации. По сравнению с термическими способами разупрочнения

холоднодеформированного металла, известны альтернативные технологии, такие как знакопеременное деформирование [2], обработки с использованием магнитного и электрического полей [3].

Цель работы

Оценка возможности использования электрической импульсной обработки для снижения степени наклепа железнодорожного колеса после определенного срока эксплуатации.

Материал и методики исследований

Материалом для исследования служила сталь 60, фрагмента обода железнодорожного колеса с 0,60 % C; 0,77 % Mn; 0,35 % Si; 0,025 % P; 0,026 % S; 0,12 % Cr; 0,005 % Al, производства ОАО «Итерпайп» НТЗ. Обработку импульсами электрического тока металла колеса проводили на специальном оборудовании в условиях предприятия ОАО ДС (г. Николаев). Твердостью по Виккерсу оценивали прочность металла. Микроструктуру исследовали под световым и электронным микроскопами, параметры тонкого кристаллического строения металла определяли с использованием методик рентгеновского структурного анализа.

Изложение основного материала

Интенсивный теплоотвод при ускоренном охлаждении сопровождается изменением структурного состояния металла по сечению обода железнодорожного колеса. В зависимости от степени отклонения достигаемой скорости охлаждения от критического значения, морфология и дисперсность структурных составляющих стали изменяются в широком диапазоне. Учитывая достижение повышенных скоростей принудительного охлаждения, структура вблизи с поверхностью катания колеса представляет собой подобие реечного строения, с выделением по границам реек и внутри них мелкодисперсных частиц цементита. Плотность дислокаций при этом может достигать уровней до 10^9 см^{-2} и более. Для более отдаленных объемов металла достигаются условия начала развития структурных превращений по диффузионному механизму.

Учитывая, что характер упрочнения металла в процессе пластической деформации в значительной степени определяется его структурным состоянием, для структур с качественно разной морфологией второй фазы наблюдается не только разный темп накопления дефектов кристаллического строения, но и различное их распределение [2; 4]. Так, цементит пластинчатой формы в составе перлитной колонии способен выдерживать значительные пластические деформации без разрушения. На основании этого диспергирование перлитных колоний сопровождается одновременным повышением прочности и пластичности металла. Далее, после накопления количества дислокаций выше определенного значения, наблюдается начало распада равномерного распределения дислокаций на периодические структуры (рис. 1). Качественные изменения структуры при указанном явлении имеют определенное значение: при формировании неомогенного распределения дислокаций объемы металла с повышенной плотностью становятся эффективным препятствием для распространения дислокаций.



a



б

Рис. 1. Структура перлитной колонии углеродной стали после пластической деформации 4 (а) и 20 % (б), $\times 20\ 000$

По мере увеличения степени деформации прирост плотности дислокаций в субграницах значительно превышает аналогичную величину внутри ячеек. На основании этого субграницы становятся тоньше, а ячейки мельче, с практически очищенными от дислокаций внутренними объемами. Большая часть от общего количества дислокаций, сосредоточенная в субграницах, после достижения максимально допустимой плотности в металле превращается в очаги формирования микротрещин.

Таким образом, можно полагать, что, при холодном пластическом деформировании углеродистой стали, чем скорее в феррите перлитной колонии начнут формироваться неомогенности в равномерном распределении дислокаций, тем быстрее будут достигнуты условия начала образования очагов разрушения металла.

Качественно иная картина наблюдается при пластической деформации углеродной стали с глобулярным цементитом. Дислокации, что обуславливают пластическое деформирование металла с глобулярным цементитом, образуют распределения, по внешним признакам подобные ячейкам. Обусловлено это явление блокирующим эффектом частиц цементита на движущиеся дислокации, особенно на те, которые располагаются в плоскости скольжения. На частицах, как на узлах, заблокированные дислокации достаточно быстро образуют подобие субграниц. Чем более дисперсные частицы глобулярного цементита, тем скорее достигается максимально допустимая концентрация дислокаций, после которой начинается процесс разрушения металла.

С учетом неоднородности наклепа обода колеса по поверхности катания определение твердости проводили в трех различных участках условного разделения: область (I) вблизи с гребнем, в середине поверхности катания (II) и вблизи с боковой поверхностью обода (III). Для указанных областей значения твердости по Виккерсу находились в интервале 5 500 – 7 000 МПа, а плотность дислокаций (ρ) составляла значения на уровне $3,6 - 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. После обработки импульсами электрического тока (ОИЭ) наблюдали снижение твердости металла на 11, 12 и 17 % для соответствующих областей I, II и III. Соответственно происходило уменьшение накопленной плотности дислокаций в указанных участках поверхности катания обода на 22–43 %. Наблюдаемое разупрочнение металла в первом приближении может быть связано с развитием процессов неконсервативного перемещения дислокаций, под действием импульсов электрического тока. На рисунке 2 представлена схема переползания дислокации из своей плоскости скольжения (P) в иную плоскость (Q). В результате такого перемещения должен формироваться слой из вакансий или атомов [5; 6]. Количество дефектов, которые могут возникнуть в плоскости Q , будет определяться углом ψ . Из анализа схемы переползания дислокации следует, что уменьшение угла ψ должно способствовать неконсервативному движению. С другой стороны, только краевая компонента обеспечивает формирование определенного количества возникающих вакансий (либо атомов) и которая, в свою очередь, пропорциональна углу ψ [5].

Оценим действующую силу на единицу длины дислокации при переползании как [5]:

$$F_1 = \frac{W_1}{b^2} \sin \psi, \quad (1)$$

где W_1 – энергия формирования атомарного дефекта, b – вектор Бюргерса.

При $\psi \rightarrow 0$ влияние краевой компоненты дислокационной линии резко снижается и $F_1 \rightarrow 0$. Другую силу (F_2), действующую между фрагментами дислокаций, расположенными в параллельных плоскостях скольжения, можно оценить как:

$$F_2 = \frac{\mu b^2}{2\pi kh}, \quad (2)$$

где μ – модуль сдвига, k принимает значения от 1 до $(1-\nu)$, ν – коэффициент Пуассона, h – расстояние между плоскостями скольжения. Условия переполюзания дислокации могут быть достигнуты при $F_1 = F_2$.

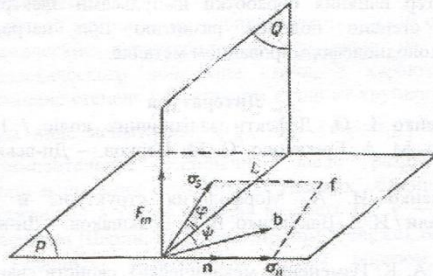


Рис. 2. Схематическое представление о перемещении случайной дислокации из своей плоскости скольжения (L – дислокационная линия, P – плоскость скольжения, ψ – угол между L и вектором Бюргерса)

Учитывая, что W_1 для вакансии составляет порядка $\frac{\mu b^3}{5}$, после подстановки составляющих в F_1 и F_2 , проведения преобразований, получили зависимость для оценки угла ψ :

$$\sin\psi = \frac{5b}{2\pi kh}. \quad (3)$$

Принимая величину k равной 0,8 (среднее значение между 1 и $1-\nu$), а h из соотношения $h = \rho^{-0,5}$, получим:

$$\sin\psi = b\rho^{0,5}. \quad (4)$$

Подставляя в (4) значения ρ до и после ОИЭ, для разных областей по поверхности катания, обнаружили снижение величины угла ψ от 48 до 17%.

Осуществив независимую оценку h , по соотношению [6]: $h = \frac{\mu b}{2\pi\sigma_0}$, где

σ_0 – напряжение необратимого движения дислокаций, при $\sigma_0 = 200-400$ МПа для стали с 0,6 % С в различном структурном состоянии, получили значения

h . Сравнительный анализ величин h , полученных по разным оценкам, показал хорошее совпадение.

ВЫВОДЫ

1. Разупрочнение холоднодеформированного металла обода железнодорожного колеса после обработки импульсами электрического тока обусловлено рекомбинацией дислокационной структуры.

2. Характер влияния обработки импульсами электрического тока в значительной степени подобен развитию при нагреве аннигиляции дислокаций в холоднодеформированном металле.

Литература

1. Вакуленко І. О. Дефекти залізничних коліс / І. О. Вакуленко, В. Г. Анофрієв, М. А. Грищенко, О. М. Перков. – Дн-вськ : Маковецький, 2009. – 112 с.
2. Вакуленко І. А. Морфологія структури і деформаційне упрочнення сталі / І. А. Вакуленко, В. І. Большаков. – Дн-вск : Маковецький, 2008. – 196 с.
3. Царюк А. К. Изменение механических свойств сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей под влиянием электромагнитных воздействий / А. К. Царюк, В. Ю. Скульский, С. И. Моравский, В. А. Сокирко // Автоматическая сварка, 2008. – № 9. – С. 28–32.
4. Бабич В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М. : Металлургия, 1972. – 320 с.
5. Фридель Ж. Дислокации / Ж. Фридель. – М. : Мир, 1967. – 643 с.
6. Рид В. Т. Дислокации в кристаллах / В. Т. Рид. – М. : ГНТИ, 1957. – 279 с.