

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5490728号  
(P5490728)

(45) 発行日 平成26年5月14日(2014.5.14)

(24) 登録日 平成26年3月7日(2014.3.7)

(51) Int.Cl.		F I	
C 2 2 C	38/00 (2006.01)	C 2 2 C	38/00 3 0 1 Z
C 2 2 C	38/24 (2006.01)	C 2 2 C	38/24
E O 1 B	5/02 (2006.01)	E O 1 B	5/02

請求項の数 11 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2010-547122 (P2010-547122)	(73) 特許権者	598019897
(86) (22) 出願日	平成21年2月23日 (2009.2.23)		タタ、スチール、ユーカー、リミテッド
(65) 公表番号	特表2011-512458 (P2011-512458A)		TATA STEEL UK LIMITED
(43) 公表日	平成23年4月21日 (2011.4.21)		ED
(86) 国際出願番号	PCT/EP2009/001276		イギリス国ロンドン、ミルバンク、30
(87) 国際公開番号	W02009/103565	(74) 代理人	100117787
(87) 国際公開日	平成21年8月27日 (2009.8.27)		弁理士 勝沼 宏仁
審査請求日	平成23年12月2日 (2011.12.2)	(74) 代理人	100091487
(31) 優先権主張番号	08101917.6		弁理士 中村 行孝
(32) 優先日	平成20年2月22日 (2008.2.22)	(74) 代理人	100107342
(33) 優先権主張国	欧州特許庁 (EP)		弁理士 横田 修孝
		(74) 代理人	100111730
			弁理士 伊藤 武泰
		(74) 代理人	100113365
			弁理士 高村 雅晴

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 摩耗特性と耐転がり疲労性の優れた組合せを有するレール鋼

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

摩耗特性と耐転がり疲労性の優れた組合せを有する高強度パーライト鋼レールであって、前記鋼が、重量%で、0.88%~0.95%の炭素、0.75%~0.95%のケイ素、0.80%~0.95%のマンガン、0.05%~0.14%のバナジウム、最大0.008%までの窒素、最大0.030%までのリン、0.008~0.030%の硫黄、最大で2.5ppmの水素、最大で0.10%のクロム、最大で0.010%のアルミニウム、最大で20ppmの酸素、残部鉄および不可避不純物からなる、パーライト鋼レール。

【請求項2】

炭素が少なくとも0.90重量%である、請求項1に記載のパーライトレール。

【請求項3】

窒素が0.003重量%~0.007重量%である、請求項1または2に記載のパーライトレール。

【請求項4】

窒素が最大で0.005重量%である、請求項1~3のいずれか一項に記載のパーライトレール。

【請求項5】

バナジウムが0.08重量%~0.12重量%である、請求項1~4のいずれか一項に記載のパーライトレール。

## 【請求項 6】

0.90重量%～0.95重量%の炭素、0.82重量%～0.92重量%のケイ素、0.80重量%～0.95重量%のマンガン、0.08重量%～0.12重量%のバナジウム、0.003重量%～0.007重量%の窒素、最大で0.015重量%のリン、0.008重量%～0.030重量%の硫黄、最大で2ppmの水素、最大で0.10重量%のクロム、最大で0.004重量%のアルミニウム、最大で20ppmの酸素、残部鉄および不可避不純物からなる、請求項1～3および5のいずれか一項に記載のパーライトレール。

## 【請求項 7】

マンガンが最大で0.90重量%である、請求項1～6のいずれか一項に記載のパーライトレール。

10

## 【請求項 8】

水潤滑させたツイン-ディスク試験条件下で亀裂開始までに少なくとも130000サイクルのRCF耐性を有する、請求項1～7のいずれか一項に記載のパーライトレール。

## 【請求項 9】

摩耗が、硬度320～350HBにおいて40mg/m未満の滑りである、請求項1～8のいずれか一項に記載のパーライトレール。

## 【請求項 10】

摩耗が、350HBを超える硬度において20mg/m未満の滑りである、請求項1～8のいずれか一項に記載のパーライトレール。

20

## 【請求項 11】

摩耗が、350HBを超える硬度において10mg/m未満の滑りである、請求項1～8のいずれか一項に記載のパーライトレール。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、従来の、および重量輸送鉄道に必要な摩耗特性と耐転がり疲労性の優れた組合せを有するレール鋼に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

30

列車速度および積載量の増加により、鉄道輸送は、より効率的になっている。しかし、この増加は、レールにとってより困難な仕事条件を意味し、課せられる応力増加および応力サイクルに対する耐性を高めるために、レール材料をさらに改良する必要がある。交通密度が高く、貨物交通の比率が高い急カーブでは、摩耗の増加が特に深刻であり、レールの耐用寿命の低下が重大になり、好ましくない。しかし、近年、レールをさらに強化するための熱処理技術の進歩、および共析炭素鋼を使用し、微小パーライト構造を有する高強度レールの開発により、レールの耐用寿命は非常に大きく改善されている。

## 【0003】

鉄道の、耐摩耗性が低くてよい直線およびゆるいカーブでは、車輪とレールとの間の繰り返し接触により、レールヘッドの表面上に転がり疲労(RCF)損傷を引き起こす。これらの損傷は、レールヘッド表面の最上面で開始した疲労亀裂がレールヘッドの内側に伝搬することにより引き起こされる。「スクアット」または「ダークスポット」と呼ばれる損傷が高速鉄道の接線軌道(tangent track)で主として、但しそこだけではないが、発生し、これは、車輪とレールとの間の繰り返し接触により引き起こされる損傷の、レールヘッド表面の中央における蓄積によるものである。

40

## 【0004】

これらの損傷は、レールヘッド表面を特定間隔で研磨することにより無くすことができる。しかし、研磨車両および操作のコストは高く、研磨のための時間は列車の運行計画によって制限される。

## 【0005】

50

別の解決策は、レールヘッド表面の摩耗速度を増加させ、蓄積された損傷を、欠陥が起こる前に摩滅させることである。レールの耐摩耗性は鋼の硬度によって異なるので、レールの硬度を下げることにより、レールの摩耗速度を増加させることができる。しかし、鋼硬度の単純な低下は、レールヘッド表面の塑性変形を引き起こし、これによって、最適輪郭が失われ、転がり疲労亀裂の発生が引き起こされる。

【0006】

ベイナイト系構造を有するレールは、ソフトフェライト系マトリックス中に細かく分散した炭化物粒子からなるので、パーライト構造を有するレールよりも多く摩滅する。従って、ベイナイト系構造のレール上を走る車輪は、炭化物をフェライト系マトリックスと共に容易に摩滅させる。このようにして促進された摩耗が、疲労損傷した層をレールヘッドのレールヘッド表面から除去する。フェライト系マトリックスの低強度は、高百分率のクロムまたは他の合金化元素を添加し、圧延した時に必要な高強度を与えることにより、対処することができる。しかし、合金添加剤の増加は経費がかかるのみならず、レール間の溶接継ぎ目の中に硬く、脆い構造を形成することもある。これらのベイナイト系鋼は、応力腐食亀裂に対してより敏感であり、残留応力をより厳格に管理する必要がある。その上、ベイナイト鋼のアルミノ-テルミーおよびフラッシュバット溶接の性能を改良すべきである。

10

【0007】

パーライト構造を有するレールは、ソフトフェライトとハードセメンタイト層の組合せを含んでなる。車輪と接触するレールヘッド表面上では、ソフトフェライトが絞り出され、ハードセメンタイトの層だけが残る。このセメンタイトおよび加工硬化の影響により、レールに必要な耐摩耗性が得られる。これらのパーライト鋼の強度は、合金化添加剤、加速冷却、またはそれらの組合せにより達成される。これらの手段を使用し、パーライトの層間間隔が減少する。鋼の硬度が増加するために、耐摩耗性が増加する。しかし、約360 HB以上の硬度値では、摩耗速度が小さすぎて、硬度をさらに増加しても、摩耗速度は大きく変化しない。しかし、耐転がり疲労性の改良は、完全なパーライト微小構造を有する共析および亜共析鋼の硬度上限と一般的に見なされている約400 HBまでの硬度増加で観察されている。

20

【0008】

しかし、実際の条件下では、これらの高強度パーライト鋼のRCF耐性をさらに改良し、転がり疲労亀裂の開始を遅延させ、それによって、レール研磨操作の間隔を延長することが求められている。

30

【発明の概要】

【0009】

そこで、本発明の目的は、現在の熱処理レールの優れた耐摩耗性を保持しながら、耐転がり疲労性を有する高強度レールを提供することである。

【0010】

本発明の目的は、(重量%で)

0.88% ~ 0.95%の炭素、

0.75% ~ 0.95%のケイ素、

0.80% ~ 0.95%のマンガン、

0.05% ~ 0.14%のバナジウム、

最大で0.008%の窒素、

最大で0.030%のリン、

0.008% ~ 0.030%の硫黄、

最大で2.5 ppmの水素、

最大で0.10%のクロム、

最大で0.010%のアルミニウム、

最大で20 ppmの酸素、

を含み、残部が鉄および不可避不純物からなる、

40

50

摩耗特性と耐転がり疲労性の優れた組合せを有する高強度パーライトレール鋼により達成された。

#### 【0011】

本発明による鋼の化学組成は、従来の亜および過共析パーライト鋼と比較して、非常に良好な摩耗特性を示した。本発明者らは、この釣り合いのとれた化学組成により、非常に細かく分散したバナジウム炭素窒化物を含んでなる、耐摩耗性が非常に高いパーライトが製造されることを見出した。その上、RCF耐性は、比較し得る従来鋼のそれよりも大幅に高い。多くのファクターが一つになって、この改良をもたらしている。第一に、鉄-炭素状態図の過共析領域への移動により、微小構造におけるハードセメンタイトの体積画分が増加する。しかし、レールが経験する比較的遅い冷却下では、そのような高濃度の炭素が、粒界で脆いセメンタイトの有害な網目を引き起こすことがある。粒界セメンタイトを防止するために、より高い濃度のケイ素およびバナジウムを組成物に意図的に添加している。これらの添加剤は、第二の、等しく重要な機能も有する。ケイ素は、固溶体強化剤であり、パーライトフェライトの強度を増加させ、これがパーライトの、RCF開始に対する耐性を増加する。同様に、パーライトフェライトの中で細かいバナジウム炭素-窒化物が析出するために、その強度が増加し、それによって、この組み合わせられたパーライト微小構造のRCF耐性が増加する。この組成設計のさらなる特徴は、窒素含有量を制限し、窒化バナジウムの粗い析出物が早期に形成されるのを防止することにあるが、これは、これらの析出物がパーライトフェライトの強度増加には効果的ではないためである。これによってバナジウム添加剤がオーステナイト中の溶体中に止まり、温度を下げ、従って、より細かい析出物が得られる。溶体中のバナジウムは、パーライトを精製するための焼入剤としても作用する。従って、この実施態様で特許権請求する組成物の特殊な設計は、個々の元素の様々な属性を利用し、摩耗とRCF耐性の非常に望ましい組合せを備えた微小構造を形成することである。こうして、RCFおよび耐摩耗性を低い硬度値で強化することができる。通常、高い硬度は、レール中の高い残留応力に関連するので、硬度が低いと言うことは、本発明のレール中のこれらの残留応力が減少することを意味し、これは、疲労亀裂の成長速度を低下させるのに特に有利である。本発明の鋼の機械的特性は、急カーブおよび高度に傾斜した曲線のロウレール上に一般的に使用される従来等級350 HTと類似している。レールを熱間圧延または熱処理の後で促進冷却にかけることにより、さらに改良することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0012】

【図1】本発明によるレール(円)のRCF開始までのサイクル数を、従来のパーライト鋼(正方形)に対する値と、レールの硬度(HB)の関数として比較する図である。

【図2】本発明によるレール(円)のmg/m滑りで表した摩耗特性を、従来のパーライト鋼(正方形)に対する値と、レールの硬度(HB)の関数として比較する図である。

#### 【発明を実施するための形態】

#### 【0013】

本発明の一実施態様では、窒素の最低量は0.003%である。好適な最大窒素含有量は0.007%であることが分かった。

#### 【0014】

バナジウムは、鋼中に存在する窒素の量および温度に応じて、炭化バナジウムまたは窒化バナジウムを形成する。原則的に、析出物の存在は、鋼の強度および高度を増加させるが、析出物が高温で粗い粒子に析出すると、析出物の効能は低下する。窒素含有量が高すぎる場合、低温における細かい炭化バナジウムの代わりに、高温で窒化バナジウムを形成する傾向が高くなる。本発明者らは、窒素含有量が0.007%未満である場合、好ましくない窒化バナジウムの量は、望ましい炭化バナジウムと比較して小さい、すなわち、窒化バナジウムが存在することの有害な影響は観察されないのに対して、細かく分散した炭化バナジウムが存在することの有益な影響が強いことを見出した。窒素最小量0.003%は、ほんの僅かな画分だけを高温の比較的粗い窒化バナジウム析出物と確実に結合させることに

より、高価なバナジウム添加の効果を最大限にするための、実用的な下限である。窒素の好適な最大値は0.006%、さらには0.005%である。

【0015】

本発明の一実施態様では、バナジウムの最小量は0.08%である。好適な最大含有量は0.13%であることが分かった。好ましくは、バナジウムは、少なくとも0.08%および/または最大0.12%である。バナジウム炭素-窒化物を細かく分散させるために、本発明者らは、バナジウム量約0.10%が最適で、好ましいことを見出した。有益な効果は量の増加と共に失われ、経済的に魅力的ではなくなる。

【0016】

炭素は、レール鋼における最もコスト的に有効な強化合金化元素である。好適な最小炭素含有量は0.90%であることが分かった。炭素の好ましい範囲は0.90%~0.95%である。この範囲は、ハードセメンタイトの体積画分と、粒界における脆いセメンタイトの有害な網目の析出防止との間の最適バランスを与える。炭素は、変態温度を下げ、従って、層間間隔をより小さくする強力な焼入性試剤でもある。ハードセメンタイトの高い体積画分および小さい層間間隔が、本発明の実施態様に含まれる組成物の耐摩耗性を与え、RCF耐性の増加に寄与する。

【0017】

ケイ素は、0.75~0.95%の範囲で、パーライト構造におけるフェライトの固溶体硬化により強度を改良する。0.75~0.92%のケイ素含有量が、レールの延性および靱性ならびに溶接性の良好なバランスを与えることが分かった。より高い値では、延性および靱性の値が急速に低下し、より低い値では、鋼の摩耗および特にRCF耐性が急速に失われる。ケイ素は、推奨するレベルで、粒界における脆いセメンタイトの有害な網目に対する有効な防御も与える。好ましくは、最小ケイ素含有量は0.82%である。0.82~0.92%の範囲が、レールの延性および靱性ならびに溶接性の非常に良好なバランスを与えることが分かった。

【0018】

マンガンは、パーライトの焼入性を改良することにより、強度を増加するのに有効な元素である。マンガンの主目的は、パーライトの変態温度を下げることである。マンガンの含有量が0.80%未満である場合、マンガンの効果は、選択された炭素含有量で所望の焼入性を達成するには不十分であることが分かっており、0.95%を超えるレベルでは、マンガンの偏析のためにマルテンサイト形成の危険性が増加する。マンガンの含有量が高いと、溶接操作がより困難になる。好ましい実施態様では、マンガン含有量は最大で0.90%である。好ましくは、鋼のリン含有量は最大で0.015%である。好ましくは、アルミニウム含有量は最大で0.006%である。

【0019】

硫黄の値は0.008~0.030%の間でなければならない。最小硫黄含有量の理由は、硫黄がMnS包接化合物を形成し、これが、鋼中に存在することがある全ての残留水素に対する掃きだめとして作用するためである。レール中の水素は、破碎亀裂(shatter cracks)と呼ばれるものを引き起こすことがあるが、これは、鋭い面を有する小さな亀裂であり、車輪から来る高応力下にあるヘッド中に疲労亀裂(タチエオーバルと呼ばれる)を開始することがある。少なくとも0.008%の硫黄を添加することにより、水素の有害な影響が阻止される。構造の脆化を回避するために、0.030%の最大値を選択する。好ましくは、最大値はせいぜい0.020%である。好ましい実施態様では、本発明の鋼は

- 0.90%~0.95%の炭素、
- 0.82%~0.92%のケイ素、
- 0.80%~0.95%のマンガン、
- 0.08%~0.12%のバナジウム、
- 0.003~0.007%の窒素、
- 最大で0.015%のリン、
- 0.008%~0.030%の硫黄、
- 最大で2 ppmの水素、

10

20

30

40

50

最大で0.10%のクロム、  
最大で0.004%のアルミニウム、  
最大で20 ppmの酸素、

残部鉄および不可避不純物からなり、パーライト構造を有する。

【0020】

RCF耐性および耐摩耗性は、R.I. Carol、レールの転がり疲労および表面冶金学(Rolling Contact Fatigue and surface metallurgy of rail)、PhD Thesis, Department of Engineering Materials, University of Sheffield, 2005に記載されている設備に類似した実験室ツイン-ディスク設備を使用して測定した。この装置は、車輪がレール上を転がり、滑る時に生じる力をシミュレーションする。これらの試験で使用する車輪は、標準的な英国車輪であるR8T-車輪である。これらの評価は、正式なレール適性手順ではないが、様々なレール鋼組成物の相対的な実使用に関する良い指針を与える。摩耗試験に関する試験条件では、750 MPa接触応力、25%滑りおよび無潤滑を使用するが、RCFに関する条件は、より高い接触応力900 MPa、5%滑りおよび水潤滑を使用する。

10

【0021】

本発明は、このレールの転がり疲労に対する耐性が、従来の熱処理したレールより遙かに高いことを立証している。圧延した状態では、亀裂開始までのサイクル数の、硬度370 HBのパーライトレール(80000サイクル)と比較して、62%以上の増加(130000サイクル)を立証している。本発明の熱処理は、RCF耐性をさらに160000サイクルに増加させている。

20

【0022】

本発明の一実施態様では、水潤滑させたツイン-ディスク試験条件下で亀裂開始までに少なくとも130,000サイクルのRCF耐性を有するパーライトレールが得られる。上記のように、これらの値は、転がりおよび滑り条件下で得られたものである。

【0023】

本発明の一実施態様では、熱処理した現在のレール鋼に匹敵する耐摩耗性を有するパーライトレールが得られており、好ましくは、上記のように試験した時に、摩耗が、硬度320~350 HBで40 mg/m滑り未満、または350 HBを超える硬度で20 mg/m滑り未満、好ましくは10 mg/m滑り未満である。

【0024】

本発明は、ツイン-ディスク試験の際に、その耐摩耗性が、硬度が現在最も高い熱処理したレールと同じ位効果的であることを立証している。圧延状態では、レールの耐摩耗性が、より高い硬度370 HBを有する従来の熱処理したレールより高い。熱処理状態では、これらのレールは、硬度400 HBの従来レールと類似の非常に低い摩耗速度を有する。

30

【0025】

不可避不純物の最大推奨レベルは、EN13674-1:2003に基づいており、それによると、上限は、Mn 0.02%、Ni 0.10%、Sn 0.03%、Sb 0.020%、Ti 0.025%、Nb 0.01%である。

【0026】

幾つかの本発明を制限しない例により、選択された合金化元素を意図的に変化させた2種類の鋳造物AおよびBを製造し、インゴットに鋳造した。これらの例の化学組成を表1に示す。

40

【0027】

表1a 化学組成、重量%

【表1a】

	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Al	N
A	0.94	0.96	0.84	0.011	0.005	0.05	0.11	0.004	0.004
B	0.92	0.83	0.88	0.012	0.007	0.06	0.12	0.003	0.005

【0028】

50

これらのインゴットを標準的な330 x 254レールブーム部分に鍛伸(cogged)し、56E1部分に圧延した。全てのレール長さが、内部または表面の破損欠陥無しに製造された。これらのレールを熱間圧延状態で、制御促進冷却状態で試験した。

【0029】

鋼の硬度は、342 HB~349 HBであった。これは、硬度によるレール耐用寿命推定では、これらの鋼は等級350 HT最小に適合しないと結論付けられよう。しかし、本発明者らは、本発明による狭い化学組成範囲内の鋼を選択することにより、耐摩耗性およびRCF耐性の両方共優れており、等級350より性能が優れており、同等の機械的特性を示すことを見出した。熱処理状態(すなわち、促進冷却したレール)では、硬度は約400 HBであった。

【0030】

表1b 化学組成、N(ppm)を除いて重量%

【表1b】

	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Al	N
A*	0.94	0.92	0.84	0.010	0.008	0.04	0.10	0.002	40
B*	0.92	0.87	0.88	0.010	0.010	0.05	0.10	0.002	30
C	0.92	0.92	0.85	0.014	0.012	0.02	0.11	0.001	37
D	0.95	0.89	0.88	0.015	0.016	0.02	0.11	0.001	41
E	0.94	0.87	0.85	0.010	0.014	0.02	0.12	0.002	43

【0031】

表1bの鋼は、商業的な試作品である。これらの鋼で得た結果は、実験室鑄造物の結果を確認している。市販鑄造物の耐摩耗性は、実験室鑄造物の耐摩耗性より優れていた。これは、工業的試作品で得た、より細かいパーライトおよびより細かい微小構造によるものであると考えられる。例えば、鋼Cに関する摩耗速度(mg/m滑り)は3.6であったのに対し、鋼AおよびBに対する値は25のオーダーにあった。後者の値は、R260およびR350HTに対する典型的な値(それぞれ124および31)と比較して、すでに非常に良いが、商業的試作品は、実験室試作品の値をさらに超えている。RCF耐性も商業的試作鑄造物の方が大幅に高く、亀裂開始まで200000~220000サイクルである。この改良は、少なくとも部分的に、硫黄含有量が商業的試作品の臨界値より上であることによるが、工業的試作品で得られる、より細かいパーライトおよびより細かい微小構造にもよる。やはり、これらの値は、R260およびR350HTに対する典型的な値、それぞれ50000および80000、より、すでに非常に遙かに良い。レール中で測定された硬度値は、レールの断面全体にわたって非常に一定している。

【0032】

鋼を、フラッシュバット溶接およびアルミノ-テルミー溶接により溶接したが、どちらの場合も、溶接部は均質溶接部(同じ材料)および不均質溶接部(異なった材料)に関する必要な標準に適合することが分かった。

【0033】

## 【表 2】

表2 引張特性

鋼等級	状態	0.2%耐力(MPa)	引張強度(MPa)
等級350 HT	熱処理	763	1210
A	圧延	659	1240
B	圧延	764	1230
A	促進冷却	981	1460
B	促進冷却	910	1404

10

## 【0034】

他の関連する特性は全て、現在市販のパーライトレール鋼等級の特性と同等であるか、またはそれより優れており、それによって、摩耗特性と耐転がり疲労性の優れた組合せ、ならびに現在市販のパーライトレール鋼等級の特性と同等であるか、またはそれより優れた特性を有するレールが得られる。

## 【0035】

図1で、本発明によるレール(円)のRCF開始までのサイクル数を、従来のパーライト鋼(正方形)に対する値と、レールの硬度(HB)の関数として比較する。本発明のレールが公知のレールより性能が優れており、耐転がり疲労性では段違いの改良を示す制御領域が明らかである。工業的試作品の結果も示す(三角形)。

20

## 【0036】

図2では、本発明によるレール(円)のmg/m滑りで表した摩耗特性を、従来のパーライト鋼(正方形)に対する値と、レールの硬度(HB)の関数として比較する。本発明によるレールの摩耗速度は、380 HB未満の硬度では現在のレール鋼よりも低く、380 HBを超える硬度値を有するレールと匹敵する。工業的試作品の結果も示す(三角形)。

【 図 1 】

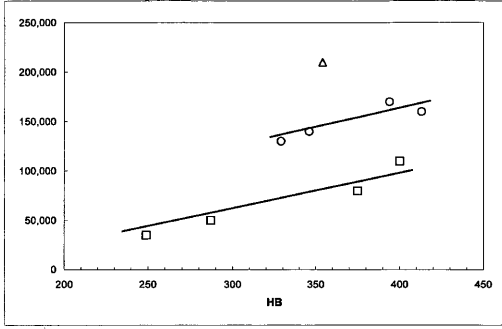


Figure 1

【 図 2 】

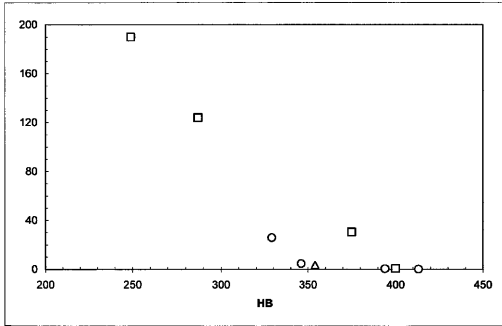


Figure 2

---

フロントページの続き

- (72)発明者 ロバート、キャロル  
イギリス国サウス、ヨークシャー、シェフィールド、バクスター、ミューズ、32
- (72)発明者 ハワード、マーティン、スミス  
イギリス国サウス、ヨークシャー、シェフィールド、アウルソープ、リーブルック、プレイス、15
- (72)発明者 シュリーカント、ジャイスワル  
イギリス国チェスターフィールド、バルモーク、レーン、43

審査官 河野 一夫

- (56)参考文献 特開2000-345296(JP,A)  
特開2000-328190(JP,A)  
特開平08-246100(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

C22C 1/00 - 49/14  
E01B 5/02