

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **039774**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.03.11

(21) Номер заявки
201992321

(22) Дата подачи заявки
2018.03.30

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

(54) **ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ КОЛЕСО**

(31) **2017-070999; 2018-014270**

(32) **2017.03.31; 2018.01.31**

(33) **JP**

(43) **2020.03.31**

(86) **PCT/JP2018/013537**

(87) **WO 2018/181861 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, в котором обеспечивается возможность подавления образования доэвтектоидного цементита, даже если содержание С является высоким. Железнодорожное колесо в соответствии с одним вариантом осуществления настоящего изобретения имеет следующий химический состав, мас. %: С: от 0,80 до 1,15, Si: 0,45 или меньше, Mn: от 0,10 до 0,85, P: 0,050 или меньше, S: 0,030 или меньше, Al: от 0,120 до 0,650, N: от 0,0030 до 0,0200, Cr: от 0 до 0,25 и V: от 0,02 до 0,12, с остатком из Fe и примесей, причем количество доэвтектоидного цементита, которое определяется с помощью выражения (1), в микроструктуре железнодорожного колеса составляет не более 1,50 шт./100 мкм:

Количество доэвтектоидного цементита (шт./100 мкм) = полная сумма количества областей доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с двумя диагональными линиями в квадратном поле зрения размером 200 мкм × 200 мкм / (5,66 × 100 мкм) (1).

B1

039774

039774

B1

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение относится к железнодорожному колесу.

Предпосылки создания изобретения

Железнодорожный вагон едет по рельсам, образующим железнодорожное полотно. Железнодорожный вагон включает в себя множество железнодорожных колес. Железнодорожное колесо поддерживает вагон, находясь в контакте с рельсом, и перемещается по рельсу, вращаясь на нем. Железнодорожное колесо изнашивается вследствие контакта с рельсом. В последние годы с целью повышения эффективности железнодорожных перевозок были предприняты попытки увеличить грузоподъемность железнодорожного вагона и увеличить его скорость. В результате возникла потребность в повышении износостойкости железнодорожных колес.

Технологии для повышения износостойкости железнодорожного колеса были предложены в публикации японской патентной заявке № 09-202937 (патентный документ 1), в публикации японской патентной заявке № 2012-107295 (патентный документ 2), в публикации японской патентной заявке № 2013-231212 (патентный документ 3), и в публикации японской патентной заявке № 2004-315928 (патентный документ 4).

Железнодорожное колесо, раскрытое в патентном документе 1, состоит из, мас. %: С: от 0,4 до 0,75, Si: от 0,4 до 0,95, Mn: от 0,6 до 1,2, Cr: от 0 до 0,2, P: 0,03 или меньше, и S: 0,03 или меньше, с остатком, представляющим собой Fe и неизбежные примеси. В этом железнодорожном колесе область от рабочей поверхности части обода колеса до глубины по меньшей мере 50 мм состоит из перлитной структуры. Способ производства железнодорожного колеса по патентному документу 1 включает в себя стадию закалки, в которой рабочая часть обода колеса охлаждается в таких условиях, что кривая охлаждения рабочей части обода колеса проходит через область формирования перлита на кривой превращения при непрерывном охлаждении, и находится на длинной стороне кривой мартенситного превращения.

Сталь для колеса, раскрытая в патентном документе 2, состоит из, мас. %: С: от 0,65 до 0,84, Si: от 0,02 до 1,00, Mn: от 0,50 до 1,90, Cr: от 0,02 до 0,50, V: от 0,02 до 0,20, и S: 0,04 или меньше, с остатком из Fe и примесей, причем $P \leq 0,05$ мас. %, $Cr \leq 0,20$ мас. % и $Ni \leq 0,20$ мас. %. Химический состав дополнительно удовлетворяет следующим соотношениям:

$$[34 \leq 2,7 + 29,5 \times C + 2,9 \times Si + 6,9 \times Mn + 10,8 \times Cr + 30,3 \times Mo + 44,3 \times V \leq 43] \text{ и}$$

$$[0,76 \times \exp(0,05 \times C) \times \exp(1,35 \times Si) \times \exp(0,38 \times Mn) \times \exp(0,77 \times Cr) \times \exp(3,0 \times Mo) \times \exp(4,6 \times V) \leq 25]$$

Патентный документ 2 утверждает, что сталь для железнодорожного колеса достигает превосходной износостойкости, усталостной стойкости при качении и стойкости к растрескиванию, если она удовлетворяет вышеописанным химическому составу и формулам.

Сталь для колеса, раскрытая в патентном документе 3, состоит из, мас. %: С: от 0,65 до 0,84, Si: от 0,4 до 1,0, Mn: от 0,50 до 1,40, Cr: от 0,02 до 0,13, S: 0,04 или меньше, V: от 0,02 до 0,12, с остатком из Fe и примесей, причем значение $Fn1$, определяемое выражением (1), составляет 32-43, а значение $Fn2$, определяемое выражением (2), составляет 25 или меньше. Здесь выражение (1) выглядит как

$$Fn1 = 2,7 + 29,5C + 2,9Si + 6,9Mn + 10,8Cr + 30,3Mo + 44,3V,$$

а выражение (2) - как

$$Fn2 = \exp(0,76) \times \exp(0,05C) \times \exp(1,35Si) \times \exp(0,38Mn) \times \exp(0,77Cr) \times \exp(3,0Mo) \times \exp(4,6V)$$

Патентный документ 2 утверждает, что сталь для колеса достигает превосходной износостойкости, усталостной стойкости при качении и стойкости к растрескиванию, когда она имеет вышеописанный химический состав, и значения $Fn1$ и $Fn2$ удовлетворяют вышеописанным диапазонам.

Колесо железнодорожного вагона, раскрытое в патентном документе 4, является интегрированным колесом железнодорожного вагона, состоящим из стали, имеющей следующий химический состав, мас. %: С: от 0,85 до 1,20, Si: от 0,10 до 2,00, Mn: от 0,05 до 2,00, и дополнительно по мере необходимости predetermined количество одного или более элементов, выбираемых из Cr, Mo, V, Nb, B, Co, Cu, Ni, Ti, Mg, Ca, Al, Zr и N, с остатком из Fe и других неизбежных примесей, в котором по меньшей мере рабочая часть обода и/или поверхность реборды колеса имеет перлитную структуру. Патентный документ 4 утверждает, что срок службы колеса железнодорожного вагона зависит от степени износа поверхности рабочей части обода и реборды (параграф [0002] патентного документа 4), и дополнительно зависит от трещин в поверхности обода и реборды, вызываемых выделением тепла при торможении на высокоскоростной железной дороге. Он также утверждает, что когда колесо железнодорожного вагона имеет вышеописанную конфигурацию, возможно подавить износ и термическое растрескивание поверхности рабочей части обода и реборды.

Список цитированной литературы.

Патентная литература:

- патентный документ 1: Японская опубликованная патентная заявка № 09-202937,
- патентный документ 2: Японская опубликованная патентная заявка № 2012-107295,
- патентный документ 3: Японская опубликованная патентная заявка № 2013-231212,
- патентный документ 4: Японская опубликованная патентная заявка № 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), p749 to 761.

Сущность изобретения

Техническая проблема.

В колесе железнодорожного вагона, предложенном в патентном документе 1, содержание Cr удерживается низким, и содержится подходящее количество Si для того, чтобы обеспечить подходящую прокаливаемость и свойство, облегчающее получение перлитной структуры. Однако колесо железнодорожного вагона в соответствии с патентным документом 1 содержит от 0,4 до 0,75 мас.% С, т.е. колесо делается из так называемой доэвтектоидной стали. Следовательно существует ограничение на улучшение износостойкости.

В сталях для колеса, предложенных в патентных документах 2 и 3, перлитная структура упрочняется за счет содержания V в стали, имеющей содержание С от 0,65 до 0,84 мас.%, улучшая тем самым износостойкость. Однако только содержание V имеет ограничение на улучшение износостойкости.

С другой стороны, в колесе железнодорожного вагона, предложенном в патентном документе 4, износостойкость улучшается за счет использования заэвтектоидной стали, в которой увеличено содержание С.

Одним примером способа производства железнодорожного колеса является следующий. Круглая заготовка (биллет) подвергается горячей обработке, чтобы сформировать промежуточный продукт, имеющий форму железнодорожного колеса. Сформированный промежуточный продукт подвергается термической обработке (закалке рабочей поверхности обода). При закалке рабочей поверхности обода промежуточный продукт нагревается, и после этого обод и реборда промежуточного продукта быстро охлаждаются. В результате этого в матричной структуре поверхностной части обода образуется мелкодисперсный перлит, который имеет высокую износостойкость. Однако закаленный слой, состоящий из мартенсита (или мартенсита и бейнита) образуется в слое над мелкодисперсным перлитом в поверхностной части обода после его закалки. Этот закаленный слой, скорее всего, будет изнашиваться во время использования железнодорожного колеса. Следовательно после закалки рабочей поверхности обода закаленный слой, который был сформирован в самом внешнем слое обода, удаляется резанием таким образом, чтобы обнажить на ободе мелкодисперсный перлит. С помощью описанных стадий процесса производится железнодорожное колесо.

Как было описано, колесо железнодорожного вагона, полученное из заэвтектоидной стали, имеет превосходную износостойкость. Однако когда железнодорожное колесо производится вышеописанным способом производства с использованием заэвтектоидной стали, становится ясно, что в отличие от доэвтектоидной стали, доэвтектоидный цементит (pro-eutectoid cementite, вторичный цементит), вероятно, образуется в железнодорожном колесе, например, в части диска или в части втулки (ступицы) железнодорожного колеса. Доэвтектоидный цементит ухудшает ударную вязкость стали. Следовательно предпочтительно иметь возможность подавить формирование доэвтектоидного цементита в железнодорожном колесе, выполненном из заэвтектоидной стали.

Задачей настоящего изобретения является предложить железнодорожное колесо, в котором может подавляться формирование доэвтектоидного цементита, даже если содержание С составляет 0,80 мас.% или больше.

Решение проблемы.

Железнодорожное колесо в соответствии с настоящим вариантом осуществления имеет следующий химический состав, состоящий из, мас. %: С: от 0,80 до 1,15, Si: 0,45 или меньше, Mn: от 0,10 до 0,85, P: 0,050 или меньше, S: 0,030 или меньше, Al: от 0,120 до 0,650, N: от 0,0030 до 0,0200, Cr: от 0 до 0,25, и V: от 0 до 0,12, с остатком, представляющим собой Fe и примеси. В микроструктуре количество доэвтектоидного цементита, определяемое выражением (1), составляет не более чем 1,50 шт./100 мкм.

Количество доэвтектоидного цементита (шт./100 мкм) = полная сумма количества

областей доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с двумя диагональными линиями в квадратном поле зрения размером 200 мкм × 200 мкм / (5,66 × 100 мкм) (1).

Железнодорожное колесо в соответствии с настоящим вариантом осуществления может содержать в микроструктуре нитрид алюминия со средним размером частиц 150 нм или меньше.

Полезные эффекты изобретения.

Железнодорожное колесо в соответствии с настоящим вариантом осуществления может иметь уменьшенное количество доэвтектоидного цементита, даже когда содержание С является высоким.

Краткое описание чертежей

Фиг. 1 представляет собой поперечное сечение, параллельное центральной оси железнодорожного колеса.

Фиг. 2 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между содержанием С, скоростью охлаждения и микроструктурой в стали, которые получаются при испытании на прокаливаемость (в тесте Джомини) и в тесте Формастера.

Фиг. 3 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между содержанием Si, ско-

ростью охлаждения и микроструктурой в стали, которые получаются в тесте Джомини и в тесте Формастера.

Фиг. 4 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между содержанием Mn, скоростью охлаждения и микроструктурой в стали, которые получаются в тесте Джомини и в тесте Формастера.

Фиг. 5 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между содержанием Cr, скоростью охлаждения и микроструктурой в стали, которые получаются в тесте Джомини и в тесте Формастера.

Фиг. 6 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между содержанием Al, скоростью охлаждения и микроструктурой в стали, которые получаются в тесте Джомини и в тесте Формастера.

Фиг. 7 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между содержанием V, скоростью охлаждения и микроструктурой в стали, которые получаются в тесте Джомини и в тесте Формастера.

Фиг. 8 представляет собой схематическую диаграмму, иллюстрирующую способ измерения количества доэвтектоидного цементита.

Фиг. 9 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между средним размером частиц AlN и размером предшествующего аустенитного зерна после процесса производства железнодорожного колеса по настоящему варианту осуществления.

Фиг. 10 представляет собой схематическую диаграмму, иллюстрирующую модельные температурные профили стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1) и стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 2), которые моделируют процесс производства железнодорожного колеса.

Фиг. 11 представляет собой схематическую диаграмму, иллюстрирующую модельные температурные профили стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1) и стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 3), которые моделируют процесс производства железнодорожного колеса, отличающийся от показанного на фиг. 10.

Фиг. 12 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между модельной температурой нагрева при горячей ковке и размером частиц и средним размером частиц AlN в стали в тестовом образце после стадии 1 и перед стадией 2, показанном на фиг. 10.

Фиг. 13 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между модельной температурой нагрева при горячей ковке и размером частиц и средним размером частиц AlN в стали в тестовом образце после стадии 2, показанной на фиг. 10.

Фиг. 14 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между модельной температурой нагрева при горячей ковке и размером предшествующего аустенитного зерна (предшествующего γ -фазе) тестового образца после стадии 3, показанной на фиг. 11.

Фиг. 15 представляет собой схематическую диаграмму, иллюстрирующую модельные температурные профили стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1) и стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 4), которые моделируют процесс производства железнодорожного колеса, отличающийся от показанного на фиг. 10.

Фиг. 16 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между модельной температурой нагрева при горячей ковке и ударной вязкостью по Шарпи (Дж/см^2) в тестовом образце после стадии 4, показанной на фиг. 15.

Фиг. 17 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между расстояниями от охлаждавшегося водой конца и твердостью по Роквеллу HRC, полученными из теста Джомини в примере 1.

Описание вариантов осуществления

Конфигурация железнодорожного колеса.

Фиг. 1 представляет собой поперечное сечение, включающее в себя центральную ось железнодорожного колеса в соответствии с настоящим вариантом осуществления. Как показано на фиг. 1, железнодорожное колесо 1 имеет дисковую форму и включает в себя часть втулки 2, часть диска 3 и часть обода 4 колеса. Часть втулки 2 имеет цилиндрическую форму и расположена в средней части в радиальном направлении (направлении, перпендикулярном к центральной оси) железнодорожного колеса 1. Часть втулки 2 имеет сквозное отверстие 21. Центральная ось сквозного отверстия 21 соответствует центральной оси железнодорожного колеса 1. Не показанный осевой вал вставляется в сквозное отверстие 21. Толщина T2 части втулки 2 больше, чем толщина T3 части диска 3. Часть обода колеса 4 формируется в краевой части по внешней окружности железнодорожного колеса 1. Часть обода колеса 4 включает в себя рабочую поверхность обода 41 и реборду 42. Обод 41 связан с ребордой 42. Обод 41 и реборда 42 находятся в контакте с поверхностью рельса во время использования железнодорожного колеса 1. Толщина T4 части обода колеса 4 больше, чем толщина T3 части диска 3. Часть диска 3 расположена между частью втулки 2 и частью обода колеса 4. Внутренняя круговая краевая часть части диска 3 связана с частью втулки 2, а внешняя круговая краевая часть части диска 3 связана с частью обода колеса 4. Толщина T3 части диска 3 меньше, чем толщина T2 части втулки 2 и толщина T4 части обода колеса 4.

Сначала авторы настоящего изобретения изучили химический состав, подходящий для улучшения износостойкости железнодорожного колеса. В результате было найдено, что в железнодорожном колесе при его использовании именно в качестве железнодорожного колеса, износостойкость улучшается лучше, когда твердость увеличивается за счет увеличения содержания С до 0,80 мас.% или больше, чем тогда, когда твердость увеличивается за счет увеличения содержания V, даже если при этом получается та же самая твердость. Хотя этот механизм неясен, возможно следующее. Обод используемого железнодорожного колеса подвергается воздействию внешней силы (нагрузке) со стороны рельса. За счет этой внешней силы цементит в перлите в наружном слое непосредственно под рабочей поверхностью обода измельчается, и твердость дополнительно увеличивается за счет дисперсионного упрочнения. Кроме того, углерод в измельченном тонком цементите растворяется в пересыщенном состоянии в феррит в перлите, увеличивая тем самым твердость наружного слоя непосредственно под рабочей поверхностью обода за счет упрочнения твердого раствора.

Увеличение содержания С в стали приведет к увеличению объемной доли цементита в перлите, и дополнительно к тому, что перлит с большей вероятностью будет формировать более тонкие пластинки. В этом случае износостойкость железнодорожного колеса будет улучшаться за счет вышеописанного механизма. В отличие от этого, когда в стали содержится V, твердость стали увеличивается за счет дисперсионного твердения карбонитридов V. В этом случае, поскольку в феррите образуется карбонитрид V, он увеличивает главным образом твердость феррита. Таким образом, содержание V не оказывает значительного воздействия на измельчение перлита. По этой причине, хотя износостойкость может быть улучшена до некоторой степени за счет содержания V, она не может быть улучшена так же высоко, как за счет дисперсионного упрочнения измельченным цементитом и упрочнения твердорастворенным С.

Затем авторы настоящего изобретения предположили, что для улучшения износостойкости предпочтительно использовать заэвтектоидную сталь, имеющую содержание С от 0,80 до 1,15 мас.% в химическом составе железнодорожного колеса.

Однако в результате исследования, проведенного авторами настоящего изобретения, было найдено, что в железнодорожном колесе из заэвтектоидной стали, имеющей содержание С 0,80 мас.% или больше, может образовываться доэвтектоидный цементит. Затем авторы настоящего изобретения исследовали соотношение между содержанием каждого элемента в химическом составе и количеством доэвтектоидного цементита в железнодорожном колесе, полученным из заэвтектоидной стали, имеющей высокое содержание С. В результате были получены следующие находки.

Фиг. 2-7 представляют собой диаграммы, иллюстрирующие соотношение содержания каждого элемента в стали (фиг. 2: содержания С, фиг. 3: содержания Si, фиг. 4: содержания Mn, фиг. 5: содержания Cr, фиг. 6: содержания Al, фиг. 7: содержания V), средней скорости охлаждения в диапазоне от 800 до 500°C, и доэвтектоидного цементита на основе результатов тестов термической обработки, моделирующих термическую обработку во время процесса производства железнодорожного колеса. Причина определения средней скорости охлаждения в диапазоне от 800 до 500°C состоит в том, что температура выделения доэвтектоидного цементита составляет от 800 до 500°C.

В частности, фиг. 2 создана на основе результатов, полученных в тесте Джомини и в тесте Формастера, которые будут описаны позже, с использованием множества образцов (сталь № 1, 2, 3 примера 1, который будет описан позже), каждый из которых имеет химический состав, по существу, с постоянным содержанием элементов Si: от 0,29 до 0,30 мас.%, Mn: от 0,79 до 0,80 мас.%, P: 0,001 мас.%, S: 0,002 мас.%, Al: от 0,032 до 0,036 мас.%, и N: от 0,0040 до 0,0042 мас.%, и различное содержание С, с остатком, представляющим собой Fe и примеси. Фиг. 3 создана на основе результатов, полученных в тесте Джомини и в тесте Формастера, которые будут описаны позже, с использованием множества образцов (сталь № 2, 4, 5 примера 1, который будет описан позже), каждый из которых имеет химический состав, по существу, с постоянным содержанием элементов С: от 1,00 до 1,03 мас.%, Mn: от 0,80 до 0,81 мас.%, P: от 0,001 до 0,002 мас.%, S: от 0,001 до 0,002 мас.%, Al: от 0,031 до 0,034 мас.%, N: от 0,0040 до 0,0042 мас.%, и различное содержание Si, с остатком, представляющим собой Fe и примеси. Фиг. 4 создана на основе результатов, полученных в тесте Джомини и в тесте Формастера, которые будут описаны позже, с использованием множества образцов (сталь № 2, 7, 8 примера 1, который будет описан позже), каждый из которых имеет химический состав, по существу, с постоянным содержанием элементов С: от 1,00 до 1,04 мас.%, Si: от 0,29 до 0,31 мас.%, P: от 0,001 до 0,002 мас.%, S: от 0,001 до 0,002 мас.%, Al: от 0,030 до 0,034 мас.%, N: от 0,0040 до 0,0058 мас.%, и различное содержание Mn, с остатком, представляющим собой Fe и примеси. Фиг. 5 создана на основе результатов, полученных в тесте Джомини и в тесте Формастера, которые будут описаны позже, с использованием множества образцов (сталь № 2, 9, 10 примера 1, который будет описан позже), каждый из которых имеет химический состав, по существу, с постоянным содержанием элементов С: от 1,00 до 1,05 мас.%, Si: от 0,29 до 0,30 мас.%, Mn: от 0,78 до 0,80 мас.%, P: 0,001 мас.%, S: от 0,001 до 0,002 мас.%, Al: от 0,033 до 0,034 мас.%, N: от 0,0030 до 0,0040 мас.%, и различное содержание Cr, с остатком, представляющим собой Fe и примеси. Фиг. 6 создана на основе результатов, полученных в тесте Джомини и в тесте Формастера, которые будут описаны позже, с использованием множества образцов (сталь № 2, 11, 12, 13, 14, 15 примера 1, который будет описан позже), каждый из которых имеет химический состав, по существу, с постоянным содержанием элементов С: от 1,00 до 1,03 мас.%, Si: от 0,29 до 0,30 мас.%, Mn: от 0,79 до 0,81 мас.%, P:

0,001 мас.%, S: от 0,001 до 0,002 мас.%, N: от 0,0034 до 0,0046 мас.%, и различное содержание Al, с остатком, представляющим собой Fe и примеси. Фиг. 7 создана на основе результатов, полученных в тесте Джомини и в тесте Формастера, которые будут описаны позже, с использованием множества образцов (сталь № 2, 17, 18 примера 1, который будет описан позже), каждый из которых имеет химический состав, по существу, с постоянным содержанием элементов C: от 1,00 до 1,03 мас.%, Si: от 0,29 до 0,30 мас.%, Mn: 0,80 мас.%, P: от 0,001 до 0,002 мас.%, S: от 0,001 до 0,002 мас.%, N: от 0,0040 до 0,0048 мас.%, Al: от 0,026 до 0,034 мас.%, и различное содержание V, с остатком, представляющим собой Fe и примеси.

Тест Джомини концевой закалки проводился следующим образом. Тест Джомини, соответствующий стандарту JIS G0561 (2011), проводился с использованием тестовых образцов Джомини (пруток круглого сечения, имеющий диаметр 25 мм и длину 100 мм), имеющих вышеописанные химические составы. В частности, тестовый образец Джомини выдерживался в печи с температурой 950°C, которая является температурой не ниже точки превращения A_{cm} , в атмосфере в течение 30 мин так, чтобы структура тестового образца Джомини превратилась в единственную фазу аустенита. После этого выполнялась концевая закалка (водяное охлаждение). В частности, вода распылялась так, чтобы охладить один конец тестового образца Джомини.

После водяного охлаждения боковая поверхность тестового образца Джомини, который был подвергнут водяному охлаждению, механически полировалась, и наблюдение ее микроструктуры выполнялось на постоянном расстоянии от одного конца (который был подвергнут водяному охлаждению) в осевом направлении. Положения наблюдения микроструктуры располагались с шагом 1,0 мм от охлаждавшегося водой конца до положения 15 мм, и с шагом 2,5 мм от охлаждавшегося водой конца до положения не менее 15 мм.

Был подготовлен образец, имеющий плоскость, включающую вышеописанные положения наблюдения микроструктуры, в качестве поверхности наблюдения. Поверхность наблюдения каждого образца была зеркально отполирована механическим образом. После этого поверхность наблюдения была протравлена смешанным раствором пикриновой кислоты и гидроксида натрия. Фотографическое изображение получалось для любого поля зрения (размером 200×200 мкм) на поверхности наблюдения после травления с использованием оптического микроскопа с увеличением 500×. На поверхности наблюдения доэвтектоидный цементит, который формируется на границе предшествующего аустенитного зерна, имел черный цвет. Соответственно, могло быть подтверждено присутствие или отсутствие доэвтектоидного цементита. Когда присутствие доэвтектоидного цементита подтверждалось, его количество (в шт./100 мкм, в дальнейшем также упоминаемое как количество доэвтектоидной фазы θ) определялось следующим способом. Как показано на фиг. 8, две диагональных линии проводились в квадратном поле зрения размером 200×200 мкм. Затем определялась полная сумма количества областей доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с этими двумя диагональными линиями. Путем деления определенной полной суммы доэвтектоидного цементита на полную длину (5,66×100 мкм) двух диагональных линий определялась количество доэвтектоидного цементита θ на 100 мкм (шт./100 мкм).

Затем та же самая поверхность наблюдения была снова зеркально отполирована механическим образом и протравлена раствором нитрата (смешанным раствором азотной кислоты и этанола). Фотографическое изображение получалось с использованием оптического микроскопа с увеличением 500× для любого поля зрения (размером 200×200 мкм) на поверхности наблюдения после травления. Закаленный слой (мартенсит и/или бейнит) и перлит имеют различающиеся контрасты. Следовательно закаленный слой и перлит на поверхности наблюдения идентифицировались на основе контраста. Доля площади перлита определялась на основе общей площади идентифицированного перлита и площади поверхности наблюдения. Когда подтверждалось существование какого-либо закаленного слоя, считалось, что закаленный слой сформирован.

Следует отметить, что соотношение между расстоянием от охлаждавшегося водой конца во время теста Джомини и временем охлаждения от 800 до 500°C экспериментально установлено в Непатентном документе 1 (F. Wever et al., Zur Frage der Warmbehandlung der Stähle auf Grund ihrer Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubilder, Stahl u Eisen, 74 (1954), p749 to 761). Основываясь на литературных источниках, расстояние от охлаждавшегося водой конца преобразовывалось, чтобы получить среднюю скорость охлаждения (°C/c) от 800 до 500°C в каждом положении.

Случай, в котором скорость охлаждения составляет не более 1°C/c, не может быть воспроизведен в тесте Джомини. Поэтому для случая, в котором скорость охлаждения составляет не более 1°C/c, проводился тест непрерывного охлаждения (тест Формастера) с низкой скоростью охлаждения. Прибор для выполнения теста Формастера производства компании Fuji Electronic Industrial Co., Ltd. использовался для термической обработки. В частности, каждый тестовый образец выдерживался при 950°C в течение 5 мин. После этого каждый тестовый образец охлаждался с постоянной скоростью охлаждения 1,0°C/c (или 0,1°C/c). Наблюдение микроструктуры проводилось вышеописанным способом на тестовом образце после охлаждения. Затем, если подтверждалось наличие доэвтектоидного цементита, его количество определялось вышеописанным способом. На основе результатов, полученных вышеописанными способами, были созданы фиг. 2-7.

Символ "○" на фиг. 2-7 означает, что микроструктура, по существу, состоит из перлита, и количество доэвтектоидного (проэвтектоидного) цементита в микроструктуре составляет не более 1,50 шт./100 мкм. Символ "×" означает, что хотя закаленный слой не был сформирован в микроструктуре, и микроструктура, по существу, состоит из перлита, количество доэвтектоидного цементита было больше чем 1,50 шт./100 мкм. Следует отметить, что фраза "микроструктура, по существу, состоит из перлита" означает, что доля площади перлита в микроструктуре составляет не менее 95%. Кроме того, символ "●" означает, что были сформированы мартенсит и/или бейнит (в дальнейшем мартенсит и/или бейнит также упоминаются как закаленный слой).

Максимальная скорость охлаждения (скорость охлаждения на границе между символом "○" и символом "×" на чертеже), при которой количество образующегося доэвтектоидного цементита составляет больше чем 1,50 шт./100 мкм, определяется как критическая скорость охлаждения доэвтектоидного цементита. Критическая скорость охлаждения доэвтектоидного цементита показана сплошной линией на фиг. 2-7.

На фиг. 2 по мере увеличения содержания С критическая скорость охлаждения доэвтектоидного цементита увеличивается. Кроме того, на фиг. 3, 4, 5 и 7 каждый из Si, Mn, Cr и V оказывает небольшой эффект на критическую скорость охлаждения доэвтектоидного цементита по сравнению с С и Al.

С другой стороны, как показано на фиг. 6, по мере увеличения содержания Al критическая скорость охлаждения доэвтектоидного цементита заметно уменьшается, приводя к заметному уменьшению количества доэвтектоидного θ . Следовательно, что касается количества доэвтектоидного θ в стали, в то время как С оказывает эффект увеличения количества доэвтектоидного θ , Al оказывает эффект заметного уменьшения количества доэвтектоидного θ .

На основе результатов вышеописанного исследования авторы настоящего изобретения предположили, что в железнодорожном колесе из заэвтектоидной стали, имеющей содержание С приблизительно 0,80-1,15 мас.%, увеличение содержание Al позволит подавить количество доэвтектоидного θ в части диска и части втулки, в которых скорость охлаждения является низкой во время термической обработки в процессе производства железнодорожного колеса, и тем самым получить превосходную ударную вязкость даже в железнодорожном колесе из заэвтектоидной стали. Затем на основе результатов вышеописанного исследования авторы настоящего изобретения дополнительно исследовали химический состав железнодорожного колеса из заэвтектоидной стали, чтобы обнаружить, что если химический состав железнодорожного колеса, состоит из С: от 0,80 до 1,15 мас.%, Si: 0,45 мас.% или меньше, Mn: от 0,10 до 0,85 мас.%, P: 0,050 мас.% или меньше, S: 0,030 мас.% или меньше, Al: от 0,120 до 0,650 мас.%, N: от 0,0030 до 0,0200 мас.%, Cr: от 0 до 0,25 мас.%, и V: от 0 до 0,12 мас.% с остатком из Fe и примесей, то количество доэвтектоидного θ может удерживаться на уровне не более 1,50 шт./100 мкм даже в части диска и части втулки, где скорость охлаждения является низкой.

Следует отметить, что, как показано на фиг. 6, по мере увеличения содержания Al закаленный слой (символ "●" на чертеже), скорее всего, будет образовываться во время закалки рабочей поверхности обода. В этом случае предел текучести имеет тенденцию к уменьшению в процессе производства. Следовательно с точки зрения подавления формирования закаленного слоя, верхний предел содержания Al в вышеописанном химическом составе предпочтительно составляет 0,350 мас.%. Однако с целью подавления выделения доэвтектоидного цементита, и тем самым улучшения ударной вязкости, содержание Al может составлять более чем 0,350 мас.% и вплоть до 0,650 мас.%.

Измельчение предшествующих аустенитных зерен.

Как было описано выше, в качестве технологии подавления количества доэвтектоидного цементита в железнодорожном колесе из заэвтектоидной стали, имеющей содержание С от 0,80 до 1,15 мас.%, эффективно увеличивать содержание Al до 0,120-0,650 мас.%. Однако в результате дополнительного исследования авторами настоящего изобретения было найдено, что, когда содержание Al увеличивается, в железнодорожном колесе может сформироваться грубый AlN. Грубый AlN не способствует подавлению роста предшествующего аустенитного зерна во время нагревания при закалке рабочей поверхности обода. Чем мельче предшествующее аустенитное зерно, тем сильнее улучшается ударная вязкость. Следовательно при рассмотрении дополнительного улучшения ударной вязкости более мелкое предшествующее аустенитное зерно является предпочтительным.

Авторы настоящего изобретения исследовали дополнительное измельчение предшествующего аустенитного зерна в железнодорожном колесе, полученном из заэвтектоидной стали, имеющей высокое содержание Al. В результате они нашли, что, как показано на фиг. 9, если средний размер частиц AlN в микроструктуре составляет 150 нм или меньше в железнодорожном колесе, сделанном из заэвтектоидной стали, имеющей вышеописанный химический состав, размер предшествующего аустенитного зерна может быть уменьшен до величины не более чем 50 мкм. Далее это будет описано подробно.

Было подготовлено множество тестовых образцов (дисков с диаметром 40 мм и толщиной 20 мм), имеющих химический состав стали 14 в табл. 1, которая будет описана ниже. Как показано на фиг. 10, моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1) выполнялась на тестовых образцах, моделирующих процесс производства железнодорожного колеса. В этом случае для каждого тестового образ-

ца температура выдержки в печи составляла 1150°C (HP1), 1200°C (HP2), 1250°C (HP3) и 1300°C (HP4). Атмосфера в печи представляла собой атмосферу газообразного аргона, и время выдержки составляло 60 мин для каждого тестового образца. Тестовый образец остывал после истечения времени выдержки.

После моделируемой стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1), выполнялась моделируемая стадия закалки рабочей поверхности обода (стадия 2). На моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода температура в печи составляла 950°C для каждого тестового образца, и выдерживалась в течение 20 мин. После истечения времени выдержки выполнялась закалка в воде (WQ).

Для каждого тестового образца после стадии 1 и перед стадией 2, а также для тестового образца после стадии 2, средний размер частиц (нм) AlN определялся описанным ниже способом.

Кроме того, для измерения размера предшествующего аустенитного зерна проводился следующий тест. В существующем химическом составе трудно различить границу предшествующего аустенитного зерна после закалки рабочей поверхности обода. Поэтому был разработан лучший способ измерения размера предшествующего аустенитного зерна путем выделения доэвтектоидного цементита на границах предшествующего аустенитного зерна во время охлаждения на моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода. В частности, вышеописанный тестовый образец подвергался моделируемой стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1) и моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 3), показанным на фиг. 11. Моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1) на фиг. 11 была той же самой, что и моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1) на фиг. 10. Моделируемая стадия закалки рабочей поверхности обода (стадия 3) на фиг. 11 отличалась от моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 2) на фиг. 10 только способом охлаждения. В частности, на моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 3) на фиг. 11 тестовый образец после выдержки при 950°C в течение 20 мин погружался в солевую ванну с температурой 675°C и изотермически выдерживался при 675°C в течение 30 мин. В результате этого доэвтектоидный цементит выделялся на границах предшествующего аустенитного зерна, так что наличие предшествующего аустенитного зерна могло быть подтверждено путем наблюдения микроструктуры. Тестовый образец после изотермической выдержки охлаждался до комнатной температуры (25°C). Размер предшествующего аустенитного зерна тестового образца, подвергнутого термической обработке стадии 1 и стадии 3, определялся способом измерения, описываемым ниже.

Фиг. 12 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую средний размер частиц AlN для каждой моделируемой температуры нагрева при горячей ковке (HP1-HP4) в тестовом образце после моделируемой стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1) и перед моделируемой стадией закалки рабочей поверхности обода (стадия 2). Фиг. 13 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую средний размер частиц AlN для каждой моделируемой температуры нагрева при горячей ковке (HP1-HP4) в тестовом образце после моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 2). Фиг. 14 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую размер предшествующего аустенитного зерна для каждой моделируемой температуры нагрева при горячей ковке (HP1-HP4) в тестовом образце после моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 3).

Символ "o" на фиг. 12 и 13 означает измеренное значение размера зерна AlN, подтвержденного в каждом наблюдаемом поле зрения при каждой из HP1-HP4, и гистограмма для каждой HP означает средний размер частиц AlN, измеренный при каждой HP. Как показано на фиг. 12 и 13, когда моделируемая температура нагрева при горячей ковке была не выше 1200°C, AlN не полностью растворялся после стадии горячейковки и перед стадией закалки рабочей поверхности обода (фиг. 12), и оставалось большое количество AlN. Следовательно большое количество грубого AlN оставалось после нагревания на стадии закалки рабочей поверхности обода (фиг. 13), и средний размер частиц также оставался грубым, более чем 150 нм.

В отличие от этого, когда моделируемая температура нагрева при горячей ковке была выше 1200°C (HP3 и HP4), остаточное количество AlN (фиг. 12) после стадии горячейковки уменьшалось, а когда она была выше 1250°C, AlN полностью растворялся. Затем, после нагревания на стадии закалки рабочей поверхности обода (фиг. 13), выделялось большое количество мелкого AlN, и средний размер частиц стал 150 нм или меньше. Кроме того, как показано на фиг. 13 и 14, поскольку средний размер частиц AlN стал меньше, размер предшествующего аустенитного зерна также уменьшился.

Фиг. 9 показывает сводку фиг. 13 и 14, т.е. соотношение между средним размером частиц AlN после моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода и размером предшествующего аустенитного зерна. Как показано на фиг. 9, по мере уменьшения среднего размера частиц AlN в стали размер предшествующего аустенитного зерна заметно уменьшается. Затем, когда средний размер частиц AlN становится равным 150 нм или меньше, степень уменьшения размера предшествующего аустенитного зерна, связанного с уменьшением среднего размера частиц AlN, уменьшается. Таким образом, график размера предшествующего аустенитного зерна имеет точку перегиба в районе среднего размера частиц AlN, равного 150 нм. Затем, когда средний размер частиц AlN становится равным 150 нм или меньше, размер предшествующего аустенитного зерна в достаточной степени уменьшается, до 50 мкм или меньше.

Следует отметить, что на основе вышеописанных наблюдений авторы настоящего изобретения в

следующем тесте подтвердили улучшение ударной вязкости железнодорожного колеса, связанное с измельчением AlN и измельчением предшествующего аустенитного зерна.

В частности, как и в тестах, показанных на фиг. 12 и 13, было подготовлено множество образцов для теста Шарпи (10 мм×10 мм×55 мм), имеющих химический состав стали 14 из примера, который будет описан позже. Эти тестовые образцы были подвергнуты моделируемой стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1) и моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 4), показанным на фиг. 15. Моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1), показанная на фиг. 15, была той же самой, что и моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1), показанная на фиг. 10 и 11. Моделируемая стадия закалки рабочей поверхности обода (стадия 4), показанная на фиг. 15, была установлена в предположении, что тестовый образец охлаждался со скоростью охлаждения, при которой часть обода колеса будет охлаждаться при закалке обода реального железнодорожного колеса. В частности, на моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 4) на фиг. 15 тестовый образец после выдержки при 950°C в течение 20 мин погружался в солевую ванну с температурой 400°C и изотермически выдерживался при 400°C в течение 10 мин. Затем тестовые образцы после изотермической выдержки охлаждались до комнатной температуры (25°C). Используя образцы для теста Шарпи, которые были подвергнуты вышеописанной термообработке на стадии 1 и стадии 4, тест на ударную вязкость по Шарпи, соответствующий стандарту JIS Z 2242(2005), проводился при комнатной температуре (25°C).

Фиг. 16 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую результаты ударного испытания Шарпи. Абсцисса показывает каждую температуру нагрева моделируемой горячейковки (HP1-HP4), а ордината показывает ударные вязкости Шарпи (Дж/см²). Столбцы на диаграмме показывают средние значения ударных вязкостей Шарпи (Дж/см²), полученные на множестве (от 1 до 4) тестовых образцов Шарпи для каждой HP1-HP4.

Как показано на фиг. 16, по мере того, как температура нагрева моделируемой горячейковки увеличивается, ударная вязкость Шарпи резко возрастает. Далее, когда температура нагрева моделируемой горячейковки становится больше чем 1200°C, рост ударной вязкости Шарпи, связанный с увеличением температуры нагрева моделируемой горячейковки, становится меньше, чем при температуре не более чем 1200°C. Другими словами, если средний размер частиц AlN составляет 150 нм или меньше, ударная вязкость железнодорожного колеса, имеющего вышеописанный химический состав, может быть дополнительно улучшена.

Как уже было описано, если средний размер частиц AlN составляет 150 нм или меньше, предшествующее аустенитное зерно будет в достаточной степени измельчено, и в результате ударная вязкость железнодорожного колеса должна дополнительно улучшиться. Однако даже если средний размер частиц AlN составляет больше чем 150 нм, как было описано выше, если количество доэвтектоидного цементита не превышает 1,50 шт./100 мкм, может быть получена ударная вязкость, эффективная в железнодорожном колесе.

Для того, чтобы сделать средний размер частиц AlN не превышающим 150 нм, например, температура нагрева во время горячейковки может быть сделана равной 1220°C или больше. В этом случае большая часть AlN в стали растворяется во время горячейковки. Затем, во время нагревания на стадии закалки рабочей поверхности обода, выделяется мелкий AlN, средний размер частиц которого составляет 150 нм или меньше. Благодаря скрепляющему действию мелкого AlN огрубление предшествующего аустенитного зерна подавляется, приводя к измельчению предшествующего аустенитного зерна. В результате ударная вязкость железнодорожного колеса должна дополнительно улучшаться.

Железнодорожное колесо по настоящему варианту осуществления, который был завершен на основе вышеописанных находок, имеет следующий химический состав, состоящий из: C: от 0,80 до 1,15 мас.%, Si: 0,45 мас.% или меньше, Mn: от 0,10 до 0,85 мас.%, P: 0,050 мас.% или меньше, S: 0,030 мас.% или меньше, Al: от 0,120 до 0,650 мас.%, N: от 0,0030 до 0,0200 мас.%, Cr: от 0 до 0,25 мас.%, и V: от 0 до 0,12 мас.%, с остатком, представляющим собой Fe и примеси. В микроструктуре железнодорожного колеса количество доэвтектоидного цементита, определяемое выражением (1), составляет не более 1,50 шт./100 мкм.

Количество доэвтектоидного цементита (шт./100 мкм) = полная сумма количества областей доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с двумя диагональными линиями в квадратном поле зрения размером 200 мкм × 200 мкм / (5,66 × 100 мкм) (1).

Железнодорожное колесо в соответствии с настоящим вариантом осуществления может содержать в микроструктуре нитрид алюминия со средним размером частиц 150 нм или меньше.

В таком случае предшествующее аустенитное зерно измельчается благодаря мелкому AlN. В результате ударная вязкость железнодорожного колеса дополнительно улучшается.

Химический состав вышеописанного железнодорожного колеса может содержать Al: от 0,120 до 0,350 мас.%. Кроме того, химический состав вышеописанного железнодорожного колеса может содержать один или более элементов, выбираемых из группы, состоящей из Cr: от 0,02 до 0,25 мас.%, и V: от 0,02 до 0,12 мас.%.

Далее будет подробно описано железнодорожное колесо настоящего варианта осуществления. В

данном описании символ "%" относительно элементов означает мас.%, если явно не указано иное.

Химический состав железнодорожного колеса.

Химический состав железнодорожного колеса настоящего варианта осуществления содержит следующие элементы.

C: от 0,80 до 1,15 мас.%

Углерод (C) увеличивает твердость стали и увеличивает износостойкость железнодорожного колеса. Если содержание C является слишком низким, этот эффект не может быть получен. С другой стороны, если содержание C является слишком высоким, большое количество доэвтектоидного цементита выделяется на границах предшествующего аустенитного зерна. В этом случае ударная вязкость железнодорожного колеса ухудшается. Следовательно содержание C составляет от 0,80 до 1,15 мас.%. Нижний предел содержания C предпочтительно составляет 0,90 мас.%, и более предпочтительно 0,95 мас.%. Верхний предел содержания C предпочтительно составляет 1,10 мас.%, и более предпочтительно 1,05 мас.%.
Si: 0,45 мас.% или меньше.

Кремний (Si) неизбежно содержится в стали. Таким образом, содержание Si составляет больше чем 0 мас.%. Твердый раствор Si упрочняет феррит, увеличивая твердость стали. Однако если содержание Si является слишком высоким, становится вероятным образование доэвтектоидного цементита, который вызывает ухудшение ударной вязкости стали. Если содержание Si является слишком высоким, прокаливаемость стали становится слишком высокой, и становится вероятным образование мартенсита. В таком случае толщина закаленного слоя, образующегося на рабочей поверхности обода во время закалки рабочей поверхности обода, увеличивается. В результате закаленный слой удаляется резанием. Следовательно, когда закаленный слой является толстым, объем резания увеличивается, и выход уменьшается. Когда содержание Si является слишком высоким, во время использования железнодорожного колеса происходит закалка, вызываемая теплотой трения между колесом и тормозной колодкой. В таком случае стойкость железнодорожного колеса к растрескиванию может ухудшиться. Следовательно содержание кремния составляет 0,45 мас.% или меньше. Верхний предел содержания Si предпочтительно составляет 0,35 мас.%, и более предпочтительно 0,25 мас.%. Нижний предел содержания Si, хотя он особенно не ограничивается, составляет, например, 0,05 мас.%.
Mn: от 0,10 до 0,85 мас.%

Твердый раствор марганца (Mn) упрочняет феррит, увеличивая твердость стали. Mn дополнительно образует MnS, улучшая тем самым обрабатываемость стали. Если содержание Mn является слишком низким, эти эффекты не могут быть получены. С другой стороны, если содержание Mn является слишком высоким, прокаливаемость стали становится слишком высокой. В таком случае толщина закаленного слоя увеличивается, и выход в процессе производства уменьшается. Кроме того, закалка может вызываться теплотой трения между колесом и тормозной колодкой во время использования железнодорожного колеса, ухудшая тем самым стойкость стали к растрескиванию. Следовательно содержание Mn составляет от 0,10 до 0,85 мас.%. Нижний предел содержания Mn предпочтительно составляет 0,50 мас.%, и более предпочтительно 0,70 мас.%. Верхний предел содержания Mn предпочтительно составляет 0,82 мас.%.
P: 0,050 мас.% или меньше.

Фосфор (P) является неизбежно содержащейся примесью. Таким образом, содержание P составляет больше чем 0 мас.%. P сегрегируется на границах зерна, ухудшая тем самым ударную вязкость стали. Поэтому содержание фосфора составляет 0,050 мас.% или меньше. Верхний предел содержания P предпочтительно составляет 0,030 мас.%, и более предпочтительно 0,020 мас.%. Содержание P предпочтительно является настолько низким, насколько это возможно. Однако чрезмерное уменьшение содержания P приведет к чрезмерному увеличению производственных затрат. Поэтому, с учетом обычного промышленного производства, нижний предел содержания P предпочтительно составляет 0,0001 мас.%, и более предпочтительно 0,0005 мас.%.
S: 0,030 мас.% или меньше.

Сера (S) является неизбежной примесью. Таким образом, содержание S составляет больше чем 0 мас.%. Сера образует MnS, улучшая тем самым обрабатываемость стали. С другой стороны, если содержание S является слишком высоким, ударная вязкость стали ухудшается. Следовательно содержание серы составляет 0,030 мас.% или меньше. Верхний предел содержания серы предпочтительно составляет 0,020 мас.%. Нижний предел содержания серы для улучшения обрабатываемости предпочтительно составляет 0,005 мас.%.
Al: от 0,120 до 0,650 мас.%.
Алюминий (Al) подавляет формирование доэвтектоидного цементита, который вызывает ухудшение ударной вязкости стали. Кроме того, Al соединяется с N, образуя AlN, и измельчает предшествующие аустенитные зерна. Поскольку предшествующие аустенитные зерна становятся более мелкими, ударная вязкость стали дополнительно улучшается. Эти эффекты не могут быть получены, если содержание Al является слишком низким. Однако если содержание Al является слишком высоким, AlN огрубляется и не растворяется при температуре нагрева во время горячей обработки. Следовательно эффект

роста предшествующих аустенитных зерен во время нагревания при закалке обода не проявляется, и ударная вязкость железнодорожного колеса ухудшается. Следовательно содержание Al составляет от 0,120 до 0,650 мас.%. Нижний предел содержания Al предпочтительно составляет 0,150 мас.%, и более предпочтительно 0,250 мас.%. Верхний предел содержания Al предпочтительно составляет 0,630 мас.%, более предпочтительно 0,600 мас.%, еще более предпочтительно 0,550 мас.%, и наиболее предпочтительно 0,500 мас.%. С учетом уменьшения объема резания закаленного слоя после закалки рабочей поверхности обода верхний предел содержания Al предпочтительно составляет 0,350 мас.%, более предпочтительно 0,320 мас.%, и еще более предпочтительно 0,300 мас.%. Содержание Al в настоящем документе означает содержание кислоторастворимого Al (растворимый Al).

N: от 0,0030 до 0,0200 мас.%.
 Azot (N) соединяется с Al, образуя AlN, и измельчает предшествующие аустенитные зерна. Поскольку предшествующие аустенитные зерна становятся более мелкими, ударная вязкость стали улучшается. Если содержание N является слишком низким, этот эффект не может быть получен. С другой стороны, если содержание N является слишком высоким, происходит насыщение этого эффекта. Следовательно содержание N составляет от 0,0030 до 0,0200 мас.%. Нижний предел содержания N предпочтительно составляет 0,0035 мас.%, и более предпочтительно 0,0040 мас.%. Верхний предел содержания N предпочтительно составляет 0,0100 мас.%, и более предпочтительно 0,0080 мас.%.
 Остаток химического состава железнодорожного колеса в соответствии с настоящим вариантом осуществления состоит из Fe и примесей. Примесь означает элемент, который поступает из руды и лома, или из производственной среды и т.д. при промышленном производстве железнодорожных колес, и содержание которого является допустимым внутри диапазона, не оказывающего негативного влияния на железнодорожное колесо настоящего варианта осуществления.
 Химический состав железнодорожного колеса настоящего варианта осуществления может также содержать Cr вместо части Fe.
 Cr: от 0 до 0,25 мас.%.
 Хром (Cr) является опциональным элементом, и может не содержаться. Таким образом, содержание Cr может составлять 0 мас.%. Когда он содержится, Cr уменьшает расстояние между пластинками перлита. Это значительно увеличивает твердость перлита. Однако если содержание Cr является слишком высоким, прокаливаемость улучшается, и толщина закаленного слоя после закалки рабочей поверхности обода чрезмерно увеличивается. Следовательно содержание Cr составляет от 0 до 0,25 мас.%. Верхний предел содержания Cr предпочтительно составляет 0,22 мас.%. Нижний предел содержания Cr предпочтительно составляет больше чем 0 мас.%. Предпочтительный нижний предел содержания Cr для более эффективного получения эффекта уменьшения расстояния между пластинками перлита составляет 0,02 мас.%.
 Химический состав железнодорожного колеса настоящего варианта осуществления может также содержать V вместо части Fe.
 V: от 0 до 0,12 мас.%.
 Ванадий (V) является опциональным элементом, и может не содержаться. Таким образом, содержание V может составлять 0 мас.%. Когда он содержится, V образует карбиды, нитриды и карбонитриды, упрочняя тем самым сталь дисперсионным твердением. В результате твердость железнодорожного колеса значительно увеличивается, дополнительно улучшая износостойкость. Однако если содержание V является слишком высоким, прокаливаемость становится высокой, и толщина закаленного слоя после закалки рабочей поверхности обода чрезмерно увеличивается. Следовательно содержание ванадия составляет от 0 до 0,12 мас.%. Верхний предел содержания V предпочтительно составляет 0,10 мас.%. Нижний предел содержания V предпочтительно составляет больше чем 0 мас.%, более предпочтительно 0,02 мас.%, и еще более предпочтительно 0,03 мас.%.
 Количество доэвтектоидного цементита.
 Железнодорожное колесо в соответствии с настоящим вариантом осуществления имеет микроструктуру, в которой количество доэвтектоидного цементита (количество доэвтектоидного θ), определяемое выражением (1), составляет не более 1,50 шт./100 мкм.

$$\text{Количество доэвтектоидного } \theta \text{ (шт./100 мкм)} = \text{полная сумма количества областей доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с двумя диагональными линиями в квадратном поле зрения размером } 200 \text{ мкм} \times 200 \text{ мкм} / (5,66 \times 100 \text{ мкм}) \text{ (1)}$$
 Более конкретно, количество доэвтектоидного θ , определяемое выражением (1), составляет не более 1,50 шт./100 мкм в части обода железнодорожного колеса настоящего варианта осуществления, количество доэвтектоидного цементита, определяемое выражением (1), составляет не более 1,50 шт./100 мкм в части диска, и количество доэвтектоидного цементита, определяемое выражением (1), составляет не более 1,50 шт./100 мкм в части втулки.
 Как было описано выше, когда количество доэвтектоидного θ является большим, ударная вязкость железнодорожного колеса ухудшается. Железнодорожное колесо настоящего варианта осуществления содержит 0,120-0,650 мас.% Al. В случае вышеописанного химического состава заэвтектоидной стали,

содержащей 0,120-0,650 мас.% Al, количество доэвтектоидного θ уменьшается в железнодорожном колесе после стадии закалки рабочей поверхности обода в процессе производства так, чтобы оно составляло не более 1,50 шт./100 мкм. Верхний предел количества доэвтектоидного θ предпочтительно составляет 1,20 шт./100 мкм, и более предпочтительно 1,00 шт./100 мкм.

Количество доэвтектоидного θ измеряется следующим способом. Образцы берутся из каждого из центрального положения в направлении толщины части обода колеса, центрального положения в направлении толщины части диска, и центрального положения в направлении толщины части втулки железнодорожного колеса. Поверхность наблюдения каждого образца зеркально полируется механическим образом. После этого поверхность наблюдения протравливается смешанным раствором пикриновой кислоты и гидроксида натрия. Фотографическое изображение получается для любого поля зрения (размером 200×200 мкм) на поверхности наблюдения после травления с использованием оптического микроскопа с увеличением 500×. На поверхности наблюдения доэвтектоидный цементит, который формируется на границе предшествующего аустенитного зерна, имеет черный цвет. Следовательно возможно подтвердить присутствие или отсутствие доэвтектоидного цементита. Как показано на фиг. 8, две диагональные линии 101 проводятся в квадратном поле зрения 100 размером 200×200 мкм. Затем определяется полная сумма количества областей доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с этими двумя диагональными линиями 101. Путем деления определенного полного количества частиц доэвтектоидного цементита на полную длину (5,66×100 мкм) двух диагональных линий 101 (т.е. на основе формулы (1)), определяется количество доэвтектоидного θ (шт./100 мкм). Количество доэвтектоидного θ , определенные в каждом из центрального положения части обода колеса, центрального положения части диска и центрального положения части втулки, выдерживаются на уровне не более 1,50 шт./100 мкм.

Средний размер частиц AlN.

В микроструктуре железнодорожного колеса в соответствии с настоящим вариантом осуществления средний размер частиц AlN предпочтительно составляет 150 нм или меньше. Как показано на фиг. 9, если средний размер частиц AlN составляет 150 нм или меньше, предшествующее аустенитное зерно будет измельчаться. Следовательно ударная вязкость железнодорожного колеса будет дополнительно улучшена. Верхний предел среднего размера частиц AlN предпочтительно составляет 120 нм, и более предпочтительно 100 нм. Следует отметить, что нижний предел среднего размера частиц AlN, хотя он особенно не ограничивается, составляет, например, 10 нм.

Средний размер частиц AlN определяется путем наблюдения извлеченной углеродом реплики образца с помощью TEM-EDS. В частности, он определяется следующим способом. Образцы берутся из каждого из центрального положения в направлении толщины части обода колеса, центрального положения в направлении толщины части диска, и центрального положения в направлении толщины части втулки железнодорожного колеса. Поверхность наблюдения полученного образца полируется. Поверхность наблюдения после полировки травится раствором нитала. Углерод осаждается из паровой фазы на поверхность наблюдения после травления. Образец после осаждения углерода из паровой фазы погружается в отслаивающий раствор для элюирования одного только основного металла без растворения выделений для отслаивания пленки реплики от основного металла. В поле зрения (размером 6,5 мкм×9 мкм), где было подтверждено присутствие в пленке реплики выделений, фотографическое изображение (того же самого размера, что и поле зрения) получается с помощью TEM. Кроме того, каждое выделение на фотографическом изображении идентифицируется с помощью EDS и анализа изображения дифракции электронов. Среди выделений такое выделение, которое имеет характерную прямоугольную или шестиугольную форму, и чей пик в рентгеновском спектре, полученном с помощью EDS, находится около характерной рентгеновской энергии элемента Al (излучение Al K α : 1,49 кэВ), идентифицируется как AlN. Площадь каждого идентифицированного AlN определяется с использованием фотографического изображения, и диаметр эквивалентной окружности (нм) определяется из этой определенной площади. Среднее значение определенных диаметров эквивалентной окружности определяется как средний размер частиц AlN (нм).

В железнодорожном колесе настоящего варианта осуществления фраза "средний размер частиц AlN составляет 150 нм или меньше" означает, что средний размер частиц AlN в части обода железнодорожного колеса составляет 150 нм или меньше, средний размер частиц AlN в части диска составляет 150 нм или меньше, и средний размер частиц AlN в части втулки составляет 150 нм или меньше.

Микроструктура железнодорожного колеса.

Микроструктура части обода колеса, части диска, и части втулки железнодорожного колеса настоящего варианта осуществления, по существу, состоит из перлита. Здесь фраза "по существу, состоит из перлита" означает, что доля площади перлита в микроструктуре составляет 95% или больше.

Доля площади перлита определяется следующим способом. Образцы берутся из каждого из центрального положения в направлении толщины части обода колеса, центрального положения в направлении толщины части диска, и центрального положения в направлении толщины части втулки железнодорожного колеса. Поверхность наблюдения каждого образца зеркально полируется механическим образом. После этого поверхность наблюдения травится раствором нитала (смешанным раствором пикрино-

вой кислоты и этанола). Фотографическое изображение получается для любого поля зрения (размером 200 мкм×200 мкм) на поверхности наблюдения после травления с использованием оптического микроскопа с увеличением 500×. Закаленный слой (мартенсит и/или бейнит) и перлит имеют различающиеся контрасты. Следовательно закаленный слой и перлит на поверхности наблюдения идентифицируются на основе контраста. Доля площади перлита определяется на основе общей площади идентифицированного перлита и площади поверхности наблюдения.

Способ производства железнодорожного колеса.

Далее будет описан один пример способа производства вышеописанного железнодорожного колеса. Этот способ производства включает в себя стадию производства стали для железнодорожного колеса (стадию производства исходного материала), стадию формования промежуточного продукта, имеющего форму колеса, из этой стали для железнодорожного колеса с помощью горячей обработки (стадию формования), стадию выполнения термической обработки (заковки рабочей поверхности обода) для сформованного промежуточного продукта (стадию термической обработки), и стадию получения железнодорожного колеса путем удаления закаленного слоя резанием с рабочей поверхности обода и т.д. промежуточного продукта после термической обработки (стадию резания). Далее будет описана каждая стадия.

Стадия производства исходного материала.

На стадии производства исходного материала расплавленные стали, имеющие вышеописанные химические составы, плавятся с использованием электропечи или конвертера, после чего отливаются для того, чтобы получить стальные слитки. Следует отметить, что стальной слиток может быть получен либо непрерывной разливкой, либо литьем в форму.

Отливка или слиток подвергается горячей обработке для производства стальных материалов для железнодорожного колеса, имеющих желаемый размер. Примеры горячей обработки включают в себя горячую ковку, горячую прокатку и др. В соответствии с описанным процессом производства производятся стальные материалы для железнодорожного колеса.

Следует отметить, что сталь для железнодорожного колеса может быть литым материалом (отливкой или слитком). Таким образом, вышеописанная стадия горячей обработки может быть опущена. В соответствии с описанной выше стадией производится сталь для железнодорожного колеса, которая является исходным материалом железнодорожного колеса.

Стадия формования.

На стадии формования промежуточный продукт, имеющий форму колеса, формируется горячей обработкой с использованием подготовленного стального материала для железнодорожного колеса. Поскольку промежуточный продукт имеет форму колеса, он включает в себя часть втулки, часть диска и часть обода колеса, включая обод и реборду. Примеры горячей обработки включают в себя горячую ковку и горячую прокатку.

Температура нагрева стального материала для железнодорожного колеса во время горячей обработки предпочтительно составляет 1220°C или больше. В этом случае AlN в стальном материале для железнодорожного колеса в достаточной степени растворяется на стадии нагревания во время горячей обработки. По этой причине мелкий AlN, имеющий средний размер частиц 150 нм или меньше, выделяется во время нагревания на стадии термической обработки (заковки рабочей поверхности обода), которая является следующей стадией. В результате этого размер предшествующего аустенитного зерна измельчается до 50 мкм или менее, как показано на фиг. 9, дополнительно улучшая тем самым ударную вязкость железнодорожного колеса.

Нижний предел температуры нагрева во время горячей обработки предпочтительно составляет 1230°C, более предпочтительно 1250°C, и еще более предпочтительно 1300°C. Верхний предел температуры нагрева во время горячей обработки предпочтительно составляет 1350°C.

Следует отметить, что способ охлаждения промежуточного продукта после горячей обработки особенно не ограничивается. Это может быть естественное остывание или охлаждение водой.

Стадия термической обработки.

На стадии термической обработки сформированный промежуточный продукт, имеющий форму колеса, подвергается закалке обода. В частности, промежуточный продукт после горячей обработки (горячейковки или горячей прокатки) повторно нагревается до точки превращения A_{cm} или выше (обработка повторного нагрева). После нагревания обод и реборда промежуточного продукта подвергаются быстрому охлаждению (закалке обода). Например, обод и реборда охлаждаются охлаждающей средой. Охлаждающая среда представляет собой, например, воздух, туман, и пар (спрей), и особо не ограничивается при условии, что может быть получена скорость охлаждения, подходящая для желаемой структуры. Следует отметить, что во время закалки рабочей поверхности обода часть диска и часть втулки не охлаждаются водой, а остывают естественным образом. В настоящем варианте осуществления путем задания содержания Al в химическом составе железнодорожного колеса в диапазоне 0,120-0,650 мас.% возможно в достаточной степени подавить образование доэвтектоидного цементита, даже если часть диска и часть втулки охлаждаются во время закалки рабочей поверхности обода как в предшествующем способе производства, и в частности количество доэвтектоидного θ может быть удержано на уровне не выше чем

1,50 шт./100 мкм в части обода колеса, части диска и части втулки.

Диаметр железнодорожного колеса настоящего варианта осуществления составляет, например, от 700 до 1000 мм. Кроме того, предпочтительная скорость охлаждения обода во время закалки рабочей поверхности обода составляет от 5 до 200°C/с. Кроме того, среди областей части обода колеса, части диска и части втулки промежуточного продукта предпочтительная скорость охлаждения для области, скорость охлаждения которой является самой низкой во время закалки рабочей поверхности обода, составляет приблизительно 0,1°C/с. В этом случае в произведенном железнодорожном колесе, имеющем вышеописанный химический состав, количество доэвтектоидного θ будет составлять не больше чем 1,50 шт./100 мкм. Область промежуточного продукта, скорость охлаждения которой является самой низкой, может быть определена, например, путем измерения изменения распределения температур промежуточного продукта во время охлаждения рабочей поверхности обода с использованием множества термографических устройств.

В результате закалки рабочей поверхности обода в наружном слое обода образуется троостит. Содержание С в железнодорожном колесе настоящего варианта осуществления составляет от 0,80 до 1,15 мас.%. По этой причине износостойкость троостита улучшается. Кроме того, содержание Al в железнодорожном колесе настоящего варианта осуществления составляет от 0,120 до 0,650 мас.%. По этой причине формирование во время закалки рабочей поверхности обода доэвтектоидного цементита, который вызывает ухудшение ударной вязкости стали, подавляется.

Хотя промежуточный продукт повторно нагревается в вышеприведенном описании, промежуточный продукт после горячей обработки может быть напрямую (без повторного нагрева) подвергнут закалке обода.

Кроме того, в вышеприведенном описании часть диска и часть втулки остывают во время закалки рабочей поверхности обода, и при этом закаленный слой с меньшей вероятностью будет сформирован на поверхностях части диска и части втулки. С другой стороны, во время закалки рабочей поверхности обода часть диска и часть втулки могут охлаждаться со скоростью охлаждения выше, чем при естественном охлаждении. В этом случае предпочтительно выполнять охлаждение с такой скоростью охлаждения, при которой закаленный слой не будет формироваться на поверхности части диска и части втулки.

Предпочтительно после того, как промежуточный продукт будет нагрет до 1220°C или выше и подвергнут горячей обработке, он охлаждается. Затем охлажденный промежуточный продукт повторно нагревается до температуры не ниже точки превращения A_{cm} и подвергается закалке рабочей поверхности обода. В этом случае грубый AlN в стали растворяется по действием нагревания во время горячей обработки, а затем выделяется в виде мелкого AlN во время повторного нагревания. Следовательно предшествующее аустенитное зерно может быть измельчено, как было описано выше.

Промежуточный продукт после закалки рабочей поверхности обода подвергается отпуску по мере необходимости. Отпуск может быть выполнен при известных температуре и времени.

Стадия резания.

Как было описано выше, в то время как троостит формируется в наружном слое обода промежуточного продукта после термической обработки, над ним формируется закаленный слой. Поскольку износостойкость закаленного слоя является недостаточной для использования железнодорожного колеса, закаленный слой удаляется путем резания. Резание может быть выполнено известным способом.

Железнодорожное колесо настоящего варианта осуществления производится с помощью вышеописанных стадий. В железнодорожном колесе, произведенном с помощью вышеописанного процесса производства, количество доэвтектоидного θ составляет не более 1,50 шт./100 мкм. Следовательно ожидается, что ударная вязкость железнодорожного колеса будет улучшена. Кроме того, когда температура нагрева на стадии горячей обработки устанавливается равной 1220°C или больше, средний размер частиц AlN в стали будет составлять 150 нм или меньше, а размер предшествующего аустенитного зерна - 50 мкм или меньше. В этом случае ударная вязкость железнодорожного колеса будет дополнительно улучшена.

Примеры

Пример 1.

Были произведены расплавленные стали № 1-20, имеющие химические составы, показанные в табл.

1.

Таблица 1

Сталь №	Химический состав (в мас.%, с остатком из Fe и примесей)									Толщина закаленного слоя (мм)	Количество сформированного доэвтектоидного цементита (шт./100 мкм)		Примечания
	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	V		Скорость охлаждения 1,0°C/с	Скорость охлаждения 0,1°C/с	
1	0,93	0,29	0,80	0,001	0,002	0,032	0,0042	—	—	9,0	0,27	1,60	Сравнительная сталь
2	1,00	0,30	0,80	0,001	0,002	0,034	0,0040	—	—	10,0	2,40	4,80	Сравнительная сталь
3	1,09	0,30	0,79	0,001	0,002	0,036	0,0040	—	—	9,0	6,14	5,07	Сравнительная сталь
4	1,02	0,05	0,81	0,002	0,001	0,031	0,0042	—	—	8,0	2,13	3,47	Сравнительная сталь
5	1,03	0,58	0,80	0,001	0,002	0,034	0,0041	—	—	14,0	3,20	3,47	Сравнительная сталь
6	1,03	0,89	0,80	0,001	0,002	0,036	0,0040	—	—	14,0	3,74	3,20	Сравнительная сталь
7	1,04	0,29	0,40	0,002	0,001	0,030	0,0056	—	—	8,0	2,13	2,93	Сравнительная сталь
8	1,02	0,31	1,23	0,002	0,001	0,030	0,0058	—	—	12,0	3,20	—	Сравнительная сталь
9	1,05	0,29	0,79	0,001	0,001	0,033	0,0030	0,11	—	8,0	2,40	2,93	Сравнительная сталь
10	1,03	0,29	0,78	0,001	0,001	0,034	0,0034	0,21	—	8,0	4,00	4,00	Сравнительная сталь
11	1,03	0,29	0,79	0,001	0,001	0,063	0,0041	—	—	9,0	2,93	2,93	Сравнительная сталь
12	1,03	0,29	0,80	0,001	0,001	0,100	0,0044	—	—	10,0	2,67	2,93	Сравнительная сталь
13	1,03	0,29	0,80	0,001	0,001	0,200	0,0046	—	—	9,0	0,27	1,33	Сталь в соответствии с настоящим изобретением
14	1,00	0,29	0,81	0,001	0,002	0,300	0,0034	—	—	10,0	0,00	0,27	Сталь в соответствии с настоящим изобретением
15	1,00	0,30	0,80	0,001	0,002	0,610	0,0034	—	—	17,5	0,00	0,27	Сталь в соответствии с настоящим изобретением
16	0,99	0,30	0,81	0,002	0,002	0,190	0,0045	—	0,03	11,0	0,53	1,33	Сталь в соответствии с настоящим изобретением
17	1,03	0,29	0,80	0,002	0,001	0,029	0,0048	—	0,03	11,0	2,13	—	Сравнительная сталь
18	1,03	0,29	0,80	0,002	0,001	0,026	0,0047	—	0,09	15,0	2,40	—	Сравнительная сталь
19	0,97	0,26	0,76	0,002	0,001	0,190	0,0043	0,08	—	11,0	0,27	1,33	Сталь в соответствии с настоящим изобретением
20	1,06	0,78	0,76	0,002	0,001	0,150	0,0041	—	—	17,5	2,40	2,93	Сравнительная сталь

Круглый слиток (в форме усеченного конуса, имеющего диаметр верхней поверхности 107 мм, диаметр нижней поверхности 97 мм и высоту 230 мм), был произведен процессом изготовления слитков с использованием вышеописанной расплавленной стали. Моделируя стадию горячей обработки в процессе производства железнодорожного колеса, этот слиток был нагрет до 1250°C, а затем подвергнут горячей ковке для того, чтобы произвести заготовку круглого сечения, имеющую диаметр 40 мм.

Тест моделируемой закалки рабочей поверхности обода.

Тест моделируемой закалки рабочей поверхности обода, которая моделирует закалку обода в про-

цессе производства железнодорожного колеса, выполнялся для того, чтобы исследовать количество доэвтектоидного θ после теста моделируемой закалки рабочей поверхности обода.

Тест измерения количества доэвтектоидного θ .

Образец для теста термической обработки, имеющий диаметр 3 мм и длину 10 мм, был изготовлен из положения D/4 ("D" означает диаметр заготовки круглого сечения) каждой заготовки круглого сечения из сталей № 1-15. Продольное направление образца для теста термической обработки соответствовало направлению центральной оси заготовки круглого сечения.

Тест непрерывного охлаждения проводился с использованием изготовленных образцов для теста термической обработки. Прибор для выполнения теста Формастера производства компании Fuji Electronic Industrial Co., Ltd использовался для термической обработки. В частности, два тестовых образца для каждого вида стали подготавливались и выдерживались при 950°C в течение 5 мин. После этого один из тестовых образцов охлаждался с постоянной скоростью охлаждения 1,0°C/с. Другой из тестовых образцов охлаждался с постоянной скоростью охлаждения 0,1°C/с. Количество доэвтектоидного θ определялось следующим способом для каждого тестового образца после охлаждения.

Был изготовлен образец, имеющий поперечное сечение, перпендикулярное к продольному направлению образца для теста термической обработки, в качестве поверхности наблюдения. На поверхности наблюдения количество доэвтектоидного θ измерялось следующим способом. После того, как поверхность наблюдения была механически отполирована, поверхность наблюдения травилась смешанным раствором пикриновой кислоты и гидроксида натрия. Фотографическое изображение получалось для любого поля зрения (размером 200 мкм×200 мкм) на поверхности наблюдения после травления с использованием оптического микроскопа с увеличением 500×. Доэвтектоидный цементит в наблюдаемом поле зрения подтверждался на основе контраста. Когда доэвтектоидный цементит наблюдался, количество доэвтектоидного θ вычислялось вышеописанным способом.

Тест измерения глубины закаленного слоя.

Кроме того, тест Джомини выполнялся относительно глубины закаленного слоя. Тест Джомини выполнялся следующим образом. Образец для теста Джомини, имеющий диаметр 25 мм и длину 100 мм, изготавливался из заготовки круглого сечения, имеющей диаметр 40 мм, для каждого вида стали. Центральная ось образца для теста Джомини соответствовала центральной оси заготовки круглого сечения. Тест Джомини, соответствующий стандарту JIS G0561 (2011), выполнялся с использованием образца для теста Джомини. В частности, образец для теста Джомини выдерживался в печи с температурой 950°C, которая является температурой не ниже точки превращения A_{cm} , в атмосфере в течение 30 мин так, чтобы структура образца для теста Джомини превратилась в единственную фазу аустенита. После этого выполнялась концевая закалка (водяное охлаждение). В частности, вода распылялась так, чтобы охладить один конец образца для теста Джомини.

После водяного охлаждения боковая поверхность тестового образца Джомини, который был подвергнут водяному охлаждению, механически полировалась, и тест на твердость по Роквеллу (HRC) с использованием шкалы C, соответствующий стандарту JIS Z 2245 (2011), выполнялся на постоянном расстоянии в осевом направлении от одного конца (который был подвергнут водяному охлаждению), чтобы получить распределение HRC. Измерения HRC выполнялись с шагом 1,0 мм до положения 15 мм от охлаждавшегося водой конца, и с шагом 2,5 мм до положения не меньше чем 15 мм от охлаждавшегося водой конца. Из полученного распределения HRC толщина закаленного слоя определялась следующим способом.

Фиг. 17 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую распределение HRC (кривую Джомини) сталей № 1-3. Как показано на фиг. 17, на кривой Джомини при увеличении расстояния D от охлаждавшегося водой конца твердость по Роквеллу HRC быстро уменьшается. Затем, когда D становится равным предопределенному расстоянию или больше, твердость по Роквеллу HRC уменьшается уже не так быстро. Область A, в которой твердость по Роквеллу HRC быстро уменьшается, определяется как "закаленный слой", а область B, в которой твердость по Роквеллу HRC уменьшается не так быстро, определяется как "основной металл". Область A и область B могут быть разделены посредством точки перегиба. Толщина закаленного слоя (мм) определялась путем идентификации области A из распределения HRC (кривой Джомини) для каждой стали.

Следует отметить, что тест наблюдения микроструктуры проводился в способе, описанном выше на фиг. 2-7, на образце для теста Джомини каждой стали после теста Джомини для определения доли площади перлита в микроструктуре в той области, в которой не было сформировано закаленного слоя. В частности, образец брался из части, соответствующей области B на фиг. 17, из образца каждой стали для теста Джомини. Поверхность наблюдения каждого образца была зеркально отполирована механическим образом. После этого поверхность наблюдения травилась раствором нитрата (смешанным раствором азотной кислоты и этанола). Фотографическое изображение получалось для любого поля зрения (размером 200×200 мкм) на поверхности наблюдения после травления с использованием оптического микроскопа с увеличением 500×. Перлит на поверхности наблюдения идентифицировался на основе контраста. Доля площади перлита определялась на основе общей площади идентифицированного перлита и площади поверхности наблюдения.

Результаты теста.

Результаты теста показаны в табл. 1. Как показано в табл. 1, микроструктура в области, отличающейся от закаленного слоя, представляла собой структуру, состоящую, по существу, из перлита, для любой стали. Таким образом, доля площади перлита составляла 95% или больше.

Кроме того, химические составы сталей № 13-16 и 19 были подходящими. По этой причине количество доэвтектоидного θ было не больше чем 1,50 шт./100 мкм при обеих скоростях охлаждения, 0,1°C/с и 1,0°C/с. Следовательно ожидалось получение превосходной ударной вязкости. Следует отметить, что содержание Al составляло 0,350 мас.% или меньше в сталях № 13, 14, 16 и 19. По этой причине, в то время как толщина закаленного слоя в стали № 15, в которой содержание Al было равно 0,610 мас.%, составляла 17,5 мм, толщина закаленного слоя в сталях № 13, 14, 16 и 19 составляла всего лишь 11,0 мм или меньше.

С другой стороны, в сталях № 1-12, 17 и 18 содержание Al было слишком низким. В результате количество доэвтектоидного θ было больше чем 1,50 шт./100 мкм.

В стали № 10 содержание Si было слишком высоким. В результате количество доэвтектоидного θ было больше чем 1,50 шт./100 мкм.

Пример 2.

Круглый слиток (в форме усеченного конуса, имеющего диаметр верхней поверхности 107 мм, диаметр нижней поверхности 97 мм и высоту 230 мм), был произведен процессом изготовления слитков с использованием расплавленной стали, имеющей химический состав Стали № 14 в табл. 1. Этот слиток был нагрет до 1250°C, после чего подвергнут горячей ковке для того, чтобы произвести множество заготовок круглого сечения, имеющих диаметр 40 мм. Произведенные заготовки круглого сечения использовались в качестве тестовых образцов.

Как показано на фиг. 10, для этих образцов выполнялась моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1), моделирующая процесс производства железнодорожного колеса. В этом случае для каждого тестового образца температура выдержки в печи составляла 1150°C (HP1), 1200°C (HP2), 1250°C (HP3) и 1300°C (HP4). Атмосфера в печи представляла собой атмосферу газообразного аргона, и время выдержки составляло 60 мин для каждого тестового образца. Тестовый образец остывал после истечения времени выдержки.

После моделируемой стадии нагревания при горячей ковке выполнялась моделируемая стадия закалки рабочей поверхности обода (стадия 2). На моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода каждый тестовый образец выдерживался в печи при температуре 950°C в течение 20 мин. После истечения времени выдержки выполнялась закалка в воде (WQ).

Тест измерения среднего размера частиц AlN.

Для каждого тестового образца после стадии 1 и перед стадией 2, а также тестового образца после стадии 2, определялся средний размер частиц AlN. В частности, образец брался из центрального положения поперечного сечения, перпендикулярного к продольному направлению тестового образца. Поверхность наблюдения взятого образца полировалась. Поверхность наблюдения после полировки травилась раствором нитала. Углерод осаждался из паровой фазы на поверхность наблюдения после травления. Образец после осаждения углерода из паровой фазы погружался в отслаивающий раствор для элюирования одного только основного металла без растворения выделений для отслаивания пленки реплики от основного металла. В любом поле зрения (размером 6,5×9 мкм) в пленке реплики фотографическое изображение (того же самого размера, что и поле зрения) получалось с помощью TEM. Кроме того, элементы в каждом выделении на фотографическом изображении были идентифицированы с помощью EDS. Определялась площадь каждой идентифицированной частицы AlN, и диаметр эквивалентной окружности (в нм) определялся из этой определенной площади. Среднее значение определенных диаметров эквивалентной окружности определялось как средний размер частиц AlN (в нм).

Тест измерения размера предшествующего аустенитного зерна.

Тестовый образец, имеющий химический состав стали № 14 в табл. 1, был подвергнут моделируемой стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1) и моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 3), показанным на фиг. 11. Моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1) на фиг. 11 была той же самой, что и моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1) на фиг. 10. На моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 3) на фиг. 11 тестовый образец с температурой 950°C погружался в солевую ванну с температурой 675°C и изотермически выдерживался при 675°C в течение 30 мин. Это заставляло доэвтектоидный цементит выделяться на границах предшествующего аустенитного зерна, что позволяло подтвердить наличие предшествующего аустенитного зерна при наблюдении микроструктуры. Тестовый образец после изотермической выдержки охлаждался до комнатной температуры (25°C).

Образец брался из центрального положения поперечного сечения, перпендикулярного к продольному направлению тестового образца после его охлаждения. Поверхность наблюдения взятого образца полировалась. Поверхность наблюдения после полировки травилась смешанным раствором пикриновой кислоты и гидроксида натрия. В любом поле зрения (размером 200 мкм×200 мкм) протравленной по-

верхности наблюдения фотографическое изображение (того же самого размера, что и поле зрения) получалось с помощью ТЕМ. На полученном фотографическом изображении идентифицировались предшествующие аустенитные зерна. Кристаллическое зерно, окруженное доэвтектоидным цементитом, идентифицировалось как предшествующее аустенитное зерно.

Размер предшествующего аустенитного зерна, идентифицированного в поле зрения, определялся методом отрезков. В частности, как показано на фиг. 8, две диагональных линии 101 проводились в квадратном поле зрения 100 размером 200×200 мкм. Затем определялась полная сумма количества областей доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с этими двумя диагональными линиями 101. Затем размер предшествующего аустенитного зерна определялся с помощью следующей формулы.

Размер предшествующего аустенитного зерна = сумма длин двух диагональных линий 101 (566 мкм) / общее количество частиц доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с диагональной линией 101.

Ударное испытание Шарпи.

Было подготовлено множество тестовых образцов Шарпи (10 мм×10 мм×55 мм), имеющих химический состав стали № 14 в табл. 1. Эти тестовые образцы были подвергнуты моделируемой стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1) и моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 4), показанным на фиг. 15. Моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1), показанная на фиг. 15, была той же самой, что и моделируемая стадия нагревания при горячей ковке (стадия 1), показанная на фиг. 10 и 11. Моделируемая стадия закалки рабочей поверхности обода (стадия 4), показанная на фиг. 15, была установлена в предположении, что тестовый образец охлаждался со скоростью охлаждения, при которой часть обода колеса будет охлаждаться при закалке обода реального железнодорожного колеса. В частности, на моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 4) на фиг. 15 тестовый образец после выдержки при 950°C в течение 20 мин погружался в солевую ванну с температурой 400°C и изотермически выдерживался при 400°C в течение 10 мин. Затем тестовый образец после изотермической выдержки охлаждался до комнатной температуры (25°C). Используя образцы для теста Шарпи, которые были подвергнуты вышеописанной термообработке на стадии 1 и стадии 4, тест на ударную вязкость по Шарпи, соответствующий стандарту JIS Z 2242(2005), проводился при комнатной температуре (25°C).

Результаты теста.

Фиг. 12 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую средний размер частиц AlN для каждой моделируемой температуры нагрева при горячей ковке (HP1-HP4) в тестовом образце после моделируемой стадии нагревания при горячей ковке (стадия 1) и перед моделируемой стадией закалки рабочей поверхности обода (стадия 2). Фиг. 13 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую средний размер частиц AlN для каждой моделируемой температуры нагрева при горячей ковке (HP1-HP4) в тестовом образце после моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 2). Фиг. 14 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую средний размер предшествующего аустенитного зерна для каждой моделируемой температуры нагрева при горячей ковке (HP1-HP4) в тестовом образце после моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 3). Фиг. 16 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую значения ударного испытания Шарпи (Дж/см²) для каждой моделируемой температуры нагрева при горячей ковке (HP1-HP4) в тестовом образце после моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 4). Фиг. 9 представляет собой диаграмму, иллюстрирующую соотношение между средним размером частиц AlN и размером предшествующего аустенитного зерна, основанную на результатах, показанных на фиг. 13 и 14.

Как показано на фиг. 12 и 13, когда моделируемая температура нагрева при горячей ковке была равна 1200°C или меньше, AlN не полностью растворялся, и большая часть AlN оставалась даже после моделируемого нагревания при горячей ковке (стадия 1) (фиг. 12). По этой причине оставалось большое количество грубого AlN, и средний размер частиц составлял более 150 нм, т.е. они оставались как всегда грубыми даже после нагревания (фиг. 13) на моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (стадия 2).

В отличие от этого, когда моделируемая температура нагрева при горячей ковке была выше 1200°C, остаточное количество AlN (фиг. 12) после моделируемой стадии нагревания при горячей ковке уменьшалось, а когда она была выше 1250°C, AlN полностью растворялся. Затем, если моделируемая температура нагрева при горячей ковке была больше чем 1200°C, выделялось большое количество мелкого AlN, приводя к среднему размеру частиц 150 нм или меньше после нагревания на моделируемой стадии закалки рабочей поверхности обода (фиг. 13).

Как показано на фиг. 9, поскольку средний размер частиц AlN уменьшился, размер предшествующего аустенитного зерна также уменьшился. Затем, когда средний размер частиц AlN становится равным 150 нм или меньше, размер предшествующего аустенитного зерна в достаточной степени уменьшается, до 50 мкм или меньше. Затем, как показано на фиг. 16, по мере того, как средний размер частиц AlN уменьшался, ударная вязкость по Шарпи увеличивалась, и когда средний размер частиц AlN составил 150 нм или меньше, ударная вязкость по Шарпи составила 10 Дж/см², показывая, что еще более превос-

ходная ударная вязкость может быть получена для железнодорожного колеса.

Выше были описаны варианты осуществления настоящего изобретения. Однако вышеописанные варианты осуществления являются просто примерами осуществления настоящего изобретения. Следовательно настоящее изобретение не будет ограничиваться вышеописанными вариантами осуществления, и может быть осуществлено путем подходящей модификации вышеописанных вариантов осуществления внутри некоторого диапазона, не отступающего от духа настоящего изобретения.

Список ссылочных обозначений:

- 1 - железнодорожное колесо,
- 2 - часть втулки,
- 3 - часть диска,
- 4 - часть обода колеса,
- 41 - рабочая поверхность обода,
- 42 - реборда.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Железнодорожное колесо, имеющее следующий химический состав, состоящий из, мас. %:

- C: от 0,80 до 1,15,
- Si: 0,45 или меньше,
- Mn: от 0,10 до 0,85,
- P: 0,050 или меньше,
- S: 0,030 или меньше,
- Al: от 0,120 до 0,650 и
- N: от 0,0030 до 0,0200,

с остатком из железа и примесей, в котором количество доэвтектоидного цементита в микроструктуре железнодорожного колеса составляет не более 1,50 шт./100 мкм, при этом

количество доэвтектоидного цементита (шт./100 мкм) определено как полная сумма количества областей доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с двумя диагональными линиями в квадратном поле зрения размером 200×200 мкм/(5,66×100 мкм).

2. Железнодорожное колесо, имеющее следующий химический состав, состоящий из, мас. %:

- C: от 0,80 до 1,15,
- Si: 0,45 или меньше,
- Mn: от 0,10 до 0,85,
- P: 0,050 или меньше,
- S: 0,030 или меньше,
- Al: от 0,120 до 0,650,
- N: от 0,0030 до 0,0200,
- Cr: более 0 до 0,25 и
- V: более 0 до 0,12,

с остатком из железа и примесей, в котором количество доэвтектоидного цементита в микроструктуре железнодорожного колеса составляет не более 1,50 шт./100 мкм, при этом

количество доэвтектоидного цементита (шт./100 мкм) определено как полная сумма количества областей доэвтектоидного цементита, которые пересекаются с двумя диагональными линиями в квадратном поле зрения размером 200×200 мкм/(5,66×100 мкм).

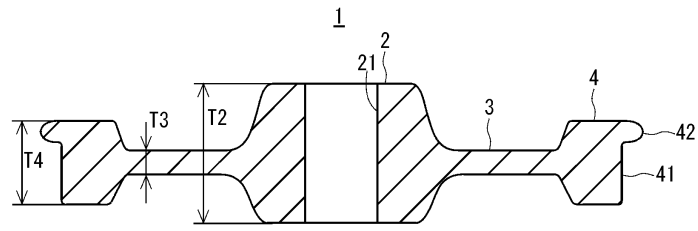
3. Железнодорожное колесо по п.2, в котором химический состав включает в себя один или более элементов, выбираемых из группы, состоящей из:

- Cr: от 0,02 до 0,25 мас. % и
- V: от 0,02 до 0,12 мас. %.

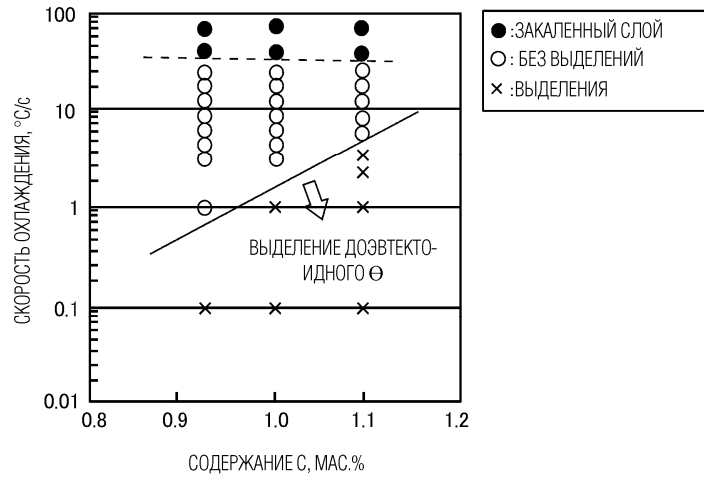
4. Железнодорожное колесо по любому из пп.1-3, в котором средний размер частиц AlN в микроструктуре составляет 150 нм или меньше.

5. Железнодорожное колесо по любому из пп.1-4, в котором химический состав содержит:

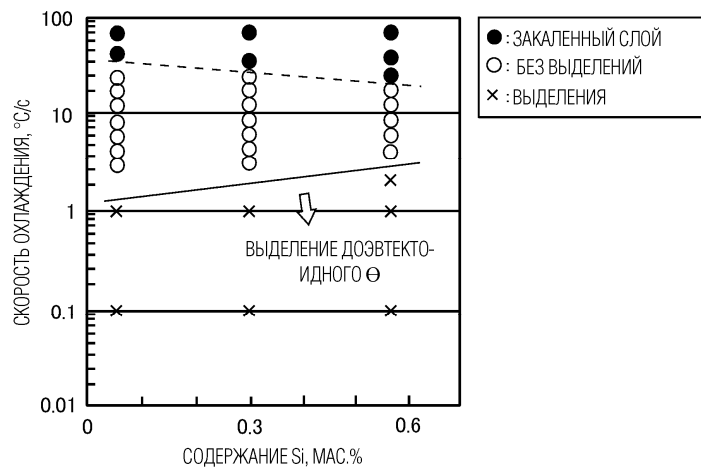
- Al: от 0,120 до 0,350 мас. %.



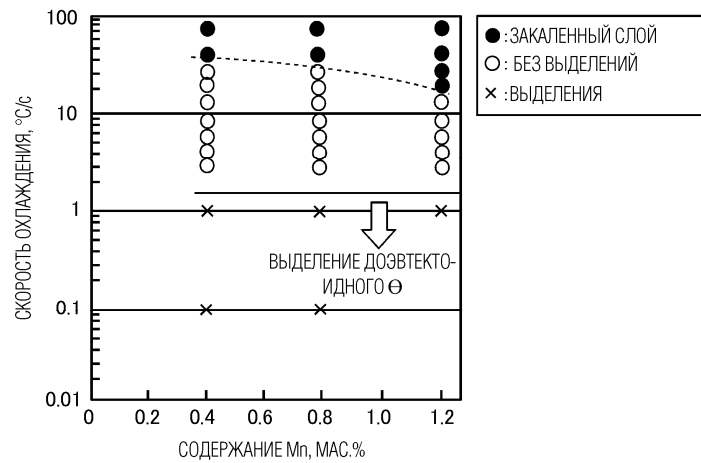
Фиг. 1



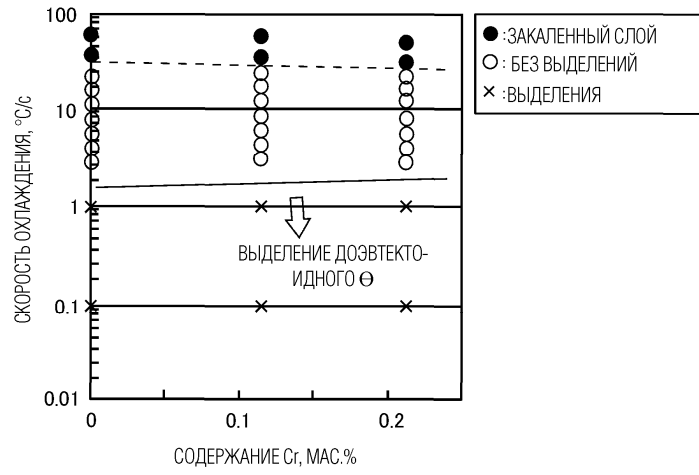
Фиг. 2



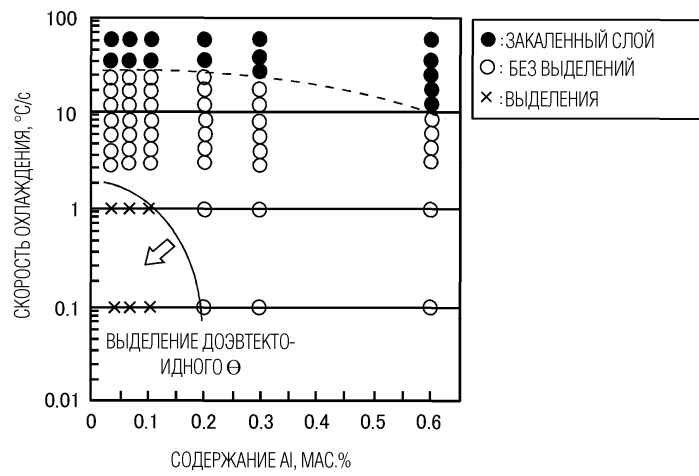
Фиг. 3



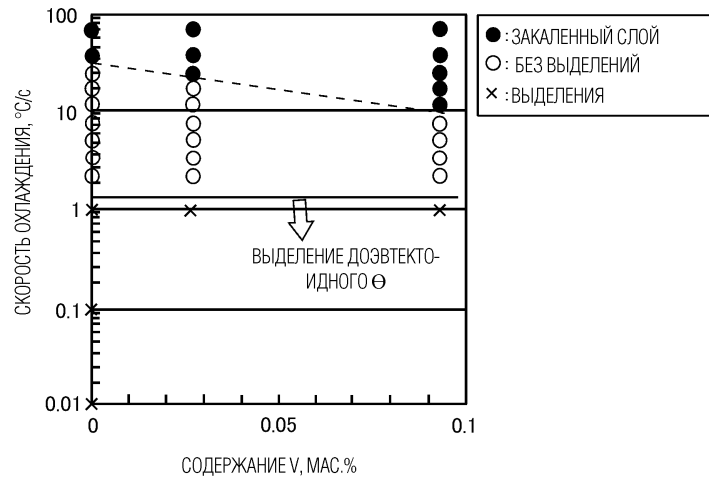
Фиг. 4



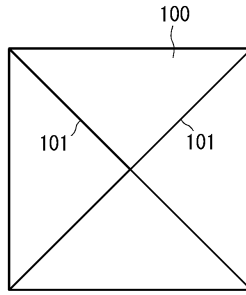
Фиг. 5



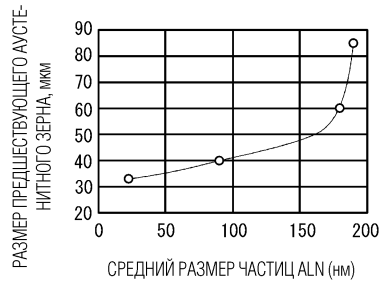
Фиг. 6



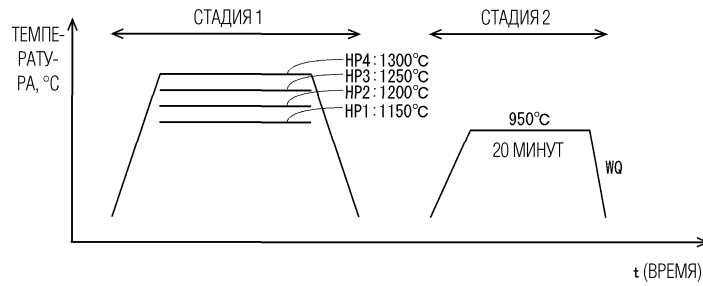
Фиг. 7



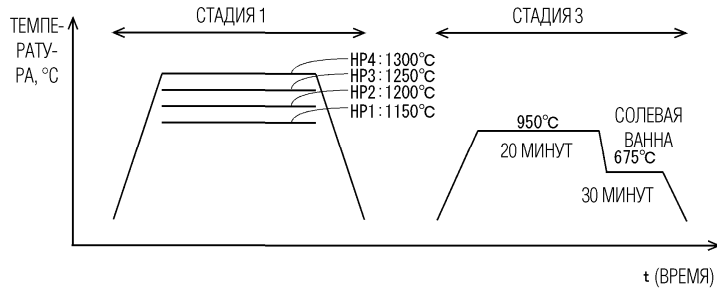
Фиг. 8



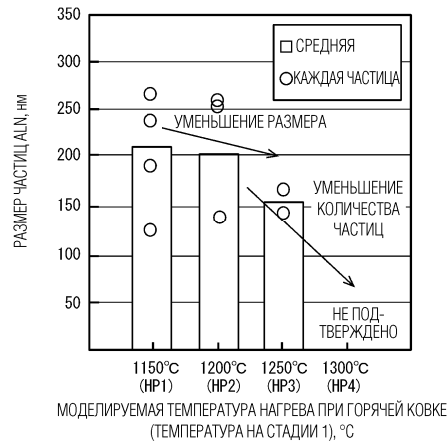
Фиг. 9



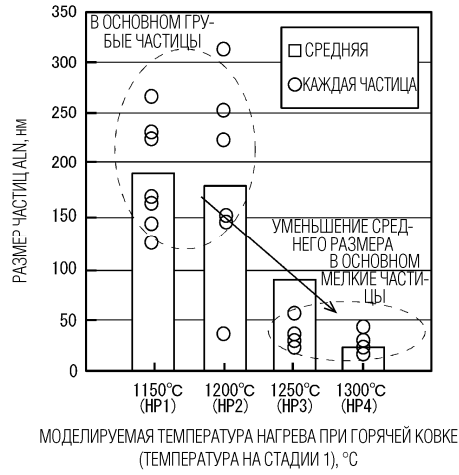
Фиг. 10



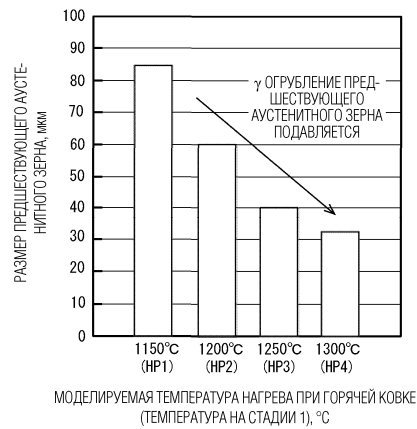
Фиг. 11



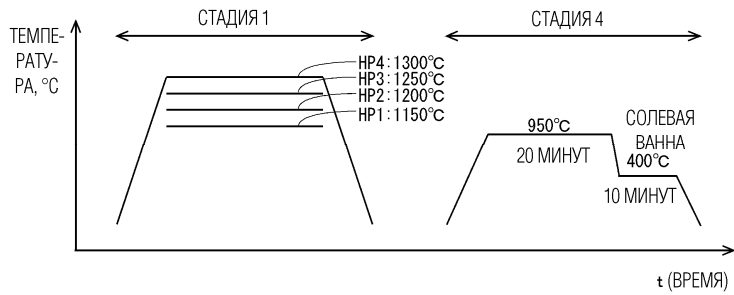
Фиг. 12



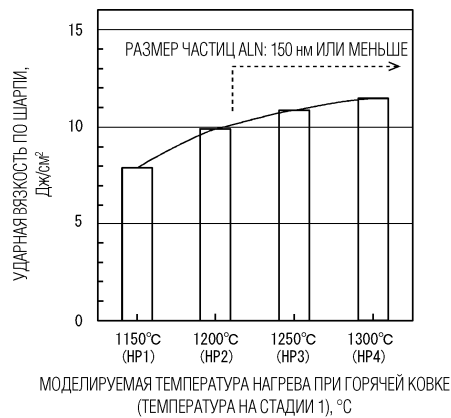
Фиг. 13



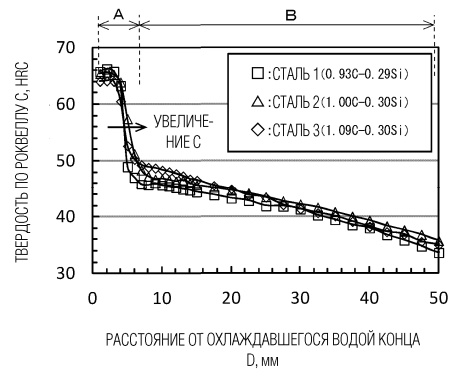
Фиг. 14



Фиг. 15



Фиг. 16



Фиг. 17



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2