

УДК 669.14-412:625.2.012.2:006.354

Кандидаты техн. наук Г. И. БРЮНЧУКОВ, А. С. РАЗУМОВ, А. В. СУХОВ,
д-р техн. наук, проф. Г. А. ФИЛИППОВ, д-р физ.-мат. наук В. И. ИЗOTOV, инж. В. В. БРЕКСОН

Разработка стали для локомотивных бандажей повышенной прочности и трещиностойкости

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы эксплуатации серийных локомотивных бандажей по ГОСТ 398–2010 под грузовыми электровозами нового поколения с асинхронным тяговым приводом серии 2ЭС10, связанные с низким ресурсом бандажей, а также их недостаточной надежностью с точки зрения повреждаемости трещинами. Показано, что фактический уровень механических свойств и особенно прочностных характеристик бандажной стали марки «2» по ГОСТ 398–2010 является недостаточным и не соответствует более жестким условиям нагружения бандажа в эксплуатации, связанным с увеличенной мощностью локомотива и реализацией повышенного коэффициента сцепления бандажа с рельсом.

С целью повышения ресурса и надежности бандажей разработаны и испытаны в лабораторных условиях три варианта опытных среднелегированных бандажных сталей с различным содержанием углерода и легирующих элементов, обеспечивающих повышенный комплекс механических свойств бандажа, специально для применения под электровозами нового поколения. Опытные марки стали имеют никель-хром-молибденовую систему легирования и различаются содержанием основного легирующего элемента никеля (на уровне ~0,5%, ~2,0% и ~2,3% соответственно), оказывающего положительное влияние практически на весь комплекс свойств стали.

На специальных образцах, изготовленных из проката лабораторных плавок стали, проведена апробация режимов термической обработки опытных сталей, а также термическая обработка (закалка в подогретую воду и высокий отпуск) имитации натурного бандажа в виде образца с обкладками, обеспечивающая получение во всем рабочем слое бандажа микроструктуры отпущенного мартенсита с наилучшим сочетанием прочностных и пластических характеристик.

Показано, что с точки зрения комплекса полученных механических свойств наиболее перспективной является сталь с содержанием никеля ~2%, после термической обработки имеющая структуру отпущенного мартенсита и показавшая по результатам испытаний высокие характеристики твердости и

прочности со значительным запасом по ударной вязкости.

Ключевые слова: локомотивный бандаж; ресурс; среднелегированная сталь; термическая обработка; закалка и отпуск; механические свойства; структура отпущенного мартенсита

Действующий в настоящее время стандарт ГОСТ 398–2010 регламентирует изготовление черновых локомотивных бандажей из углеродистых низколегированных сталей марки «2» и марки «4». Массово применяемые на сети железных дорог бандажи марки «2» с уровнем твердости в рабочем слое 280–295 НВ обеспечивают среднесетевой пробег колесной пары до смены бандажей (ресурс) на уровне 500–550 тыс. км под грузовыми электровозами типовых серий. Практика эксплуатации бандажей повышенной твердости марки «4» (твердость 330–340 НВ) под грузовыми электровозами типовых серий показала их существенное преимущество перед бандажами марки «2» по износостойкости и фактическому ресурсу (до 55%) [1, 2].

Эксплуатация грузовых электровозов нового поколения с асинхронным тяговым приводом серии 2ЭС10 производства ООО «Уральские локомотивы», начавшаяся в 2012 г. на Свердловской железной дороге, показала недостаточную надежность серийных бандажей марки «2» под данными локомотивами. Бандажи этой марки не обеспечивают как требуемого ресурса по износу, так и безотказности с точки зрения повреждаемости трещинами в эксплуатации. В частности, ресурс бандажей марки «2» под электровозами 2ЭС10 составляет 390–410 тыс. км при установленном нормативном пробеге до смены бандажей не менее 600 тыс. км. Основной причиной обточек бандажей марки «2» в течение первого года эксплуатации являлся остроконечный накат на вершине гребня и наплыв металла на фаску (местное уширение бандажа) (рис. 1, данные за 2012 г.). Кроме того, на бандажах марки «2» имели место случаи возникновения усталостных трещин и отколов в гребне, связанных с наличием неметаллических включений, а также случаи изломов по знакам маркировки (рис. 2).

Комплексное исследование причин снижения ресурса и надежности бандажей марки «2» под электровозами 2ЭС10, выполненное специалистами ОАО «ВНИИЖТ», ООО «Уральские локомотивы» и ООО «Сименс» (Siemens AG), показало, что фактический уровень механических свойств и особенно

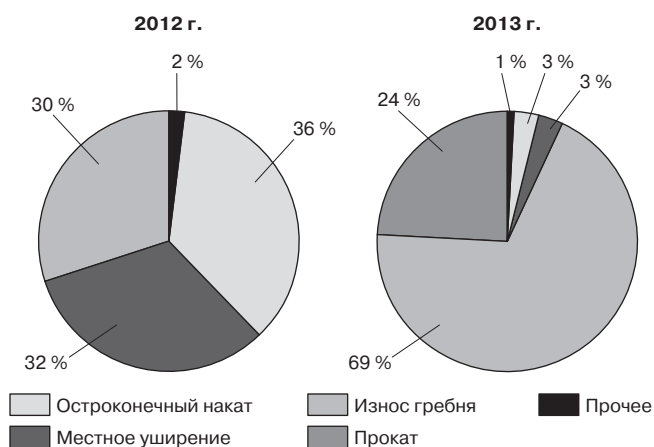


Рис. 1. Статистика причин обточек бандажей электровозов 2ЭС10 на Свердловской железной дороге (в % от общего числа обточек)



Рис. 2. Дефекты на гребне бандажей марки «2» в виде усталостных трещин и отколов (а, б) и излом бандажа по знаку маркировки (в)

Таблица 1

Фактические механические свойства серийных бандажей марок «2» и «4» по ГОСТ 398–2010

Марка стали	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Твердость на глубине 20 мм, НВ	Твердость на гребне, НВ	Ударная вязкость КСЧ (+20 °С), Дж/см ²	Трещиностойкость K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	Живучесть K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
«2» Фактическая	1000–1030	14–18	30–35	280–295	290–305	35–50	72–82	100–108
ГОСТ 398	930–1110	≥ 10	≥ 14	≥ 269	≤ 321	≥ 25	—	≥ 60
«4» Фактическая	1130–1160	13–17	30–35	330–340	330–340	25–30	60–66	74–80
ГОСТ 398	≥ 1050	≥ 9	≥ 12	320–360	≤ 380	≥ 20	—	≥ 60

прочностных характеристик стали является недостаточным и не соответствует более жестким условиям нагружения бандажа в эксплуатации, связанным с увеличенной мощностью локомотива и реализацией повышенного коэффициента сцепления бандажа с рельсом (тягового усилия) за счет поосного регулирования момента асинхронным приводом. Это подтверждается тем фактом, что большинство обточек бандажей марки «2» производилось по дефектам, вызванным локальной пластической деформацией вследствие недостаточно высокой прочности и твердости стали (табл. 1).

Металловедческие исследования показали, что причина изломов по маркировке бандажей марки «2» не связана с качеством металла, а обусловлена наличием концентраторов напряжений в виде знаков штампованной маркировки с обезуглероженным поверхностным слоем, существенно снижающих предел выносливости бандажа. Необходимо отметить, что аналогичные выводы были получены ранее в работах [3–5], что подтверждает актуальность перехода на альтернативные способы маркировки бандажей, предназначенных для электровозов нового поколения.

Преждевременное изъятие колесных пар из эксплуатации по причине низкого ресурса и отказов (изломов) бандажей приводит к дополнительным затратам на простой и техническое обслуживание локомотивного парка нового поколения, а также снижает показатели технико-экономической эффективности использования весьма дорогостоящих локомотивов. С целью решения данной проблемы в конце 2012 г. был разработан и принят ряд экстренных мер,

направленных на повышение ресурса и надежности бандажей под электровозами 2ЭС10, в том числе:

- поставка для применения под электровозами 2ЭС10 специально отобранных партий бандажей марки «2» по ГОСТ 398–2010 с максимальным уровнем прочностных характеристик и ударной вязкости (предел прочности σ_B не менее 1020 МПа и ударная вязкость КСЧ при +20 °С не менее 40,5 Дж/см²);
- поставка бандажей без маркировки методом горячей штамповки (завод-изготовитель поставляет черновые бандажи с наклеенной этикеткой, содержащей штрихкод и данные о бандаже, по которой предприятие — изготовитель колесной пары идентифицирует бандаж электронным способом и после механической обработки маркирует его в холодном состоянии ударно-точечным методом, рис. 3);
- удаление горячештампованной маркировки с бандажей колесных пар, уже находящихся в эксплуатации под электровозами 2ЭС10, посредством местной кольцевой проточки на наружной боковой поверхности бандажа (для данных колесных пар минимально допустимая толщина бандажа была увеличена с

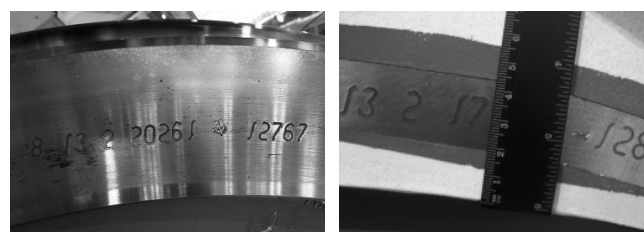


Рис. 3. Маркировка на наружной боковой поверхности механически обработанного бандажа, нанесенная ударно-точечным методом на ООО «Уральские локомотивы»

Таблица 2

Требования к механическим свойствам опытных бандажных сталей

Показатель	Нормативное значение
Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	≥ 1050
Твердость на глубине 20 мм от поверхности катания бандажа, НВ	320 – 360
Статическая вязкость разрушения (трещиностойкость) K_{IC} на образцах по ГОСТ 25.506 – 85, МПа·м ^{1/2}	≥ 75
Ударная вязкость KCU при +20 °С, Дж/см ²	≥ 40

45 до 55 мм с целью сохранения конструкционной прочности).

Реализация данных мер позволила в сжатые сроки решить проблему с отказами бандажей марки «2» в эксплуатации по причине трещин и изломов, однако их ресурс по износу практически не увеличился в связи с невысоким уровнем твердости рабочего слоя бандажа (не более 300 НВ). При этом произошло существенное перераспределение причин обточек бандажей, и более 90% колесных пар обтачивалось уже по причине естественного износа бандажей (боковой износ гребня и прокат — см. рис. 1, данные за 2013 г.).

Однако необходимо отметить, что изготовление и поставка бандажей марки «2» с повышенным уровнем прочности и ударной вязкости представляют определенную сложность для завода-изготовителя (ОАО «ЕВРАЗ НТМК») ввиду обратно пропорциональной зависимости этих характеристик. Поставка бандажей без штампованной маркировки также требует повышенных затрат, поскольку для идентификации бандажей в процессе производства ее все равно наносят на начальном этапе (после проката заготовок) и удаляют с готовых бандажей механическим способом.

Кроме того, с целью повышения ресурса бандажей также было принято решение о поставке и применении под электровозами 2ЭС10 ограниченной партии бандажей марки «4» (всего ими оснащено 38 секций электровозов). Бандажи марки «4», эксплуатируемые под электровозами 2ЭС10, показали повышенную стойкость к повреждениям профиля дефектами и повышенный ресурс (прогнозируемый пробег до смены бандажей составляет 700 – 720 тыс. км), что связано с более высокой прочностью и твердостью стали (см. табл. 1). При этом обточка бандажей марки «4» производится преимущественно по причине проката и бокового износа гребня. Следует отметить, что за время эксплуатации произошел один излом бандажа марки «4» по маркировке, аналогичный произошедшим ранее изломам бандажей марки «2» и также связанный с наличием концентратора в виде знака штампованной маркировки. В настоящее время поставка бандажей марки «4» под электровозы 2ЭС10 приостановлена до завершения мониторинга уже оснащенных ими

локомотивов и оценки фактического ресурса и надежности данных бандажей в эксплуатации.

Учитывая перечисленные выше ограниченные возможности эксплуатации бандажей из сталей марок «2» (пониженная стойкость к износу и пластической деформации) и «4» (пониженные характеристики ударной вязкости и трещиностойкости) под электровозами нового поколения, было принято решение о разработке бандажей, имеющих повышенную твердость и износостойкость в сочетании с высокой вязкостью и трещиностойкостью, специально для применения под электровозами нового поколения серий 2ЭС10, 2ЭС7, 2ЭС6. Данная работа была выполнена специалистами ОАО «ВНИИЖТ» и ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» и включала в себя обоснование химического состава, микроструктуры, способов и режимов термической обработки бандажной стали, обеспечивающих повышенную стойкость к пластической деформации и трещинообразованию, а также лабораторные исследования с изготовлением опытных плавок бандажных сталей, подбором режимов термической обработки и оценкой полученной микроструктуры и механических свойств.

Результаты многолетних исследований, а также практика изготовления и эксплуатации бандажей из стандартных марок стали показывают, что применение углеродистой низколегированной стали с перлитной (сорбитной) структурой не позволяет получить повышенный уровень прочностных характеристик и твердости при одновременном обеспечении высоких характеристик вязкости и трещиностойкости [6, 7]. Для сталей данного класса, к которому относятся марки «2» и «4» по ГОСТ 398 – 2010, повышение характеристик прочности и твердости, обеспечивающих износостойкость бандажа и его ресурс, неизбежно сопровождается снижением характеристик пластичности. Таким образом, возможности повышения прочности и твердости стандартных бандажных сталей ограничены верхним пределом (для стали марки «4» — не более 360 НВ), поскольку дальнейшее повышение твердости может привести к критическому падению вязкости и трещиностойкости.

Для получения бандажей с высокими характеристиками прочности и твердости (аналогично марке «4») и повышенными характеристиками вязкости и трещиностойкости (не ниже, чем у марки «2») были разработаны новые марки опытных среднелегированных бандажных сталей. Данная работа проводилась при участии ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», имеющего специальное оборудование для изготовления лабораторных плавок стали и апробации на них режимов термической обработки.

Основные требования к свойствам опытных бандажных сталей, установленные с точки зрения обеспечения повышенного ресурса и надежности бандажа,

приведены в табл. 2. Заданные свойства должны быть обеспечены в бандажах из опытных марок стали при существующей технологии термической обработки бандажей на заводах-изготовителях (два варианта: закалка методом погружения стопы бандажей в колодец с водой или индивидуальная закалка на столах с возможностью управления режимами).

Исходя из условия получения заданной твердости бандажа и обеспечения повышенной вязкости, была выбрана никель-хром-молибденовая система легирования бандажной стали. Всего были разработаны три опытные марки бандажной стали с различным соотношением углерода и легирующих элементов. Содержание легирующих элементов подбиралось по критерию обеспечения требуемого уровня упрочнения микроструктуры и износостойкости с одновременным повышением ударной вязкости и снижением порога хладноломкости, т. е. склонности стали к хрупкому разрушению. При этом степень легирования стали (общее содержание и соотношение легирующих элементов) должна обеспечивать равномерную прокаливаемость бандажа во всем рабочем слое, учитывая, что электровозный бандаж представляет собой изделие большого сечения.

При идентичной системе легирования опытные стали по вариантам 1, 2 и 3 различаются содержанием основного легирующего элемента никеля (на уровне ~0,5%, ~2,0% и ~2,3% соответственно), оказывающего положительное влияние практически на весь комплекс свойств стали [8, 9]. Учитывая, что стали подобного класса впервые в мировой практике разрабатываются для изготовления колесобандажной продукции, это позволило оценить влияние степени легирования никелем на комплекс получаемых свойств стали.

Требования к химическому составу разработанных среднелегированных сталей для бандажей по трем вариантам представлены в табл. 3. Оптимизация химического состава опытных сталей по содержанию и соотношению легирующих элементов проводилась расчетным методом с помощью углеродного эквивалента химического состава, характеризующего прокаливаемость стали и определяемого по следующей формуле [9]:

$$C_{\Sigma} = [C] + \frac{[Mn]}{6} + \frac{[Si]}{24} + \frac{[Ni]}{10} + \frac{[Cr]}{5} + \frac{[Mo]}{4} + \frac{[Cu]}{15} + \frac{[V]}{14} + 5 \cdot [B],$$

где символы химических элементов обозначают их содержание в стали, %.

Практика разработки колесобандажных сталей повышенной твердости показывает, что для обеспечения заданного уровня твердости 320–360 НВ после термической обработки путем закалки с отпуском значение углеродного эквивалента стали C_{Σ} должно составлять от 0,85 до 1,0% [10]. Для опытных сталей по вариантам 1, 2 и 3 значение C_{Σ} составляет 0,86, 0,99 и 0,95% соответственно (для сравнения: стандартная сталь марки «2» имеет $C_{\Sigma} = 0,76\%$, стандартная сталь марки «4» имеет $C_{\Sigma} = 0,92\%$).

Сочетание повышенной твердости (прочности) с высокими характеристиками вязкости и трещиностойкости в углеродистых среднелегированных сталях достигается, как правило, посредством термической обработки в виде закалки и высокого отпуска, известной как «улучшение». Учитывая, что стали этого класса закаляются, как правило, в масле, реже в воде, режим термической обработки с учетом возможностей завода-изготовителя должен включать закалку в предварительно подогретую воду (не ниже 50 °С) с последующим высоким отпуском.

Заданный комплекс механических свойств (см. табл. 2) в опытных сталях данного класса может быть обеспечен после термической обработки на структуру отпускаемого мартенсита. Основными факторами, обеспечивающими высокую прочность мартенситной углеродсодержащей стали, являются: наличие значительного количества атомов внедрения (углерода) в α -твердом растворе, а после отпуска — дисперсных частиц карбидов, высокая ($\geq 10^{11} \text{ см}^{-2}$) плотность дислокаций внутри кристаллов, малый размер кристаллов (толщина реальных кристаллов ~0,1–0,3 мкм). Высокий отпуск также приводит к полигонизации внутренней дислокационной структуры мартенсита с образованием внутри кристаллов субзерен. Таким образом, структура отпускаемого мартенсита с субзернами и дисперсными карбидами внутри кристаллов является оптимальной для получения улучшенной стали с повышенной пластичностью и ударной вязкостью при высоком уровне прочности (твердости).

Для проведения исследований в открытой индукционной печи были выплавлены лабораторные плавки опытных бандажных сталей по вариантам 1–3 с последующей разливкой в слитки массой 5 кг. Далее

Таблица 3

Химический состав опытных бандажных сталей

Вариант стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo	V	Al
1	0,40–0,46	0,13–0,23	0,70–0,90	0,70–0,90	0,48–0,58	$\leq 0,020$	$\leq 0,030$	0,28–0,33	—	0,02–0,04
2	0,38–0,48	0,25–0,45	0,67–0,92	0,63–0,88	1,85–2,15	$\leq 0,020$	$\leq 0,030$	0,15–0,25	0,07–0,16	—
3	0,30–0,40	0,28–0,48	0,45–0,70	0,80–1,00	2,10–2,40	$\leq 0,020$	$\leq 0,030$	0,25–0,35	0,10–0,20	—

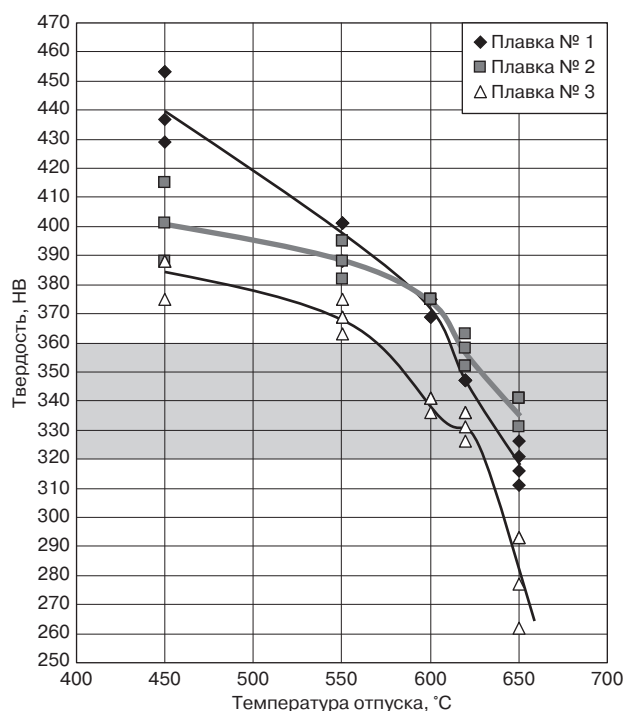


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на твердость закаленных в масле образцов из опытных бандажных сталей

слитки были прокатаны на лабораторном стане на пластины толщиной 12 мм с замедленным охлаждением готовых пластин. На прямоугольных образцах сечением 12×12 мм, вырезанных из прокатанных пластин, предварительно были подобраны режимы термической обработки стали (закалка и отпуск), обеспечивающие получение заданного уровня твердости 320–360 НВ.

Термическую обработку проводили по следующему режиму: нагрев до $900 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка в течение 1 ч, охлаждение в масло и отпуск в интервале температур 450–650 °C в течение 2 ч. Температура нагрева 900 °C была выбрана таким образом, чтобы произошло растворение в аустените большей части карбидов, образовавшихся при черновой прокатке и охлаждении, но при этом не произошло роста исходного аустенитного зерна. Охлаждение в масле обеспечивало закалку образцов без растрескивания.

Отпуск в интервале температур 450–650 °C приводит к выделению углерода из твердого раствора,

образованию карбидов, размер которых возрастает с увеличением температуры отпуска, и частичной полигонизации дислокаций. Непосредственно после закалки образцов из опытных сталей была получена твердость на уровне 53–59 HRC. Отпуск приводит к заметному снижению твердости, причем требуемые ее значения 320–360 НВ достигаются для опытных сталей в интервале температур отпуска от 600 до 650 °C (рис. 4). Наиболее интенсивно твердость снижается для сталей по вариантам 1 и 3, имеющих наименьшие значения углеродного эквивалента $C_{\text{э}}$.

Для моделирования процесса термической обработки непосредственно бандажа и оценки прокаливаемости опытных сталей в сечении, эквивалентном черновому электровозному бандажу типоразмера $1060 \times 143 \times 98$ мм, была проведена закалка образцов сечением 12×12 мм со стальными обкладками, имитирующими расположение образцов в теле полноразмерного бандажа.

После нагрева при 900 °C с выдержкой в течение 1 ч такая сборка (имитация бандажа) была закалена в подогретой до 50 °C воде. Уровень твердости закаленных образцов соответствовал значениям, полученным ранее при закалке образцов без обкладок. Следовательно, опытные стали обладают прокаливаемостью, необходимой для получения мартенситной структуры во всем сечении бандажа.

После установления режимов термической обработки исследованных сталей, обеспечивающих получение заданной твердости 320–360 НВ, термической обработке по аналогичной схеме с обкладками и оптимальным режимом (закалка с 900 °C в подогретую до 50 °C воду и отпуск при 620, 650 и 600 °C для стали по вариантам 1, 2 и 3 соответственно в течение 2 ч) были подвергнуты образцы из опытных сталей для определения фактического уровня механических свойств при растяжении и ударной вязкости КСУ. Полученные значения механических свойств при растяжении и ударной вязкости опытных сталей представлены в табл. 4.

Для стали по варианту 2 с целью достижения более высокого запаса прочности дополнительно была проведена термообработка по режиму с пониженной температурой отпуска (закалка с 900 °C и отпуск при 620 °C в течение 2 ч). Полученные значения механических свойств

Таблица 4

Механические свойства опытных бандажных сталей при испытании на растяжение и ударный изгиб

Вариант стали (температура отпуска)	Предел прочности σ_b , Н/мм ²	Предел текучести σ_t , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Твердость, НВ	Ударная вязкость КСУ (+20 °C), Дж/см ²
1 (620 °C)	1204	1129	16	46	348	61
2 (650 °C)	1056	986	17	53	339	106
2 (620 °C)	1217	1159	16	51	356	87
3 (600 °C)	1128	1048	15	42	340	76
Заданное требование	≥ 1050	—	—	—	320–360	≥ 40

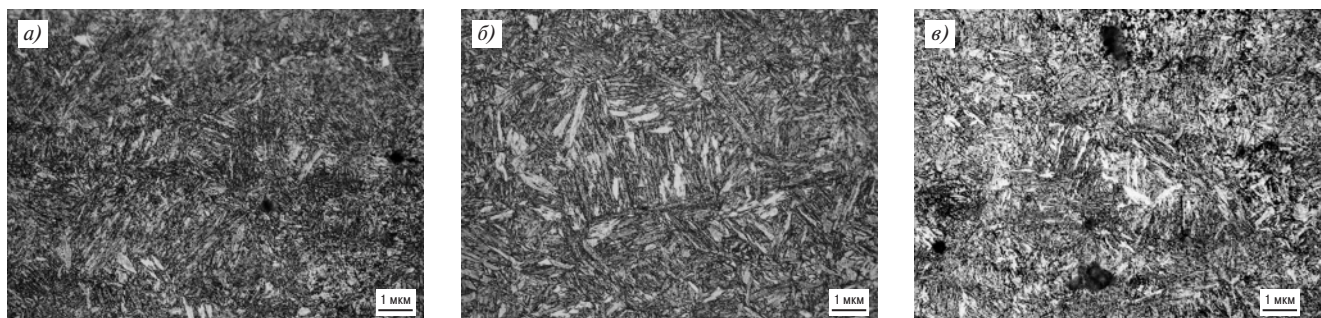


Рис. 5. Микроструктура опытных сталей после закалки и отпуска:
а — сталь по варианту 1; б — сталь по варианту 2; в — сталь по варианту 3

стали по варианту 2 после дополнительно проведенной термической обработки также представлены в табл. 4.

Анализ полученных результатов показывает, что все варианты опытных бандажных сталей после термической обработки обеспечивают получение требуемого уровня характеристик прочности, твердости и ударной вязкости. При этом существенное преимущество по ударной вязкости при эквивалентном уровне твердости имеет опытная сталь по варианту 2, что обусловлено повышенным содержанием никеля на уровне ~2%.

Также необходимо отметить, что уровень свойств опытных сталей существенно превышает нормативные требования ГОСТ 398—2010, а также фактический уровень свойств стандартных бандажных сталей (для сравнения: сталь марки «2» при твердости 280—295 НВ имеет ударную вязкость на уровне 35—50 Дж/см², сталь марки «4» при уровне твердости 330—340 НВ имеет ударную вязкость на уровне 25—30 Дж/см²).

Анализ микроструктуры опытных сталей после термической обработки проводили с помощью инвертированного микроскопа при увеличении $\times 700$ на протравленных шлифах. Микроструктура опытных сталей состоит из кристаллов отпущенного мартенсита двух морфологических разновидностей — пластин и тонких реек, составляющих так называемые пакеты (рис. 5). Существенных различий микроструктуры в зависимости от состава сталей не наблюдается. Следует подчеркнуть, что отпуск не привел к исчезновению границ мартенситных кристаллов, сохранивших свою форму и размеры. Таким образом, вклад в упрочнение стали от малых размеров кристаллов сохраняется и после отпуска.

Заключение. В результате разработки и лабораторных исследований опытных среднелегированных бандажных сталей с повышенными характеристиками прочности и трещиностойкости установлено следующее.

Опытные бандажные стали с никель-хром-молибденовой системой легирования применительно к существующей технологии термической обработки бандажей на заводе-изготовителе (закалка с высоким отпуском)

обеспечивают получение требуемого сочетания прочностных характеристик и ударной вязкости (твердость рабочего слоя бандажа 320—360 НВ, предел прочности не менее 1050 МПа и ударная вязкость КСЧ при +20 °С не менее 40 Дж/см²).

С точки зрения комплекса полученных механических свойств наиболее перспективной из исследованных является сталь с повышенным содержанием никеля (~2%), имеющая структуру отпущенного мартенсита и показавшая по результатам испытаний высокие характеристики твердости и прочности со значительным запасом по ударной вязкости (твердость на уровне 350—360 НВ, предел прочности ~1200 МПа и ударная вязкость КСЧ при +20 °С на уровне 85—90 Дж/см²).

На основании положительных результатов лабораторных исследований принято решение о разработке специальных технических условий на производство бандажей из среднелегированной стали, а также об изготовлении на ОАО «ЕВРАЗ НТМК» опытных образцов бандажей для проведения расширенных испытаний с оценкой всего комплекса механических и служебных свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухов А.В., Брюнчуков Г.И., Тимофеев В.В. Локомотивные бандажи марки 4 // Железнодорожный транспорт. 2012. № 2. С. 58—61.
2. Терехов П.М., Воробьев А.А. Перспективы использования колесных пар с бандажами повышенной твердости // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2012. № 15. С. 23—25.
3. Исследование горячей, ударно-точечной и плазменной маркировки локомотивных бандажей / А.В. Кушнарев [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2007. № 3. С. 11—17.
4. Усталостное разрушение бандажа колесной пары по знаку маркировки / Р.Ю. Демин [и др.] // Железнодорожный транспорт Украины. 2014. № 5. С. 47—50.
5. Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю. Анализ причин разрушения бандажей локомотивов по знакам маркировки // Техника железных дорог. 2013. № 3. С. 74—77.
6. Marich S., Mutton P.J. Material developments in the Australian industry — past, present and future // Proceedings of the 4th Heavy Haul Conference. Brisbane, 1989, pp. 267—275.
7. Bierogel E. Verschleiß von Radreifen. Stahl und Eisen. 1971. № 235, pp. 1335—1336.
8. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. М.: Металлургия, 1985. 408 с.

9. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
10. Брюнчуков Г.И. Бандажи тягового подвижного состава повышенной эксплуатационной стойкости: дисс. ... к-та техн. наук. М., 2007. 161 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БРЮНЧУКОВ Григорий Иванович,
заведующий лабораторией, ОАО «ВНИИЖТ».
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.
Тел.: (499) 260-45-23.
E-mail: steelmaker3@mail.ru

РАЗУМОВ Андрей Сергеевич,
ведущий научный сотрудник, ОАО «ВНИИЖТ».
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.
Тел.: (499) 260-43-92.
E-mail: razumov78@yandex.ru

СУХОВ Алексей Владимирович,
заведующий отделением, ОАО «ВНИИЖТ».
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.

Тел.: (499) 260-43-90.
E-mail: A_Sukhov@mail.ru

ФИЛИППОВ Георгий Анатольевич,
директор, Институт качественных сталей
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».
105005, Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2.
Тел.: (495) 777-93-09.
E-mail: Filippov@chermet.net

ИЗОТОВ Владимир Ильич,
ведущий научный сотрудник, Институт качественных сталей
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».
105005, Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2.
Тел.: (495) 777-93-09.
E-mail: iqs12@yandex.ru

БРЕКСОН Виталий Вильямович,
начальник Департамента конструкторских разработок
и исследований ООО «Уральские локомотивы».
624090, Свердловская обл., Верхняя Пышма,
ул. Парковая, д. 36.
Тел.: (343) 379-41-32.
E-mail: brekson@ulkm.ru

Development of locomotive tire steel with increased strength and crack growth resistance

Grigoriy I. Bryunchukov, Candidate of Technical Science, Laboratory Chief, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT).
10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 2604523. E-mail: steelmaker3@mail.ru

Andrey S. Razumov, Candidate of Technical Science, Leading Researcher, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str.,
129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 2604392. E-mail: razumov78@yandex.ru

Alexey V. Sukhov, Candidate of Technical Science, Head of Department for Transport Related Material Technology, JSC Railway Research Institute
(JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 2604390. E-mail: A. Sukhov@mail.ru

Georgiy A. Philippov, Dr. of Technical Science, Professor, Director, Institute of High-Quality Steels, Federal State Unitary Enterprise (FSUE) I.P. Bardin Research
Institute For Ferrous Metallurgy. Building 2, 23/9 Radio str., 105005 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (495) 7779309. E-mail: Filippov@chermet.net

Vladimir I. Izotov, Dr. of Physics and Mathematics, Leading Researcher, Institute of High-Quality Steels, Federal State Unitary Enterprise (FSUE)
I.P. Bardin Research Institute For Ferrous Metallurgy. Building 2, 23/9 Radio str., 105005 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (495) 7779309. E-mail:
iqs12@yandex.ru

Vitaliy V. Brekson, Head of Department for Design Engineering and Analysis, Ural Locomotives Ltd. 36, Parkovaya str., Verkhnyaya Pyshma,
Sverdlovskaya Oblast', Russian Federation. Tel.: +7 (343) 3794132. E-mail: brekson@ulkm.ru

Abstract. The paper tackles the problems of serial locomotive tires (as per GOST 398 – 210) operation under new generation freight electric locomotives 2ES10 with asynchronous traction drive, attributed to low operational resource of such tires and their insufficient reliability in terms of crack damageability. It is demonstrated that actual level of the tires' mechanical properties and especially of strength characteristics of tire steel grade 2 as per GOST 398 – 210 is insufficient and does not comply with more tough conditions of tire loading in operation caused by the increased locomotive power rating and implementation of higher coefficient of "tire – rail" adhesion.

To enhance resource and reliability of locomotive tires there were developed and tested in a laboratory environment three prototype versions of medium alloy tire steel with various content of carbon and alloying agents, improving mechanical property package up to the standards of tire operation under the new generation electric locomotives. The discussed tire steel prototypes have alloying system of Ni – Cr – Mo and differ from each other in the content of Ni (~0,5%, ~2,0% and ~2,3% respectively), the main alloying agent which positive effect covers nearly all the property package of steel.

By making use of special-purpose rolled specimens of steel obtained by way of laboratory melting there were conducted heat treatment modes approbation of steel prototypes and heat treatment (inclusive of heated water quenching and high-temperature tempering) of full-size tire simulant in the form of specimen with facings, creating tempered martensite microstructure with the best possible combination of strength and plastic properties all over the tire working layer

It was demonstrated that in the context of obtained mechanical properties steel containing ~2% of Ni with post-heat treatment tempered martensite microstructure, which exhibited the best test results in a part of hardness and strength (with considerable impact strength reserve) is the most prospective one.

Keywords: locomotive tire; resource; medium alloy steel; heat treatment; quenching and tempering; mechanical properties; tempered martensite structure

References

1. Sukhov A. V., Bryunchukov G. I., Timofeev V. V. *Lokomotivnye bandazhi marki 4* [Locomotive brand 4 tyres]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2012, no. 2, pp. 58 – 61.
2. Terekhov P. M., Vorob'ev A. A. *Perspektivy ispol'zovaniya kole-snykh par s bandazhami povyshennoy tverdsti* [Prospects for the use of wheel sets with tyres of increased hardness]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*, 2012, no. 15, pp. 23 – 25.
3. Kushnarev A. V., Bryunchukov G. I., Sukhov A. V., Bazanov Yu. A., Petrenko Yu. P., Markov D. P. *Issledovanie goryachey, udarno-tochechnoy i plazmennoy markirovki lokomotivnykh bandazhey* [Researching hot, impact-pointed and plasma marking locomotive wheel tyres]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2007, no. 3, pp. 11 – 17.
4. Demin R. Yu. et al. *Ustalostnoe razrushenie bandazha kolesnoy pary po znaku markirovki* [Fatigue failure of the tyre of the wheelset on the sign marking]. *Zheleznodorozhnyy transport Ukrainy*, 2014, no. 5, pp. 47 – 50.
5. Merson D. L., Vinogradov A. Yu. *Analiz prichin razrusheniya bandazhey lokomotivov po znakam markirovki* [Analysis of the causes of destruction of locomotives wheel tyres on the sign marking]. *Tekhnika zheleznnykh dorog*, 2013, no. 3, pp. 74 – 77.
6. Marich S., Mutton P. J. *Material developments in the Australian industry – past, present and future*. Proc. 4th Heavy Haul Conf. Brisbane, 1989. pp. 267 – 275.
7. Bierogel E. *Verscheib von Radreifen*. *Stahl und Eisen*, 1971, no. 235, pp. 1335 – 1336.
8. Gol'dshteyn M. I., Grachev S. V., Veksler Yu. G. *Spetsial'nye stali* [Special steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 408 p.
9. Gulyaev A. P. *Metallovedenie* [Metal technology]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p.
10. Bryunchukov G. I. *Bandazhi tyagovogo podvijnogo sastava povyshennoy ekspluatatsionnoy stoykosti*. Kand. tekhn. nauk diss. [Wheel tyres of traction rolling stock with increased service durability. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2007. 161 p.