

УДК 621.77.539.21

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ В БАНДАЖНОЙ СТАЛИ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ

А. Т. Канаев, А. В. Богомолов, Е. Н. Решеткина

Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина (г. Астана, Казахстан),  
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова (г. Павлодар, Казахстан)

Проведены металлографические исследования структурно-фазовых состояний, формирующихся в сечении гребня бандажа при поверхностном плазменном упрочнении. Показано, что по глубине упрочнения отчетливо наблюдается образование нескольких структурных зон разной микротвердости, свидетельствующих о наличии градиентно-слоистой структуры, и при сверхбыстрых скоростях нагрева в ходе поверхностной плазменной закалки фазовые и структурные превращения смещаются в область высоких температур, сильно изменяя кинетику возникновения и роста зародышей новой фазы. При этом формируется мелкозернистый аустенит, который превращается в высокодисперсную мартенситную структуру, недостижимую традиционными способами термической обработки.

**Ключевые слова:** бандажная сталь, колесо, рельс, плазменное упрочнение, градиентно-слоистая структура, износостойкость, гребень бандажа.

Взаимодействие колеса и рельса — основополагающий процесс в движении локомотивов и вагонов по железным дорогам, определяющий не только такие важнейшие технико-экономические показатели железнодорожного транспорта, как нагрузка на ось и статическая нагрузка вагонов, вес поездов и скорость их движения, эксплуатационный ресурс службы, но и основу основ работы железных дорог — безопасность движения поездов.

Условия взаимодействия колеса и рельса существенно влияют на расход топливно-энергетических ресурсов, на тягу поездов, которые непосредственно связаны с условиями сцепления и трения в зоне контакта системы колесо — рельс [1]. Требования к показателям взаимодействия колес и рельсов в разных зонах контактирования противоречивы. С одной стороны, сцепление колес с рельсами должно быть таким, чтобы обеспечивалось малое сопротивление движению поезда. С другой — для реализации требуемой силы тяги необходимо обеспечивать высокий и стабильный уровень сцепления локомотивных колес с той же поверхностью.

С учетом этих противоречивых требований к числу наиболее важных проблем системы колесо — рельс

относятся проблемы их контактной усталости, а также интенсивность изнашивания гребней бандажа и бокового износа рельсов. Контактно-усталостное повреждение головки рельса наиболее опасно для безопасности движения поездов, что потребовало соответствующего усиления в первую очередь рельсов. Были созданы рельсы тяжелых типов, разработаны и внедрены технологии поверхностной и объемной закалки.

Интенсивность изнашивания гребней колесных пар и бокового износа рельсов зависит от нагруженности зоны контакта, скоростей относительного проскальзывания колеса, температуры в зоне контакта, наличия и свойств смазочных материалов, применения технологий упрочнения традиционных (поверхностной и объемной закалки) и инновационных (плазменной и магнитно-плазменной закалки) [2].

**Методика исследований.** Плазменное упрочнение металлов и сплавов — один из перспективных методов модификации структуры и, как следствие, свойств поверхности тяжело нагруженных деталей и узлов машин и механизмов. В данной работе плазменному упрочнению подвергали бандажи локомотивных колес из углеродистой стали № 2 (табл. 1). Механические

Таблица 1. Химический состав бандажной стали, мас. %, по ГОСТ Р 52366–2005

Сталь	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo
№ 1	0,610	0,820	0,370	0,014	0,020	0,042	0,053	0,012	0,024	0,005
№ 2	0,620	0,820	0,400	0,015	0,016	0,042	0,053	0,009	0,030	0,005

Таблица 2. Механические свойства бандажей

Бандаж	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость HB	
					на глубине 20 мм	на гребне
№ 1	1017	15,5	32	36	285	288
№ 2	1044	14,5	31	35	295	300



Рис. 1. Микрошлиф гребня с упрочненным слоем

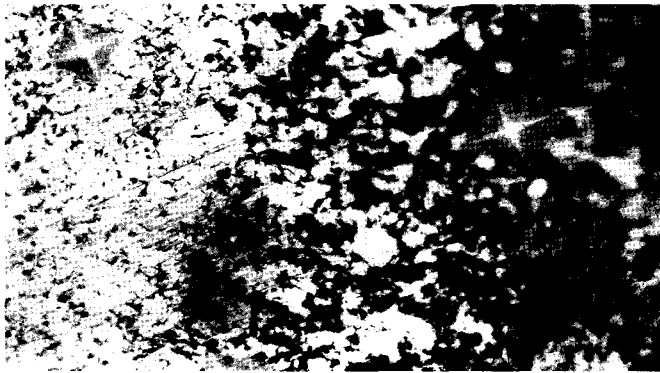


Рис. 2. Микроструктура образца гребня в упрочненной зоне.  $\times 200$

свойства бандажей в состоянии поставки ( $\sigma$ ,  $\delta$ ,  $\psi$  по ГОСТ 1497 на образце диам. 15 мм с расчетной длиной 60 мм, ударная вязкость  $KCU$  на образцах типа 1 по ГОСТ 9454, твердость  $HV$  по ГОСТ 9012 при вдавливании шарика диам. 10 мм нагрузкой 29430 Н) приведены в табл. 2.

Упрочнению подвергали зону перехода от рабочей поверхности гребня к поверхности катания. Зона упрочнения начинается на расстоянии 2–3 мм от вершины гребня и имеет ширину 25–26 мм. Макроскопические исследования проводили на поперечном темплекте бандажа с высотой гребня 28 мм после травления 50 %-ным водным раствором  $H_2SO_4$ .

Режим плазменного упрочнения:

Сила тока, А	275
Напряжение электрической дуги, В	120
Номинальное значение мощности дуги, кВт	35
Расход защитного газа, л/мин	5
Частота вращения колесной пары, мин <sup>-1</sup>	0,143

Микроскопические исследования проводили на металлографическом микроскопе «Neophot» при 200-кратном увеличении микрошлифов, вырезанных в поперечном направлении из сегмента с условием сохранения упрочненного слоя. Изучали микроструктуру, глубину, распределение микротвердости по сечению шлифов, качество упрочненных поверхностей. Микротвердость упрочненного слоя измеряли на микрошлифе до травления на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 1,962 Н (200 г) в соответствии с требованиями ГОСТ 9450–2006 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».

**Результаты измерений.** На рис. 1. представлен микрошлиф гребня исследуемого бандажа, на котором выделен упрочненный слой, были определены его размеры и место расположения относительно вершины гребня: ширина упрочненной зоны 25–26 мм, максимальная глубина 1,5–2,7 мм, высота гребня 28 мм.

На рис. 2 представлено изменение микроструктуры по сечению гребня бандажа, упрочненного плазменной закалкой. Видно формирование в поверхностном слое гребня бандажа градиентной слоистой структуры. Поверхностный слой состоит из мартенсита, образованного по сдвиговому механизму превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$ . Промежуточный слой характеризуется структурой из продуктов превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$ , идущего частично по диффузионному механизму. Структура сердцевины состоит из продуктов превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  по диффузионному механизму.

В табл. 3 представлена микротвердость упрочненного слоя в зависимости от расстояния от поверхности и обозначены формирующиеся при этом микро-

Таблица 3. Микротвердость по глубине упрочненного слоя, соответствующие фазовые и структурные составляющие

Расстояние от поверхности, мм	Микротвердость $HV_{02}$	Микроструктура упрочненного слоя	Расстояние от поверхности, мм	Микротвердость $HV_{02}$	Микроструктура упрочненного слоя
0,05	871	Мелкодисперсный мартенсит	1,35	460	Троостит
0,10	843		1,42	420	
0,20	805		1,54	423	Сорбит
0,30	746	Мелкодисперсный мартенсит + троостит	1,62	370	
0,40	681		1,90	311	
0,50	597		2,08	280	
0,60	592		2,31	259	
0,70	560		2,53	240	Феррит + перлит в соотношении 20/80
0,80	544		2,82	250	
0,90	549	Троостит	3,07	247	
1,05	500		3,11	245	
1,23	440		3,16	249	

структуры. Как видно из экспериментальных данных, изменение микротвердости происходит в диапазоне от 871  $HV_{0,2}$  до 240 – 245  $HV_{0,2}$ . При этом на глубине 0,05 – 0,30 мм от поверхности наблюдается мелкодисперсная мартенситная структура с микротвердостью 871 – 743  $HV_{0,2}$ , далее на глубине 0,30 – 1,00 мм наблюдается троосто-мартенситная структура с микротвердостью 743 – 500  $HV_{0,2}$ , затем следуют трооститная структура с микротвердостью 500 – 410  $HV_{0,2}$  на глубине 1,00 – 1,40 мм и сорбитная структура на глубине 1,40 – 2,20 мм с микротвердостью 410 – 260  $HV_{0,2}$ , далее видна структура основного металла с ферритно-перлитной структурой (микротвердость 240 – 245  $HV_{0,2}$ ). Общая глубина зоны плазменного воздействия составляет 1,9 – 2,1 мм. На рис. 3 упрочненные зоны с разной микроструктурой разделены вертикальными линиями.

**Обсуждение результатов.** Основное направление работ по снижению контактно-усталостных повреждений и повышению износостойкости колес и рельсов — разработка и внедрение инновационных технологий поверхностного упрочнения с получением комплекса высоких прочностных и служебных свойств материала колес и рельсов.

Наиболее перспективный и управляемый способ снижения интенсивности износа — поверхностное магнитно-плазменное упрочнение гребней бандажа, имеющее бесспорные технические и экономические преимущества перед другими способами упрочнения высококонцентрированным источником энергии (лазерным, электронно-лучевым, катодно-ионным и др.). Важнейшим является то, что при магнитно-плазменном упрочнении в силу специфичности обработки (высокие скорости нагрева и охлаждения) удается получить структуру и свойства поверхностного слоя, недостижимые традиционными способами термической обработки; кроме того, упрочняется только поверхностный слой, а сердцевина остается вязкой, что обеспечивает повышенное сопротивление одновременно изнашиванию и контактной усталости.

Особенно актуальна разработка новых технологических способов создания градиентно-слоистых структур в стали. На основании экспериментальных исследований можно утверждать, что реальной перспективой улучшения конструкционных свойств металлических материалов является использование слоистой структуры в изделиях, работающих в жестких условиях нагружения. Авторами статьи показана возможность резкого снижения чувствительности к концентрации напряжений сталей со слоистой структурой при сохранении высокой прочности. Формирование смешанно-градиентной многослойной структуры приводит к существенному повышению трещиностойкости стали, так как распространение возникшей трещины затрудняется, поскольку она должна каждый раз зарождаться вновь, переходя от одного слоя к другому [3, 4].

Кроме того, при плазменном упрочнении в поверхностном слое изделия создаются сжимающие на-

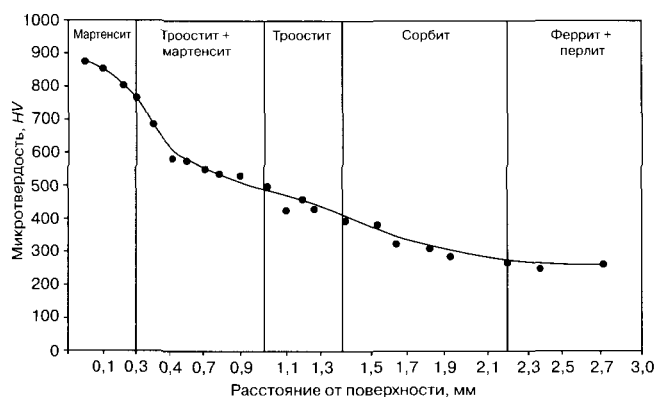


Рис. 3. Зависимость микротвердости от расстояния по глубине упрочненного слоя

пряжения, увеличение которых при неизменном растягивающем напряжении смещает кривую усталости в направлении больших сжимающих напряжений. Как известно, чем больше остаточные растягивающие напряжения на поверхности, тем ниже усталостная прочность. Это объясняется тем, что растягивающие напряжения способствуют раскрытию трещины, а сжимающие напряжения затрудняют его [4, 5].

Из экспериментальных данных (см. рис. 2, табл. 3) видно, что по глубине упрочнения отчетливо наблюдается образование нескольких структурных зон с разной микротвердостью. На поверхности находится зона, химический состав которой соответствует составу стали с содержанием углерода 0,61 – 0,62 %. При резком охлаждении эта зона превращается в игольчатый мартенсит с дисперсностью 5 – 15 мкм. За ней следует зона превращения аустенита в троосто-мартенсит. В микроструктуре этих слоев наблюдается присутствие небольшого количества остаточного аустенита, колеблющегося в зависимости от глубины закаленного слоя. Далее следует слой троостита, где микротвердость снижается и зависит от объемного содержания присутствующих фаз, затем в структуре появляется сорбит. Область расположения сорбита определяется центральными участками бывших аустенитных зерен, характеризуется меньшей дисперсностью ферритных и цементитных составляющих в них по сравнению с трооститом и обладает меньшей микротвердостью. Микротвердость в этой области также зависит от объемного количества присутствующих фаз.

По мере углубления в образце на стыке границ бывших аустенитных зерен появляется феррит и его количество постепенно возрастает. Структура остается ферритно-сорбитной и затем плавно переходит в ферритно-перлитную. Суммарная микротвердость снижается до исходной. Исходная структура представляет смесь ферритных и перлитных зерен с объемной долей каждой фазы соответственно 20 и 80 %. При сверхбыстрых скоростях нагрева в ходе плазменной закалки фазовые превращения смещаются в область высоких температур, что сильно влияет на кинетику возникновения и роста зародышей новой фазы.

Соотношение между скоростью зарождения и скоростью роста зародышей меняется: по мере повышения температуры зерна новой фазы (аустенита) зарождаются быстрее, чем ускоряется их рост, наблюдается все большее количественное опережение скоростью зарождения скорости роста. В результате по мере смещения превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  в область высоких температур все большую роль играет процесс зарождения, а рост зародышей в значительной степени подавляется. В итоге формируется мелкозернистый аустенит, который превращается в высокодисперсный бесструктурный мартенсит [6].

Регулируя количество введенной энергии, можно создать такие условия превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$ , когда единственной возможностью перехода исходных фаз окажется процесс зарождения. Таким образом, открывается возможность получения сверхмелкого аустенита, когда размеры зерен будут соизмеримы с критическими при температуре, достигаемой в процессе скоростного нагрева. Это используется в целях улучшения свойств стали после поверхностной плазменной закалки. Кроме того, особенности упрочнения сплавов при быстром нагреве связаны с тем, что превращение  $\alpha \rightarrow \gamma$  в них идет в неравновесных условиях (в отличие от традиционных методов термического упрочнения с медленным нагревом, либо с изотермической выдержкой для достижения температуры закалки).

При сверхбыстром нагреве отсутствует выдержка, необходимая для превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$ , растворения карбидов с последующим перераспределением углерода и легирующих элементов. Образующийся аустенит имеет разные концентрации растворенных атомов углерода и легирующих элементов в отличие от гомогенного распределения при медленном печном нагреве.

## ВЫВОДЫ

1. Проведены металлографические исследования структурно-фазовых состояний, формирующихся в сечении гребня бандажа при поверхностном плазменном упрочнении. Показано, что по глубине упрочнения отчетливо наблюдается образование нескольких структурных зон разной микротвердости, свидетельствующих о создании градиентно-слоистой структуры. Для повышения трещиностойкости стали наиболее рациональна градиентно-слоистая структура, при которой распространение трещины затрудняется,

поскольку трещина должна каждый раз зарождаться вновь, переходя от одного слоя к другому.

2. Показано, что в поверхностном слое формируется мелкодисперсная мартенситная структура, на глубине 0,30 – 1,00 мм от поверхности — троосто-мартенситная структура, образованная по сдвиговому и диффузионному механизмам превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$ , затем — трооститная и сорбитная структуры, далее следует структура основного металла с ферритно-перлитной составляющей в соотношении 20/80. Общая глубина зоны плазменного воздействия — до 1,9 – 2,0 мм.

3. Подтверждено, что при сверхбыстрых скоростях нагрева в ходе поверхностной плазменной закалки фазовые и структурные превращения смещаются в область высоких температур, сильно изменяя кинетику возникновения и роста зародышей новой фазы. При этом все большую роль играет процесс зарождения, а рост зародышей в значительной степени подавляется. В итоге формируется мелкозернистый аустенит (балл зерна 14,  $d_{cp} = 22$  мкм по ГОСТ 5639), который превращается в высокодисперсную мартенситную структуру, не достижимую при традиционных способах термической обработки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Богданов В. М.** Стратегическая программа обеспечения устойчивого взаимодействия в системе колесо – рельс. Материалы научно-практической конференции «Колесо – рельс 2003». — Шербинка, 2003. С. 14 – 20.
2. **Балановский А. Е.** Плазменное поверхностное упрочнение металлов. — Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2006. — 180 с.
3. **Костерев В. Б., Ефимов О. Ю., Иванов Ю. Ф.** Формирование градиентных структурно-фазовых состояний при термомеханическом упрочнении // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 4. С. 24 – 27.
4. **Лахтин Ю. М.** Металловедение и термическая обработка металлов. — М. : Металлургия, 1984. — 360 с.
5. **Kanayev A. T., Kanayev A. A.** Plasma Surface Hardening of Crests of Wheels of a Rolling Stock / Materialy IV Mezinarnodnivedecko-praktika conference VEDA TEORIE A PRAXE-2008. Praha, 2008. P. 56 – 60.
6. **Токтанаева А. А., Канаев А. Т.** Поверхностное плазменное упрочнение гребней колес тягового подвижного состава / Материалы 14-й Международной научно-практической конференции «Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика. Ч. 2. С. 338 – 343.