

УДК 621.771.294:621.785

Перков О. Н.<sup>1</sup>

Вакуленко И. А.<sup>2</sup>

Кузьмичев В. М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, ст. научн. сотр. ИЧМ НАНУ

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор ДНУЖТ

<sup>3</sup> инж., зав. отделом ИЧМ НАНУ

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

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 640–660°C, 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 вакуумирова-

ние, 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  $1,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  ( $1,5 \text{ ppm}$ ) становится излишней операция противоблоксной 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 стали 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 противоблоксной 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 3WG4Pt1 W62), 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 противфлокеной 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 противфлокеновую обработку не проводят. При содержании водорода в стали в пределах  $1,5\text{--}2,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  обязательно подвергают противфлокеной 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 принятое 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  $2 \text{ ppm}$ ). 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 противофлокеной обработке в колодцах изотермической выдержки при  $650^{\circ}\text{C}$  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 ppm водорода) проводят противофлокеновую обработку колес в колодцах изотермической выдержки при температуре  $650^{\circ}\text{C}$  в течение 3–4 часов в случае, если остаточное содержание водорода перед разливкой превышало 2–2,5 ppm [19, 20, 25].

Осуществляемый на НТЗ процесс производства стали отличается от этих схем производства наличием разрыва между вакуумированием и выпечной 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 ppm можно обходиться без применения специальной термической операции: противофлокеной 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), фрагментах обода (рис. 2) и ступицы (рис. 3) готового колеса с помощью специально разработанного полого сверла (рис. 4).

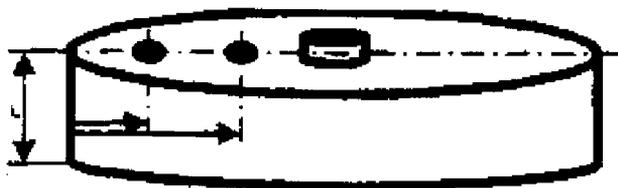


Рисунок 1 – Схема разметки отбора проб из донной части колесного слитка для определения количества остаточного водорода

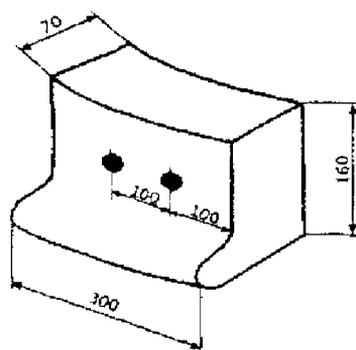


Рисунок 2 – Схема разметки отбора проб в фрагменте обода колеса для определения содержания остаточного водорода

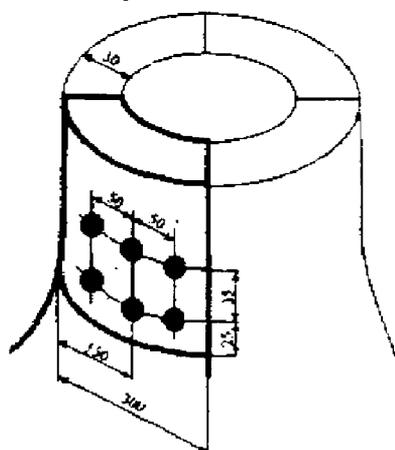


Рисунок 3 – Схема разметки отбора проб в фрагменте ступицы колеса для определения количества остаточного водорода

От плавок по принятой технологии отбирались исследуемые слитки. Разрезку слитков осуществляли на слиткорезных станках модели 18А65 в колесопрокатном цехе. Отделение поперечных темплетов донной части слитков производили механическим способом на прессе для долома слитков.

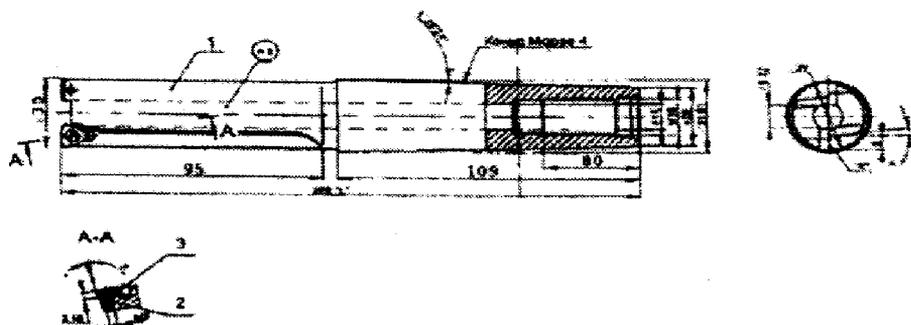


Рисунок 4 – Конструкция полого сверла для отбора проб при определении количества остаточного водорода

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 5–10°С. 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, задиров. 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.

### **Список литературы**

1. 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.
2. Башнин Ю. А. Термическая обработка крупногабаритных, изделий и полуфабрикатов на металлургических заводах / Ю. А. Башнин, В. Н. Цурков, В. М. Коровина. – М. : Металлургия, 1985. – 220 с.
3. 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.

4. Влияние водорода на механические свойства и флокенообразование стали 30ХГСА / [Р. Г. Мурадова, А. В. Гольцов, Г. Д. Умайская и др.] // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1991. – № 1. – С. 71–73.
5. Полторацкий Л. М. Влияние водорода на пластичность проволоки при холодной осадке / Л. М. Полторацкий, В. Е. Громов, В. Я. Чинокалов, В. Я. Целлермаер // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1991. – № 4. – С. 56–58.
6. Целлермаер В. Я. Изменение при технологических испытаниях структуры стали 20Г2Р, подвергнутой наводороживанию / В. Я. Целлермаер, П. Е. Кравченко, В. Е. Громов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1996. – № 12. – С. 70–71.
7. Сидоренко О. Г. Водородное охрупчивание высокопрочной термомеханически упрочненной арматуры и способы его предотвращения / О. Г. Сидоренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 5. – С. 68–71.
8. Синяков К. А. Влияние водорода на вязкость разрушения сталей и сплавов / К. А. Синяков, М. Н. Фуникова, С. А. Лукин // МитОМ. – 1990. – № 3. – С. 11–12.
9. Вороненко В. И. Водород и флокены в стали / В. И. Вороненко // МитОМ. – 1997. – № 11. – С. 12–18.
10. Millman M. S. Secondary steelmaking developments in British Steel / M. S. Millman // Ironmaking and Steelmaking. – 1999. – Vol. 26, № 3. – P. 169–175.
11. Флокеночувствительность железнодорожных рельсов производства НТМК / [Дерябин Л. А., Горшенин И. Г., Матвеев В. В. и др.] // Сталь. – 2003. – № 11 – С. 88–91.
12. Оптимизация противоблоксной обработки слэбов с целью улучшения качества толстолистового проката / И. Л. Бродецкий, А. И. Троцан, О. В. Носоченко и др. // Сталь. – 1996. – № 11 – С. 60–63.
13. Узлов И. Г. Влияние углерода и водорода на физические и служебные характеристики конструкционных сталей / И. Г. Узлов, Э. В. Приходько, В. И. Школа // Int. Hydrogen Energy. – 1997. – Vol. 22, № 2/3. – pp. 291–298.
14. 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.