



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 694 33 512 T2** 2004.11.11

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 101 828 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **694 33 512.6**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **01 102 992.3**

(96) Europäischer Anmeldetag: **23.02.1994**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **23.05.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **21.01.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **11.11.2004**

(51) Int Cl.⁷: **C21D 9/04**
C21D 1/20

(30) Unionspriorität:

3795993	26.02.1993	JP
12026593	21.05.1993	JP
12972993	31.05.1993	JP
12973093	31.05.1993	JP
18166393	22.07.1993	JP
18166493	22.07.1993	JP

(73) Patentinhaber:

Nippon Steel Corp., Tokio/Tokyo, JP

(74) Vertreter:

Vossius & Partner, 81675 München

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AT, DE, FR, GB, IT, LU

(72) Erfinder:

Kageyama, Hideaki, Tobata-ku, Fukuoka, JP;
Ueda, Masaharu, Tobata-ku, Fukuoka, JP; Sugino,
Kazuo, Tobata-ku, Fukuoka, JP

(54) Bezeichnung: **Hochfeste bainitische Stahlschienen mit verbesserter Beständigkeit gegen Ermüdungsschäden durch Rollkontakt**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft hochfeste bainitische Stahlschienen mit einer Kopffläche mit hervorragender Beständigkeit gegen Ermüdungsschäden durch Rollkontakt, die für die auf Hochgeschwindigkeitsstrecken verwendeten Schienen erforderlich ist, und insbesondere hochfeste Schienen mit einer bainitischen Struktur, die beständig sind gegen Ermüdungsrisse, die in den Innenkanten zwischen dem Kopf und den Seiten der Schienen auftreten könnten, und gegen das Oberflächenschälen oder den dunklen Fleck, der in der oberen Ebene der Schienenkopffläche auftritt, und Verfahren zur Herstellung solcher Schienen.

[0002] In jüngster Zeit sind das Gewicht der transportierten Lasten und die, Reisegeschwindigkeit erhöht worden, um die Effizienz des Schienentransports zu erhöhen. Eisenbahnschienen unterliegen nunmehr also schwereren Betriebsbedingungen und müssen daher eine höhere Qualität haben.

[0003] Konkrete Probleme sind u. a. eine starke Zunahme des Abriebs der in Kurven montierten Schienen und das Auftreten von Ermüdungsrisen, die sich aus dem Inneren der Innenkante entwickeln, die der Hauptkontaktpunkt der Schienen mit den Rädern der darüber rollenden Wagen ist.

[0004] Die folgenden Lösungen sind für die eben beschriebenen Probleme bisher verwendet worden:

- (1) Walzharte Schienen aus legierten Stählen, die unter Zusatz großer Mengen Kupfer, Molybdän und anderer Legierungselemente hergestellt worden sind. (Siehe vorläufige japanische Patentveröffentlichung JP-A-140 316 von 1975, die US-A-4 008 078 entspricht).
- (2) Wärmebehandelte Schienen aus unlegierten Stählen, die hergestellt worden sind, indem der Kopf oder die Gesamtheit der Schiene einer Schnellabkühlung (durch Sprühabkühlung) zwischen 700 und 550°C unterzogen worden ist. (Siehe japanische Patentveröffentlichung JP-B-55-23 885 von 1980.)
- (3) Wärmebehandelte Schienen aus niedriglegierten Stählen mit verbesserter Abrieb- und Ermüdungsrißbeständigkeit und Fähigkeit, härtere Schweißnähte zu bilden, die unter Zusatz eines geringeren Prozentsatzes von Legierungselementen hergestellt werden. (Siehe japanische Patentveröffentlichung JP-B-59-19 173 von 1984.)

[0005] Diese hochfesten Schienen bestehen aus Stählen mit bainitischen, ferritischen und feinperlitischen Strukturen, um ihre Beständigkeit gegen Abrieb und innere Ermüdungsdefekte zu verbessern.

[0006] In tangentialen und leicht gekrümmten Bahnstrecken, wo nicht viel Widerstand gegen Abrieb und innere Ermüdungsdefekte erforderlich ist, bewirken wiederholte Kontakte zwischen Rädern und Schienen Rollkontakt-Ermüdungsschäden auf der Schienenkopffläche. Dies führt zu Rollkontaktermüdnungs- oder quer verlaufenden Defekten, die von der Ausbreitung der in der oberen Ebene der Schienenkopffläche beginnenden Ermüdungsrisse in das Innere herrühren. Die Fehler, die als "Oberflächenschälen" oder "dunkler Fleck" bezeichnet werden und die hauptsächlich in den tangentialen Strecken von Hochgeschwindigkeitsbahnlinien auftreten, sind ein typisches Beispiel. Obwohl das Auftreten solcher Fehler bekannt ist, werden herkömmliche walzharte Schienen mit Perlitstrukturen in den tangentialen und leicht gekrümmten Strecken verwendet.

[0007] Nach einer bestimmten Zeitperiode (oder nachdem eine bestimmte Tonnage über sie transportiert worden ist), gehen die Fehler, die durch Rollkontaktermüdung bedingt sind, von der Mitte der Schienenkopffläche aus, die in den tangentialen oder leicht gekrümmten Bahnstrecken verwendet wird, die hauptsächlich zum Transport von Passagieren dienen. Untersuchungen der Erfinder haben gezeigt, daß die eben beschriebenen Fehler auf die Schadenshäufung in der Mitte der Schienenkopffläche zurückzuführen sind, die durch den wiederholten Kontakt zwischen Rädern und Schienen bewirkt wird.

[0008] Diese Fehler können beseitigt werden, indem die Schienenkopffläche in gegebenen Intervallen geschliffen wird. Die Kosten des Schleifwagens und -betriebs sind jedoch hoch, und die Zeit zum Schleifen ist durch den Fahrplan der Züge begrenzt.

[0009] Eine andere Lösung erhöht die Abriebrate der Schienenkopffläche, so daß der akkumulierte Ermüdungsschaden abgetragen wird, bevor die Defekte auftreten. Die Abriebrate der Schienen kann durch Verringerung ihrer Härte erhöht werden, da ihre Abriebbeständigkeit von der Stahlhärte abhängt. Eine einfache Verringerung der Stahlhärte bewirkt jedoch eine bleibende Verformung auf der Oberfläche des Schienenkopfes, die wiederum Kopfrisse und andere Schäden bewirkt, die als Abblättern bezeichnet werden. Deshalb ist es bisher schwierig gewesen, das Auftreten des oben beschriebenen Fehlers bei herkömmlichen Schienen aus Stahl mit Perlitstrukturen effektiv zu verhindern.

[0010] Herkömmliche Schienen bestehen bisher in erster Linie aus Stahl mit Perlitstrukturen. Die Perlitstruktur ist eine Kombination aus Weichferrit und Lamellen aus Hartzementit. Auf der Schienenkopffläche, die mit den Rädern in Kontakt kommt, wird Weichferrit ausgequetscht, um nur die Lamellen des Hartzementits zurückzulassen. Dieser Zementit und die Wirkung der Kaltverfestigung ermöglichen die für Schienen erforderliche Abriebbeständigkeit. Gleichzeitig tritt jedoch ein Schichtstrukturfluß (Metallfluß) von der oberen Endfläche der Schiene bis in ihr Inneres auf, und es entwickeln sich Risse entlang diesem Fluß.

[0011] Die Bainitstruktur, die stärker verschleißt als die Perlitstruktur, besteht aus Carbidpartikeln, die in der gesamten Matrix der Weichferritstruktur fein verteilt sind. Räder, die über die Schienen mit Bainitstrukturen rollen, bewirken daher, daß das Carbid mit der Ferritmatrix leicht abgetragen wird. Durch den derartig beschleunigten Abrieb wird die ermüdungsbeschädigte Schicht von der Schienenkopffläche des Schienenkopfes entfernt. Die walzharte Schiene aus niedriglegiertem Stahl mit einer Bainitstruktur, die in der vorläufigen japanischen Patentveröffentlichung JP-A-140 316 von 1975 (oder US-A-4 008 078) offenbart ist, hat wegen der massiven Ferritmatrix und grob verteilter Carbidpartikel eine geringere Festigkeit. Diese Verringerung der Festigkeit bewirkt einen kontinuierlichen Strukturfluß (Metallfluß) in einer Richtung entgegen der Richtung, in der der Zug fährt, auf der Lauffläche direkt unter den Rädern, wobei Risse entlang dem Metallfluß auftreten.

[0012] Dieses Problem kann gelöst werden, indem Schienen aus Stählen mit Bainitstrukturen hergestellt werden, die unter Zusatz höherer Prozentsätze von Chrom oder anderer Legierungselemente gefertigt werden, um die erforderliche hohe Festigkeit im walzharten Zustand zu erreichen. Erhöhte Legierungszusätze sind jedoch nicht nur teuer, sondern bilden auch eine harte und spröde Martensitstruktur in den Schweißnähten zwischen den Schienen.

[0013] GB-A-1 450 355 offenbart ein Verfahren zur Herstellung einer nichtvergüteten hochfesten Stahlschiene mit den Schritten: Warmwalzen eines Stahls mit folgenden Anteilen in Gewichtsprozent: 0,28 bis 3,50 Kohlenstoff, 0,20 bis 1,50 Silicium, 0,50 bis 3,50 Mangan und 1,25 bis 4,00 Chrom mit der Maßgabe, daß der Gesamtanteil an Mangan und Chrom 2,75 bis 4,50 ist, um eine Schiene auszubilden, Abkühlen der Schiene aus dem warmgewalzten Zustand in Luft mit der Bildung einer Bainitstruktur und anschließendes Glühen der Stahlschiene in einem Temperaturbereich von 450 bis 600°C über eine Periode von bis zu 1 h.

[0014] DE-A-25 01 175 offenbart ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Herstellung eines Profilstahlmaterials, wobei ein Stahl, der aus 0,28 bis 0,40% Kohlenstoff, 0,15 bis 0,45% Silicium, 0,65 bis 1,0% Mangan, höchstens 0,30% Chrom und Nickel sowie Phosphor mit nicht mehr als 0,08% und Schwefel mit nicht mehr als 0,05% besteht, nach dem Erwärmen in einem Durchlaufofen bei einer Temperatur von oberhalb des Ac_3 -Punkts des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms durch ringsherum angeordnete und wassersprühende Düsen abgeschreckt wird, wodurch die Temperatur sich mit einer hohen Geschwindigkeit bis zu einem gemäßigten Temperaturbereich verringert und wobei danach die Materialien der Luft ausgesetzt werden, um einen gemäßigten Wärmeübergang zu erhalten.

[0015] DE-A-25 43 750 offenbart ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Verbesserung der Qualität von Profilstahl, wobei am Austritt des Walzgerüsts nur die Oberfläche einer Ebene des Profils einem Kühlmittel ausgesetzt wird und die Kühlbedingungen so gesteuert werden, daß am Austritt der Kühlzone die abgeschreckten Teile der Profile eine Temperatur haben, die ausreichend hoch ist zur Verbesserung der abgeschreckten Flächenschicht und zur Umwandlung des Austenits in Ferrit und Carbid in den nichtabgeschreckten Teilen der Profile.

[0016] Eine Aufgabe der Erfindung ist deshalb die Bereitstellung hochfester Schienen aus niedriglegierten Stählen mit festen Bainitstrukturen mit hervorragender Beständigkeit gegen Ermüdungsschäden durch Rollkontakt. Diese Aufgabe wird durch Bereitstellung einer wie in Anspruch 1 definierten Bainitstahlschiene erzielt.

[0017] Außerdem ist es eine weitere Aufgabe der Erfindung, hochfeste Schienen mit hervorragender Beständigkeit gegen Ermüdungsschäden durch Rollkontakt bereitzustellen, die Ermüdungsfehler an den Innenkanten zwischen dem Kopf und den Seiten der Schienen und den Fehler, der als Oberflächenschälchen oder dunkler Fleck bezeichnet wird, nicht aufweisen.

[0018] Insbesondere ist die Hauptaufgabe der Erfindung die Bereitstellung hochfester Schienen aus Stahl mit Bainitstrukturen mit hervorragender Beständigkeit gegen Ermüdungsschäden durch Rollkontakt, die eine Härte von Hv 300 bis 400 in der Mitte der Schienenkopffläche und mindestens Hv 350 in der Innenkante haben, wobei die Härte der Innenkante um mindestens Hv 30 größer ist als die in der Mitte der Schienenkopffläche.

- [0019]** Die oben beschriebenen und weitere Aufgaben und Merkmale der Erfindung sind ausführlich in der nachstehenden Beschreibung beschrieben, die mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen zu lesen ist.
- [0020]** Fig. 1 zeigt einen Schnitt eines Schienenkopfes mit Erläuterung.
- [0021]** Fig. 2 ist eine schematische Darstellung einer Nishihara-Abriebprüfmaschine.
- [0022]** Fig. 3 ist eine schematische Darstellung einer Rollkontaktermüdungsprüfmaschine.
- [0023]** Fig. 4 ist eine schematische Darstellung einer Prüfmaschine zur Bestimmung des Oberflächenschadens im Kopf von gekrümmten Schienen.
- [0024]** Die oben beschriebenen Aufgaben der Erfindung können mit den im Anspruch definierten Merkmalen gelöst werden.
- [0025]** Die Stähle zur Herstellung der erfindungsgemäßen hochfesten bainitischen Stahlschienen mit hervorragender Beständigkeit gegen Ermüdungsschäden durch Rollkontakt enthalten in Gewichtsprozent 0,15 bis 0,45% Kohlenstoff, 0,15 bis 2,00% Silicium, 0,30 bis 2,00% Mangan, 0,50 bis 3,00% Chrom und wahlfrei mindestens ein Element, das gewählt ist aus: einer ersten Gruppe, die aus 0,10 bis 0,60% Molybdän, 0,05 bis 0,50% Kupfer und 0,05 bis 4,00% Nickel besteht, einer zweiten Gruppe, die aus 0,01 bis 0,05% Titan, 0,03 bis 0,30% Vanadium und 0,01 bis 0,05% Niobium besteht, und einer dritten Gruppe, die aus 0,0005 bis 0,0050% Bor besteht, wobei der Rest aus Eisen und unvermeidlichen Verunreinigungen besteht.
- [0026]** Hochfeste bainitische Stahlschienen mit hervorragender Beständigkeit gegen Ermüdungsschäden durch Rollkontakt, die aus Stählen mit den oben beschriebenen Zusammensetzungen hergestellt sind und die eine Bainitstruktur haben, können erhalten werden, indem eine beschleunigte Abkühlung bzw. Schnellabkühlung vom Austenitbereich bis zu einer Abkühlunterbrechungstemperatur von 500°C bis 300°C mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 10°C/s angewendet und dann weiter nahe Raumtemperatur abgekühlt wird, wobei die Härte in der Mitte der Schienenkopffläche von Hv 300 bis Hv 400 reicht, die der Innenkante nicht kleiner als Hv 350 ist und die Härte der Innenkante um mindestens Hv 30 größer ist als die in der Mitte der Schienenkopffläche. Hv bedeutet in dieser Beschreibung Vickers-Härte.
- [0027]** Die Erfindung wird nachstehend ausführlich beschrieben.
- [0028]** Der Grund für die Begrenzung der chemischen Zusammensetzung der erfindungsgemäßen Schienen ist folgender:
- [0029]** Kohlenstoff ist wichtig zur Erreichung einer gegebenen Härte. Während ein Kohlenstoffgehalt unter 0,15% unzureichend ist zur Erreichung der für Schienen erforderlichen Abriebfestigkeit, bildet ein Gehalt von über 0,45% größere Mengen von Perlitstrukturen, die für die Oberflächenqualität von Schienen nachteilig sind, und reduziert die Bainitumwandlungsgeschwindigkeit so stark, daß die Vollendung der vollständigen Bainitumwandlung im Wärmerückgewinnungsprozeß nach der beschleunigten Abkühlung bzw. Schnellabkühlung behindert und die Bildung von Martensitstrukturen bewirkt wird, die für die Zähigkeit der Schienen nachteilig sind. Deshalb ist der Kohlenstoffgehalt auf zwischen 0,15 und 0,45% begrenzt.
- [0030]** Silicium erhöht die Festigkeit von Stählen durch Bildung von Mischkristallen in der Ferritmatrix der Bainitstrukturen. Obwohl keine solche Festigkeitserhöhung bei Siliciumgehalten von nicht mehr als 0,15% möglich ist, nimmt das Auftreten von Oberflächendefekten während des Walzens zu, Martensit wird in Bainitstrukturen ausgebildet, und die Zähigkeit der Schienen verschlechtert sich, wenn der Siliciumgehalt 2,00% überschreitet. Deshalb liegt der Siliciumgehalt zwischen 0,15 und 2,00%.
- [0031]** Wie Kohlenstoff erhöht Mangan die Härtebarkeit von Stählen, bildet feinere Bainitstrukturen und verbessert gleichzeitig die Festigkeit und die Zähigkeit. Während unter 0,30% ein geringer Verbesserungseffekt erreichbar ist, steigt das Auftreten der Bildung von Perlitstrukturen, die das Auftreten von Oberflächenfehlern fördern, bei über 2,00%. Deshalb ist der Mangangehalt auf zwischen 0,30 und 2,00% begrenzt.
- [0032]** Chrom ist ein wichtiges Element, das eine gegebene Festigkeit ermöglicht, indem es das Carbide in Bainitstrukturen fein verteilt. Chromgehalte unter 0,50% vergrößern das Carbideverteilungsmuster in Bainitstrukturen, wodurch eine bleibende Verformung des Metalls bewirkt wird und Oberflächendefekte auftreten. Chromgehalte nicht kleiner als 3,00% bewirken die Vergrößerung der Carbide, vermindern die Geschwindigkeit der

Bainitumwandlung so stark, daß die Vollendung der Bainitbildung im Wärmerückgewinnungsprozeß nach der Schnellabkühlung behindert und die Bildung von Martensitstrukturen bewirkt wird, die für die Zähigkeit von Schienen nachteilig sind. Deshalb ist der Chromgehalt auf zwischen 0,50 und 3,00% begrenzt.

[0033] Ferner können ein, zwei oder mehr der unten beschriebenen Elemente den Stählen mit den oben beschriebenen Zusammensetzungen nach Bedarf zugesetzt werden.

[0034] Eine erste Gruppe, die aus 0,10 bis 0,60% Molybdän, 0,05 bis 0,50% Kupfer und 0,05 bis 4,00% Nickel besteht, wird prinzipiell zur Festigung der Bainitstrukturen in Stählen zugesetzt. Eine zweite Gruppe, die aus 0,01 bis 0,05% Titan, 0,03 bis 0,30% Vanadium und 0,01 bis 0,05% Niob besteht, wird hauptsächlich zur Verbesserung der Zähigkeit von Stählen zugesetzt. Ein Zusatz von 0,0005 bis 0,0050% Bor ermöglicht eine stabilere Bildung von Bainitstrukturen. Die Gründe, warum der Zusatz der oben aufgeführten Elemente begrenzt ist, sind nachstehend aufgeführt.

[0035] Wie Chrom ist Molybdän unentbehrlich für die Festigung und Stabilisierung von Bainitstrukturen sowie zur Verhinderung der Anlaßsprödigkeit, die beim Schweißen entsteht. Während keine ausreichende Wirkung unter 0,10% erreichbar ist, vermindert ein Molybdängehalt über 0,60% die Geschwindigkeit der Bainitumwandlung so stark, daß die Vollendung der vollständigen Bainitbildung im Wärmerückgewinnungsprozeß nach der Schnellabkühlung verhindert und die Bildung von Martensitstrukturen bewirkt wird, die für die Zähigkeit von Schienen nachteilig sind. Deshalb ist der Molybdängehalt auf zwischen 0,10 bis 0,60% begrenzt.

[0036] Kupfer erhöht die Festigkeit von Stählen, ohne ihre Zähigkeit zu beeinträchtigen. Während die größte Wirkung zwischen 0,05 und 0,50% erreichbar ist, bewirkt Kupfer über 0,50% Warmbrüchigkeit. Deshalb beträgt der Kupfergehalt 0,05 bis 0,50%.

[0037] Nickel stabilisiert Austenitkörner, senkt die Bainitumwandlungstemperatur, verfeinert Bainitstrukturen und erhöht die Festigkeit und die Zähigkeit von Stählen. Während diese Wirkungen unter 0,05% begrenzt sind, erzeugt ein Zusatz von über 4,00% keine weitere Zunahme der verbessernden Wirkung. Deshalb ist der Nickelgehalt auf zwischen 0,05 und 4,00% begrenzt. Ein Zusatz von Titan ist für die Bildung von feinen Austenitkörnern während der Walz- und Erwärmungsprozesse der Schienen förderlich, da die ausgeschiedenen Titan-kohlenstoffnitride sich auch bei hohen Temperaturen nicht lösen. Diese Wirkung ist jedoch unter 0,01% begrenzt, während Titanzusatz über 0,05% wegen der Vergrößerung des Titanitrids nachteilig ist, das die Ursache für die Ermüdungsrisse in den Schienen ist. Deshalb ist der Titangehalt auf zwischen 0,01 und 0,05% begrenzt.

[0038] Obwohl Vanadium Bainitstrukturen durch die Ausscheidung von Vanadiumkohlenstoffnitriden festigt, ist die festigende Wirkung unzureichend, wenn sein Zusatz nicht mehr als 0,03% beträgt. Dagegen bewirkt ein Vanadiumzusatz von über 0,30% Sprödigkeit infolge der Vergrößerung der Vanadiumkohlenstoffnitride. Deshalb beträgt der Vanadiumgehalt 0,03 bis 0,30%.

[0039] Niob verfeinert Austenitkörner und erhöht die Zähigkeit und Verformbarkeit von Stählen für Schienen. Da eine ausreichende verbessernde Wirkung unter 0,01% nicht erreichbar ist und eine Zugabe von über 0,05% durch Bildung intermetallischer Verbindungen Versprödung bewirkt, ist der Niobgehalt auf zwischen 0,01 und 0,05% begrenzt.

[0040] Bor hat die Wirkung, die Erzeugung von Ferrit an den Korngrenzen zu unterdrücken, wodurch die stabile Erzeugung von Bainitstrukturen möglich ist. Eine ausreichende Wirkung ist jedoch unter 0,0005% nicht erreichbar, während eine Zugabe von mehr als 0,0050% die Qualität der Schienen infolge der Bildung von grobkörnigen Borverbindungen verschlechtert. Deshalb ist der Borgehalt auf zwischen 0,0005 und 0,0050% begrenzt.

[0041] Stähle mit den oben beschriebenen Zusammensetzungen werden in Konvertern, elektrischen oder anderen allgemein verwendeten Schmelzöfen geschmolzen. Die hergestellten Stähle werden dann durch eine Kombination aus Blockguß- und Vorwalzverfahren oder durch Strangguß zu vorgewalzten Blöcken gewalzt. Der vorgewalzte Block wird dann zu Schienen mit den gewünschten Formen warmgewalzt.

[0042] Der Kopf der derartig hergestellten Schienen wird einer beschleunigten Abkühlung bzw. Schnellabkühlung aus dem Austenitbereich bis zu einer Abkühlunterbrechungstemperatur von 500 bis 300°C mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 10°C/s unterzogen. Diese Schnellabkühlung erfolgt bei frischgewalzten Schienen, die noch so viel Wärme enthalten, daß sie im Austenitbereich sind, oder bei solchen, die bis zum Austenitbereich

wiedererwärmt worden sind.

[0043] Nach der Schnellabkühlung wird der Schienenkopf weiter bis in die Nähe von Raumtemperaturen abgekühlt, indem entweder natürliche Abkühlung mit Wärmerückgewinnung oder Zwangskühlung mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 40°C/min je nach Objekt angewendet werden kann. Im ersteren Fall wird die Temperaturerhöhung bis zu 150°C, die durch die Wärmerückgewinnung bedingt ist, die im Innern der Schiene auftritt, genutzt. Solche Schienen werden zunächst einer Schnellabkühlung unterzogen, um eine Bainitumwandlung in einem niedrigeren Temperaturbereich beginnen zu lassen. Dann wird ein stabiles Wachstum feiner Bainitstrukturen durch Ausnutzung einer Temperaturerhöhung möglich, die durch die Wärmerückgewinnung bedingt ist. Im letzteren Fall erfolgt die Bainitumwandlung in einem niedrigeren Temperaturbereich, und die folgende Abkühlung bewirkt die stabile Bildung feiner und fester Bainitstrukturen.

[0044] Die Gründe für die Festlegung der Geschwindigkeit der Schnellabkühlung und der Bereich der Abkühlunterbrechungstemperatur, wie oben ausgeführt, werden nachstehend beschrieben.

[0045] Als erstes ist der Grund zur Begrenzung der Schnellabkühlgeschwindigkeit bis zur Abkühlunterbrechungstemperatur auf zwischen 1 und 10°C/s folgender: Wenn Stähle mit den oben beschriebenen Zusammensetzungen mit einer langsameren Geschwindigkeit als 1°C/s abgekühlt werden, beginnt die Bainitumwandlung in einer höheren Temperaturzone mitten im Abkühlprozeß und zieht die Bildung grobkörniger Bainitstrukturen nach sich, die die Festigkeit der Schienen reduzieren und Oberflächendefekte bewirken. Dies ist der Grund, warum die untere Grenze auf 1°C/s festgelegt ist. Wenn die Abkühlung mit einer Geschwindigkeit erfolgt, die schneller als 10°C/s ist, werden im Innern der Schienen große Wärmemengen im nachfolgenden Wärmerückgewinnungsprozeß erzeugt, auf den die Bildung grobkörniger Bainitstrukturen folgt, die die Festigkeit der Schienen reduzieren und Oberflächenschäden bewirken, wie oben beschrieben. Daher ist die obere Grenze auf 10°C/s festgelegt.

[0046] Der Grund zur Begrenzung des Bereichs der Abkühlunterbrechungstemperatur zwischen dem Austenitbereich bis zwischen 500 und 300°C ist folgender: Wenn die Abkühlung bei einer Temperatur über 500°C unterbrochen wird, besteht die Tendenz, daß sich in Abhängigkeit von den Bedingungen der nachfolgenden Abkühlung grobkörnige Bainitstrukturen, die die Festigkeit der Schienen verringern und Oberflächendefekte bewirken, im Wärmerückgewinnungsbereich bilden. Dies ist ein Grund, warum die obere Grenze auf 500°C festgelegt ist. Um eine feinere Bainitstruktur zu erreichen, sollte die obere Grenze vorzugsweise nicht höher als 450°C sein. Wenn dagegen eine Abkühlung auf niedrigere Temperaturen als 300°C erfolgt, werden in den Bainitstrukturen Martensitstrukturen gebildet. In Abhängigkeit von den Bedingungen der nachfolgenden Abkühlung findet keine ausreichende Wärmerückgewinnung im Innern der Schienen statt, wodurch große Mengen von harten Martensitstrukturen zurückbleiben. Um die unerwünschte deutliche Verringerung der Schienenzähigkeit zu vermeiden, ist die untere Grenze auf nicht weniger als 300°C festgelegt. Um eine stabile Bainitstruktur zu erreichen, sollte die Schnellabkühlunterbrechungstemperatur vorzugsweise nicht niedriger als 350°C sein, da die Ms-Temperatur der Stähle mit den erfindungsgemäßen Zusammensetzungen nicht höher als annähernd 350°C ist.

[0047] Eines der Abkühlverfahren, das nach der Unterbrechung der Schnellabkühlung verwendet wird, ist die natürliche (oder spontane) Abkühlung mit Wärmerückgewinnung.

[0048] Die Wärmerückgewinnung ist auf die natürliche Rückgewinnung aus dem Innern der Schiene begrenzt. Es erfolgt keine Zwangserwärmung oder -abkühlung von außen. Ein Experiment wurde durchgeführt, um den Kopf der Schienen mit den erfindungsgemäßen Zusammensetzungen einer Schnellabkühlung aus dem Austenitbereich mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 10°C/s zu unterziehen, die bei einer Temperatur zwischen 400 und 300°C unterbrochen wurde. Die Temperaturerhöhung aufgrund der natürlichen Wärmerückgewinnung von durchschnittlich 50 bis 100°C (einige Proben wiesen immerhin eine Temperaturerhöhung von nahezu 150°C auf) trat nachweislich im Schienenkopf auf. In den Stählen mit den oben beschriebenen Zusammensetzungen wandeln sich feinkörnige Bainitstrukturen im Temperaturbereich von 500 bis 300°C (vorzugsweise nicht unter 350°C) um. Wenn die oben genannte Schnellabkühlgeschwindigkeit und Unterbrechungstemperatur gewählt werden, liegt die Temperatur nach der Wärmerückgewinnung im Bereich von 500 bis 350°C, der mit dem Temperaturbereich übereinstimmt, in dem sich hochfeste Bainitstrukturen umwandeln.

[0049] Eine Temperaturerhöhung (Wärmerückgewinnung) von annähernd 100°C in dem Temperaturbereich, in dem die Schnellabkühlung unterbrochen wird, stellt die gewünschte Festigkeit der bainitischen Stähle sicher. Die gleiche Wärmerückgewinnung könnte jedoch einen Teil der Struktur vergrößern, was zu einer Beeinträchtigung der Zähigkeit führt. In einem weiteren Experiment wurde deshalb der Kopf der Schienen einer Schnel-

labkühlung aus dem Austenitbereich mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 10°C/s unterzogen. Nach der Unterbrechung der Schnellabkühlung zwischen 400 und 300°C wurde die Wärmerückgewinnung aus dem Innern der Schiene unterdrückt. Es wurde festgestellt, daß dann die Vergrößerung der Bainitstrukturen verhindert werden konnte, wenn die Temperaturerhöhung im Schienenkopf infolge der Wärmerückgewinnung unter 50°C gehalten wurde. Dann waren Bainitstrukturen mit hoher Festigkeit und Zähigkeit erreichbar.

[0050] Wie die Ergebnisse dieser Experimente zeigen, ermöglichen die vorstehenden Verfahren ein stabiles Wachstum der feinkörnigen Bainitstrukturen, wenn mit der Bainitumwandlung in einer niedrigeren Temperaturzone begonnen wird, wenn Stähle einer Schnellabkühlung aus dem Austenitbereich bei einer Geschwindigkeit von 1 bis 10°C unterzogen werden und die Schnellabkühlung bei Temperaturen zwischen 500 und 300°C unterbrochen wird und eine Temperaturerhöhung auf maximal 150°C benutzt wird, die durch natürliche Abkühlung mit Wärmerückgewinnung oder Unterdrückung einer solchen Wärmerückgewinnung innerhalb bestimmter Grenzen verursacht wird.

[0051] Die Aufgaben der Erfindung werden gelöst, wenn eine gesteuerte Abkühlung zwischen 1 und 40°C/min nach der Unterbrechung der Schnellabkühlung angewendet wird. Um die gewünschte Festigkeit zu verleihen, wird bevorzugt, die Abkühlung nach der Schnellabkühlung zu steuern, indem beispielsweise bei Schienen mit größeren Querschnitten schneller und bei Schienen mit kleineren Querschnitten langsamer verfahren wird. Durch eine solche gesteuerte Abkühlung wird die Entstehung fester feinkörniger Bainitstrukturen sichergestellt. Der Grund, warum die Abkühlungsgeschwindigkeit begrenzt ist, wie oben ausgeführt, ist folgender: Eine Abkühlung mit langsameren Geschwindigkeiten als 1°C/min führt zur Ausscheidung von groben Carbiden in Bainitstrukturen, die die Festigkeit und Zähigkeit des Stahlkopfs stark reduzieren. Eine Abkühlung mit höheren Geschwindigkeiten als 40°C/min verhindert dagegen die Vollendung einer vollständigen Bainitumwandlung in Abhängigkeit von der Abkühlunterbrechungstemperatur. Die Martensitumwandlung, tritt während dieser Abkühlung auf und es entsteht hartes Martensit, das für die Zähigkeit der Schienen mit Bainitstrukturen nachteilig ist.

[0052] In Abhängigkeit von der gewählten Stahlzusammensetzung und der Schnellabkühlgeschwindigkeit kann die Bainitumwandlung im Laufe der Schnellabkühlung im Temperaturbereich von 500 bis 300°C beginnen, wo die Schnellabkühlung unterbrochen wird, und im nachfolgenden Wärmerückgewinnungsprozeß enden, oder sie kann im Wärmerückgewinnungsprozeß unmittelbar nach der Schnellabkühlung beginnen und enden. Beide im Abkühlunterbrechungstemperaturbereich gebildeten Bainitstrukturen sind feinkörnig und haben wenig nachteilige Wirkungen auf die Festigkeit, Zähigkeit und Oberflächendefektbeständigkeit der Schienen. Deshalb können die Bainitstrukturen in den Stählen für Schienen sowohl im Verlaufe der Schnellabkühlung im Temperaturbereich von 500 bis 300°C, wo die Schnellabkühlung unterbrochen wird, als auch im Wärmerückgewinnungsprozeß nach der Schnellabkühlung gebildet werden.

[0053] Die Metallstruktur, die nach der Schnellabkühlung erreicht wird, sollte vorzugsweise bainitisch sein. In Abhängigkeit von der gewählten Schnellabkühlgeschwindigkeit und Abkühlunterbrechungstemperatur könnten sich jedoch extrem feinkörnige Martensitstrukturen in die Bainitstrukturen mischen, was schließlich als Martensit verbleiben könnte, der durch die Wärme ausgehärtet wird, die aus dem Innern der Schiene rückgewonnen wird. Da das Vorhandensein von feinkörnigem ausgehärteten Martensit in Bainitstrukturen wenig nachteilige Wirkungen auf die Festigkeit, Zähigkeit und Oberflächendefektbeständigkeit der Schienen hat, können die bainitischen Stähle für erfindungsgemäße Schienen kleine Mengen von ausgehärteten Martensitstrukturen enthalten.

[0054] Die Schnellabkühlung erfolgt durch Luft, Sprühnebel oder andere luftzerstäubte Flüssigkeiten aus Düsen, die auf beiden Seiten des Schienenkopfes angeordnet sind. Die Schienenköpfe, die der Schnellabkühlung und der oben beschriebenen nachfolgenden Abkühlung unterzogen werden, haben eine Härte von Hv 300 bis 400 in der Mitte der Schienenkopffläche und nicht weniger als Hv 350 in der Kante, wobei die Härte der Innenkante um mindestens 30 Hv größer als die der Mitte der Schienenkopffläche ist und die Festigkeit nicht kleiner als 1000 Mpa ist. Die Schienenköpfe mit einer so großen Härte und Festigkeit, wie oben beschrieben, sind ausreichend beständig gegen Laufflächendefekte, die auf den tangentialen Schienen von Bahnstrecken auftreten könnten, und Kantenflächenschäden, die in leicht gekrümmten Abschnitten auftreten oder auf die Schlingerbewegung von Hochgeschwindigkeitszügen zurückzuführen sind.

[0055] Die bainitischen Stahlschienen, die nach den oben beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren hergestellt sind, haben die Beständigkeit gegen Oberflächendefekte, die für hochfeste Schienen für Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken erforderlich ist.

[0056] Als nächstes werden einige die Erfindung erläuternde Beispiele aufgeführt. Beispiel 3 zeigt die Merkmale der vorliegenden Erfindung. **Fig. 1** zeigt einen Schnitt des Kopfes der Schienen der Klasse JIS 60 kg/m mit Erläuterung. Die Bezugszeichen **1** und **2** bezeichnen die Mitte der Schienenkopffläche bzw. die Kante, die einen Abschnitt bilden, der als Schienenkopf bezeichnet wird.

Beispiel 1

[0057] Tabelle 1 zeigt die chemischen Zusammensetzungen und Abkühlbedingungen der Schienen gemäß dem Wärmerückgewinnungsprozeß und der zum Vergleich geprüften Schienen. Tabelle 2 zeigt ihre Härte, Abriebmengen, die nach 500000maligen Aufbringen von Lasten unter trockenen Bedingungen mit einer Nishihara-Abriebprüfmaschine bestimmt worden sind, und die Anzahl der Belastungen, die aufgebracht wurden, bevor in der Rollkontaktermüdungsprüfung mit Wasserschmierung Oberflächendefekte an Schienen und scheibenförmigen Probestücken auftraten, die hergestellt wurden, indem die Konfiguration der Räder auf einen Maßstab von 1 : 4 verkleinert wurde. **Fig. 2** ist eine schematische Darstellung einer Nishihara-Abriebprüfmaschine, wobei das Bezugszeichen **3** ein Schienenprobestück, **4** ein Radprobestück, **5** ein Paar Zahnräder und **6** einen Motor bezeichnet. **Fig. 3** ist eine schematische Darstellung einer Rollkontaktermüdungsprüfmaschine, bei der das Bezugszeichen **7** ein Schienenprobestück, **8** ein Radprobestück, **9** einen Motor und **10** einen Lagerkörper bezeichnet.

[0058] Einzelheiten zu den geprüften Schienen und zu den Prüfungsabläufen sind unten aufgeführt.

– Schienen, die die Erfindung erläutern (10 Stück)

A bis J: Schienen mit Bainitstrukturen, die durch natürliche Abkühlung des Schienenkopfes nach Schnellabkühlung hergestellt worden sind.

– Zum Vergleich geprüfte Schienen (3 Stück)

K: Schiene mit Bainitstruktur, die durch natürliche Abkühlung des Schienenkopfes nach Schnellabkühlung hergestellt worden ist.

L: Schiene mit Bainitstruktur, die durch natürliche Abkühlung nach dem Walzen hergestellt worden ist.

M: Schiene mit Perlitstruktur, die durch natürliche Abkühlung nach dem Walzen hergestellt worden ist.

[0059] Die Prüfbedingungen waren folgende:

– Abriebversuch (bei allen geprüften Schienen gleich)

Prüfmaschine: Nishihara-Abriebprüfmaschine Probestückkonfiguration: scheibenförmig (Außendurchmesser = 30 mm, Innendurchmesser = 16 mm, Dicke = 8 mm)

Prüflast: 490 N

Schlupf: 9%

Radprobe: vergüteter Martensitstahl (Hv 350) Atmosphäre: in der Atmosphäre

Häufigkeit der Belastung: 500 000 Umdrehungen

– Rollkontaktermüdungsprüfung

Prüfmaschine: Rollkontaktermüdungsprüfmaschine Probestückkonfiguration: scheibenförmig (Außendurchmesser = 200 mm, Querschnitt des Schienenprobestücks = 1/4 der Schienen der Klasse 60 kg/m)

Prüflast: 1,5 t (Radiallast)

Atmosphäre: trocken + Wasserschmierung (60 cm³/min)

Rotationsgeschwindigkeit: trocken = 100 U/min, wassergeschmiert = 300 U/min

Häufigkeit der Belastung: 0 bis 5000 Umdrehungen unter trockenen Bedingungen und darüber hinaus unter wassergeschmierten Bedingungen, bis ein Schaden auftrat.

[0060] Tabelle 2 zeigt die Härte der verarbeiteten Schienen und der zum Vergleich geprüften Schienen, die Abriebmengen, die nach Aufbringen von Lasten mit 500 000 Umdrehungen unter trockenen Bedingungen unter Verwendung der Nishimara-Abriebprüfmaschine bestimmt worden sind, und die Anzahl der Belastungen, die aufgebracht worden sind, bevor in der Rollkontaktermüdungsprüfung mit Wasserschmierung Oberflächendefekte an Schienen und scheibenähnlichen Probestücken auftraten, die hergestellt wurden, indem die Konfiguration der Räder auf einen Maßstab von 1 : 4 verkleinert wurde.

[0061] Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, nutzten sich die Schienen A bis J mehr ab als die herkömmliche Schiene M mit einer Perlitstruktur und wiesen dabei eine deutlich verbesserte Beständigkeit gegen Rollkontaktermüdung auf. Die Rollkontaktermüdungsbeständigkeit der erfindungsgemäßen Schienen war viel größer als die der walzharten Schiene L mit einer Bainitstruktur und der Schiene K mit einer Bainitstruktur, die mit natürlicher Abkühlung des Schienenkopfes nach Schnellabkühlung hergestellt worden ist.

Tabelle 1

Schiene	Symbol	chemische Zusammensetzung (Gew.-%)							Abkühlbedingungen				Struktur
		C	Si	Mn	P	S	Cr	andere hinzugesetzte Elemente	Abkühl- anfangs- temperatur (°C)	Schnell- abkühl- geschwindig- keit (°C/s)	Abkühlunter- brechungs- temperatur (°C)	Temperatur- erhöhung durch Wärme- rückgewinnung (°C)	
Verfah- rens- schritte (Wärme- rück- gewin- nung)	A	0.28	0.30	1.21	0.013	0.009	1.65	V:0.08	850	3	300	51	Bainit
	B	0.31	0.31	1.32	0.013	0.008	1.32	Mo:0.26	800	4	370	86	Bainit
	C	0.29	0.55	1.10	0.010	0.006	2.21	Nb:0.04	700	5	360	81	Bainit
	D	0.34	0.32	0.70	0.011	0.007	2.51	B:0.0015	800	8	340	94	Bainit
	E	0.32	0.29	0.41	0.012	0.007	2.81	Mo:0.59	850	1	400	54	Bainit
	F	0.25	0.15	0.31	0.011	0.009	2.98	Ni:2.41	800	10	400	100	Bainit
	G	0.45	0.31	0.64	0.011	0.007	2.21	-	750	5	320	62	Bainit
	H	0.35	1.98	0.74	0.012	0.007	2.41	Ti:0.032	800	5	360	82	Bainit
	I	0.38	0.51	1.99	0.014	0.009	0.51	Cu:0.11	800	4	330	62	Bainit
	J	0.15	0.51	1.41	0.012	0.007	0.95	Mo:0.41, Ni:3.89	800	8	380	95	Bainit
	K	0.30	0.29	1.21	0.016	0.008	1.21	-	850	15	420	135	Bainit
Vergleich	L	0.30	0.29	1.22	0.015	0.008	1.19	-	natürliche Abkühlung nach dem Walzen				Bainit
	M	0.69	0.25	0.89	0.013	0.007	-	-	natürliche Abkühlung nach dem Walzen				Perlit

Hinweis: Der Rest in oberflächenfehlerbeständigen und abriebfesten Stählen ist Eisen

Tabelle 2

Schiene	Symbol	Härte (HV)	Abriebmenge (g/500 000 Umdrehungen)	Ausgeübte Belastung vor Ober- flächendefekten (Umdrehungen)
Eigen- schaften	A	422	2.05	215×10^4
	B	374	2.54	190×10^4
	C	396	2.40	201×10^4
	D	410	2.11	209×10^4
	E	417	2.03	211×10^4
	F	371	3.04	184×10^4
	G	411	1.84	210×10^4
	H	432	1.82	220×10^4
	I	405	1.96	206×10^4
	J	381	3.01	194×10^4
Vergleich	K	328	3.06	55×10^4
	L	321	3.10	50×10^4
	M	260	1.24	80×10^4

Beispiel 2

[0062] Tabelle 3 zeigt die chemischen Zusammensetzungen und Abkühlbedingungen der durch weiteres kontrolliertes Abkühlen verarbeiteten Schienen und der zum Vergleich geprüften Schienen. Tabelle 4 zeigt ihre Härte, Abriebmengen, die nach dem Aufbringen von Lasten mit 500 000 Umdrehungen unter trockenen Bedingungen mit einer Nishihara-Abriebprüfmaschine bestimmt worden sind und die Anzahl der Belastungen, die aufgebracht worden sind, bevor bei der Rollkontaktermüdungsprüfung mit Wasserschmierung Oberflächendefekte an Schienen und scheibenähnlichen Probestücken auftraten, die hergestellt wurden, indem die Konfiguration der Räder auf einen Maßstab von 1 : 4 verkleinert wurde.

[0063] Die chemischen Zusammensetzungen und Abkühlbedingungen der Schienen A bis M waren die gleichen wie die in Beispiel 1. Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, nutzten sich die Schienen A bis J mehr ab als die herkömmlichen Schienen M mit einer Perlitstruktur und wiesen dabei eine deutlich verbesserte Beständigkeit gegen Rollkontaktermüdung auf. Die Rollkontaktermüdungsbeständigkeit der erfindungsgemäßen Schienen war viel größer als die der walzharten Schiene K mit einer Bainitstruktur und der Schiene L mit einer Perlitstruktur, die durch natürliche Kühlung des Schienenkopfes nach Schnellabkühlung hergestellt worden ist.

Tabelle 3

Schiene	Symbol	chemische Zusammensetzung (Gew.-%)							Abkühlbedingungen				Struktur
		C	Si	Mn	P	S	Cr	andere hinzugesetzte Elemente	Abkühl- anfangs- temperatur (°C)	Schnell- abkühl- geschwindig- keit (°C/sec)	Abkühlunter- brechungs- temperatur (°C)	Abkühlung nach Schnell- abkühlung (°C/min)	
Verfahrens- schritte	A	0.29	0.31	1.21	0.013	0.009	1.45	V:0.08	700	5	400	20	Bainit
	B	0.32	0.31	1.23	0.013	0.008	1.29	Mo:0.25	750	3	375	10	Bainit
	C	0.29	0.51	1.01	0.010	0.006	1.74	Nb:0.04	700	5	425	30	Bainit
	D	0.35	0.32	0.70	0.011	0.007	2.41	B:0.0015	800	8	375	20	Bainit
	E	0.32	0.29	0.50	0.012	0.007	2.85	Mo:0.59	750	1	500	1	Bainit
	F	0.16	0.15	0.31	0.011	0.009	2.99	Ni:2.00	800	10	425	40	Bainit
	G	0.45	0.31	0.60	0.011	0.007	1.82	-	850	5	450	20	Bainit
	H	0.35	1.98	0.98	0.012	0.007	1.90	Ti:0.032	750	5	400	10	Bainit
	I	0.38	0.51	1.99	0.014	0.009	0.51	Cu:0.11	800	4	400	5	Bainit
	J	0.15	0.51	1.41	0.012	0.007	0.85	Mo:0.30, Ni:3.89	800	8	350	10	Bainit
	K	0.31	0.29	1.21	0.016	0.008	1.19	-	natürliche Abkühlung nach dem Walzen				Bainit
Vergleich	L	0.79	0.51	0.91	0.020	0.009	0.21	-	Wärmebehandlung, nur auf Schienenkopf angewendet				Perlit
	M	0.69	0.25	0.89	0.013	0.007	-	-	natürliche Abkühlung nach dem Walzen				Perlit

Hinweis: Der Rest in oberflächenfehlerbeständigen und abriebfesten Stählen ist Eisen

Tabelle 4

Schiene	Symbol	Härte (Hv)	Abriebmenge (g/500 000 Umdrehungen)	Ausgeübte Belastung vor Ober- flächendefekten (Umdrehungen)
Eigen- schaften	A	401	2. 45	201×10^4
	B	421	2. 21	205×10^4
	C	381	2. 63	183×10^4
	D	390	2. 54	194×10^4
	E	430	2. 11	210×10^4
	F	378	2. 75	184×10^4
	G	390	2. 52	192×10^4
	II	381	2. 62	185×10^4
	I	385	2. 57	190×10^4
	J	381	2. 62	186×10^4
Vergleich	K	321	3. 34	40×10^4
	L	378	0. 19	50×10^4
	M	260	1. 24	80×10^4

Beispiel 3

[0064] Tabelle 5 zeigt die chemischen Zusammensetzungen und Abkühlbedingungen von erfindungsgemäßen Schienen und zum Vergleich geprüften Schienen. **Fig. 4** ist eine schematische Darstellung einer Prüfmaschine zur Bestimmung der Oberflächendefekte in Schienenköpfen (japanisches Patent 1 183 162 bzw. JP-A-5300/074). Die in Tabelle 5 gezeigten erfindungsgemäßen und zum Vergleich geprüften Schienen bestanden alle aus Stahl mit Bainitstrukturen, mit Ausnahme der Nr. 1 und 6. Die Prüfung erfolgte, indem man Räder **12** über den Kopf einer gekrümmten Schiene **11** laufen ließ. Die Tabelle 6 zeigt die Anzahl der Belastungen, die aufgebracht wurden, bevor die Oberflächenschäden in der oben simulierten Prüfung auftraten. Die Prüfung erfolgte unter zwei Bedingungen; die eine, die den Kontakt zwischen den Rädern und Schienen auf der gekrümmten Bahnstrecke simulierte, und die andere, die den Kontakt in der tangentialen Strecke simulierte. In **Fig. 4** bezeichnen die Bezugszeichen **11** und **12** eine gekrümmte Schiene und auf ihr laufende Räder.

[0065] Die Prüfung erfolgte unter Verwendung einer Schiene, die bis zu einem bestimmten Grad wärmebehandelt war und mit einem Krümmungsdurchmesser von 6 m gekrümmt war, wobei der Kopf auf der Innenseite des entstandenen Kreises angeordnet war und die Räder des Zuges auf der Shinkansen-Strecke verwendet wurden. Bei der Prüfung, die die Bedingung auf der gekrümmten Strecke simuliert, wurde ein seitlicher Druck auf die Räder aufgebracht, um den Radkranz gegen den Rand des Schienenkopfs zu pressen, und die resultierende Beschädigung in der Oberfläche der Kante bestimmt. Bei der Prüfung, die die Bedingung der tangentialen Strecke simuliert, wurde die obere Endfläche der Schiene in Kontakt mit der Mitte des Rades gebracht und der resultierende Schaden in der oberen Endfläche des Schienenkopfes bestimmt. Die Lebensdauer der Schiene bis zum Auftreten von Oberflächendefekten ist als kumulative Tonnage angegeben, wie sie bei richtigen Bahnstrecken verwendet wird.

Tabelle 5

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	V	Ti	B	Schnellabkühl- geschwindig- keit für Kante (°C/s)	Schnellabkühl- unter- brechungs- temperatur (°C)	Abkühlgeschwindigkeit nach Unterbrechung der Schnellabkühlung (°C/min)
Erfindung	(1) 0.15	0.80	2.00	2.00								2	450	30
	(2) 0.15	0.80	2.00	0.50	0.30	2.00						3	435	20
	(3) 0.25	1.20	1.50	2.50								1	500	40
	(4) 0.25	1.20	1.00	0.50	0.10	1.00	0.50				0.0030	8	350	3
	(5) 0.35	0.80	1.00	2.00								6	400	4
	(6) 0.35	0.80	1.00	2.00	0.60					0.015		5	380	5
	(7) 0.45	0.15	0.30	3.00								4	450	10
	(8) 0.45	0.15	0.30	0.50		4.00		0.20	0.150			10	500	1
Vergleich	(1) 0.75	0.23	0.85									6	400	4
	(2) 0.10	0.23	2.00									10	500	1
	(3) 0.15	1.35	2.00									8	350	3
	(4) 0.25	0.80	0.80	3.50								1	500	40
	(5) 0.35	0.65	1.00	0.40								3	400	20
	(6) 0.55	0.23	1.00	1.25								2	450	30
	(7) 0.15	0.80	2.00	2.00								0.5	550	40
	(8) 0.45	0.15	0.30	0.50		4.00		0.02	0.150			11	350	0.5

Tabelle 6

Stahl		Schienen- kopf- ober- flächen- härte	Ausgeübte Belastung vor Ober- flächen- defekt auf tangenten- förmiger Strecke	Schienen- kanten- härte	Ausgeübte Belastung vor Ober- flächen- defekt auf gekrümmter Strecke
Erfindung	(1)	IIv 350	35700×10^4	IIv 420	8300×10^4
	(2)	IIv 365	33000×10^4	IIv 410	8250×10^4
	(3)	IIv 365	36700×10^4	IIv 425	8700×10^4
	(4)	IIv 390	32150×10^4	IIv 400	8100×10^4
	(5)	IIv 335	41500×10^4	IIv 425	8300×10^4
	(6)	IIv 310	43600×10^4	IIv 410	8400×10^4
	(7)	IIv 340	38500×10^4	IIv 430	8900×10^4
	(8)	IIv 355	34500×10^4	IIv 415	8500×10^4
Vergleich	(1)	IIv 285	11000×10^4	IIv 380	3150×10^4
	(2)	IIv 265	19800×10^4	IIv 370	3850×10^4
	(3)	IIv 280	18500×10^4	IIv 365	4200×10^4
	(4)	IIv 395	16800×10^4	IIv 390	4750×10^4
	(5)	IIv 340	27500×10^4	IIv 375	3900×10^4
	(6)	IIv 325	30500×10^4	IIv 325	4550×10^4
	(7)	IIv 275	32850×10^4	IIv 290	3100×10^4
	(8)	IIv 405	11200×10^4	IIv 390	2200×10^4

[0066] Wenn die Härte der Schienenkopf kante über Hv 400 gehalten wird, entsteht offenkundig eine deutlich höhere Beständigkeit gegen Oberflächendefekte als bei den zum Vergleich geprüften Schienen, aber wenn die Härte so gesteuert wird, daß sie in der Mitte der Schienenkopffläche zwischen Hv 300 und 400 liegt, wird das Auftreten von Oberflächendefekten dort verhindert.

Beispiel 4

[0067] Tabelle 7 zeigt die chemischen Zusammensetzungen und Abkühlbedingungen der verarbeiteten Schienen und der zum Vergleich geprüften Schienen. Tabelle 8 zeigt ihre Härte, Abriebmengen, die nach dem Aufbringen von Lasten mit 500000 Umdrehungen unter trockenen Bedingungen mit einer Nishihara-Abriebprüfmaschine bestimmt wurden, und die Anzahl der Belastungen, die aufgebracht wurden, bevor in der Rollkontaktermüdungsprüfung mit Wasserschmierung Oberflächendefekte an Schienen und scheibenförmigen Probestücken auftraten, die hergestellt wurden, indem die Konfiguration der Räder auf einen Maßstab von 1 : 4 reduziert wurde. Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse einer Fallgewichtsprüfung der erfindungsgemäßen und der zum Vergleich geprüften Schienen. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse einer Kerbschlagzähigkeitsprüfung (absorbierte Energie), die an Probestücken durchgeführt worden ist, die den Schienenköpfen entnommen wurden.

[0068] Die chemischen Zusammensetzungen und Abkühlbedingungen der Schienen A bis J und der zum Vergleich geprüften Schienen K bis M waren die gleichen wie die im Beispiel 1.

Tabelle 7

Schiene	Symbol	chemische Zusammensetzung (Gew.-%)						Abkühlbedingungen				Struktur	
		C	Si	Mn	P	S	Cr	andere hinzugesetzte Elemente	Abkühl- anfangs- temperatur (°C)	Schnell- abkühl- geschwindig- keit (°C/s)	Abkühl- unter- brechungs- temperatur (°C)		Temperatur- erhöhung durch Wärme- rückgewinnung (°C)
Verfahrens- schritte	A	0.31	0.30	1.21	0.013	0.009	1.71	V:0.09	900	3	300	49	Bainit
	B	0.28	0.31	1.20	0.013	0.008	1.41	Mo:0.26	800	4	370	1	Bainit
	C	0.29	0.55	1.10	0.010	0.006	2.32	Nb:0.05	700	5	360	8	Bainit
	D	0.41	0.31	0.76	0.011	0.007	2.51	B:0.0020	800	8	340	26	Bainit
	E	0.31	0.32	0.40	0.012	0.007	2.91	Mo:0.59	850	1	400	34	Bainit
	F	0.35	0.15	0.31	0.011	0.009	2.98	Ni:2.22	850	10	400	14	Bainit
	G	0.45	0.31	0.61	0.011	0.007	2.26	-	800	5	320	48	Bainit
	H	0.35	1.98	0.54	0.012	0.007	2.62	Ti:0.041	850	5	360	16	Bainit
	I	0.31	0.54	1.99	0.014	0.009	0.51	Cu:0.21	800	4	330	35	Bainit
	J	0.15	0.51	1.32	0.012	0.007	1.54	Mo:0.41, Ni:3.89	750	8	380	42	Bainit
	K	0.31	0.29	1.40	0.015	0.008	1.41	-	natürliche Abkühlung nach dem Walzen				Bainit
Vergleich	L	0.33	0.30	1.21	0.016	0.008	1.64	-	800	12	450	89	Bainit
	M	0.69	0.25	0.89	0.013	0.007	-	-	natürliche Abkühlung nach dem Walzen				Pearlit

Hinweis: Der Rest in oberflächenfehlerbeständigen und abriebfesten Stählen ist Eisen

Tabelle 8

Schiene	Symbol	Härte (HV)	aufge- nommene Energie (J/cm ²)	Abriebmenge (g/500 000 Umdrehungen)	Ausgeübte Belastung vor Ober- flächendefekten (Umdrehungen)
Eigen- schaften	A	409	72	2.13	215×10^4
	B	421	96	2.02	224×10^4
	C	402	84	2.22	210×10^4
	D	413	64	2.10	205×10^4
	E	425	61	1.98	230×10^4
	F	384	86	2.31	188×10^4
	G	414	61	1.61	194×10^4
	H	430	69	1.81	228×10^4
	I	376	84	2.54	184×10^4
	J	388	98	2.85	178×10^4
Vergleich	K	321	18	3.21	45×10^4
	L	346	36	3.05	60×10^4
	M	260	15	1.24	80×10^4

Kerbschlagzähigkeitsprüfbedingungen (bei allen Probestücken gleich)

Probestückschnittstelle: Schienenkopf

Probestücktyp: JIS Nr. 3, Probestück mit 2 mm tiefer Charpy-U-Kerbe

Prüftemperatur: Raumtemperatur (annähernd 20°C)

Tabelle 9

Schiene	Symbol	Ergebnisse der Fallgewichtsprüfung (Die Zahlen zeigen die Anzahl der gebrochenen der vier Probestücke an)											
		Fallgewichtsprüfungstemperatur (°C)											
		0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110
Eigen- schaften	A	-	-	-	-	-	-	0	0	0	2	4	-
	B	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	2	4
	C	-	-	-	-	-	-	0	0	0	2	4	-
	D	-	-	-	-	-	-	0	0	2	4	-	-
	E	-	-	-	-	-	-	0	0	2	4	-	-
	F	-	-	-	-	-	-	0	0	0	2	4	-
	G	-	-	-	-	-	-	0	0	2	4	-	-
	H	-	-	-	-	-	-	0	0	2	4	-	-
	I	-	-	-	-	-	-	0	0	0	2	4	-
	J	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	2	4
Vergleich	K	0	0	2	3	4	-	-	-	-	-	-	-
	L	-	-	0	0	2	4	-	-	-	-	-	-
	M	0	0	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-

[0069] Wie aus Tabelle 8 hervorgeht, nutzten sich die erfindungsgemäßen Schienen A bis J mehr ab als die herkömmliche Schiene M mit einer Perlitstruktur, wobei eine deutlich verbesserte Beständigkeit gegen Rollkontaktermüdung vorhanden ist. Die Rollkontaktermüdungsbeständigkeit der erfindungsgemäßen Schienen war viel größer als die der walzharten Schiene K mit einer Bainitstruktur und der Schiene L mit einer Bainitstruktur, die durch natürliche Abkühlung des Schienenkopfs nach Schnellabkühlung unter Bedingungen außerhalb des Schutzbereichs der Erfindung hergestellt worden sind.

[0070] Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse einer Fallgewichtsprüfung der Schienen und der zum Vergleich geprüften Schienen zusammen mit den verwendeten Prüfbedingungen, nämlich die Anzahl der gebrochenen von den vier Probestücken jedes Stahltyps. Während alle vier Probestücke der zum Vergleich geprüften Schienen bei Temperaturen zwischen -30 und -50°C brachen, brach keine der Schienen, bis die Temperatur auf -90°C fiel.

Patentansprüche

1. Hochfeste bainitische Stahlschiene mit hervorragender Beständigkeit gegen Ermüdungsschäden durch Rollkontakt, erhältlich aus Stahl bestehend aus: 0,15 bis 0,45% Kohlenstoff, 0,15 bis 2,00% Silicium, 0,30 bis 2,00% Mangan und 0,50 bis 3,00% Chrom und wahlfrei mindestens einem Element, das gewählt ist aus: einer ersten Gruppe, die aus 0,10 bis 0,60% Molybdän, 0,05 bis 0,50% Kupfer und 0,05 bis 4,00% Nickel besteht, einer zweiten Gruppe, die aus 0,01 bis 0,05% Titan, 0,03 bis 0,30% Vanadium und 0,01 bis 0,05% Niobium besteht, und einer dritten Gruppe, die aus 0,0005 bis 0,0050% Bor besteht, wobei der Rest aus Eisen und unvermeidlichen Verunreinigungen besteht, und mit bainitischer Struktur erhältlich durch beschleunigte Abkühlung des Schienenkopfes aus dem Austenitbereich bis zu einer Abkühlunterbrechungstemperatur von 500 bis 300°C mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 10°C/s, und anschließende weitere Abkühlung des Schienenkopfes auf eine noch niedrigere Temperaturzone, wobei die Mitte der Schienenkopffläche des Schienenkopfs eine Härte von Hv 300 bis 400 und die Innenkante eine Härte von mindestens Hv 350 aufweist, wobei die Härte der Innenkante um mindestens Hv 30 größer als die der Mitte der Schienenkopffläche ist.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

FIG. 1

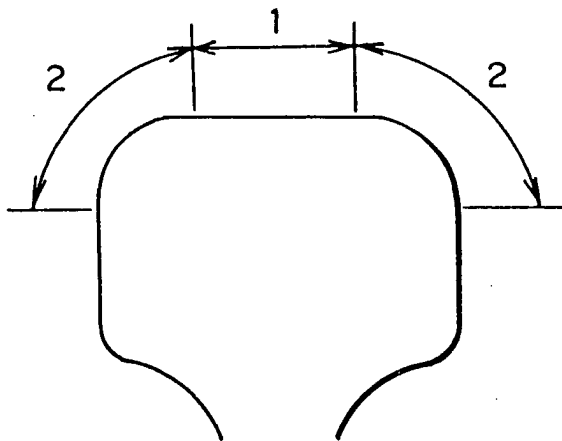


FIG. 2

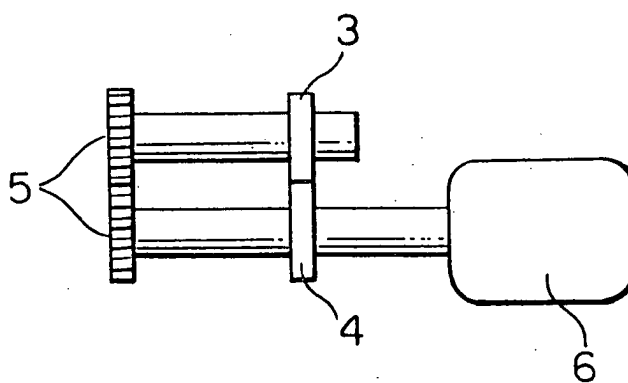


FIG. 3

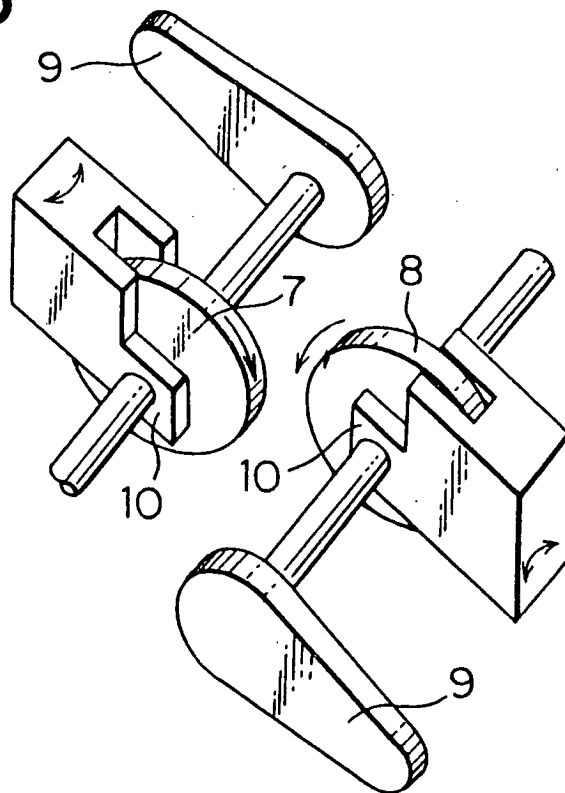


FIG. 4

