

И.Г.Узлов, К.И.Узлов, А.Н.Хулин, Ж.А.Дементьева, А.В.Кныш

**АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛЕЙ БЕЙНИТНОГО КЛАССА
С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁС
ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ**

Проанализированы три перспективные марки колёсной стали, химический состав которых обуславливает формирование бейнитной структуры при охлаждении на воздухе, то есть без термоупрочнения с отдельного нагрева. Показано, что стандартные характеристики изученных сталей существенно превышают показатели серийного материала по ДСТУ ГОСТ 10791. Установлено, что благодаря высокой износостойкости изученные материалы являются конкурентноспособными с точки зрения эксплуатационной долговечности.

Постановка задачи.

С целью повышения надежности и долговечности подвижного состава железных дорог, среди прочих мероприятий, «Укрзалізниця» своими протокольными решениями приняла к реализации освоение железнодорожных цельнокатаных колёс с двумя уровнями твердости обода:

1. 320–340 НВ (начиная с № ЦЗТ–6/1 от 01.02.2000г.);
2. 400 НВ (например, «Протокол НТС «Укрзалізниця» по выполнению программы освоения новых видов колёс на ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» от 16.09.2005г.).

Как сообщалось ранее [1], путем комплексной реализации научно–исследовательских, технологических, нормативно–технических мероприятий и маршрутных испытаний, совместно со специалистами ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» и «Укрзалізниця», уже начато промышленное производство железнодорожных цельнокатаных колёс с твердостью в ободе более 320 НВ. Причем, за счёт микролегирования и реализации оптимального сочетания технологических параметров термоупрочнения, структурное состояние (мелкозернистая структура, тонкодифференцированный эвтектоид и избыточный феррит игольчатой морфологии [2], который по современной классификации [3] отнесён к бейнитному классу) было обеспечено сочетание высокой твердости (≥ 320 НВ) и ударной вязкости (≥ 20 Дж/см²).

Вместе с тем, в ходе наших исследований было отмечено, что структуры тонкодифференцированного перлита в сочетании с избыточным ферритом, даже игольчатой морфологии, вряд ли смогут обеспечить уровень твердости 400 НВ.

Вышеуказанное положение заставило искать альтернативные пути решения второй задачи, а именно, поиска новых химических составов сталей и способов их обработки для надежного обеспечения сочетания

твёрдости 400 НВ с высокими характеристиками вязких свойств элементов железнодорожного колеса.

Современное состояние вопроса.

Автор [4] считает, что перспективным материалом, который способен продлить эксплуатационную стойкость колёс, является низкоуглеродистая бейнитная сталь. По его данным, за счёт оптимального сочетания механических характеристик и указанного структурного состояния, колёса из этого материала не подвержены образованию выщерблин и трещин. По данным автора, в зоне термического влияния экстренного торможения твёрдость обода бейнитного колеса в зоне контакта повышается на 15%, против 160% в случае углеродистой стали. Это означает, что при тщательной оптимизации химического состава бейнитная сталь, в случае железнодорожной эксплуатации, оказывается устойчивой к мартенситному превращению. Принимая во внимание указанные преимущества, мировые производители железнодорожных колёс, такие, как Bombardier Transp. Serv., Valdunes, British Steel и др., сообщили на 13 Международном Конгрессе по колёсным парам [5] о широкомасштабном опытном опробовании обсуждаемой продукции. Именно это направление поиска альтернативных путей повышения твёрдости и износостойкости железнодорожных колёс было нами выбрано в качестве наиболее целесообразного. Базовыми химическими составами (с некоторыми корректировками [6]) назначены «наиболее перспективные бейнитные стали железнодорожного назначения», предложенные в монографии [3].

Базовый химический состав бейнитной колёсной стали, по данным [3], представлен в табл.1.

Таблица 1. Базовый химический состав бейнитных сталей железнодорожного назначения [3] (масс.%)

№ п/п	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	V	Nb	B	Al	Ti
1	0,04	0,20	0,75	2,0	0,25	2,8	–	–	0,003	0,03	0,03
2	0,30	0,20	2,00	–	0,50	1,0	–	–	0,003	0,03	0,03
3	0,30	1,00	0,70	–	0,20	2,7	–	0,1	–	–	–

Моделирование основных технологических параметров производства и принятые условные обозначения.

С целью моделирования процессов формирования структурного состояния и механических свойств элементов колеса «обод» и «диск», подвергающихся в процессе прессо–прокатного производства различным степеням деформации (50% и 90%– соответственно [7]), модельные образцы исследовали, также, в деформированном перед термообработкой состоянии с соответствующими степенями деформации. В дальнейшем образцам присвоен, дополнительно к номеру по табл.1, соответствующий

индекс– «О» или «Д» («обод» или «диск»– соответственно), т.е. «1–О»; «1–Д» и т.д.

Температуры аустенитизации образцов и их отпуска, моделирующие реальные технологические процессы, назначены из следующих соображений:

1. Температура колеса на последней операции прессо–прокатного производства «выгибка и прошивка» $\sim 980^{\circ}\text{C}$ [7]; средняя температура первой зоны кольцевой аустенитизационной печи отдельного нагрева по ТК ТО №34–б (в) ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» 920°C . Назначена для экспериментальных термообработок температура аустенитизации средняя между рассмотренными, т.е. 950°C .
2. Температура отпуска по ТК ТО № 34–б (в) ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» $520+10^{\circ}\text{C}$. Назначена для всех рассматриваемых случаев 525°C .

Из анализа всего массива данных, полученных при реализации различных режимов термообработки, к дальнейшему рассмотрению были признаны перспективными составы и режимы:

1. При реализации оптимального сочетания параметров, обеспечивающие достижение поставленной цели, т.е. ~ 400 НВ;
2. Которые, с целью достижения конкурентной способности продукции из рассматриваемых легированных сталей, не предусматривают термоупрочнение с отдельного нагрева, а используют тепло прокатного передела с последующим охлаждением на спокойном воздухе либо в активированном воздушном потоке (с вентилятором), при этом, в первом случае, к принятой ранее маркировке добавлен индекс «В»– «воздух» (например, «2–Д–В»), во втором– индекс «У»– «ускоренное на воздухе» (например, «1–О–У»).

Изложение основных материалов исследований.

Механические свойства опытных образцов перспективных бейнитных сталей железнодорожного назначения с соответствующими термообработками представлены в табл.2.

Таблица 2. Механические свойства опытных образцов бейнитных сталей для железнодорожных колёс повышенной прочности и износостойкости

Условное обозначение	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Ψ , %	Твердость, НВ	KCU, Дж/см ²
1–О–У	1467	1218	13,2	51,2	401	>60,04*
1–Д–У	1435	1258	13,9	45,6	409	51,67
1–Д–В	1554	1159	13,5	40,5	409	38,34
2–О–В	1486	1387	10,3	36,5	401	49,42
2–Д–В	1498	1373	10,3	36,0	409	55,59
3–О–В	1542	1244	11,9	28,5	393	41,8
3–Д–У	1535	1387	7,8	23,5	409	27,05
3–Д–В	1457	1044	9,5	14,0	386	25,91

* Образцы типа 1 по ГОСТ 9454 не разрушились при испытаниях на ударный изгиб

Микроструктурный анализ исследованных образцов показал (см., например, рис.1), что во всех, без исключения, случаях в опытных сталях при охлаждении на спокойном воздухе либо в активированном вентилятором воздушном потоке сформировались бейнитные структуры, детальный анализ которых, с применением электронномикроскопического анализа, приведён в работе [8].

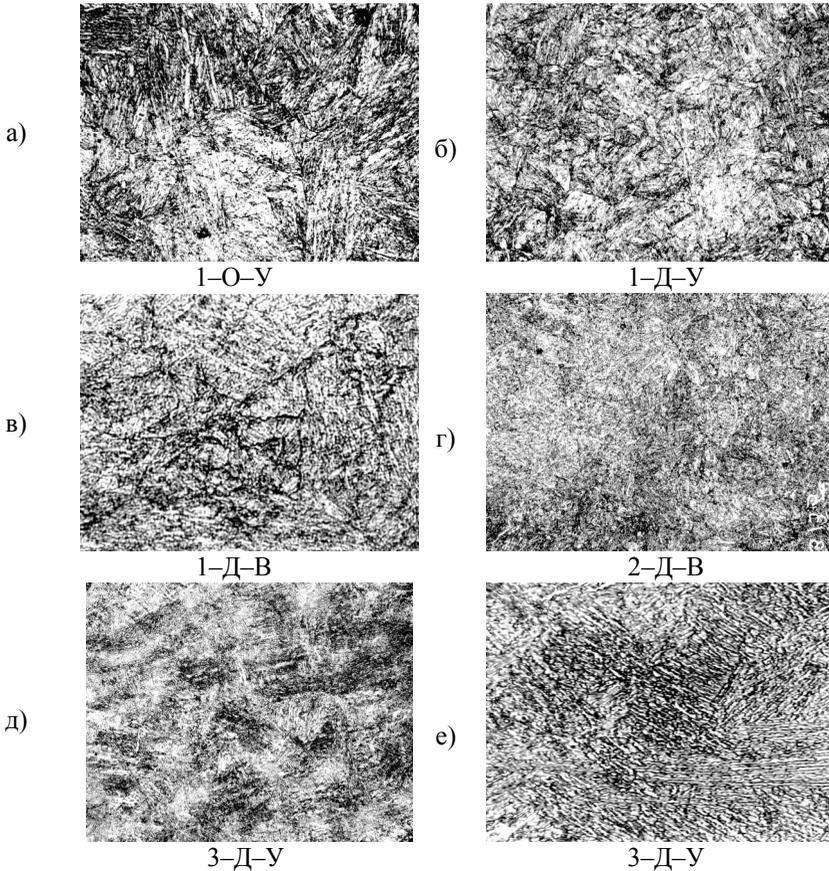


Рис.1. Микроструктура опытных образцов бейнитных сталей: а; б; г; д– $\times 400$; в; е– $\times 800$.

Анализ данных табл.2 свидетельствует о том, что после термообработки по обоснованным выше режимам опытные образцы со степенями деформации 90% приобретают твердость, превышающую соответствующий показатель модельных проб «обод» (50% деформации). Объясняется

это, по всей видимости, известными причинами— более мелким зерном и повышенной, во втором случае, плотностью дефектов кристаллического строения на момент начала охлаждения и, как следствие, на начальном этапе сдвигово–диффузионной перекристаллизации. Табл.2 демонстрирует тот факт, что во всех случаях достигается сочетание высоких значений одновременно твердости, прочности и ударной вязкости, что особенно выявляется в случае составов 1 и 2 по табл.1. Вместе с тем, следует отметить, что для состава 3 твердость в 400 НВ надежно фиксируется только при ускоренном охлаждении на воздухе. При этом пластичность модельного образца катастрофически падает ниже допустимых сдаточных норм по ДСТУ ГОСТ 10791 и ТУ У 35.2–23365425–600:2006 ($\delta_5 \geq 8,0\%$). В противном случае (составы «3–О–В» и «3–Д–В»), при получении удовлетворительных характеристик пластичности, твердость не достигает значений 400 НВ (393 НВ и 386 НВ, соответственно).

Однако, если досконально воспринимать задание «Укрзалізниці» (цитированный выше «Протокол...» от 16.09.2005г.), которой документально установлена разработка колёсных сталей «... до 400 НВ», то очевидно, что обсуждаемый состав нельзя относить к безнадёжно бесперспективным. В–целом, за исключением одного негативного результата из восьми (маркировка 3–Д–У, табл.2), очевидно, что использование легированных сталей с бейнитной структурой позволяет производить изделия со сдаточными характеристиками существенно превышающими нормативные требования (особенно состав 1 по табл.1 во всех рассмотренных вариантах– см. табл.2).

Известно, что, помимо сдаточных свойств, эксплуатационную долговечность колёс определяет их износостойкость в паре трения с железнодорожным рельсом. С целью изучения этой характеристики, в работе определяли потерю массы исследованных образцов в паре с контртелами рельсовой стали твёрдостью 400 НВ на машине трения СМЦ–2 (ИЧМ НАНУ). Результаты испытаний представлены на рис.2 в сопоставлении с соответствующими данными для КП–2 по ГОСТ 10791 и КП–Т по ТУ У 35.2–23365425–600:2006.

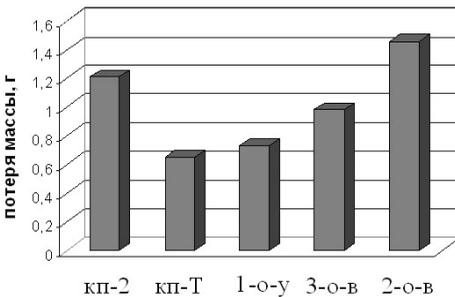


Рис.2. Суммарная потеря массы образцов в парах трения с рельсовой сталью

Анализ результатов рис.2 показывает, что модельные образцы «обод» составов 1 и 3 (табл.1) демонстрируют превосходную износостойкость в сравнении с серийными колёсами по ГОСТ 10791 (КП–2), а сталь 2 (табл.1) уступает им, невзирая на

твёрдость, превышающую 400 НВ. Показательно, что сталь 3 в предыдущих экспериментах (табл.2), среди трех рассматриваемых, продемонстрировала наименьшую твердость. Учитывая многофакторный характер износа и неоднозначную корреляцию твердости и износостойкости, этот факт требует дополнительного тщательного изучения.

Очевидно одно, сталь 1 (табл.1) имеет по показателям как механических свойств, так и износостойкости неоспоримые преимущества против имеющихся, на сегодняшний день, стандартных изделий отечественного и зарубежного производства.

С целью оценки опасности хрупкого разрушения колёс при эксплуатации в регионах с отрицательными температурами ГОСТ 10791 пунктом 7.5 предусматривает факультативные исследования ударной вязкости при температурах -20°C и -60°C . Результаты соответствующих испытаний представлены в табл.3.

Таблица 3. Испытание стали 1 (табл.1) бейнитного класса на ударную вязкость при отрицательных температурах.

Сталь 1 (Табл. 1)	КСУ, Дж/см ²	
	-20°C	-60°C
Охлаждение с вентилятором + отпуск 525°C	16,7	13,35
Охлаждение на воздухе + отпуск 525°C	18,3	12,47

Табл.3 однозначно свидетельствует о том, что, помимо указанных выше позитивных характеристик, анализируемая перспективная сталь (1 по табл.1) является, также, хладостойкой, так как, даже при минус 20°C , имеет показатели ударной вязкости выше, чем допустимый показатель для стали марки 3 по ГОСТ 10791 (≥ 16 Дж/см²) при плюс 20°C .

Выводы.

1. На основе изучения производственного опыта ведущих зарубежных фирм по использованию новых материалов для железнодорожных цельнокатаных колёс, в работе предложены 3 перспективные марки бейнитных сталей, претерпевающих сдвигово-диффузионную перекристаллизацию с получением искомой структуры без термоупрочнения с отдельного нагрева, что позволяет интенсифицировать процесс производства и, как следствие, достичь существенной экономии за счёт устранения целого технологического передела.

2. Установлено, что твердость, механические свойства, износостойкость двух из трех изученных бейнитных легированных сталей существенно превышают соответствующие показатели для серийных колёсных сталей КП-2 (ДСТУ ГОСТ 10791), а это является очевидным показателем их перспективности и конкурентноспособности с точки зрения эксплуатационной долговечности.

1. *Узлов І.Г., Узлов К.І.* Науково–технічні положення і технологічні рішення щодо створення високоміцних залізничних коліс // В зб. «Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». – Київ: ІЕЗ НАНУ, 2006.– С.245–249.
2. *Формирование* структурного состояния высокопрочных микролегированных ванадием колёс в процессе их отпуска / И.Г. Узлов, А.М. Нестеренко, К.И.Узлов и др.// *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб.научн.тр.ИЧМ. – Вып. 11. – 2005.– С. 223–228.
3. *Bianite* in Steels. Н.К.Д.Н. Bhadeshia. London: Institute of Materials. –1992.– 468p.
4. *Kassidi Ф.Д.* Леговані метали можуть подовжити життя коліс. // *Залізничний транспорт України*. – № 5. – 2002.– С.69–70.
5. *XIII International Wheelset Congress*. Rome, Italy, September 17 – 21, 2001.
6. *Стали для железнодорожных колёс с бейнитной структурой/ Ю.С. Пройдак, С.И.Губенко, Е.В. Горб и др.*// Тезисы XVI международной научно–практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Днепропетровск: ДНУЗТ, 11.05–12.05.2006. – С. 366.
7. *Производство железнодорожных колес / Г.А.Бибик, А.М.Июффе, А.В.Праздников и др.*– М.: Металлургия, 1982.–232с.
8. *Розробка сталей з бейнітною структурою для залізничних коліс / Ю.С.Пройдак, С.И.Губенко, Г.Д. Сухомлин и др.* // *Металознавство та обробка металів.*– 2006.– № 1.– С.51–56.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук, проф. В.В.Парусовым