

А.А.Костенко, В.Г.Раздобреев, О.Н.Перков, Ю.А.Степина

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА
ОСТАТОЧНОГО ВОДОРОДА В ТВЕРДОМ МЕТАЛЛЕ ПРИ
ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС**

ИЧМ НАН Украины, Нижнеднепровский трубный завод им.К.Либкнехта

Разработана и опробована в условиях колесопрокатного цеха ОАО «НТЗ» оригинальная методика определения содержания остаточного водорода в твердом металле в процессе производства железнодорожных колес. Методика была согласована и утверждена с основным потребителем колес «Укрзалізницею».

Современное состояние вопроса.

Возрастание грузоподъемности перевозок, интенсивности и скорости движения на железнодорожном транспорте, а также строительство высокоскоростных магистралей требуют повышения надежности и долговечности железнодорожных колес. В этих условиях важны современные технологии производства качественной стали для них. Проблема водорода в жидкой и твердой стали является одной из основных проблем современной металлургии и целого ряда отраслей машиностроительной промышленности. При современных способах производства стали и изделий из нее водород является неизбежной примесью, ухудшающей ее качество и вызывающей при определенных условиях в готовом прокате распространенного дефекта – флокенов. В настоящее время установлено, что высокая концентрация протонов водорода, проникших в электронные оболочки атомов, создает в кристаллической решетке металла, т.н. "водородные" напряжения. При соответствующих условиях напряженное состояние решетки может возникнуть не только в отдельных локальных участках, но и в больших объемах металла. Внедрение протонов водорода в электронные оболочки атомов железа приводит к глубоким изменениям физической природы металлов, которые внешне проявляются в том, что сталь становится серебристо-белого цвета, в высокой степени восстановленной и не корродирующей на воздухе [1–4]. Под влиянием водорода резко снижаются пластические и вязкие характеристики стали, а, начиная с некоторого его содержания, разного для сталей разных марок, сортамента, их назначения и структурного состояния, пластические и вязкие свойства могут полностью отсутствовать при одновременном снижении прочности и повышении упругости стали [1,4–12]. Согласно этой теории влияние водорода проявляется в охрупчивании стали и нарушениях ее сплошности в наиболее охрупченных объемах под влиянием суммарного воздействия внутренних напряжений (напряжений деформации, структурных, термических и создаваемых молекулярным водородом).

Учитывая, что перераспределение водорода и выделение его из стали протекает в широком диапазоне температур, хотя и с разной интенсивностью, в мировой практике производства изделий для железнодорожного транспорта, в первую очередь рельсов и колес, исходя из конкретных условий, используют различные методы с целью снижения содержания водорода в стали и предупреждения образования флокенов в них. Это: уменьшение общего содержания водорода в стали (в процессе выплавки, разливки,ковки, охлаждения); уменьшение количества водорода, находящегося в стали в твердом растворе, путем перевода его в молекулярную или связанную форму (посредством специальной термообработки или введением гидридообразующих элементов V, Ti, Zr, Pd и др.), а также повышения качества стали путем уменьшения ликвации.

Основной операцией термической обработки, обуславливающей снижение флокеночувствительности стали, является изотермическая выдержка при 640–660⁰С, приводящая к уменьшению содержания водорода в ликвационных участках и снижению содержания растворенного водорода за счет его диффузии в несплошности металла с превращением в них в молекулярную форму, неактивную в отношении образования флокенов [5,13,14]. По данным работ [14,15] стандартные технологии ПФТО, используемые в отечественной и зарубежной практике являются весьма энерго- и трудоемкими, характеризуются большой продолжительностью (от 3–6 часов для готового колеса и до 8–15 суток для слитков).

Мировой опыт производства железнодорожных колес и рельсов из вакуумированной стали свидетельствует о том, что гарантией отсутствия флокенов в металле является содержание в стали не более 2,0 ppm водорода. К примеру, один из ведущих металлургических концернов мира *British Steel* при производстве металла железнодорожного назначения, газопроводных труб большого диаметра, толстых листов бурильных платформ, тяжелых профилей проводят дегазацию стали до содержания в ней водорода 1,0 – 2,0 ppm. Это, по мнению зарубежных экспертов, позволяет значительным образом повысить эксплуатационную надежность и многократно снизить риск отказа изделий при производстве железнодорожных колес, рельсов и ответственных конструкций [16].

Анализ последних достижений.

В настоящее время, с переходом к современной сталеплавильной технологии, включающей внепечную обработку и вакуумирование, в странах СНГ и за рубежом получил признание простой способ оценки склонности железнодорожного металла к флокенообразованию – по содержанию водорода в стали [6,17–27]. При его количестве менее 1,5 см³/100г (1,5 ppm) становится излишней операция противфлокеновой обработки заготовок или готового проката [18,20,25].

Несмотря на безусловную правомерность такого подхода, названный критерий представляется чрезмерно упрощенным, поскольку известно, что помимо водорода на образование флокенов влияют содержание в ста-

ли серы, углерода и других элементов, а также характер распределения внутренних напряжений в сечении рельсов и колес [15,26–31]. Кроме того, метод, по существу, основан на прогнозе качественных характеристик по одному из ряда технологических значимых параметров. Эффективность и надежность такого критерия обеспечиваются при высокой стабильности технологии.

На Нижнетагильском металлургическом комбинате (НТМК) после реконструкции в 1997 г. сталеплавильного производства (объем инвестиций 700 млн. долларов) осуществлен переход на выпуск рельсов и колес из непрерывнолитых заготовок конвертерной стали, которую перед разливкой рафинируют на установке ковш–печь и вакуумируют на *RH*–установке [21]. Для охлаждения и передачи заготовок диаметром 430 мм в рельсобалочный и колесопрокатный цеха предусмотрены специальные вагоны – термосы. В результате перехода на новую технологии выплавки стали улучшены комплекс механических свойств железнодорожных рельсов и колес и их макроструктура, уменьшено содержание водорода, азота, кислорода, загрязненность металла всеми видами неметаллических включений и т.д. Например, снизилась флокеночувствительность рельсовой стали вследствие уменьшения содержания водорода перед разливкой от 6 до 1–2 *ppm*, что позволяет рассматривать вакуумирование как процесс противоблокенной обработки. Вместе с этим инвестирование в реконструкцию колесопрокатного производства в объеме 110 млн. долларов позволило осуществить к концу 2004 г. механизацию работ на участке отделки колес, эксплуатацию дробеструйной установки, внедрить автоматизированную установку для обнаружения поверхностных дефектов, монтаж и эксплуатацию современных средств неразрушающего контроля, обеспечивающие выполнение ультразвукового контроля необходимой части сечения колеса в полном соответствии с требованиями любого стандарта.

Технология производства рельсов в наиболее развитых странах (Японии, Франции, Канаде, Австрии, Германии, США) в последние годы претерпела коренные изменения. Качество рельсов намного улучшилось, что позволило значительно увеличить скорость движения грузовых и пассажирских поездов. Наиболее существенные улучшения достигнуты по геометрическим параметрам изделий (главным образом, прямолинейности) и показателям, определяемым металлургическими факторами (чистота стали по сере, фосфору, газам и неметаллическим включениям, механические свойства и твердость поверхности катания). Это нашло отражение в стандартах международных организаций (Международного союза железных дорог и Евронормах) и ведущих в производстве рельсов стран (США, Канады, Японии), а также России [18]. Доля водорода в рельсах оговаривается в Евронормах (EN 3WG4Pt1W62), Канады (CN 12–16), США (AREA P.2) и новом стандарте России (ГОСТ Р) и не нормируется в Международном союзе железных дорог (UIC 860), Японии (JIS E101) и старом

ГОСТ 24182–80. Однако, судя по его фактическому содержанию в жидкой стали перед разливкой, принимают решение о проведении и режиме противоблоксной обработки. Установлено, что при содержании водорода менее $1,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($1,5 \text{ ppm}$) флокены в рельсах не образуются и противоблоксную обработку не проводят. При содержании водорода в стали в пределах $1,5\text{--}2,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ обязательно подвергают противоблоксной обработке исходные заготовки или рельсы, а при содержании больше $2,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ – только рельсы.

По аналогии с принятыми в действие новыми нормативно-техническими документами на железнодорожные рельсы, идет обсуждение и принятие нового Межгосударственного стандарта на производство железнодорожных колес [25]. В новой редакции стандарта ужесточены многие требования к аттестационным свойствам, характеристикам колес и методам контроля и направлены на дальнейшее улучшение качества и повышения конкурентоспособности отечественных изделий. Например, в действующем стандарте на производство цельнокатаных колес предусмотрено использование двух марок сталей. В проекте нового стандарта дополнительно включена марка стали 3, предназначенная для изготовления колес для грузовых вагонов, маневровых и грузовых локомотивов. По химическому составу она приближается к рельсовой стали по ГОСТ 51685–2000 и отличается повышенным содержанием углерода и ванадия и пониженным содержанием серы и фосфора (в сравнении с колесной сталью марок 1 и 2). Впервые в отличие от действующего стандарта введена жестко регламентированная норма содержания водорода в вакуумированном металле ($2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ или 2 ppm). Это означает, что если вакуумирование было недостаточным и остаточное содержание водорода перед разливкой превышает норму, то по стандарту такая сталь считается невакуумированной и изготовленные из нее колеса подлежат обязательной противоблоксной обработке в колодцах изотермической выдержки при 650°C в течение 3–4 часов.

На НТМК с учетом нового проекта ГОСТа на железнодорожные колеса, а также опыта производства колес по стандарту UIC 812–3 (выполнение заказов Швеции и Болгарии с дополнениями: применение вакуумированной стали, содержащей не более $2,5 \text{ ppm}$ водорода) проводят противоблоксную обработку колес в колодцах изотермической выдержки при температуре 650°C в течение 3–4 часов в случае, если остаточное содержание водорода перед разливкой превышало $2\text{--}2,5 \text{ ppm}$ [19,20,25].

Осуществляемый на НТЗ процесс производства стали отличается от этих схем производства наличием разрыва между вакуумированием и внепечной обработкой мартеновской стали и ее кристаллизацией в изложницах – разливка производится последовательно в установленные на поддонах изложницы из разливочного ковша, перемещаемого мостовым краном. При содержании водорода в металле менее $2,0 \text{ ppm}$ можно обходиться без применения специальной термической операции: противоблокс-

ной обработки колес. Точность определения содержания водорода в значительной мере зависит от всей процедуры анализа, включая метод отбора проб и операций по их подготовке. Известные и надежные методы отбора проб жидкой стали на сегодняшний день достаточно хорошо осуществимы в процессе производства стали, что невозможно сказать об известных методиках отбора, обработки и хранения проб на водород из твердой стали [1,26,27].

Методика исследования.

Для оптимизации технологического процесса производства колес необходимо создание системы сквозного контроля содержания водорода в стали, слитках и колесах на различных стадиях их изготовления. Была разработана достаточно надежная и простая методика определения количества остаточного водорода, корректный способ отбора проб и операций по их подготовке, на образцах, изготовленных из донной части слитка (рис.1), фрагмента обода (рис.2) и ступицы (рис.3) готового колеса с помощью специально разработанного полого сверла (рис. 4).

Рис.1. Схема разметки отбора проб из донной части колесного слитка для определения количества остаточного водорода.

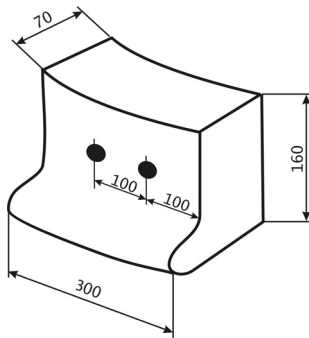
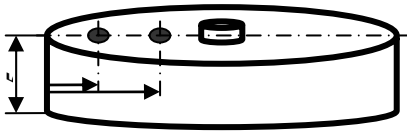
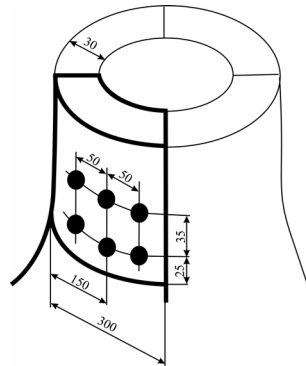


Рис.2. Схема разметки отбора проб в фрагменте обода колеса для определения содержания остаточного водорода.

Рис.3. Схема разметки отбора проб в фрагменте ступицы колеса для определения количества остаточного водорода.



От плавков по принятой на НТЗ технологии отбирались исследуемые слитки. Разрезку слитков осуществляли на слиткоразрезных станках модели 18А65 в колесопрокатном цехе. Отделе-

ние поперечных темплетов донной части слитков производили механическим способом на прессе для долома слитков.

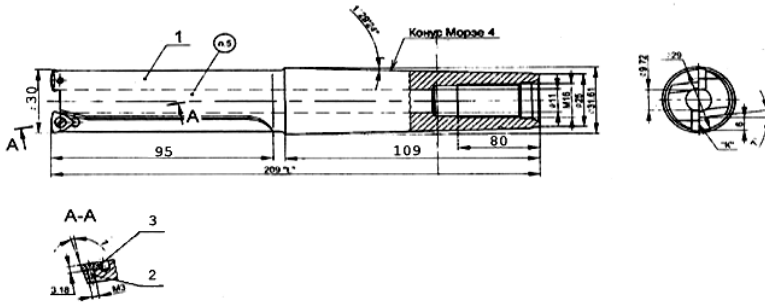


Рис. 4. Конструкция полого сверла для отбора проб при определении количества остаточного водорода.

Отбор металла, который предназначен для изготовления образцов для определения содержания остаточного водорода из готового колеса проводили на фрагментах обода и ступицы. Вырезку заготовок образцов осуществляли полым сверлом из темплетов донной части слитка и фрагментов колеса на радиально-сверлильном станке марки 2А334 в течение 3-х минут. Вследствие малой скорости резания образцов температура пробы превышала окружающую всего на 5–10⁰С. И заготовки, и сами образцы, представляющие собой цилиндры диаметром 3 мм и длиной 10 мм хранились в жидком азоте в сосудах Дьюара. Непосредственное определение содержания водорода в пробах проводили в соответствии с методикой работы на газоанализаторе фирмы «ЛЕКО» RH-420. До начала анализа содержания остаточного водорода на газоанализаторе образцы обезжиривали промывкой в спирте (эфире, авиационном бензине или четыреххлористом углероде). Поверхность образцов должна быть чистой, без пор, раковин, задигов. Обработка результатов определения количества остаточного водорода производилась автоматически с помощью встроенного в анализатор микропроцессора.

Выводы.

Таким образом, разработана типовая, надежная и простая методика отбора проб из твердого колесного металла для анализа на содержание остаточного водорода, согласованная и утвержденная Главным управлением вагонного хозяйства, инспекцией «Укрзалізниця» и предприятием – изготовителем колес. Контроль содержания остаточного водорода на всех переделах мартеновского и колесопрокатного производства позволит реализовать корректировку отдельных операций сквозного технологического процесса.

1. *Шапалов В.И.* Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 230 с.
2. *Галактионова Н.А.* Водород в металлах. – М.: Металлургия, 1967. – 303 с.
3. *Водород в металлах.* Т.1. Основные свойства /Под ред. Алефельда Г. и Фёлькия И. Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 475 с.
4. *Виды разрушений термомеханически упрочненной высокопрочной арматуры, подвергнутой водородному охрупчиванию* / О.Г.Сидоренко, И.П. Федорова, Е.М.Демченко и др. // Сб. науч.тр. ИЧМ. «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – К.: Наукова думка, 1995. –С. 222–229.
5. *Бащин Ю.А., Цурков В.Н., Коровина В.М.* Термическая обработка крупногабаритных изделий и полуфабрикатов на металлургических заводах: – М.: Металлургия, 1985. – 220 с.
6. *Термоупрочнение толстолистового проката из низколегированных марок стали, подвергаемого противоблоксной обработке* / В.А.Харченко, И.Е.Силаева, С.В.Коваленко и др. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. –1991. – № 1. –С. 77–78.
7. *Влияние водорода на механические свойства и флокенообразование стали 30ХГСА* / Р.Г.Мурадова, А.В.Гольцов, Г.Д.Уманская и др. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. –1991. –№ 1. –С. 71–73.
8. *Полторацкий Л.М., Громов В.Е., Чинокалов В.Я., Целлермаер В.Я.* Влияние водорода на пластичность проволоки при холодной осадке // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. –1991. –№ 4. –С. 56–58.
9. *Целлермаер В.Я., Кравченко П.Е., Громов В.Е.* Изменение при технологических испытаниях структуры стали 20Г2Р, подвергнутой наводороживанию // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. –1996. –№ 12. –С. 70–71.
10. *Особенности охрупчивающего воздействия металлургического водорода в термически упрочненной в потоке прокатки высокопрочной арматуры* / О.Г.Сидоренко, В.К.Бабич, И.П.Федорова и др. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. –1991. –№ 8. –С. 41–44.
11. *Сидоренко О.Г.* Водородное охрупчивание высокопрочной термомеханически упрочненной арматуры и способы его предотвращения // Металлургическая и горнорудная промышленность. –1999. –№ 5. –С. 68–71.
12. *Синяков К.А., Фуникова М.Н., Лукин С.А.* Влияние водорода на вязкость разрушения сталей и сплавов // МиТОМ. –1990. –№ 3. –С. 11–12.
13. *Склюев П.В.* Водород и флокены в крупных поковках. – М.: Машгиз, 1963. – 188 с.
14. *Металловедение и термическая обработка стали.* Т.3. / Под ред. М.Л.Бернштейна, А.Г.Рахштадта. – М.: Металлургия, 1983. – 215 с.
15. *Вороненко В.И.* Водород и флокены в стали // МиТОМ. –1997. –№ 11. –С. 12–18.
16. *Millman M.S.* Secondary steelmaking developments in British Steel // Ironmaking and Steelmaking. 1999. V.26. №3. PP. 169–175.
17. *Флокеночувствительность железнодорожных рельсов производства НТМК* / Дерябин Л.А., Горшенин И.Г., Матвеев В.В. и др. // Сталь. –2003. –№ 11. –С. 88–91.
18. *Повышение требований к качеству железнодорожных рельсов в новом национальном стандарте* / Дерябин А.А., Рабовский В.А., Шур Е.А. и др. // Сталь. – 2000. –№ 11. –С. 82–85.

19. *Паршин В.А., Парышев Ю.М., Стамбульчик М.А., Филиппов Г.А.* Опыт производства железнодорожных колес из вакуумированной «первородной» стали // Сталь. –1995. –№ 1. –С. 52–55.
20. *Опыт* производства железнодорожных колес по стандарту UIC 812–3 / А.А.Опарина, А.А.Фетисов, В.В.Тимофеев и др. // Сталь. –2002. –№ 4. –С. 83–84.
21. *Киричков А.А., Дерябин А.А.* Развитие производства металла для железнодорожного транспорта на Урале // Сталь. –2001. –№ 9. –С. 108–111.
22. *Новый* уровень качества железнодорожных рельсов из непрерывнолитых блюмов / Клачков А.А., Красильников В.О., Сидоров В.П., Фомин В.И. // Сталь. –2000. –№ 7. –С. 55–58.
23. *Качество* рельсов из непрерывнолитой стали, выплавляемой на основе «первородной» / Б.Ю.Зелинечок, А.А.Киричков, В.А.Паршин и др. шихты // Сталь. –1996. –№ 5. –С. 51–56.
24. *Оптимизация* противоблоксной обработки слябов с целью улучшения качества толстолистового проката / И.Л.Бродецкий, А.И.Троцан, О.В.Носоченко и др. // Сталь. –1996. –№ 11. –С. 60–63.
25. *Ужесточение* требований к качеству железнодорожных колес в проекте нового межгосударственного стандарта и меры по их обеспечению на НТМК / А.А.Дерябин, А.В.Кушнарев, В.А.Рабовский и др. // Сталь. –2004. –№ 5. –С. 92–93.
26. *Шаповалов В.И., Трофименко В.В., Антипова Н.В.* Распределение водорода в литом и горячедеформированном металле цельнокатаных колес // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. –1981. –№ 4. –С. 111–114.
27. *Шаповалов В.И., Староселецкий М.И., Трофименко В.В., Антипова Н.В.* Поведение водорода в стали при производстве цельнокатаных железнодорожных колес // Сталь. –1982. –№ 6. –С. 72–74.
28. *Узлов И.Г., Приходько Э.В., Школа В.И.* Влияние углерода и водорода на физические и служебные характеристики конструкционных сталей. / Int. Hydrogen Energy, Vol. 22, № 2/3, pp. 291–298, 1997.
29. *Влияние* водорода на процессы структурообразования в железоуглеродистых сплавах / В.И.Большаков, И.Г.Узлов, Л.Н.Дейнеко, В.И.Школа // Сб. научн. тр. ИЧМ НАНУ "Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии". – К.: Наукова думка.–2004. –Вып. 7. –С. 220–230.
30. *Узлов И.Г., Большаков В.И., Школа В.И.* Влияние углерода и водорода на структуру и свойства конструкционной стали // Сб. тр. Межд. конф. "Проблемы современного материаловедения". Часть 1. – Днепропетровск: Центр економічної освіти, 1997. – С. 28–31.
31. *Полухин П.И., Грдина Ю.В., Зарвин Е.Я.* Прокатка и термическая обработка железнодорожных рельсов. – М.: Металлургиздат, 1963. – 510 с.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф.. И.Г.Узловым