

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

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины,

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ ВАНАДИЕМ БАНДАЖНОЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ТВЁРДОСТИ

Целью работы являлось исследование влияния твердости и структуры микролегированной ванадием бандажной стали на ее склонность к контактно-усталостным повреждениям. Критерием оценки принято количество циклов нагружения до появления первых следов разрушения на поверхности трения образца. Установлено, что повышение твердости бандажной стали от 275 до 350 НВ и изменение структуры от феррито-перлитного состояния до перлитобейнитного приводит к увеличению её контактно-усталостной прочности в 2 раза. При этом пластические свойства и ударная вязкость стали остаются на высоком уровне и соответствуют требованиям ГОСТ 398-96. Разработана нормативная документация (ТУ У 35.2-23365425-641:2009) для производства локомотивных бандажей с высокой контактно-усталостной прочностью и твердостью изделий до 320 единиц по Бринеллю.

Ключевые слова: контактно-усталостная прочность, механические свойства, твердость, структурное состояние, бандажная сталь

Современное состояние вопроса. Выщербины усталости (рис. 1, деф. 2 [1]) являются одним из видов повреждений колёсных пар тягового подвижного состава железной дороги. Они образуются вследствие многочисленных соприкосновений колеса с рельсом под большой нагрузкой. Глубина этих выщербин может достигать 15-20 мм [2]. Для их устранения при переточке удаляется большой слой металла бандажа, существенно снижая его ресурс эксплуатации. Поэтому повышение контактно-усталостной прочности локомотивных бандажей является весьма актуальной проблемой.

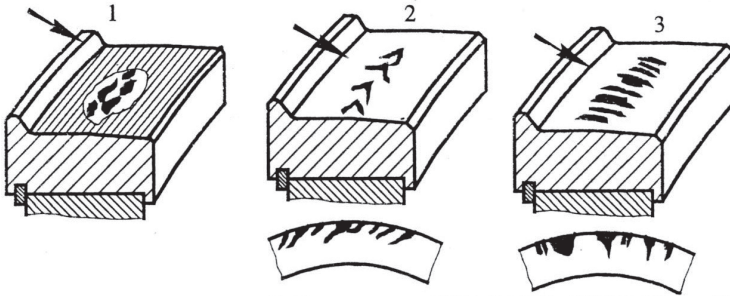
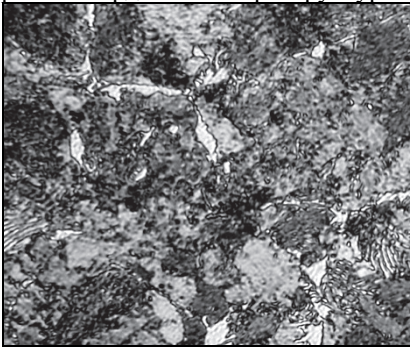


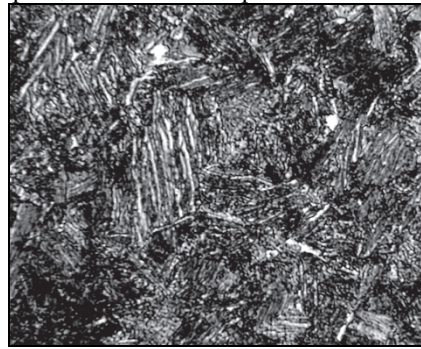
Рис.1. Существующая классификация выщербин [1]. 1) по светлым пятнам, ползунам, «наварам»; 2) по усталостным трещинам; 3) по сетке термотрещин.

Целью настоящей работы являлось изучить влияние твердости и структуры микрелегированной ванадием бандажной стали марки 3 по ГОСТ 398-96 на её склонность к контактно-усталостным повреждениям при твердостях 275 (норматив для бандажей марки 3 по ГОСТ 398-96), 300 НВ, а также 325, 350 НВ (оптимальная твердость исследуемой бандажной стали с точки зрения её износостойкости [3]). Целью работы также являлось изучить влияние твердости исследуемой бандажной стали на её механические свойства.

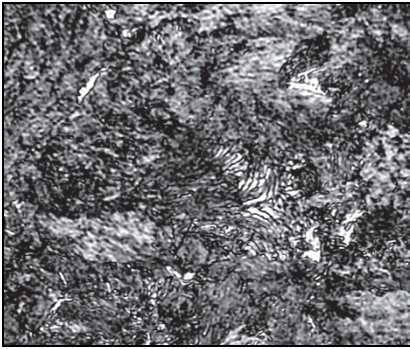
Изложение основных материалов исследования. Заготовки образцов из исследуемой стали были термически упрочнены на указанные уровни твердости. Микроструктуры образцов показаны на рис.2.



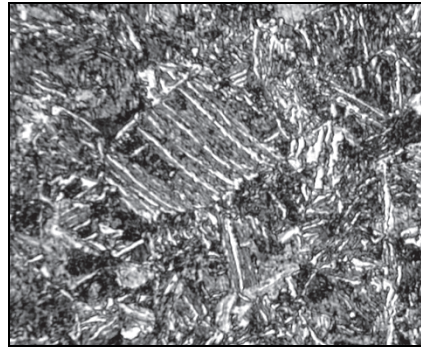
275НВ: 94% П+6% Ф



325НВ: 90% П+10% Б



300НВ: 98% П+2% Ф



350НВ: 86% П+14% Б

Рис.2. Микроструктура образцов для испытаний на контактную усталость из стали марки 3 по ГОСТ 398-96 с различной твердостью ($\times 1000$).

Образцы с твердостью 275, 300 НВ имеют структуру грубодисперсного перлита с равномерно распределенным по границам зерен избыточным ферритом в количестве 2-6%. При твердости 325-350

НВ структура состоит из тонкодисперсного перлита и небольшого количества бейнита (10-14%).

Испытания на контактно-усталостную выносливость проводились в ИЧМ НАНУ на машине трения СМЦ-2, с непрерывной подачей на контактирующие поверхности образца и контртела смазки, по методике, использованной в работе [4]. Критерием оценки сопротивления контактно-усталостным разрушениям было принято количество циклов нагружения до появления первых следов разрушения (выкрашивания) на поверхности трения испытываемого образца. Результаты испытаний представлены на рис.3.

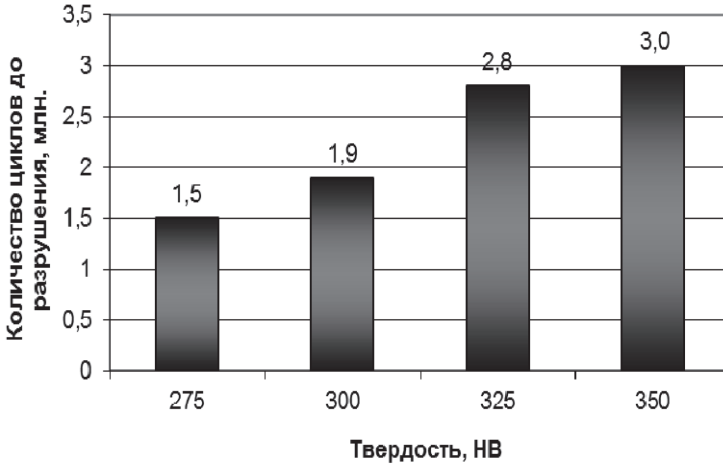


Рис.3. Зависимость контактно-усталостной прочности бандажной стали марки 3 от её твёрдости.

Результатами испытаний установлено (рис.3), что при повышении твердости исследуемой стали от 275 до 350 НВ количество циклов до появления выкрашивания непрерывно возрастает от 1,5 до 3 млн. Образцы с твердостью 325-350 НВ (структура высокодисперсного перлита и бейнита 10-14%) показали в сравнении с твердостью 275 НВ (норматив для марки 3 по ГОСТ 398-96) и феррито-перлитной структурой (94% П+6% Ф) повышение контактно-усталостной прочности в 1,8-2 раза. Образцы с твёрдостью 300НВ (98%П+2%Ф) продемонстрировали в 1,26 раза большую контактную выносливость в сравнении с твёрдостью 275 НВ.

Согласно классическим представлениям о разрушении металла [5], образование трещины на начальных стадиях разрушения и её рост происходят в результате пластической деформации стали. В работе была изучена микроструктура поверхности катания образцов после испытаний. Обнаружено, что с повышением твердости исследуемой стали от 275 до 350 НВ и изменением её структуры от феррито-перлитного состояния до

перлитно-бейнитного уменьшается глубина проникновения пластической деформации в контактируемом слое образцов (рис.4).

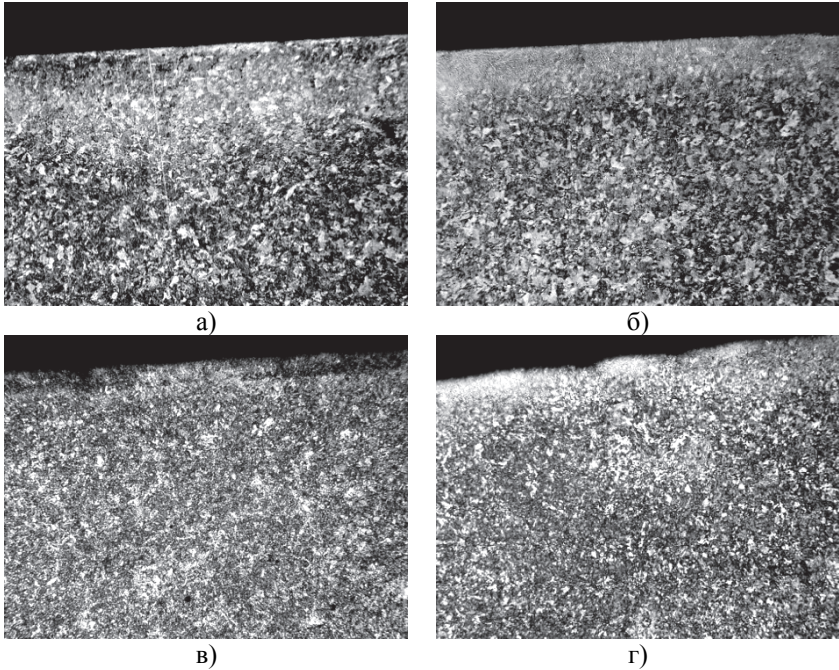


Рис.4. Микроструктура поверхности катания исследуемых образцов после испытаний ($\times 100$): а) 275 НВ; б) 300 НВ; в) 325 НВ; г) 350 НВ

Методом микротвёрдости количественно была определена глубина проникновения пластической деформации. Поскольку деформированный в результате циклических нагружений слой металла существенно упрочняется в сравнении с основной структурой, то его толщина может быть определена измерением микротвёрдости от поверхности катания вглубь образца. Установлено (рис.5), что глубина проникновения пластической деформации с повышением твёрдости образцов непрерывно уменьшается от 0,35 до 0,10 мм. Контактно-усталостная прочность (рис.3) в этом случае обратно пропорциональна глубине проникновения деформации.

Поскольку твёрдость характеризует сопротивление материала деформации [5], то для зарождения трещины, её роста и образования усталостной выщербины для более прочной стали необходимо большее напряжение (нагрузка), либо большее количество циклов нагружения в сравнении с менее прочной сталью. Следовательно, для повышения

контактно-усталостной прочности стали необходимо повышать её сопротивляемость пластической деформации.

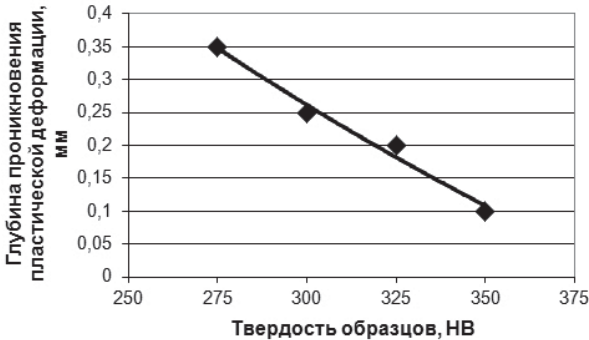


Рис.5. Зависимость глубины проникновения пластической деформации в результате контактного нагружения от твердости образцов

Результаты испытаний на растяжение приведены на рис. 6-8. Как видно из рисунков, при повышении твердости от 275 до 350 НВ предел прочности исследуемой стали непрерывно возрастает от 1007 МПа до 1147 МПа. Пластические характеристики при этом несколько снижаются. Относительное удлинение (δ) изменяется от 17,1 % до 13,4 %. Относительное сужение (ψ) понижается от 37,4 % до 30,4 %. Несмотря на некоторое снижение пластических характеристик бандажной стали при повышении её твердости, полученный уровень свойств надежно обеспечивает требования ГОСТ 398-96 для марки «3» к соответствующим показателям: δ - не менее 8 %; ψ - не менее 12 %.

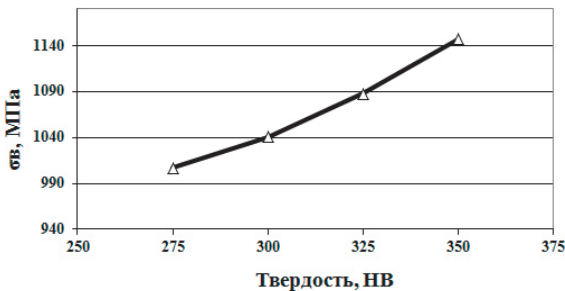


Рис.6. Зависимость предела прочности бандажной стали от её твердости.

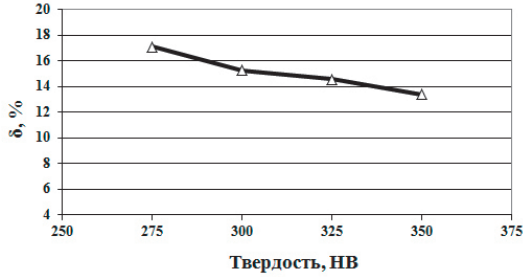


Рис. 7. Зависимость относительного удлинения бандажной стали от её твердости

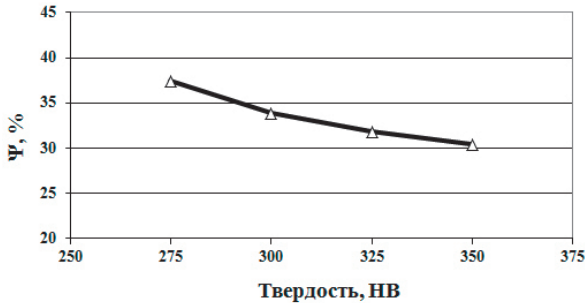


Рис.8. Зависимость относительного сужения бандажной стали от её твердости

Испытания на ударный изгиб при +20...-60°C образцов с мягким надрезом показали (рис. 9) следующее: исследуемая сталь с твердостью 275...350 НВ обладает высоким уровнем ударной вязкости как при комнатной, так и при отрицательных температурах, практически в два раза превышая требования ГОСТ 398-96 для марки «3»: при +20 °С не менее 20 Дж/см², при -60 °С не менее 15 Дж/см². При этом повышение твердости стали приводит к некоторому увеличению ударной вязкости для всех температур испытаний, что связано, очевидно, с повышением дисперсности перлита [6].

С учётом полученных результатов ИЧМ НАНУ и ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» разработаны ТУ У 35.2-23365425-641:2009, которые предусматривают производство бандажей из микролегированной ванадием стали марки «Т» с уровнем твердости более 320 НВ (табл. 1).

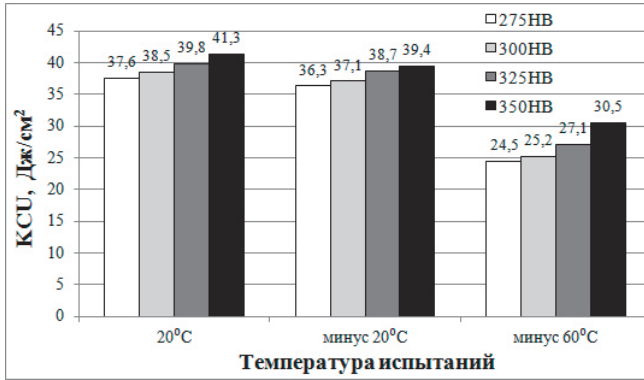


Рис. 9. Зависимость ударной вязкости бандажной стали от её твердости и температуры испытаний.

Таблица 1. Требования ГОСТ 398-96 и ТУ У 35.2-23365425-641:2009 к механическим свойствам бандажей из микролегированной ванадием стали

Марка стали (нормативный документ)	$\sigma_{в}$, Н/мм ²	δ , %	Ψ , %	ККУ при +20°C, Дж/см ²	Твердость на гл. 20 мм, НВ
«3» (ГОСТ 398-96)	1000- 1270	не менее			
		8,0	12,0	20	275
«Т» (ТУ У 35.2- 23365425-641:2009)	≥ 1078	не менее			
		8,0	12,0	20	320

Выводы.

1. Установлено, что повышение твёрдости микролегированной ванадием бандажной стали марки 3 по ГОСТ 398-96 от 275 до 350HV и изменение структуры от феррито-перлитного состояния до перлитобейнитного приводит к увеличению её контактно-усталостной прочности в 2 раза. При этом пластические свойства и ударная вязкость стали остаются на высоком уровне и соответствуют требованиям ГОСТ 398-96 на рассматриваемый вид продукции.

2. Разработана нормативная документация ТУ У 35.2-23365425-641:2009 для производства локомотивных бандажей с высокой контактно-усталостной прочностью, в которой повышены требования к твердости изделий до 320 и более единиц по Бринеллю против марки 3 по ГОСТ 398-96.

1. *Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм.* 305–Ц Міністерство транспорту України, Державна адміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця 2001 р.
2. *Термическая обработка железнодорожных цельнокатаных колес* / [ред. К.Ф. Стародубов]. – К.: Издательство академии наук украинской ССР, 1956. – 180 с.
3. *Определение структурного состояния и свойств железнодорожных бандажей и рельсов с целью минимизации их износа в паре взаимодействия* / И.Г.Узлов, К.И.Узлов, А.Н.Хулин, Ж.А.Дементьева, И.Е.Батюшин, Г.В.Логвинов // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2009. – № 2. – С. 63–66.
4. *Мирошниченко Н.Г.* Разработка и опробование новых низколегированных сталей для цельнокатаных железнодорожных колёс: дис. кандидата техн. наук : 05.16.01 / Мирошниченко Николай Григорьевич. – Днепропетровск, 1970. – 137 с.
5. *Гуляев А. П.* *Металловедение* / А. П. Гуляев. – М. : *Металлургия*, 1977. – 648 с.
6. *Влияние параметров микроструктуры колесной стали на ее вязкие свойства.* / И.Г.Узлов, А.И.Бабаченко, Ж.А.Дементьева [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Сб.научн.тр.ИЧМ. – 2007. – Вып.14. – С.202–210.

*Статья рекомендована к печати
канд. техн. наук А.И. Бабаченко*

І.Г.Узлов, А.М.Хулін, К.І.Узлов, Ж.А.Дементьєва

Дослідження контактної-втомлюваної міцності і механічних властивостей мікролегованої ванадієм бандажної сталі з різним рівнем твердості

Метою роботи є дослідження впливу твердості й структури мікролегованої ванадієм бандажної сталі на її схильність до контактної-втомних пошкоджень. Критерієм оцінки прийнято кількість циклів навантаження до появи перших слідів руйнування на поверхні тертя зразка. Встановлено, що підвищення твердості бандажної сталі від 275 до 350НВ та зміна структури від ферито-перлітного стану до перліто-бейнітного призводить до збільшення її контактної-втомної міцності в 2 рази. При цьому пластичні властивості та ударна в'язкість сталі залишаються на високому рівні і відповідають вимогам ГОСТ 398-96. Розроблено нормативну документацію (ТУ У 35.2-23365425-641:2009) для виробництва локомотивних бандажів з високою контактної-втомною міцністю і твердістю виробів до 320 одиниць за Брінеллем.