

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **041988**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.12.22

(21) Номер заявки
201992323

(22) Дата подачи заявки
2018.03.30

(51) Int. Cl. **C21D 9/34** (2006.01)
C22C 38/00 (2006.01)
C22C 38/24 (2006.01)

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ КОЛЕСО

(31) **2017-070847; 2018-014271**

(32) **2017.03.31; 2018.01.31**

(33) **JP**

(43) **2020.02.19**

(86) **PCT/JP2018/013538**

(87) **WO 2018/181862 2018.10.04**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
НИППОН СТИЛ КОРПОРЕЙШН
(JP)

(72) Изобретатель:
Маедзима Такето, Кубота Манабу (JP)

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(56) **JP-A-2004315928**
WO-A1-2015190088

(57) Предлагается железнодорожное колесо, при изготовлении которого гарантированно не допускается возникновение вторичного цементита. После нагрева полуфабриката, содержащего 0,80-1,15 мас.% С, до температуры превращения не ниже температуры A_{cm} его охлаждают таким образом, чтобы скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C удовлетворяла следующим условиям: на поверхностях, отличающихся от поверхности катания и гребня, она была не более F_{n1} , определяемого выражением (1), а в той зоне, где скорость охлаждения является минимальной, она была не менее F_{n2} , определяемого выражением (2), и на поверхности катания и гребня она была не менее F_{n2} .

$$F_{n1} = -5,0 + \exp(5,651 - 1,427 \times C - 1,280 \times Si - 0,7723 \times Mn - 1,815 \times Cr - 1,519 \times Al - 7,798 \times V) \quad (1)$$

$$F_{n2} = 0,515 + \exp(-24,816 + 24,121 \times C + 1,210 \times Si + 0,529 \times Mn + 2,458 \times Cr - 15,116 \times Al - 5,116 \times V) \quad (2)$$

B1**041988****041988****B1**

Область техники

Настоящее изобретение относится к способу изготовления железнодорожного колеса и железнодорожному колесу.

Предпосылки создания изобретения

Железнодорожное транспортное средство перемещается по рельсам, образующим железнодорожный путь. Железнодорожное транспортное средство включает множество железнодорожных колес. Железнодорожное колесо обеспечивает опору этому транспортному средству, контактируя с рельсом, и перемещается по рельсу, катясь по нему. Из-за контакта с рельсом железнодорожное колесо изнашивается. Для повышения эффективности транспортировки по железной дороге стараются увеличить вес груза, перевозимого железнодорожным транспортным средством, и увеличить скорость этого транспортного средства. Поэтому существует потребность в повышении износостойкости железнодорожных колес, используемых в железнодорожном транспортном средстве.

Технологии, обеспечивающие повышение износостойкости железнодорожного колеса, предложены в опубликованной заявке на японский патент № 09-202937 (патентный документ 1), опубликованной заявке на японский патент № 2012-107295 (патентный документ 2), опубликованной заявке на японский патент № 2013-231212 (патентный документ 3) и опубликованной заявке на японский патент № 2004-315928 (патентный документ 4).

Железнодорожное колесо, описанное в патентном документе 1, состоит из следующего (в мас.%): C - 0,4-0,75; Si - 0,4-0,95; Mn - 0,6-1,2; Cr - 0-0,2 или менее; P - 0,03 или менее; S - 0,03 или менее; Fe и неизбежные примеси - остальное. В этом железнодорожном колесе область от поверхности катания до глубины по меньшей мере 50 мм по структуре состоит из перлита. Способ изготовления железнодорожного колеса в патентном документе 1 включает этап закалки, на котором поверхность катания колеса охлаждают таким образом, чтобы кривая охлаждения для этой поверхности проходила через зону образования перлита на кривой превращения при непрерывном охлаждении и находилась на стороне большей длительности по времени от кривой мартенситного превращения.

Железнодорожное колесо, описанное в патентном документе 2, имеет следующий химический состав (в мас.%): C - 0,65-0,84; Si - 0,02-1,00; Mn - 0,50-1,90; Cr - 0,02-0,50; V - 0,02-0,20; S - 0,04 или менее; Fe и примеси - остальное, причем содержание $P \leq 0,05\%$, $Cu \leq 0,20\%$ и $Ni \leq 0,20\%$. Кроме того, для химического состава соблюдаются следующие соотношения:

$$34 \leq 2,7 + 29,5 \times C + 2,9 \times Si + 6,9 \times Mn + 10,8 \times Cr + 30,3 \times Mo + 44,3 \times V \leq 43 \text{ и} \\ 0,76 \times \exp(0,05 \times C) \times \exp(1,35 \times Si) \times \exp(0,38 \times Mn) \times \exp(0,77 \times Cr) \times \exp \\ (3,0 \times Mo) \times \exp(4,6 \times V) \leq 25$$

В патентном документе 2 утверждается, что при соблюдении указанных выше химического состава и соотношений сталь для железнодорожного колеса позволяет обеспечить превосходные износостойкость, усталостную стойкость в контакте качения и стойкость к выкрашиванию. Железнодорожное колесо, описанное в патентном документе 3, состоит из следующего (в мас.%): C - 0,65-0,84; Si - 0,4-1,0; Mn - 0,50-1,40; Cr - 0,02-0,13; S - 0,04 или менее; V - 0,02-0,12; Fe и примеси - остальное, причем F_n1 , рассчитываемый по формуле (1), составляет от 32 до 43, и F_n2 , рассчитываемый по формуле (2), не превышает 25. Формула (1) является следующей:

$$F_n1 = 2,7 + 29,5C + 2,9Si + 6,9Mn + 10,8Cr + 30,3Mo + 44,3V$$

и формула (2) является следующей:

$$F_n2 = \exp(0,76) \times \exp(0,05C) \times \exp(1,35Si) \times \exp(0,38Mn) \times \exp(0,77Cr) \times \exp(3,0Mo) \times \exp(4,6V)$$

В патентном документе 3 утверждается, что сталь для железнодорожного колеса позволяет обеспечить превосходные износостойкость, усталостную стойкость в контакте качения и стойкость к выкрашиванию, если она имеет указанный выше химический состав, а F_n1 и F_n2 удовлетворяют указанным выше соотношениям. Железнодорожное колесо, описанное в патентном документе 4, представляет собой цельное колесо железнодорожного транспортного средства, состоящее из стали, имеющей следующий химический состав (в мас.%): C - 0,85-1,20; Si - 0,05-2,0; Mn - 0,05-2,0; и, если необходимо, заранее определенное количество одного или более из следующих химических элементов: Cr, Mo, V, Nb, B, Co, Cu, Ni, Ti, Mg, Ca, Al, Zr и N, Fe и неизбежные примеси - остальное, причем по меньшей мере часть поверхности катания и/или поверхности гребня колеса по структуре состоит из перлита. В патентном документе 4 утверждается, что срок службы колеса железнодорожного транспортного средства зависит от степени износа поверхности катания и поверхности гребня (абзац [0002] патентного документа 4) и, кроме того, зависит от наличия трещин на этих поверхностях, возникновение которых обусловлено увеличением выделения теплоты при торможении в случае высокоскоростной железнодорожной магистрали. В нем также утверждается, что в случае когда колесо железнодорожного транспортного средства имеет указанную выше структуру, можно уменьшить износ и не допустить возникновения термических трещин на поверхности катания и поверхности гребня.

Список литературы

Патентная литература.

Патентный документ 1: опубликованная заявка на японский патент № 09-202937.

Патентный документ 2: опубликованная заявка на японский патент № 2012-107295.

Патентный документ 3: опубликованная заявка на японский патент № 2013-231212.

Патентный документ 4: опубликованная заявка на японский патент № 2004-315928.

Непатентная литература.

Непатентный документ 1: F. Wever et al., Zur Frage der Wärmebehandlung der Stähle auf Grund ihrer Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubilder, Stahl u Eisen, 74 (1954), с. 749-761.

Сущность изобретения

Техническая проблема.

В железнодорожных колесах, описанных в указанных выше патентных документах 1, 2 и 3, износостойкость повышают за счет активного содержания в составе V. Однако при применении этих известных из документов уровня техники железнодорожных колес для грузового железнодорожного транспорта, где требуются увеличение веса груза и повышение скорости, не всегда можно обеспечить достаточную износостойкость. В то же время железнодорожное колесо, описанное в патентном документе 4, изготовлено из заэвтектоидной стали, в которой по сравнению с патентными документами 1, 2, 3 увеличено содержание C. Когда это железнодорожное колесо применяется для грузового железнодорожного транспорта, где требуются увеличение веса груза и повышение скорости, потенциально возможно обеспечить достаточную износостойкость. При этом данное железнодорожное колесо изготавливают приведенным далее образом. Биллет (круглую заготовку) подвергают обработке в горячем состоянии с получением полуфабриката, имеющего форму железнодорожного колеса. Полученный полуфабрикат подвергают термической обработке (закалке поверхности катания). При закалке поверхности катания после нагрева полуфабриката на его поверхность катания и гребень распыляют охлаждающую воду для их быстрого охлаждения. Отметим, что при быстром охлаждении поверхности катания и гребня также охлаждаются часть ступицы и часть диска. В результате в структуре матрицы внешнего слоя, находящегося непосредственно под поверхностью катания, и в приповерхностной части гребня образуется мелкозернистый перлит, имеющий высокую износостойкость. Однако во внешнем слое, находящемся непосредственно под поверхностью катания, и в приповерхностной части гребня после закалки поверхности катания над слоем мелкозернистого перлита также образуется слой мартенсита и/или бейнита. Далее слой, состоящий из мартенсита и/или бейнита, который возникает во внешнем слое у поверхности катания и внешнем слое гребня при быстром охлаждении этих поверхности и гребня после термической обработки, называется "закаленным слоем". При использовании железнодорожного колеса, имеющего закаленный слой во внешнем слое у поверхности катания и внешнем слое гребня, этот закаленный слой будет подвергаться износу во время эксплуатации колеса. По этой причине при традиционном изготовлении железнодорожного колеса закаленный слой, возникший во внешнем слое у поверхности катания и внешнем слое гребня, удаляют путем обработки резанием, чтобы на поверхность катания и поверхность гребня полуфабриката железнодорожного колеса после закалки поверхности катания открыть мелкозернистый перлит. В результате выполнения описанного процесса изготовления получают обычное железнодорожное колесо. Однако в результате исследования, выполненного авторами настоящего изобретения, было обнаружено, что в случае когда железнодорожное колесо состоит из заэвтектоидной стали, как в патентном документе 4, при использовании обычного способа для изготовления этого колеса может ухудшиться ударная вязкость части ступицы и части диска. Для обычного железнодорожного колеса, при том что структура поверхности катания и гребня, входящих в состав части обода, была изучена с целью продления срока службы железнодорожного колеса, не были проведены исследования направленные на структуру части ступицы и части диска железнодорожного колеса. Задача настоящего изобретения - предложить способ изготовления железнодорожного колеса, позволяющий гарантированным образом получать железнодорожное колесо из заэвтектоидной стали, имеющее превосходную ударную вязкость, а также предложить такое железнодорожное колесо.

Устранение проблемы.

Способ изготовления железнодорожного колеса, соответствующий одному варианту осуществления настоящего изобретения, включает этап нагрева и этап охлаждения. На этапе нагрева полуфабрикат железнодорожного колеса, имеющий следующий химический состав, состоящий из, в мас. %: C - 0,80-1,15; Si - 1,00 или менее; Mn - 0,10-1,25; P - 0,050 или менее; S - 0,030 или менее; Al - 0,025-0,650; N - 0,0030-0,0200; Cr - 0-0,60; V - 0-0,12; Fe и примеси - остальное, и включающий часть ступицы, часть обода, имеющую поверхность катания и гребень, и часть диска, расположенную между частью ступицы и частью обода, нагревают до температуры превращения не ниже температуры A_{cm} (°C). На этапе охлаждения полуфабрикат охлаждают таким образом, что

скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C на его поверхностях, отличающихся от поверхности катания и поверхности гребня, была не более $Fn1^{\circ}C/c$, определяемого выражением (1);

скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C в той области, в которой скорость охлаждения является минимальной в упомянутом полуфабрикате, составляет не менее $Fn2^{\circ}C/c$, определяемого выражением (2); и

скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C на поверхности катания и поверхности гребня упомянутого полуфабриката составляет не менее $F_n 2^\circ\text{C}/\text{с}$:

$$F_{n1} = -5,0 + \exp(5,651 - 1,427 \times C - 1,280 \times Si - 0,7723 \times Mn - 1,815 \times Cr - 1,519 \times Al - 7,798 \times V) \quad (1)$$

$$F_{n2} = 0,515 + \exp(-24,816 + 24,121 \times C + 1,210 \times Si + 0,529 \times Mn + 2,458 \times Cr - 15,116 \times Al - 5,116 \times V) \quad (2)$$

причем каждый символ элемента в выражениях (1) и (2) показывает содержание соответствующего элемента в мас.%. Железнодорожное колесо, соответствующее данному варианту, имеет следующий химический состав, состоящий из, в мас.%, C - 0,80-1,15; Si - 1,00 или менее; Mn - 0,10-1,25; P - 0,050 или менее; S - 0,030 или менее; Al - 0,025-0,650; N - 0,0030-0,0200; Cr - 0-0,60; V - 0-0,12; Fe и примеси - остальное, и включает часть ступицы, часть обода, имеющую поверхность катания и гребень, и часть диска, расположенную между частью ступицы и частью обода. В микроструктуре ступицы доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита (доэвтектоидного цементита от англ. proeutectoid cementite), определенное по приведенной далее формуле (А), не превышает 1,0 частицы/100 мкм. В микроструктуре части диска доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита, определенное по приведенной далее формуле (А), не превышает 1,0 частицы/100 мкм. В микроструктуре части обода доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита, определенное по приведенной далее формуле (А), не превышает 1,0 частицы/100 мкм, где

$$\text{количество вторичного цементита (частиц/100 мкм)} = \frac{\text{общее количество частиц вторичного цементита, через которые проходят две диагонали в квадратном поле зрения } 200 \text{ мкм} \times 200 \text{ мкм} / (5,66 \times 100 \text{ мкм})}{(A)}.$$

Преимущества изобретения.

Способ изготовления железнодорожного колеса, соответствующий настоящему изобретению, позволяет гарантированным образом получать железнодорожное колесо из заэвтектоидной стали, которое имеет превосходную ударную вязкость.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 приведен разрез при сечении плоскостью, проходящей параллельно центральной оси железнодорожного колеса.

На фиг. 2 приведена диаграмма, иллюстрирующая связь между твердостью железнодорожного колеса по Виккерсу и степенью износа этого колеса, определенной при испытании на износ по схеме Nishihara.

На фиг. 3 схематично показано испытание на износ по схеме Nishihara.

На фиг. 4 приведена диаграмма, иллюстрирующая связь между содержанием C, скоростью охлаждения и наличием закаленного слоя и вторичного цементита, которая получена на основе результатов испытания на термическую обработку, имитирующего термическую обработку при изготовлении железнодорожного колеса.

На фиг. 5 приведена диаграмма, иллюстрирующая связь между содержанием Si, скоростью охлаждения и наличием закаленного слоя и вторичного цементита, которая получена на основе результатов испытания на термическую обработку, имитирующего термическую обработку при изготовлении железнодорожного колеса.

На фиг. 6 приведена диаграмма, иллюстрирующая связь между содержанием Mn, скоростью охлаждения и наличием закаленного слоя и вторичного цементита, которая получена на основе результатов испытания на термическую обработку, имитирующего термическую обработку при изготовлении железнодорожного колеса.

На фиг. 7 приведена диаграмма, иллюстрирующая связь между содержанием Cr, скоростью охлаждения и наличием закаленного слоя и вторичного цементита, которая получена на основе результатов испытания на термическую обработку, имитирующего термическую обработку при изготовлении железнодорожного колеса.

На фиг. 8 приведена диаграмма, иллюстрирующая связь между содержанием Al, скоростью охлаждения и наличием закаленного слоя и вторичного цементита, которая получена на основе результатов испытания на термическую обработку, имитирующего термическую обработку при изготовлении железнодорожного колеса.

На фиг. 9 приведена диаграмма, иллюстрирующая связь между содержанием V, скоростью охлаждения и наличием закаленного слоя и вторичного цементита, которая получена на основе результатов испытания на термическую обработку, имитирующего термическую обработку при изготовлении железнодорожного колеса.

На фиг. 10 схематично показано примерное охлаждающее устройство, используемое в способе изготовления железнодорожного колеса, соответствующем представленному варианту.

На фиг. 11 схематично показан способ измерения количества вторичного цементита.

На фиг. 12 приведены графики зависимости твердости по шкале С Роквелла (HRC) от расстояния от водоохлажденного торца образца для испытания по Джомини (кривые Джомини), которые получены в примере при испытании на торцовую закалку по Джомини.

Подробное описание вариантов реализации

Конструкция железнодорожного колеса.

На фиг. 1 приведен разрез при сечении плоскостью, проходящей через центральную ось железнодорожного колеса. Как показано на фиг. 1, железнодорожное колесо 1 имеет форму диска и включает часть 2 ступицы, часть 3 диска и часть 4 обода. Часть 2 ступицы имеет цилиндрическую форму и расположена в средней части железнодорожного колеса 1. Часть 2 ступицы имеет сквозное отверстие 21. Центральная ось сквозного отверстия 21 совпадает с центральной осью железнодорожного колеса 1. В сквозное отверстие 21 вставляют осевой вал, который не показан. Толщина Т2 части 2 ступицы больше толщины Т3 части 3 диска. Часть 4 обода образована на внешней периферии железнодорожного колеса 1. Часть 4 обода включает в себя поверхность 41 катания и гребень 42. Поверхность 41 катания сопряжена с гребнем 42. При использовании железнодорожного колеса 1 поверхности 41 катания и гребня 42 контактируют с поверхностью рельса. Толщина Т4 части 4 обода больше толщины Т3 части 3 диска. Часть 3 диска расположена между частью 2 ступицы и частью 4 обода. Часть 3 диска по его внутреннему краю соединена с частью 2 ступицы и по внешнему краю соединена с частью 4 обода. Толщина Т3 части 3 диска меньше толщины Т2 части 2 ступицы и толщины Т4 части 4 обода. Авторы настоящего изобретения изучили пути повышения износостойкости железнодорожного колеса. В результате они обнаружили приведенное далее.

Повышение износостойкости путем увеличения содержания С.

На фиг. 2 приведена диаграмма, иллюстрирующая связь между твердостью железнодорожного колеса по Виккерсу и степенью износа этого колеса, определенной при испытании на износ по схеме Nishihara. Фиг. 2 получена в результате проведения эксперимента, который рассмотрен далее. Из каждого из слитков, имеющих химический состав, указанный в табл. 1, был изготовлен круглый стержень диаметром 40 мм.

Таблица 1

Сталь №	Химический состав (мас.%, остальное – Fe и примеси)								
	C	Si	Mn	S	Al	N	P	Cr	V
1	0,84	0,30	0,81	0,002	0,032	0,0038	0,001	–	–
2	0,93	0,29	0,80	0,002	0,032	0,0042	0,001	–	–
3	1,00	0,30	0,80	0,002	0,034	0,0040	0,001	–	–
4	1,09	0,30	0,79	0,002	0,036	0,0040	0,001	–	–
21	0,79	0,29	0,81	0,002	0,035	0,0030	0,001	0,10	–
22	0,76	0,29	0,79	0,001	0,034	0,0026	0,001	0,08	0,028
23	0,75	0,29	0,80	0,002	0,034	0,0033	0,001	0,10	0,058
24	0,75	0,29	0,80	0,002	0,034	0,0032	0,001	0,10	0,097
25	0,78	0,75	0,82	0,002	0,036	0,0038	0,001	0,10	–
26	0,75	0,77	0,79	0,001	0,038	0,0034	0,001	0,09	0,028
27	0,77	0,77	0,81	0,001	0,033	0,0032	0,001	0,10	0,058
28	0,76	0,76	0,82	0,001	0,036	0,0027	0,001	0,10	0,096

Из круглого стержня был изготовлен необработанный испытательный образец (соответствующий полуфабрикату железнодорожного колеса) в форме кольца диаметром 32 мм и шириной 10 мм. Необработанный испытательный образец был подвергнут закалке, которая имитировала закалку поверхности катания железнодорожного колеса. Если говорить конкретно, необработанный испытательный образец из каждой стали, указанной под соответствующим номером, выдерживался при температуре термической обработки 950°C в течение 20 мин. Для создания мелкозернистой перлитной структуры после выдержки необработанный испытательный образец был вынут из печи и погружен в соляную ванну, имеющую температуру 550°C. Время нахождения в соляной ванне составляло 7 мин. По истечении этих 7 мин необработанный испытательный образец был вынут из соляной ванны и охлажден до комнатной температуры (25°C). Для имитации отпуска во время изготовления железнодорожного колеса, каждый необработанный испытательный образец после охлаждения выдерживался при температуре термической обработки 450°C в течение 3 ч. После выдержки при температуре термической обработки 450°C в течение 3 ч необработанный испытательный образец охлаждался до комнатной температуры (25°C).

После охлаждения была выполнена обработка резанием необработанного испытательного образца по его внешней окружности для получения образца 100 колеса (соответствующего железнодорожному колесу), который имел цилиндрическую форму, показанную на фиг. 3. Образец 100 колеса имел диаметр D100, составляющий 29,39 мм, и ширину W100, составляющую 8 мм.

Кроме того, была получена сталь № 29, указанная в табл. 2, которая была использована в качестве материала рельса.

Таблица 2

Сталь №	Химический состав (мас.%, остальное – Fe и примеси)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
29	0,99	0,51	0,71	0,011	0,008	0,22	–

Из стали № 29 как материала рельса был изготовлен образец 200 рельса, имеющий форму кольца и показанный на фиг. 3. Образец 200 рельса имел диаметр D200, составляющий 30,0 мм, и ширину W200, составляющую 5 мм. С использованием оптического микроскопа при 500-кратном увеличении была изучена структура металла образца 100 колеса в положении на глубине 2-3 мм от внешней окружной поверхности к центральной оси. Аналогичным образом с использованием оптического микроскопа при 500-кратном увеличении была изучена структура металла образца 200 рельса в положении на глубине 2-3 мм от внешней окружной поверхности к центральной оси. В результате изучения структуры было установлено, что по структуре образца 100 колеса из сталей № 1-4 и 21-28 состояли из единственной перлитной фазы и образец 200 рельса по структуре также состоял из единственной перлитной фазы. Помимо этого, для образца 100 колеса в том же положении, что и при изучении структуры, т.е. в положении на глубине 2-3 мм от внешней окружной поверхности к центральной оси, путем проведения испытания по стандарту JIS Z 2244 (2009) была измерена твердость по Виккерсу. Во всех случаях при испытании сила составляла 2,9421 Н. Аналогичным образом для образца 200 рельса в том же положении, что и при изучении структуры, т.е. в положении на глубине 2-3 мм от внешней окружной поверхности, путем проведения испытания по стандарту JIS Z 2244 (2009) была измерена твердость по Виккерсу. При испытании сила составляла 2,9421 Н. В результате твердость по Виккерсу образца 200 рельса составила 430 HV. Центр ширины внешней окружной поверхности образца 100 колеса и центр ширины внешней периферийной поверхности образца 200 рельса были приведены в контакт друг с другом, и было выполнено испытание на износ со взаимным вращением образца 100 колеса и образца 200 рельса при их прижатии друг к другу с силой 900 МПа. Скорость вращения образца 100 колеса составляла 800 об/мин, и скорость вращения образца 200 рельса составляла 775 об/мин. Таким образом, относительное скольжение образца 100 колеса и образца 200 рельса составляло 1,1%. По окончании испытания, а именно после совершения образцом 100 колеса 500000 оборотов, была измерена его масса (г). Затем была определена разность между массой (г) образца 100 колеса до испытания и его массой (г) после испытания, и в качестве степени износа колеса был принят результат деления этой разности масс на 50 (г/10000 об). Отметим, что из каждой стали было изготовлено 4 образца 100 колеса и для каждой стали с использованием таких образцов одно и то же испытание проводилось 4 раза. За степень износа железнодорожного колеса из каждой стали было принято среднее значение от степеней износа образцов 100 колеса, которое было получено в этих четырех испытаниях. Полученные для каждой стали твердость по Виккерсу и степень износа образца 100 колеса были использованы для создания фиг. 2.

Символом $\diamond$ на фиг. 2 указан результат испытаний при использовании сталей, не содержащих V, в которых содержание Si является примерно постоянным и составляет приблизительно 0,3% и содержание C изменяется от 0,8 до 1,1% (далее называются "заэвтектоидными сталями, не содержащими V"). Символом $\circ$ указаны результаты испытаний при использовании сталей, в которых содержание C находится в диапазоне от 0,75 до 0,79%, содержание Si является примерно постоянным и составляет приблизительно 0,3% и содержание V изменяется от 0% до приблизительно 0,1% (далее называются "заэвтектоидными сталями с разным содержанием V и низким содержанием Si"). Символом Δ указаны результаты испытаний при использовании сталей, в которых содержание C находится в диапазоне от 0,75 до 0,79%, содержание Si является примерно постоянным и составляет приблизительно 0,8% и содержание V изменяется от 0% до приблизительно 0,1% (далее называются "заэвтектоидными сталями с разным содержанием V и высоким содержанием Si"). Число рядом с каждым символом на фиг. 2 - это номер стали в табл. 1. Если обратиться к фиг. 2, по мере увеличения содержания V увеличивалась твердость по Виккерсу колеса из заэвтектоидных сталей с разным содержанием V и низким содержанием Si (символ $\circ$). Если говорить конкретно, твердость по Виккерсу увеличивалась при увеличении содержания V от безванадиевой стали (сталь 21) до 0,028% (сталь 22), 0,058% (сталь 23) и 0,097% (сталь 24). При этом твердость по Виккерсу оставалась на уровне около 350 HV и степень износа снизилась всего лишь до приблизительно 0,015 г/10000 об. В то же время в заэвтектоидных сталях с разным содержанием V и высоким содержанием Si (символ Δ) по мере увеличения содержания V от безванадиевой стали (сталь 25) до 0,028% (сталь 26), 0,058% (сталь 27) и 0,096% (сталь 28) твердость по Виккерсу увеличилась до приблизительно 380 HV. Однако даже несмотря на увеличение твердости по Виккерсу степень износа колеса осталась постоянной и находилась на уровне приблизительно 0,015 г/10000 об и дальнейшего снижения не произошло. В то же время в заэвтектоидных сталях, не содержащих V (символ $\diamond$), твердость по Виккерсу увеличивалась при увеличении содержания C с 0,84% (сталь 1) до 0,93% (сталь 2), 1,00% (сталь 3) и 1,09% (сталь 4). Кроме того, при увеличении твердости по Виккерсу степень износа снизилась до приблизительно 0,010 г/10000 об.

На основе указанного выше можно сказать, что износостойкость железнодорожного колеса из стали, предназначенной для его изготовления, повышается сильнее, если увеличивать твердость за счет уве-

личения содержания С, а не за счет увеличения содержания V, даже при обеспечении одной и той же твердости. Хотя причина этого не является очевидной, предполагается приведенное далее объяснение. Во время использования железнодорожного колеса на поверхность катания действует внешняя сила (нагрузка) со стороны рельса. Под действием этой силы цементит, входящий в состав перлита, содержащегося во внешнем слое, находящемся непосредственно под поверхностью катания, разрушается, и твердость дополнительно увеличивается в результате дисперсионного упрочнения. Кроме того, углерод, содержащийся в мелкозернистом разрушенном цементите, растворяется в феррите, входящем в состав перлита, с возникновением пересыщенного раствора, что приводит к увеличению твердости внешнего слоя, находящегося непосредственно под поверхностью катания, в результате твердорастворного упрочнения. Увеличение содержания С в стали будет приводить к увеличению объемной доли цементита в перлите. Помимо этого, повысится вероятность возникновения более мелких пластинок перлита. В этом случае, при действии описанного выше механизма, износостойкость железнодорожного колеса будет повышаться. В то же время, если в стали содержится V, ее твердость увеличивается в результате дисперсионного упрочнения при возникновении карбонитрида V. В этом случае, так как карбонитрид V возникает в феррите, он увеличивает, главным образом, твердость феррита. Т.е. содержание V не влияет в значительной степени на измельчение перлита. По этой причине, хотя износостойкость в определенной степени можно повысить за счет содержания V, ее нельзя повысить столь же сильно, как в случае дисперсионного упрочнения при разрушении цементита и упрочнения из-за перехода С в твердый раствор. Поэтому даже при обеспечении одинаковой твердости стали железнодорожного колеса износостойкость можно повысить сильнее за счет увеличения содержания С, чем за счет введения в состав V.

На основе результатов описанного выше исследования авторы настоящего изобретения пришли к выводу, что в плане повышения износостойкости для железнодорожного колеса предпочтительно использовать заэвтектоидную сталь со следующим химическим составом (в мас.%): С - 0,80-1,15; Si - 1,00 или менее; Mn - 0,10-1,25; P - 0,050 или менее; S - 0,030 или менее; Al - 0,025-0,650; N - 0,0030-0,0200; Cr - 0-0,60; V - 0-0,12; Fe и примеси - остальное.

Недопущение возникновения вторичного цементита.

Как описано выше, железнодорожное колесо изготавливают, подвергая его полуфабрикат термической обработке (закалка поверхности катания). В железнодорожном колесе износостойкость необходима для поверхности катания и гребня, которые приводятся в контакт с рельсом. Поэтому при термической обработке полуфабриката в обычном процессе изготовления железнодорожного колеса на поверхность катания и гребень, входящие в состав обода этого полуфабриката, распыляют охлаждающую среду (воду или текучую среду в виде смеси воды и воздуха) для их быстрого охлаждения с возникновением структуры из мелкозернистого перлита во внешнем слое, находящемся непосредственно под поверхностью катания, и во внешнем слое гребня. В то же время при обычной термической обработке другие поверхности железнодорожного колеса, отличающиеся от поверхности катания и поверхности гребня, а именно поверхность ступицы, поверхность диска и боковую поверхность обода, охлаждают без распыления охлаждающей среды. Это объясняется тем, что, как описано выше, требуется износостойкость поверхности катания и поверхности гребня, входящих в состав обода, и не требуется износостойкость других поверхностей (поверхностей ступицы и диска и боковой поверхности обода).

В доэвтектоидной стали и эвтектоидной стали, в которых содержание С является низким, как в обычном железнодорожном колесе, вторичный цементит возникать не будет. Но в случае заэвтектоидной стали, в которой содержание С составляет 0,80% или более, как в случае указанного выше химического состава, исследование, выполненное авторами настоящего изобретения, позволило впервые обнаружить, что при изготовлении железнодорожного колеса с использованием обычного способа в этом колесе может возникать вторичный цементит и, в частности, есть вероятность его возникновения в части ступицы и части диска, которые подвергают обычному охлаждению при закалке поверхности катания. Вторичный цементит ухудшает ударную вязкость. Поэтому в железнодорожном колесе, состоящем из заэвтектоидной стали, в которой содержание С составляет 0,80% или более, предпочтительно не допускать возникновения вторичного цементита не только в части обода, но также в части ступицы и части диска. Кроме того, ударную вязкость железнодорожного колеса также ухудшает закаленный слой, возникающий во внешнем слое полуфабриката во время термической обработки, если он остается в этом колесе, а не удаляется путем обработки резанием. По этой причине на других поверхностях, отличающихся от поверхности катания и поверхности гребня, на которых закаленный слой удаляется путем обработки резанием, а именно поверхностях части ступицы и части диска и боковой поверхности части обода, предпочтительно не допускать возникновения вторичного цементита, а также не допускать возникновения сверху него закаленного слоя. Соответственно авторы настоящего изобретения изучили пути недопущения возникновения вторичного цементита при изготовлении железнодорожного колеса не только в части обода, в состав которого входят поверхность катания и гребень, но также в части диска и части ступицы. В результате авторы настоящего изобретения обнаружили приведенное далее. На фиг. 4-9 приведены диаграммы, иллюстрирующие связи между содержанием в стали каждого из химических элементов (фиг. 4 - содержание С, фиг. 5 - содержание Si, фиг. 6 - содержание Mn, фиг. 7 - содержание Cr, фиг. 8 - содержание Al и фиг. 9 - содержание V), средней скоростью охлаждения ($^{\circ}\text{C}/\text{с}$) в диапазоне 800-500 $^{\circ}\text{C}$ и наличием

закаленного слоя и вторичного цементита, эти связи были получены в результате испытания на термическую обработку, имитирующей термическую обработку во время изготовления железнодорожного колеса. Фиг. 4 создана на основе результатов, полученных при испытании на торцовую закалку по Джомини, которое будет описано ниже, с использованием множества образцов (стали № 1, 2, 3, 4 в рассмотренной ниже табл. 3), в которых различалось содержание С. Фиг. 5 создана на основе результатов, полученных при испытании на торцовую закалку по Джомини с использованием множества образцов (стали № 5, 3, 6 в табл. 3), в которых различалось содержание Si. Фиг. 6 создана на основе результатов, полученных при испытании на торцовую закалку по Джомини с использованием множества образцов (стали № 7, 3, 8 в табл. 3), в которых различалось содержание Mn. Фиг. 7 создана на основе результатов, полученных при испытании на торцовую закалку по Джомини с использованием множества образцов (стали № 3, 9, 10, 11 в табл. 3), в которых различалось содержание Cr. Фиг. 8 создана на основе результатов, полученных при испытании на торцовую закалку по Джомини с использованием множества образцов (стали № 3, 12, 13, 14, 15, 16 в табл. 3), в которых различалось содержание Al. Фиг. 9 создана на основе результатов, полученных при испытании на торцовую закалку по Джомини с использованием множества образцов (стали № 3, 17, 18 в табл. 3), в которых различалось содержание V. Символ ● на фиг. 4-9 указывает на возникновение закаленного слоя (мартенсита и/или бейнита). Символ ○ указывает, что закаленный слой не возникает, микроструктура состоит по существу из перлита и количество вторичного цементита в микроструктуре составляет не более 1,0 частицы на 100 мкм, т.е. вторичный цементит по существу отсутствует. Символ × указывает, что закаленный слой в микроструктуре не возникает, микроструктура состоит по существу из перлита и количество вторичного цементита в микроструктуре составляет более 1,0 частицы/100 мкм, т.е. в микроструктуре возникает вторичный цементит. Здесь формулировка "микроструктура состоит по существу из перлита" означает, что доля площади перлита в микроструктуре составляет 95% или более. Помимо этого, позднее будет рассмотрен способ определения количества вторичного цементита (частиц/100 мкм).

Фиг. 4 является подтверждением того, что в случае если скорость охлаждения является слишком высокой, возникает закаленный слой. В данном описании максимальная скорость охлаждения, при которой в структуре возникает перлит и не будет возникать закаленный слой (скорость охлаждения на границе между символами ● и ○ на фиг. 4), задается как "предельная скорость охлаждения при возникновении перлита". На фиг. 4-9 предельная скорость охлаждения при возникновении перлита показана пунктирной линией. Как показано на фиг. 4, при увеличении содержания С предельная скорость охлаждения при возникновении перлита уменьшается. Как показано на фиг. 5, при увеличении содержания Si предельная скорость охлаждения при возникновении перлита уменьшается. Как показано на фиг. 6, при увеличении содержания Mn предельная скорость охлаждения при возникновении перлита уменьшается. Как показано на фиг. 7, при увеличении содержания Cr предельная скорость охлаждения при возникновении перлита уменьшается. Как показано на фиг. 8, при увеличении содержания Al предельная скорость охлаждения при возникновении перлита уменьшается. Как показано на фиг. 9, при увеличении содержания V предельная скорость охлаждения при возникновении перлита уменьшается. Т.е. как показано на фиг. 4-9, С, Si, Mn, Cr, Al и V обеспечивают уменьшение предельной скорости охлаждения при возникновении перлита.

С другой стороны, если скорость охлаждения является слишком низкой, в структуре может возникнуть вторичный цементит. Как показано на фиг. 4, при увеличении содержания С вторичный цементит возникает, даже если скорость охлаждения является высокой.

Здесь максимальная скорость охлаждения, при которой вторичный цементит возникает в количестве более 1,0 частицы/100 мкм (на чертеже - скорость охлаждения на границе между символами ○ и ×) задается как "скорость охлаждения, критическая для возникновения вторичного цементита". На фиг. 4-9 скорость охлаждения, критическая для возникновения вторичного цементита, показана сплошной линией.

Как показано на фиг. 4, при увеличении содержания С скорость охлаждения, критическая для возникновения вторичного цементита, увеличивается. Аналогичным образом, как показано на фиг. 5, хотя и не так заметно, как в случае С, но при увеличении содержания Si скорость охлаждения, критическая для возникновения вторичного цементита, увеличивается. Как показано на фиг. 7, хотя также не так заметно, как в случае С, но при увеличении содержания Cr скорость охлаждения, критическая для возникновения вторичного цементита, увеличивается. Кроме того, как показано на фиг. 6 и 9, при увеличении содержания Mn и V скорость охлаждения, критическая для возникновения вторичного цементита, не изменяется настолько сильно. В то же время, как показано на фиг. 8, если увеличивается содержание Al, скорость охлаждения, критическая для возникновения вторичного цементита, заметно уменьшается.

Таким образом, С обеспечивает увеличение скорости охлаждения, критической для возникновения вторичного цементита, и Al обеспечивает уменьшение скорости охлаждения, критической для возникновения вторичного цементита.

Исходя из описанных выше результатов авторы настоящего изобретения дополнительно изучили связь между предельной скоростью охлаждения при возникновении перлита/скоростью охлаждения, критической для возникновения вторичного цементита, и содержанием С, Si, Mn, Cr, Al и V. В результа-

те они обнаружили, что в случае если железнодорожное колесо изготовлено из заэвтектоидной стали, имеющей указанный выше химический состав, в процессе изготовления при охлаждении полуфабриката этого колеса после термической обработки при температуре не ниже температуры превращения A_{cm} можно не допустить возникновения закаленного слоя, если скорость охлаждения ($^{\circ}C/c$) в диапазоне 800-500 $^{\circ}C$ не превышает значения F_{n1} , представляющего собой предельную скорость охлаждения при возникновении перлита и определяемого выражением (1). Они также обнаружили, что можно не допустить возникновения вторичного цементита, если эта скорость охлаждения имеет значение не меньше значения F_{n2} , представляющего собой скорость охлаждения, критическую для возникновения вторичного цементита, и определяемого выражением (2).

$$F_{n1} = -5,0 + \exp(5,651 - 1,427 \times C - 1,280 \times Si - 0,7723 \times Mn - 1,815 \times Cr - 1,519 \times Al - 7,798 \times V) \quad (1)$$

$$F_{n2} = 0,515 + \exp(-24,816 + 24,121 \times C + 1,210 \times Si + 0,529 \times Mn + 2,458 \times Cr - 15,116 \times Al - 5,116 \times V) \quad (2)$$

В формулы (1) и (2) вместо обозначений химических элементов подставляют их содержание (в мас.%). Отметим, что 800-500 $^{\circ}C$ это температурный диапазон, в котором возникают перлит и вторичный цементит.

Способ изготовления железнодорожного колеса, соответствующий данному варианту, который был создан на основе указанной выше обнаруженной информации, включает этап нагрева и этап охлаждения. На этапе нагрева полуфабрикат железнодорожного колеса, который имеет следующий химический состав (в мас.%): C - 0,80-1,15; Si - 1,00 или менее, Mn - 0,10-1,25; P - 0,050 или менее; S - 0,030 или менее; Al - 0,025-0,650; N - 0,0030-0,0200; Cr - 0-0,60; V - 0-0,12; Fe и примеси - остальное, и включает ступицу, обод, имеющий поверхность катания и гребень, и диск, расположенный между ступицей и ободом, нагревают до температуры не ниже температуры A_{cm} . На этапе охлаждения этот полуфабрикат охлаждают. На этапе охлаждения полуфабрикат железнодорожного колеса охлаждают таким образом, чтобы скорость охлаждения в диапазоне 800-500 $^{\circ}C$ на его поверхностях, отличающихся от поверхности катания и поверхности гребня, была не более $F_{n1}^{\circ}C/c$, определяемого выражением (1), в той зоне полуфабриката, где скорость охлаждения в диапазоне 800-500 $^{\circ}C$ является минимальной, она была не менее $F_{n2}^{\circ}C/c$, определяемого выражением (2), и скорость охлаждения в диапазоне 800-500 $^{\circ}C$ на поверхности катания и поверхности гребня этого полуфабриката была не менее $F_{n2}^{\circ}C/c$.

$$F_{n1} = -5,0 + \exp(5,651 - 1,427 \times C - 1,280 \times Si - 0,7723 \times Mn - 1,815 \times Cr - 1,519 \times Al - 7,798 \times V) \quad (1)$$

$$F_{n2} = 0,515 + \exp(-24,816 + 24,121 \times C + 1,210 \times Si + 0,529 \times Mn + 2,458 \times Cr - 15,116 \times Al - 5,116 \times V) \quad (2)$$

В формулы (1) и (2) вместо обозначений химических элементов подставляют их содержание (в мас.%). Кроме того, на указанном выше этапе охлаждения полуфабрикат можно охлаждать таким образом, чтобы скорость охлаждения в диапазоне 800-500 $^{\circ}C$ на поверхности катания и поверхности гребня была не менее $F_{n2}^{\circ}C/c$, не менее 5 $^{\circ}C/c$ и не более 200 $^{\circ}C/c$.

Полуфабрикат описанного выше железнодорожного колеса может содержать следующие химические элементы, %: Cr - 0,02-0,60; и/или V - 0,02-0,12. Железнодорожное колесо, соответствующее данному варианту, имеет следующий химический состав (в мас.%): C - 0,80-1,15; Si - 1,00 или менее; Mn - 0,10-1,25; P - 0,050 или менее; S - 0,030 или менее; Al - 0,025-0,650; N - 0,0030-0,0200; Cr - 0-0,60; V - 0-0,12; Fe и примеси - остальное, и включает ступицу, обод, имеющий поверхность катания и гребень, и диск, расположенный между ступицей и ободом. В микроструктуре ступицы доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита, определенное по формуле (A), не превышает 1,0 частицы/100 мкм. В микроструктуре диска доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита, определенное по формуле (A), не превышает 1,0 частицы/100 мкм. В микроструктуре обода доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита, определенное по формуле (A), не превышает 1,0 частицы/100 мкм.

$$\text{Количество вторичного цементита (частиц/100 мкм)} = \frac{\text{общее количество частиц вторичного цементита, через которые проходят две диагонали в квадратном поле зрения 200 мкм} \times 200 \text{ мкм}}{(5,66 \times 100 \text{ мкм})} \quad (A)$$

Полуфабрикат может содержать следующие химические элементы, %: Cr - 0,02-0,60; и/или V - 0,02-0,12.

Далее способ изготовления железнодорожного колеса и железнодорожное колесо, соответствующие данному варианту, будут рассмотрены подробно. При указании содержания химических элементов "%" - это мас.%, если не указано иное. Химический состав железнодорожного колеса

Железнодорожное колесо в данном варианте включает ступицу 2, диск 3 и обод 4, включающий поверхность 41 катания и гребень 42, как показано на фиг. 1. Химический состав железнодорожного колеса

в данном варианте приведен далее.

C: 0,80-1,15%.

Углерод (C) увеличивает твердость стали и износостойкость. Если содержание C является слишком низким, эти эффекты обеспечить невозможно. С другой стороны, если содержание C является слишком высоким, на границах зерен предшествующего аустенита выделяется вторичный цементит, и ухудшаются пластичность, ударная вязкость и усталостная долговечность стали. Поэтому содержание C составляет 0,80-1,15%. Нижнее предельное значение содержания C предпочтительно составляет 0,85%, более предпочтительно - 0,86%, еще более предпочтительно - 0,87% и даже более предпочтительно - 0,90%. Верхнее предельное значение содержания C предпочтительно составляет 1,05%, более предпочтительно - 1,00%.

Si: 1,00% или менее.

Кремний (Si) неизбежно входит в состав. Т.е. содержание Si превышает 0%. Si обеспечивает упрочнение феррита в результате возникновения твердого раствора, что приводит к увеличению твердости стали. Однако если содержание Si является слишком высоким, вероятно возникновение вторичного цементита. Кроме того, если содержание Si является слишком высоким, слишком сильно повышается упругость стали, и вероятно возникновение мартенсита. Помимо этого в материале, используемом в железнодорожном колесе, под действием тепла, выделяющегося при трении этого колеса и тормозной колодки, может происходить закалка, что ухудшает стойкость стали к возникновению трещин. Поэтому содержание Si не превышает 1,00%. Верхнее предельное значение содержания Si предпочтительно составляет 0,80%, более предпочтительно - 0,65%, еще более предпочтительно - 0,45% и даже более предпочтительно - 0,35%. Нижнее предельное значение содержания Si предпочтительно составляет 0,01%, более предпочтительно - 0,05% и еще более предпочтительно - 0,20%.

Mn: 0,10-1,25%.

Марганец (Mn) обеспечивает упрочнение феррита в результате возникновения твердого раствора, что приводит к увеличению твердости стали. Кроме того, Mn образует MnS, облегчающий механическую обработку стали. Если содержание Mn является слишком низким, эти эффекты обеспечить невозможно. С другой стороны, если содержание Mn является слишком высоким, слишком сильно повышается упругость стали и вероятно возникновение мартенсита. Помимо этого, в материале, используемом в железнодорожном колесе, под действием тепла, выделяющегося при трении этого колеса и тормозной колодки, может происходить закалка и может ухудшиться стойкость стали к возникновению трещин. Поэтому содержание Mn составляет 0,10-1,25%. Нижнее предельное значение содержания Mn предпочтительно составляет 0,50%, более предпочтительно - 0,60% и еще более предпочтительно - 0,70%. Верхнее предельное значение содержания Mn предпочтительно составляет 1,00% и более предпочтительно 0,82%.

P: 0,050% или менее.

Фосфор (P) является неизбежной примесью. Т.е. содержание P превышает 0%. P выделяется на границах зерен, ухудшая ударную вязкость стали. Поэтому содержание P составляет 0,050% или менее. Верхнее предельное значение содержания P предпочтительно составляет 0,030% и более предпочтительно 0,020%. Предпочтительно, чтобы содержание P было как можно меньше. Однако чрезмерное снижение содержания P приведет к чрезмерному увеличению стоимости очистки. Поэтому, учитывая обычные условия промышленного производства, нижнее предельное значение P предпочтительно составляет 0,0001% и более предпочтительно - 0,0005%.

S: 0,030% или менее.

Сера (S) неизбежно входит в состав. Т.е. содержание S превышает 0%. При введении S в состав, она образует MnS, что облегчает механическую обработку стали. Однако S ухудшает ударную вязкость стали. Поэтому содержание S составляет 0,030% или менее. Верхнее предельное значение содержания S предпочтительно составляет 0,020%. С учетом облегчения механической обработки нижнее предельное значение содержания S предпочтительно составляет 0,001% и более предпочтительно 0,005%.

Al: 0,025-0,650%.

Алюминий (Al) препятствует возникновению вторичного цементита, когда железнодорожное колесо по данному варианту содержит C на уровне 0,80% или более, что повышает ударную вязкость стали. Кроме того, Al соединяется с N с образованием AlN и обеспечивает измельчение кристаллического зерна. В результате измельчения кристаллического зерна повышается ударная вязкость стали. Эти эффекты невозможно обеспечить, если содержание Al является слишком низким. С другой стороны, если содержание Al является слишком высоким, увеличивается количество крупных неметаллических включений, что ухудшает ударную вязкость стали. Поэтому содержание Al составляет 0,025-0,650%. Нижнее предельное значение содержания Al предпочтительно составляет 0,030%, более предпочтительно - 0,040% и еще более предпочтительно - 0,050%. Верхнее предельное значение содержания Al предпочтительно составляет 0,450%, более предпочтительно - 0,350%, еще более предпочтительно - 0,250% и даже более предпочтительно - 0,115%. Под содержанием Al здесь имеется в виду содержание Al, растворимого в кислоте (раств. Al).

N: 0,0030-0,0200%.

Азот (N) объединяется с Al с образованием AlN и обеспечивает измельчение кристаллического

зерна. В результате измельчения кристаллического зерна повышается ударная вязкость стали. Если содержание N является слишком низким, этот эффект обеспечить невозможно. С другой стороны, если содержание N является слишком высоким, такой эффект достигает насыщения. Поэтому содержание N составляет 0,0030-0,0200%. Нижнее предельное значение содержания N предпочтительно составляет 0,0035% и более предпочтительно - 0,0040%. Верхнее предельное значение содержания N предпочтительно составляет 0,0100% и более предпочтительно - 0,0080%.

Остальным в химическом составе железнодорожного колеса по данному варианту являются Fe и примеси. Здесь "примесь" - это химический элемент, который попадает из руды и лома как исходных материалов или из производственной среды и т.п. при изготовлении описанного выше железнодорожного колеса в промышленных условиях и содержание которого допускается в диапазоне, не оказывающем отрицательного влияния на это колесо. По химическому составу железнодорожное колесо, соответствующее данному варианту, вместо части Fe также может содержать Cr и V.

Cr: 0-0,60%.

Хром (Cr) является необязательным химическим элементом и может не входить в состав. Т.е. содержание Cr может быть равно 0%. Если Cr входит в состав, он уменьшает расстояние между пластинками перлита, что значительно повышает твердость перлита. Однако если содержание Cr является слишком высоким, повышается вероятность возникновения вторичного цементита. Кроме того, если содержание Cr является слишком высоким, повышается упрочняемость и увеличивается вероятность возникновения мартенсита. Поэтому содержание Cr составляет 0-0,60%. Верхнее предельное значение содержания Cr предпочтительно составляет 0,30%, более предпочтительно - 0,25% и еще более предпочтительно - 0,10%. Предпочтительно нижнее предельное значение содержания Cr для получения эффекта уменьшения расстояния между пластинками перлита составляет 0,02%.

V: 0-0,12%.

Ванадий (V) является необязательным химическим элементом и может не входить в состав. Т.е. содержание V может быть равно 0%. Если V входит в состав, он образует карбид, нитрид или карбонитрид, что приводит к дисперсионному упрочнению стали. В результате значительно увеличивается твердость железнодорожного колеса, что приводит к дополнительному повышению износостойкости. Однако, если содержание V является слишком высоким, упрочняемость становится высокой, и после закалки поверхности катания чрезмерно увеличивается толщина закаленного слоя. Поэтому содержание V составляет 0-0,12%. Верхнее предельное значение содержания V предпочтительно составляет 0,09%. Нижнее предельное значение содержания V предпочтительно составляет 0,02% и более предпочтительно - 0,03%.

Способ изготовления железнодорожного колеса.

Далее будет описан один примерный способ изготовления описанного выше железнодорожного колеса. Способ изготовления железнодорожного колеса, соответствующий данному варианту, включает процесс термической обработки. Процесс термической обработки включает этап нагрева и этап охлаждения.

Этап нагрева.

Перед выполнением этапа нагрева сначала изготавливают полуфабрикат, который имеет указанный выше химический состав и форму, близкую к форме железнодорожного колеса, и включает часть ступицы, часть диска и часть обода. Полуфабрикат изготавливают, например, приведенным далее образом. С использованием электрической печи или конвертера получают расплавленные стали, имеющие указанный выше химический состав. С использованием этих расплавленных сталей получают исходные материалы. Для примера изготавливают литую деталь, например, с использованием процесса непрерывного литья. В качестве альтернативы с использованием процесса литья слитков изготавливают слиток. Литую деталь или слиток подвергают прокатке на блюминге или горячей ковке для изготовления заготовки в качестве исходного материала. Исходный материал может представлять собой литую деталь, изготовленную с использованием процесса непрерывного литья. В предпочтительном случае исходный материал имеет цилиндрическую форму. Используя полученный исходный материал, создают описанный выше полуфабрикат. Исходный материал режут в плоскости, перпендикулярной продольному направлению. Отрезанный исходный материал подвергают горячей обработке в направлении, перпендикулярном поверхности реза, для получения формы диска. Последующую горячую обработку выполняют таким образом, чтобы получить полуфабрикат, форма которого близка к форме железнодорожного колеса. В ходе горячей обработки, например, выполняют горячую ковку, после чего при необходимости выполняют горячую прокатку (прокатку колеса). В результате выполнения описанных выше процессов получают полуфабрикат. Изготовленный полуфабрикат нагревают. Если говорить конкретно, полуфабрикат нагревают до температуры не ниже температуры A_{cm} (°C). Например, полуфабрикат помещают в нагревательную печь, которая должна быть нагрета до температуры (температуры закалки) не ниже температуры A_{cm} . Скорость нагрева и время выдержки при температуре закалки могут быть выбраны из хорошо известных. Хотя температура A_{cm} меняется в зависимости от химического состава стали, температура закалки, например, составляет 850-1000°C.

Этап охлаждения.

Для нагретого полуфабриката выполняют этап охлаждения. На этом этапе охлаждения микрострук-

туры во внешнем слое, находящемся непосредственно под поверхностью катания, и внешнем слое гребня полуфабриката железнодорожного колеса, превращаются в мелкозернистый перлит, имеющий высокую износостойкость. Во внешнем слое, находящемся непосредственно под поверхностью катания, и внешнем слое гребня выше мелкозернистого перлита может возникнуть закаленный слой определенной толщины (слой, состоящий из мартенсита и/или бейнита). В этом случае закаленный слой удаляют на последующем этапе путем обработки резанием. В то же время в микроструктуре не допускают возникновения закаленного слоя на поверхностях, отличающихся от поверхности катания и поверхности гребня полуфабриката. В результате микроструктура будет состоять по существу из перлита (доля площади перлита составляет 95% или более). Здесь поверхности, отличающиеся от поверхности катания и поверхности гребня полуфабриката, это поверхность части диска, поверхность части ступицы и поверхности части обода, кроме поверхности катания и поверхности гребня. Причина, по которой не допускается возникновение закаленного слоя на поверхностях, отличающихся от поверхности катания и поверхности гребня полуфабриката, заключается в том, что трудно путем обработки резанием удалить возникший закаленный слой с этих отличающихся поверхностей. Кроме того, в любой зоне полуфабриката не допускается возникновение вторичного цементита. А именно в полуфабрикате железнодорожного колеса, имеющем указанный выше химический состав, соответствующий заэвтектоидной стали, возникновение вторичного цементита не допускается не только в части обода, но также в части диска и части ступицы. За счет недопущения возникновения закаленного слоя и недопущения возникновения вторичного цементита в любой зоне части обода, помимо поверхности катания и гребня, а также в части диска и части ступицы можно не допустить ухудшения ударной вязкости, даже если железнодорожное колесо имеет указанный выше химический состав, соответствующий заэвтектоидной стали. Если говорить конкретно, полуфабрикат охлаждают от указанной выше температуры закалки таким образом, чтобы соблюдались приведенные далее условия (А)-(С).

(А) Полуфабрикат охлаждают таким образом, чтобы скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C на его поверхностях, отличающихся от поверхности катания и поверхности гребня, т.е. на поверхности части ступицы, поверхности части диска и боковой поверхности части обода (поверхности обода, отличающейся от поверхности катания и поверхности гребня) была не более $Fn1^{\circ}C/c$.

(В) Полуфабрикат охлаждают таким образом, чтобы в той зоне полуфабриката, где скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C является минимальной, т.е. в той зоне внутри части ступицы, части диска и части обода, где скорость охлаждения является минимальной (далее называется "зоной с минимальной скоростью охлаждения"), она была не менее $Fn2^{\circ}C/c$.

(С) Полуфабрикат охлаждают таким образом, чтобы скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C на поверхности катания и поверхности гребня была не менее $Fn2^{\circ}C/c$.

Если скорость охлаждения на поверхности катания и поверхности гребня меньше $Fn2^{\circ}C/c$, в областях части обода рядом с этими поверхностями будет выделяться вторичный цементит. Поэтому скорость охлаждения задают таким образом, чтобы на поверхности катания и поверхности гребня она была не менее $Fn2^{\circ}C/c$.

Отметим, что на верхнее предельное значение скорости охлаждения на поверхности катания и поверхности гребня конкретные ограничения не накладываются. Однако, если скорость охлаждения на поверхности катания и поверхности гребня является слишком высокой, увеличивается толщина возникающего закаленного слоя, и увеличивается глубина удаления на этапе обработки резанием. Поэтому верхнее предельное значение скорости охлаждения на поверхности катания и поверхности гребня предпочтительно составляет $200^{\circ}C/c$. Помимо этого предпочтительно, чтобы скорость охлаждения на поверхности катания и поверхности гребня была не менее $Fn2^{\circ}C/c$ и не менее $5^{\circ}C/c$. В этом случае происходит более сильное измельчение перлита во внешнем слое, находящемся непосредственно под поверхностью катания, и внешнем слое гребня, и можно получить еще более высокую износостойкость. Здесь причиной задания скорости охлаждения именно в диапазоне 800-500°C является то, что это температурный диапазон, в котором происходит перлитное превращение, а также температурный диапазон, в котором возникает вторичный цементит. За скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C принимают среднюю скорость охлаждения ($^{\circ}C/c$) в этом диапазоне в каждой зоне полуфабриката железнодорожного колеса. Скорости охлаждения на поверхности и внутри полуфабриката будут различаться в зависимости от его формы (т.е. формы железнодорожного колеса) и способа охлаждения. Изменение температуры на поверхности (т.е. скорость охлаждения в каждой части) полуфабриката во время охлаждения можно определить с использованием прибора, измеряющего распределение теплоты, а именно термографического устройства. Таким образом, скорость охлаждения в зоне с минимальной скоростью охлаждения также можно определить при помощи такого прибора, измеряющего распределение теплоты.

Для примера изменение температуры в каждой области (зоне) полуфабриката определяют при помощи приведенного далее способа. На фиг. 10 приведен вид сбоку охлаждающего устройства 10, используемого на этапе охлаждения. Как показано на фиг. 10, охлаждающее устройство 10 включает вращающееся устройство 11, имеющее вращающийся вал, и множество охлаждающих форсунок 12-14. Упомянутое множество охлаждающих форсунок 12-14 включает одну или более форсунок 14 для охлаждения поверхности катания, одну или более форсунок 13 для охлаждения части диска и одну или более форсу-

нок 12 для охлаждения части ступицы. Упомянутые одна или более форсунок 14 для охлаждения поверхности катания установлены обычным образом вокруг вращающегося вала. Выпускное отверстие форсунки 14 для охлаждения поверхности катания расположено напротив поверхности 41 катания полуфабриката. Выпускное отверстие форсунки 14 для охлаждения поверхности катания можно располагать напротив поверхности гребня 42 полуфабриката. Упомянутые одна или более форсунок 13 для охлаждения части диска установлены таким образом, чтобы выпускное отверстие каждой из них располагалось напротив поверхности части 3 диска. Упомянутые одна или более форсунок 12 для охлаждения части ступицы установлены таким образом, чтобы выпускное отверстие каждой из них располагалось напротив поверхности части 2 ступицы. Форсунка 14 для охлаждения поверхности катания распыляет охлаждающую среду из выпускного отверстия для охлаждения, главным образом, поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 части 4 обода. Форсунка 13 для охлаждения диска распыляет охлаждающую среду из выпускного отверстия для охлаждения, главным образом, части 3 диска. Форсунка 12 для охлаждения ступицы распыляет охлаждающую среду из выпускного отверстия для охлаждения, главным образом, части 2 ступицы. Форсунка 14 для охлаждения поверхности катания может обеспечивать охлаждение не только поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 части 4 обода, но также охлаждение по меньшей мере части 3 диска. Форсунка 13 для охлаждения части диска может обеспечивать охлаждение не только части 3 диска, но также охлаждение по меньшей мере части 4 обода и/или по меньшей мере части 2 ступицы. Форсунка 12 для охлаждения ступицы может обеспечивать охлаждение не только части 2 ступицы, но также охлаждение по меньшей мере части 3 диска. Расположение и число форсунок 14 для охлаждения поверхности катания, форсунок 13 для охлаждения части диска и форсунок 12 для охлаждения части ступицы, показанные на фиг. 10, являются примерными и не накладывают ограничений. На конструкцию охлаждающих форсунок из упомянутого множества охлаждающих форсунок, входящих в состав охлаждающего устройства, конкретные ограничения не накладываются, пока на этапе охлаждения они могут выполнять охлаждение с соблюдением указанных выше условий (А)-(С). На указанную выше охлаждающую среду конкретные ограничения не накладываются, пока может быть обеспечена скорость охлаждения, подходящая для получения требуемой структуры. Примерами охлаждающей среды являются вода, воздух, туман, пар (водяная пыль) и т.п. Кроме того, охлаждающее устройство 10 включает одно или более термографических устройств (инфракрасных приборов для измерения распределения теплоты) 20. Термографические устройства 20 установлены таким образом, чтобы в полуфабрикате железнодорожного колеса, устанавливаемом в охлаждающее устройство 10, можно было измерять температуру верхней поверхности, нижней поверхности, боковой поверхности этого полуфабриката и температуру внутри него. Расположение и число термографических устройств 20, показанные на фиг. 10, являются примерными и не накладывают ограничений. На фиг. 10 упомянутое множество термографических устройств 20 установлено таким образом, чтобы можно было измерять распределение температуры на поверхности 41 катания, поверхности гребня 42, поверхностях части 4 обода, отличающихся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 (например, на боковой поверхности обода 4), а также поверхности части 3 диска и поверхности части 2 ступицы.

Для примера в охлаждающем устройстве 10 установлен полуфабрикат-образец (образец, который предназначен для измерения температуры и имеет те же форму и химический состав, что и полуфабрикат железнодорожного колеса, из которого получают реальное изделие), нагретый до температуры не ниже температуры превращения A_{cm} . Охлаждающую среду распыляют из охлаждающих форсунок 12-14, когда полуфабрикат-образец приводится во вращение вращающим устройством 11, в результате чего начинается охлаждение. Во время охлаждения при помощи упомянутого множества термографических устройств 20 измеряют изменения в распределении температуры в полуфабрикате-образце. Упомянутое множество термографических устройств 20 соединено со средством анализа распределения температуры, которое не показано. Средство анализа распределения температуры, например, включает компьютер и программу анализа распределения температуры, хранящуюся в памяти этого компьютера. Когда ЦП исполняет программу анализа распределения температуры, средство анализа распределения температуры анализирует в трехмерном виде изменение температуры в единицу времени в каждой зоне полуфабриката-образца (включая зону внутри него). Средство анализа распределения температуры может выполнять анализ при помощи хорошо известного способа, используя хорошо известную программу анализа теплопроводности, в которой применяется метод трехмерных конечных элементов (FEM). Полуфабрикат-образец охлаждают (быстро охлаждают) до комнатной температуры, чтобы определить изменение температуры в каждой его зоне. Затем на основе определенного изменения температуры определяют зону полуфабриката-образца, в которой скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C является минимальной (зону с минимальной скоростью охлаждения). Скорость охлаждения полуфабриката-образца регулируют с использованием охлаждающего устройства 10 таким образом, чтобы скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C, измеренная при помощи термографического устройства 20 на поверхностях этого полуфабриката-образца, отличающихся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42, т.е. на поверхности части 2 ступицы, поверхности части 3 диска и поверхностях части 4 обода, отличающихся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42, была не более $Fn1^{\circ}C/c$, скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C в зоне с минимальной скоростью охлаждения, определенной в этом полуфабрикате-образце

при помощи трехмерного анализа, была не менее $Fn2^{\circ}C/c$, и скорость охлаждения в диапазоне $800-500^{\circ}C$, измеренная при помощи термографического устройства 20 на поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 этого полуфабриката-образца, была не менее $Fn2^{\circ}C/c$. Если говорить конкретно, скорости охлаждения регулируют путем регулирования расхода охлаждающей среды, подаваемой в форсунку 14 для охлаждения поверхности катания, форсунку 13 для охлаждения части диска и форсунку 12 для охлаждения части ступицы, и путем выбора используемых охлаждающих форсунок из упомянутого множества форсунок 14 для охлаждения поверхности катания, форсунок 13 для охлаждения части диска и форсунок 12 для охлаждения части ступицы, которые установлены в охлаждающем устройстве 10. После этого регулирования с использованием охлаждающего устройства 10 вместо охлаждения полуфабриката-образца выполняют охлаждение полуфабриката, используемого для получения готового изделия, который нагрет до температуры не ниже температуры A_{cm} . В предпочтительном случае скорость охлаждения полуфабриката-образца регулируют при помощи охлаждающего устройства 10 таким образом, чтобы скорость охлаждения в диапазоне $800-500^{\circ}C$ на поверхностях, отличающихся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42, была не более $Fn1^{\circ}C/c$, скорость охлаждения в диапазоне $800-500^{\circ}C$ в зоне с минимальной скоростью охлаждения, определенной в этом полуфабрикate-образце при помощи трехмерного анализа, была не менее $Fn2^{\circ}C/c$, и скорость охлаждения в диапазоне $800-500^{\circ}C$, измеренная при помощи термографического устройства 20 на поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 этого полуфабриката-образца, была не менее $Fn2^{\circ}C/c$, не менее $5^{\circ}C/c$ и не более $200^{\circ}C/c$. Если на этапе охлаждения задать скорость охлаждения поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 полуфабриката на уровне не менее $5^{\circ}C/c$, в приповерхностной части, находящейся непосредственно под поверхностью 41 катания, и приповерхностной части гребня 42 возникает мелкозернистый перлит. Содержание C в железнодорожном колесе по данному варианту является высоким и составляет $0,80-1,15\%$. Это позволяет повысить износостойкость мелкозернистого перлита. Помимо этого, охлаждение полуфабриката таким образом, что скорости охлаждения поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 составляют не менее $Fn2^{\circ}C/c$, также позволяет не допустить возникновения вторичного цементита на этих поверхностях. Помимо этого, полуфабрикат охлаждают таким образом, чтобы скорость охлаждения на поверхностях, отличающихся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 (т.е. на поверхности части 2 ступицы, поверхности части 3 диска и поверхностях части 4 обода, отличающихся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42), была не более $Fn1^{\circ}C/c$. В результате не допускается возникновение закаленного слоя на поверхностях, отличающихся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42. Помимо этого, полуфабрикат охлаждают таким образом, чтобы скорость охлаждения в зоне с минимальной скоростью охлаждения, находящейся в части 2 ступицы, части 3 диска или части 4 обода, была не менее $Fn2^{\circ}C/c$. В результате не допускается возникновение вторичного цементита. Т.е. на описанном выше этапе охлаждения в дополнение к поверхности 41 катания и гребню 42 усиливают охлаждение в областях, от них отличающихся (в части 2 ступицы, части 3 диска и на боковой поверхности части 4 обода). Таким образом, этап охлаждения выполняют путем выполнения описанных выше операций. После окончания этапа охлаждения температура полуфабриката, например, будет равна комнатной ($25^{\circ}C$). Однако на температуру полуфабриката после окончания этапа охлаждения конкретные ограничения не накладываются, и она может быть любой, но не выше $500^{\circ}C$.

Этап отпуска.

После этапа охлаждения полуфабрикат при необходимости подвергают отпуску. Отпуск может выполняться с использованием хорошо известных температуры и периода времени. Температура отпуска не превышает температуру A_{c1} . Температура отпуска, например, составляет $400-600^{\circ}C$, и время выдержки при температуре отпуска, например, составляет $60-180$ мин. Но температура отпуска и время выдержки не ограничиваются указанными. Отпуск можно не выполнять.

Этап обработки резанием.

При том что после процесса термической обработки (этапа нагрева и этапа охлаждения) во внешнем слое, находящемся непосредственно под поверхностью 41 катания, и во внешнем слое гребня 42 полуфабриката возникает мелкозернистый перлит, выше него может возникать закаленный слой. При использовании железнодорожного колеса закаленный слой характеризуется плохой износостойкостью. Поэтому на данном этапе закаленные слои во внешнем слое, находящемся непосредственно под поверхностью 41 катания, и во внешнем слое гребня 42 удаляют путем обработки резанием. Обработка резанием может выполняться с использованием хорошо известного способа. Отметим, что в способе изготовления по данному варианту закаленный слой не будет возникать на поверхностях, отличающихся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 (т.е. поверхности части 2 ступицы, поверхности части 3 диска и поверхностях части 4 обода, отличающихся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42). По этой причине в способе изготовления железнодорожного колеса по данному варианту, даже несмотря на то что выполняется охлаждение не только части 4 обода полуфабриката железнодорожного колеса, но также части 3 диска и части 2 ступицы, нет необходимости обрабатывать резанием поверхности, отличающиеся от поверхности 41 катания и поверхности гребня 42 (т.е. поверхность части 2 ступицы, поверхность части 3 диска и боковую поверхность части 4 обода). В результате выполнения описанных выше этапов получают железнодорожное колесо, соответствующее данному варианту. Когда железнодо-

рожное колесо изготавливают при помощи способа по данному варианту, даже несмотря на то что в этом колесе используется заэвтектоидная сталь, в части 3 диска и части 2 ступицы не допускается возникновение вторичного цементита, который ухудшает ударную вязкость. Помимо этого, даже несмотря на то что в этом колесе используется заэвтектоидная сталь, можно не допустить возникновения в части 3 диска и части 2 ступицы закаленного слоя, который ухудшает ударную вязкость. Отметим, что возникновение вторичного цементита также не допускается в части 4 обода.

Структура железнодорожного колеса.

Далее приведена микроструктура железнодорожного колеса, изготовленного при помощи описанного выше способа. По структуре внешний слой, находящийся непосредственно под поверхностью катания, и приповерхностная часть гребня представляют собой перлит. Количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы/100 мкм. Часть ступицы, часть диска и часть обода, отличающиеся от поверхности катания и гребня, по структуре состоят по существу из перлита. Т.е. доля площади перлита составляет 95% или более. Кроме того, количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы/100 мкм.

Если говорить более конкретно, в железнодорожном колесе из заэвтектоидной стали, имеющей указанный выше химический состав, в микроструктуре части ступицы доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы/100 мкм. И в микроструктуре части диска доля площади перлита составляет 95% или более, и количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы/100 мкм. Кроме того, в микроструктуре части обода доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы/100 мкм. Здесь количество вторичного цементита определяется по формуле (А)

$$\text{Количество вторичного цементита (частиц/100 мкм)} = \frac{\text{общее количество частиц вторичного цементита, через которые проходят две диагонали в квадратном поле зрения } 200 \text{ мкм} \times 200 \text{ мкм}}{(5,66 \times 100 \text{ мкм})} \quad (\text{А})$$

При этом микроструктуру можно визуальнo изучить при помощи приведенного далее способа. Образец для визуального изучения микроструктуры берут из каждой части (ступицы, диска и обода) железнодорожного колеса в положении на глубине более 5 мм от поверхности. Изучаемую поверхность каждого образца полируют до зеркального блеска механическим способом. После этого изучаемую поверхность травят в растворе, содержащем смесь пикриновой кислоты и гидроксида натрия. После травления получают фотографию произвольного поля зрения (200×200 мкм) на изучаемой поверхности с использованием оптического микроскопа при 500-кратном увеличении. Наличие вторичного цементита определяется, исходя из того, что этот цементит, возникающий на границе зерна предшествующего аустенита, имеет черный цвет. Как показано на фиг. 11, в квадратном поле 100 зрения размером 200×200 мкм проводят две диагонали 101. После этого определяют общее количество частиц вторичного цементита, через которые проходят эти две диагонали 101. Как задано выражением (А), количество вторичного цементита на каждые 100 мкм (частиц/100 мкм) определяют, разделив полученное общее количество частиц вторичного цементита на суммарную длину двух диагоналей 101 (5,66×100 мкм). Если количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы на 100 мкм, считается, что его возникновение не допускается в достаточной степени.

Далее снова выполняют полирование той же изучаемой поверхности до зеркального блеска механическим способом и после этого травят в нитале (растворе, содержащем смесь азотной кислоты и этанола). После травления получают фотографию произвольного поля зрения (200×200 мкм) на изучаемой поверхности с использованием оптического микроскопа при 500-кратном увеличении. Феррит, бейнит, мартенсит и перлит различаются по тону. Таким образом, исходя из тона можно определить наличие закаленного слоя и перлита на изучаемой поверхности. Относительную площадь перлита определяют исходя из общей площади определенного таким образом перлита и площади изучаемой поверхности. В железнодорожном колесе, изготовленном при помощи описанного выше способа, часть обода, включая поверхность катания и гребень, в которой доля площади перлита составляет 95% или более по существу состоит из перлита. И количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы/100 мкм. Поэтому это железнодорожное колесо имеет превосходную износостойкость. Кроме того, в железнодорожном колесе часть ступицы, часть диска и часть обода, отличающаяся от поверхности катания и гребня, по существу состоят из перлита. Помимо этого, в части ступицы, части диска и части обода, отличающейся от поверхности катания и гребня, количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы/100 мкм. Таким образом, железнодорожное колесо, соответствующее данному варианту, имеет превосходную ударную вязкость, даже несмотря на то что оно имеет химический состав, соответствующий заэвтектоидной стали. Отметим, что непосредственно после этапа охлаждения, как описано выше, железнодорожное колесо может иметь закаленный слой во внешнем слое, находящемся непосредственно под поверхностью катания, и внешнем слое гребня части обода. Однако перед использованием железнодорожного колеса этот закаленный слой удаляют путем описанной выше обработки резанием. В результате микроструктура на поверхности катания и поверхности гребня по существу состоит из перлита.

Пример 1.

Были получены расплавленные стали № 1-18, имеющие химический состав, указанный в табл. 3.

Таблица 3

Сталь №	Химический состав (мас.%, остальное – Fe и примеси)									Температура A_{cm} , °C	Fn1	Fn2	Примечания
	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	V				
1	0,84	0,30	0,81	0,001	0,002	0,032	0,0038	0,00	0,00	768	24,8	0,5	Изобретение
2	0,93	0,29	0,80	0,001	0,002	0,032	0,0042	0,00	0,00	802	21,7	0,6	Изобретение
3	1,00	0,30	0,80	0,001	0,002	0,034	0,0040	0,00	0,00	828	18,8	1,2	Изобретение
4	1,09	0,30	0,79	0,001	0,002	0,036	0,0040	0,00	0,00	860	16,0	6,1	Изобретение
5	1,02	0,05	0,81	0,002	0,001	0,031	0,0042	0,00	0,00	829	26,8	1,3	Изобретение
6	1,03	0,89	0,80	0,001	0,002	0,036	0,0040	0,00	0,00	854	5,7	3,2	Изобретение
7	1,04	0,29	0,40	0,002	0,001	0,030	0,0056	0,00	0,00	842	26,2	2,0	Изобретение
8	1,02	0,31	1,23	0,002	0,001	0,030	0,0058	0,00	0,00	836	11,5	1,9	Изобретение
9	1,05	0,29	0,79	0,001	0,001	0,033	0,0030	0,11	0,00	853	13,6	3,4	Изобретение
10	1,03	0,29	0,78	0,001	0,001	0,034	0,0034	0,21	0,00	852	11,0	2,7	Изобретение
11	1,02	0,28	0,79	0,001	0,001	0,033	0,0036	0,51	0,00	868	4,5	4,2	Изобретение
12	1,03	0,29	0,79	0,001	0,001	0,063	0,0041	0,00	0,00	838	17,3	1,4	Изобретение
13	1,03	0,29	0,80	0,001	0,001	0,100	0,0044	0,00	0,00	836	15,9	1,0	Изобретение
14	1,03	0,29	0,80	0,001	0,001	0,200	0,0046	0,00	0,00	832	13,0	0,6	Изобретение
15	1,00	0,29	0,81	0,001	0,002	0,300	0,0034	0,00	0,00	817	11,0	0,5	Изобретение
16	1,00	0,30	0,80	0,001	0,002	0,610	0,0034	0,00	0,00	804	4,9	0,5	Изобретение
17	1,03	0,29	0,80	0,002	0,001	0,029	0,0048	0,00	0,03	843	13,4	1,7	Изобретение
18	1,03	0,29	0,80	0,002	0,001	0,026	0,0047	0,00	0,09	842	6,6	1,5	Изобретение

При помощи процесса литья слитков с использованием указанной выше расплавленной стали был изготовлен округлый слиток (в форме усеченного конуса с диаметром верхней поверхности 107 мм, диаметром нижней поверхности 97 мм и высотой 230 мм). После нагрева до 1250°C слиток был подвергнут горячей ковке в диапазоне температур 850-1100°C для получения круглого стержня для железнодорожного колеса, который имеет диаметр 40 мм.

Испытание на торцовую закалку по Джомини.

Из круглого стержня диаметром 40 мм из каждой стали № 1-18 был изготовлен образец для испытания по Джомини с диаметром 25 мм и высотой 100 мм. Если говорить конкретно, путем токарной обработки круглый стержень диаметром 40 мм был превращен в круглый стержень диаметром 25 мм. После этого круглый стержень был обрезан до длины 100 мм, чтобы получить образец для испытания по Джомини. С использованием образца для испытания по Джомини в соответствии со стандартом JIS G0561 (2011) было проведено испытание на торцовую закалку по Джомини для имитации процесса термической обработки (этап нагрева и этап охлаждения), входящего в состав процесса изготовления железнодорожного колеса. Если говорить конкретно, образец для испытания по Джомини выдерживался в атмосфере печи при температуре 950°C, которая не ниже температуры A_{cm} , в течение 30 мин, в результате чего структура этого образца стала состоять из одной аустенитной фазы. После этого была выполнена закалка торца (водяное охлаждение). Если говорить конкретно, для охлаждения одного торца образца для испытания по Джомини распылялась вода. После водяного охлаждения боковая поверхность образца для испытания по Джомини была механически отполирована, и в соответствии со стандартом JIS Z 2245 (2011) в осевом направлении была измерена твердость по шкале С Роквелла (HRC), начиная от упомянутого торца (водоохлажденного торца) и с постоянным интервалом, чтобы получить распределение твердости. Измерение твердости по шкале С Роквелла выполнялось с шагом 1,0 мм от водоохлажденного торца до точки, находящейся на расстоянии 15 мм от этого торца, и с шагом 2,5 мм после этой точки.

На фиг. 12 для примера приведено одно полученное распределение твердости по шкале С Роквелла. На фиг. 12 показаны результаты для сталей № 1-4. Как можно видеть на фиг. 12, начиная от твердости на водоохлажденном торце испытательного образца, кривая Джомини разделяется на две области - область А, в которой твердость быстро снижается с увеличением расстояния от водоохлажденного торца, и область В, которая находится дальше от этого торца по сравнению с областью А, и в которой с увеличением расстояния от этого торца твердость снижается более постепенно, чем в области А. В результате визуального изучения структуры было обнаружено, что область А - это закаленный слой, состоящий из мартенсита и/или бейнита. Область В состояла по существу из перлита. На основе распределения твердости по шкале С Роквелла, приведенного на фиг. 12, была определена глубина закаленного слоя.

Визуальное изучение микроструктуры.

Визуальное изучение микроструктуры на всех расстояниях от водоохлажденного торца выполнялось приведенным далее образом. В качестве изучаемой поверхности была выбрана зона боковой поверхности образца для испытания по Джомини, в отдельных точках которой проводилось измерение твердости по шкале С Роквелла, изучаемая поверхность была отполирована до зеркального блеска механическим способом, после чего была протравлена с использованием раствора, содержащего смесь пикриновой кислоты и гидроксида натрия. После травления с использованием оптического микроскопа при

вторичного цементита.

Результаты.

Результаты приведены в табл. 4. В этой таблице символ ● в столбце конкретного расстояния от водоохлажденного торца указывает, что структурой на этом расстоянии был закаленный слой (мартенсит и/или бейнит). Помимо этого, символ в столбце конкретного расстояния от водоохлажденного торца указывает, что на этом расстоянии структура состояла по существу из перлита (доля площади перлита составляла 95% или более), было подтверждено отсутствие мартенсита или бейнита, а также было подтверждено отсутствие вторичного цементита. Численное значение в столбце конкретного расстояния от водоохлажденного торца указывает, что структура состояла по существу из перлита (доля площади перлита составляла 95% или более), и представляет собой количество частиц вторичного цементита на 100 мкм на этом расстоянии. Помимо этого, в табл. 4 для каждой стали диапазон, в котором скорость охлаждения ($^{\circ}\text{C}/\text{с}$) не превышает $\text{Fn}1$, заданное выражением (1), и составляет не менее $\text{Fn}2$, определяемого выражением (2), зашит серым цветом. Как видно из табл. 4, в диапазоне скорости охлаждения, зашитом серым цветом, закаленный слой не возникал, и количество вторичного цементита не превышало 1,0 частицы/100 мкм.

Как видно из табл. 3 и 4, когда скорость охлаждения была не менее $\text{Fn}2$ в любой стали, количество вторичного цементита не превышало 1,0 частицы/100 мкм, даже если эта сталь представляла собой заэвтектоидную сталь, имеющую содержание С на уровне 0,80-1,15%, т.е. возникновение вторичного цементита не допускалось. Поэтому можно было ожидать обеспечения достаточной ударной вязкости железнодорожного колеса. Кроме того, если скорость охлаждения не превышала $\text{Fn}1$, не допускалось возникновение закаленного слоя. Поэтому можно было ожидать обеспечения достаточной ударной вязкости железнодорожного колеса. Таким образом, было обнаружено, что в случае если полуфабрикат охлаждают таким образом, скорость охлаждения в диапазоне 800-500 $^{\circ}\text{C}$ на его поверхностях, отличающихся от поверхности катания и поверхности гребня, т.е. на поверхности ступицы, поверхности диска и боковой поверхности обода (поверхности обода, отличающейся от поверхности катания и поверхности гребня), составляет не более $\text{Fn}1^{\circ}\text{C}/\text{с}$ в той зоне полуфабриката, где скорость охлаждения в диапазоне 800-500 $^{\circ}\text{C}$ является минимальной, т.е. в той зоне внутри ступицы, диска и обода, где скорость охлаждения является минимальной (далее называется "зоной с минимальной скоростью охлаждения"), она составляет не менее $\text{Fn}2^{\circ}\text{C}/\text{с}$, и скорость охлаждения в диапазоне 800-500 $^{\circ}\text{C}$ на поверхности катания и поверхности гребня этого полуфабриката составляет не менее $\text{Fn}2^{\circ}\text{C}/\text{с}$, в изготовленном железнодорожном колесе доля площади перлита будет составлять 95% или более в ступице, диске и ободе, и количество вторичного цементита не будет более 1,0 частицы/100 мкм, и можно не допустить возникновения закаленного слоя на поверхностях ступицы и диска.

Пример 2.

С использованием круглого стержня диаметром 40 мм из стали № 9, приведенной в табл. 3, была изучена связь между количеством вторичного цементита и ударной вязкостью по Шарпи (Дж/см²). Четыре круглых стержня из стали № 9 были выдержаны при 950 $^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин, после чего были охлаждены со скоростью, указанной в табл. 5. Скорость охлаждения задавали, выполняя погружение круглого стержня в соляную ванну, имеющую различную температуру.

Таблица 5

Сталь №	Скорость охлаждения, $^{\circ}\text{C}/\text{с}$	$\text{Fn}1$	$\text{Fn}2$	Количество вторичного цементита, частиц/100 мкм	Ударная вязкость по Шарпи, Дж/см ²
9-1	3,86	13,6	3,4	0,53	23,3
9-2	0,88	13,6	3,4	2,67	19,0
9-3	0,50	13,6	3,4	2,40	17,8
9-4	0,35	13,6	3,4	3,20	15,0

Визуальное изучение микроструктуры.

После охлаждения из средней части круглого стержня с каждым номером испытания (с 9-1 по 9-4) был взят образец для визуального изучения микроструктуры. Изучаемая поверхность образца представляла собой плоскость, перпендикулярную оси круглого стержня. Изучаемая поверхность была отполирована до зеркального блеска механическим способом, после чего была протравлена в растворе, содержащем смесь пикриновой кислоты и гидроксида натрия. После травления была получена фотография произвольного поля зрения (200×200 мкм) на изучаемой поверхности с использованием оптического микроскопа при 500-кратном увеличении. Наличие вторичного цементита можно было определить исходя из того, что этот цементит, возникающий на границе зерна предшествующего аустенита, имеет черный цвет на изучаемой поверхности. Помимо этого, при помощи того же способа, что и в примере 1, была определена доля площади перлита. В результате во всех испытаниях доля площади перлита составила 95% или более. Как показано на фиг. 11, в квадратном поле 100 зрения размером 200×200 мкм были проведены

две диагонали 101. После этого было определено общее количество частиц вторичного цементита, через которые проходят эти две диагонали 101. Количество вторичного цементита на каждые 100 мкм (частиц/100 мкм) было определено путем деления полученного общего количества частиц вторичного цементита на суммарную длину двух диагоналей 101 ($5,66 \times 100$ мкм). Т.е. количество вторичного цементита было определено в соответствии с выражением (А).

Испытание на ударную вязкость по Шарпи.

Из круглого стержня из каждого испытания (с 9-1 по 9-4) был получен образец для испытания на ударную вязкость по Шарпи ($10 \times 10 \times 55$ мм). Ось образца для испытания на ударную вязкость по Шарпи совпадала с осью круглого стержня. С использованием образцов для испытания на ударную вязкость по Шарпи в соответствии со стандартом JIS Z 2242 (2005) при комнатной температуре (25°C) было проведено испытание на ударную вязкость по Шарпи.

Результаты испытания.

Результаты испытания приведены в табл. 5. Как видно из табл. 5, когда скорость охлаждения была не менее F_{n2} (3,4) (сталь № 9-1), количество вторичного цементита не превышало 1,0 частицы/100 мкм. По этой причине ударная вязкость по Шарпи была высокой и составляла не менее $20,0 \text{ Дж/см}^2$, т.е. обеспечивалась достаточная ударная вязкость. С другой стороны, когда скорость охлаждения была меньше F_{n2} (стали с номерами с 9-2 по 9-4), ударная вязкость по Шарпи была низкой и составляла менее $20,0 \text{ Дж/см}^2$.

Выше были рассмотрены варианты реализации настоящего изобретения. Однако рассмотренные выше варианты являются всего лишь примерами реализации настоящего изобретения на практике. Таким образом, настоящее изобретение не ограничивается рассмотренными выше вариантами и может быть реализовано на практике путем подходящей модификации данных вариантов в пределах сущности этого изобретения.

Список ссылочных обозначений.

- 1 - железнодорожное колесо;
- 2 - часть ступицы;
- 3 - часть диска;
- 4 - часть обода;
- 10 - охлаждающее устройство.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ изготовления железнодорожного колеса, содержащий этап нагрева, на котором нагревают полуфабрикат железнодорожного колеса до температуры не ниже температуры A_{cm} превращения, причем полуфабрикат имеет следующий химический состав, состоящий из, в мас. %: С - 0,80-1,15; Si - 1,00 или менее; Mn - 0,10-1,25; P - 0,050 или менее; S - 0,030 или менее; Al - 0,025-0,650; N - 0,0030-0,0200; Fe и примеси - остальное, и имеет часть ступицы, часть обода, включающую поверхность катания и гребень, и часть диска, расположенную между частью ступицы и частью обода; и этап охлаждения, на котором охлаждают нагретый полуфабрикат, причем на этапе охлаждения полуфабрикат охлаждают таким образом, что скорость охлаждения в диапазоне $800-500^\circ\text{C}$ на поверхности полуфабриката, отличающейся от поверхности катания и поверхности гребня, составляет не более $F_{n1}^\circ\text{C/с}$, определяемого выражением (1); скорость охлаждения в диапазоне $800-500^\circ\text{C}$ в той области, в которой скорость охлаждения является минимальной в упомянутом полуфабрикате, составляет не менее $F_{n2}^\circ\text{C/с}$, определяемого выражением (2); и скорость охлаждения в диапазоне $800-500^\circ\text{C}$ на поверхности катания и поверхности гребня упомянутого полуфабриката составляет не менее $F_{n2}^\circ\text{C/с}$:

$$F_{n1} = -5,0 + \exp(5,651 - 1,427 \times C - 1,280 \times Si - 0,7723 \times Mn - 1,519 \times Al) \quad (1)$$

$$F_{n2} = 0,515 + \exp(-24,816 + 24,121 \times C + 1,210 \times Si + 0,529 \times Mn - 15,116 \times Al) \quad (2)$$

причем каждый символ элемента в выражениях (1) и (2) показывает содержание соответствующего элемента в мас. %.

2. Способ изготовления железнодорожного колеса, содержащий

этап нагрева, на котором нагревают полуфабрикат железнодорожного колеса до температуры не ниже температуры A_{cm} превращения,

причем полуфабрикат имеет следующий химический состав, состоящий из, в мас. %: С - 0,80-1,15; Si - 1,00 или менее; Mn - 0,10-1,25; P - 0,050 или менее; S - 0,030 или менее; Al - 0,025-0,650; N - 0,0030-0,0200; один или более элементов, выбранных из группы, состоящей из Cr - более 0-0,60; V - более 0-0,12; Fe и примеси - остальное,

и имеет

часть ступицы,
 часть обода, включающую поверхность катания и гребень, и
 часть диска, расположенную между частью ступицы и частью обода; и
 этап охлаждения, на котором охлаждают нагретый полуфабрикат,
 причем на этапе охлаждения полуфабрикат охлаждают таким образом, что
 скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C на поверхности полуфабриката, отличающейся от поверхности катания и поверхности гребня, составляет не более $F_{n1}^{\circ}\text{C/c}$, определяемого выражением (1);
 скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C в той области, в которой скорость охлаждения является минимальной в упомянутом полуфабрикате, составляет не менее $F_{n2}^{\circ}\text{C/c}$, определяемого выражением (2); и
 скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C на поверхности катания и поверхности гребня упомянутого полуфабриката составляет не менее $F_{n2}^{\circ}\text{C/c}$:

$$F_{n1} = -5,0 + \exp(5,651 - 1,427 \times C - 1,280 \times Si - 0,7723 \times Mn - 1,815 \times Cr - 1,519 \times Al - 7,798 \times V) \quad (1)$$

$$F_{n2} = 0,515 + \exp(-24,816 + 24,121 \times C + 1,210 \times Si + 0,529 \times Mn + 2,458 \times Cr - 15,116 \times Al - 5,116 \times V) \quad (2)$$

причем каждый символ элемента в выражениях (1) и (2) показывает содержание соответствующего элемента в мас. %.

3. Способ по п.2, в котором химический состав содержит один или несколько элементов, выбранных из группы, состоящей из, %: Cr - 0,02-0,60; и V - 0,02-0,12.

4. Способ по любому из пп.1-3, в котором дополнительно на этапе охлаждения полуфабрикат охлаждают таким образом, что скорость охлаждения в диапазоне 800-500°C на поверхности катания и гребня составляет не менее $F_{n2}^{\circ}\text{C/c}$, и не менее чем 5°C/c, и не более чем 200°C/c.

5. Железнодорожное колесо, содержащее химический состав, состоящий из, в мас. %: C - 0,80-1,15; Si - 1,00 или менее; Mn - 0,10-1,25; P - 0,050 или менее; S - 0,030 или менее; Al - 0,025-0,650; N - 0,0030-0,0200; Fe и примеси - остальное,

причем железнодорожное колесо имеет

часть ступицы,

часть обода, включающую поверхность катания и гребень, и

часть диска, расположенную между частью ступицы и частью обода, причем

в микроструктуре части ступицы доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы на 100 мкм,

в микроструктуре части диска доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы на 100 мкм, и

в микроструктуре части обода доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы на 100 мкм,

причем количество вторичного цементита (частиц/100 мкм) определено как общее количество частиц вторичного цементита, через которые проходят две диагонали в квадратном поле зрения 200×200 мкм/(5,66×100 мкм).

6. Железнодорожное колесо, содержащее химический состав, состоящий из, в мас. %: C - 0,80-1,15; Si - 1,00 или менее; Mn - 0,10-1,25; P - 0,050 или менее; S - 0,030 или менее; Al - 0,025-0,650; N - 0,0030-0,0200; один или более элементов, выбранных из группы, состоящей из Cr - более 0-0,60; V - более 0-0,12; Fe и примеси - остальное,

причем железнодорожное колесо имеет

часть ступицы,

часть обода, включающую поверхность катания и гребень, и

часть диска, расположенную между частью ступицы и частью обода, причем

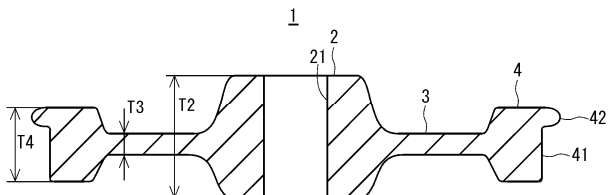
в микроструктуре части ступицы доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы на 100 мкм,

в микроструктуре части диска доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы на 100 мкм, и

в микроструктуре части обода доля площади перлита составляет 95% или более и количество вторичного цементита не превышает 1,0 частицы на 100 мкм,

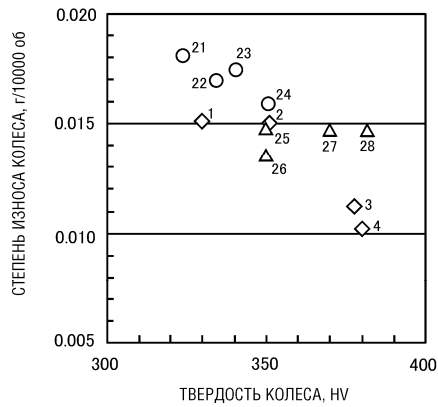
причем количество вторичного цементита (частиц/100 мкм) определено как общее количество частиц вторичного цементита, через которые проходят две диагонали в квадратном поле зрения 200×200 мкм/(5,66×100 мкм).

7. Железнодорожное колесо по п.6, в котором химический состав содержит один или несколько элементов, выбранных из группы, состоящей из, %: Cr - 0,02-0,60; и V - 0,02-0,12.

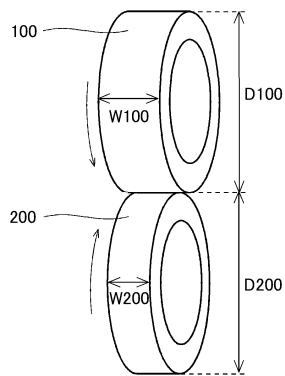


Фиг. 1

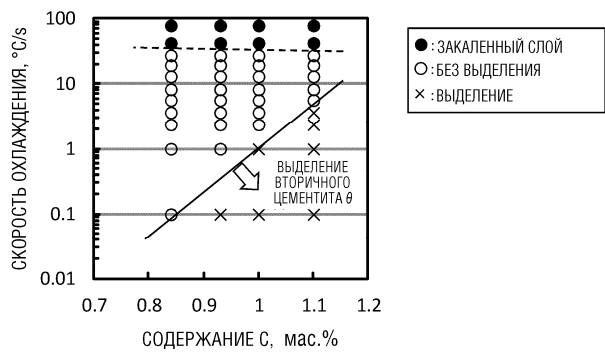
○ : ЗАВТЕКТОИДНЫЕ СТАЛИ С РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ V И НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ Si
△ : ЗАВТЕКТОИДНЫЕ СТАЛИ С РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ V И ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ Si
◇ : ЗАВТЕКТОИДНЫЕ СТАЛИ, НЕ СОДЕРЖАЩИЕ V



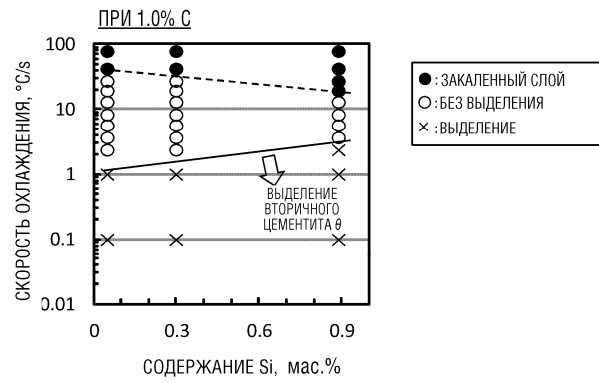
Фиг. 2



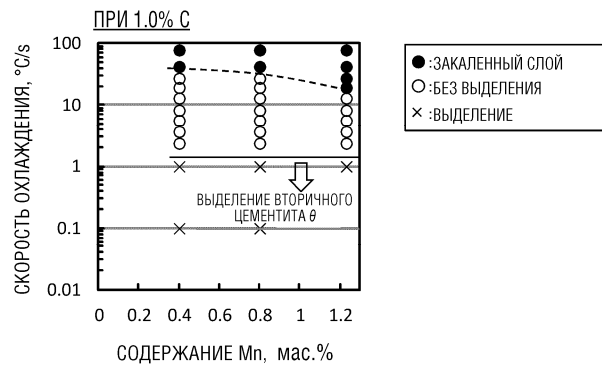
Фиг. 3



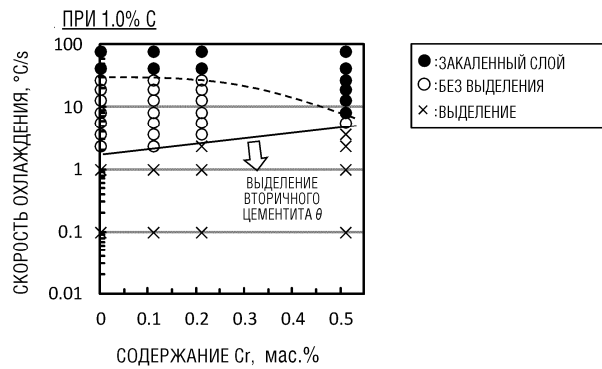
Фиг. 4



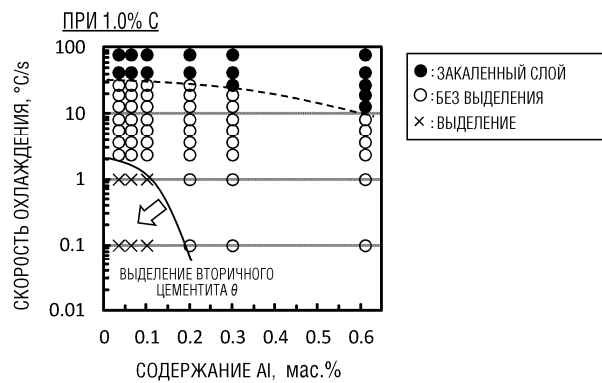
Фиг. 5



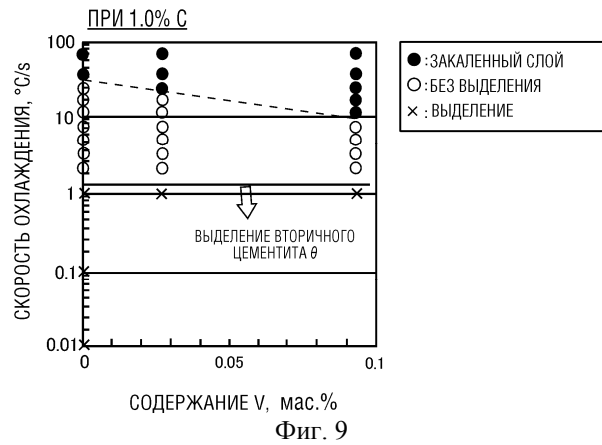
Фиг. 6



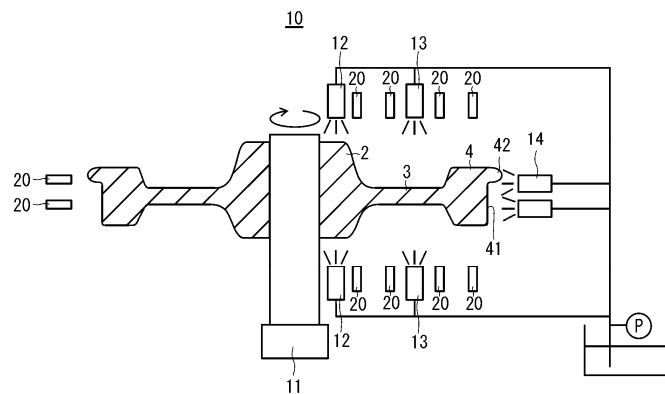
Фиг. 7



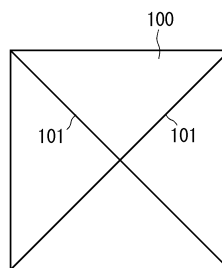
Фиг. 8



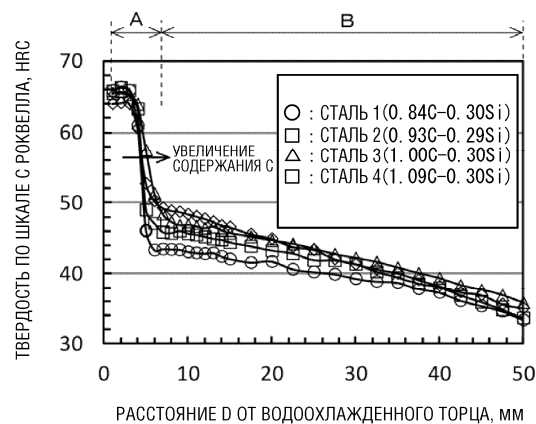
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12

