

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2012 年 5 月 24 日(24.05.2012)



(10) 国際公開番号
WO 2012/067237 A1

- (51) 国際特許分類:
C22C 38/00 (2006.01) C22C 38/38 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/076695
- (22) 国際出願日: 2011 年 11 月 18 日(18.11.2011)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2010-257440 2010 年 11 月 18 日(18.11.2010) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 住友金属工業株式会社 (SUMITOMO METAL INDUSTRIES, LTD.) [JP/JP]; 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 5 番 3 3 号 Osaka (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 山本 雄一郎 (YAMAMOTO, Yuichiro) [JP/JP]; 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 5 番 3 3 号 住友金属工業株式会社内 Osaka (JP). 竹下 幸輝 (TAKE-SHITA, Yukiteru) [JP/JP]; 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 5 番 3 3 号 住友金属工業株式会社内 Osaka (JP). 加藤 孝憲 (KATO, Takanori) [JP/JP]; 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 5 番 3 3 号 住友金属工業株式会社内 Osaka (JP). 桐山 健太郎 (KIRIYAMA, Kentaro) [JP/JP]; 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 5 番 3 3 号 住友金属工業株式会社内 Osaka (JP).

- (74) 代理人: 杉岡 幹二, 外 (SUGIOKA, Kanji et al.); 〒5300057 大阪府大阪市北区曽根崎 2 丁目 5 番 1 0 号 杉岡特許事務所 Osaka (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーロシヤ (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

(54) Title: STEEL FOR WHEEL

(54) 発明の名称: 車輪用鋼

(57) Abstract: Provided is steel for a wheel, the steel having a chemical composition containing C (0.65-0.84%), Si (0.02-1.00%), Mn (0.50-1.90%), Cr (0.02-0.50%), V (0.02-0.20%), and S ($\leq 0.04\%$), wherein $[34 \leq 2.7 + 29.5 \times C + 2.9 \times Si + 6.9 \times Mn + 10.8 \times Cr + 30.3 \times Mo + 44.3 \times V \leq 43]$ and $[0.76 \times \exp(0.05 \times C) \times \exp(1.35 \times Si) \times \exp(0.38 \times Mn) \times \exp(0.77 \times Cr) \times \exp(3.0 \times Mo) \times \exp(4.6 \times V) \leq 25]$, with the remainder comprising Fe and impurities, and having $P \leq 0.05\%$, $Cu \leq 0.20\%$, and $Ni \leq 0.20\%$. This steel for a wheel has an excellent balance of wear resistance, rotational fatigue resistance, and spalling resistance, and is capable of providing a wheel with a long life.

(57) 要約: C: 0.65~0.84%、Si: 0.02~1.00%、Mn: 0.50~1.90%、Cr: 0.02~0.50%、V: 0.02~0.20%、 $S \leq 0.04\%$ を含み、 $[34 \leq 2.7 + 29.5 \times C + 2.9 \times Si + 6.9 \times Mn + 10.8 \times Cr + 30.3 \times Mo + 44.3 \times V \leq 43]$ かつ $[0.76 \times \exp(0.05 \times C) \times \exp(1.35 \times Si) \times \exp(0.38 \times Mn) \times \exp(0.77 \times Cr) \times \exp(3.0 \times Mo) \times \exp(4.6 \times V) \leq 25]$ で、残部が Fe と不純物からなり、 $P \leq 0.05\%$ 、 $Cu \leq 0.20\%$ 、 $Ni \leq 0.20\%$ の化学組成の車輪用鋼。この車輪用鋼は、耐摩耗性、耐転動疲労性および耐スポーリング性のバランスに優れ、車輪に長い寿命を具備させることが可能である。

WO 2012/067237 A1

明 細 書

発明の名称：車輪用鋼

技術分野

[0001] 本発明は、車輪用鋼に関し、詳しくは、耐摩耗性、耐転動疲労性および耐スポーリング性に優れた鉄道用高硬度車輪の素材として好適な車輪用鋼に関する。

[0002] スポーリングとは、緊急ブレーキなどによって車輪の加熱急冷された部分が、白色層と呼ばれる脆いマルテンサイトに変態し、その白色層を起点としてき裂が進行し、脆性破壊して剥離する現象である。「熱き裂」と呼ばれる場合もある。

背景技術

[0003] 近年、世界的な走行距離の増加および積載荷重の増加に伴い、従来にも増して長寿命を有する鉄道用車輪（以下、「車輪」ともいう。）が求められている。

[0004] 車輪の損傷要因には、主に（i）摩耗、（ii）転動疲労および（iii）スポーリングの3つの現象があり、特に近年は走行距離の増加に伴う摩耗および積載荷重の増加に伴う転動疲労によって損傷する車輪が増加している。転動疲労は、「シェリング」と称されることがある。スポーリングで形成されるき裂は、「シェリング」と呼ばれる場合もあるが、本件明細書では、白色層の形成に起因するき裂の発生を「スポーリング」と定義する。

[0005] 経験的に、耐摩耗性および耐転動疲労性と、耐スポーリング性とは相反する性質であることが知られている。耐摩耗性、耐転動疲労性および耐スポーリング性のバランスに優れ、車輪に長寿命を付与できる車輪用鋼の開発が急務となっている。

[0006] 例えば、特許文献1～7には車輪に関する技術が開示されている。

[0007] 特許文献1には、Vを含有させた「高靱性鉄道車輪用鋼」が開示されている。

- [0008] 特許文献2には、耐摩耗性、耐割損性および耐熱き裂性に優れた「鉄道車両の車輪セットのためのリムまたは一体車輪」が開示されている。
- [0009] 特許文献3には、Cの含有量を低くし、踏面部をベイナイト組織、焼戻しマルテンサイト組織、または、ベイナイトと焼戻しマルテンサイトの混合組織とすることによって、耐シェリング性と耐熱き裂性としての耐フラット剥離性とを両立した「鉄道車両用車輪」が開示されている。
- [0010] 特許文献4には、Cの含有量を0.85～1.20%に高めた「耐摩耗性および耐熱き裂性に優れた高炭素鉄道車両用車輪」が開示されている。
- [0011] 特許文献5には、C : 0.4～0.75%、Si : 0.4～0.95%、Mn : 0.6～1.2%、Cr : 0～0.2%未満、P : 0.03%以下およびS : 0.03%以下を含有し、残部がFeおよび不純物からなる化学組成の鋼で構成された一体型の鉄道車両用車輪であって、車輪踏面の表面から少なくとも深さ50mmまでの領域が、パーライト組織からなることを特徴とする「耐摩耗性および耐熱亀裂性に優れた鉄道車両用車輪」とその製造方法が開示されている。
- [0012] 特許文献6および特許文献7には、それぞれ、0.01～0.12%および0.009～0.013%のNbを含有させることによって高強度化し、耐転動疲労性および耐スポーリング性を向上させた「鉄道車輪用鋼」が開示されている。

先行技術文献

特許文献

- [0013] 特許文献1：特開昭50-104717号公報
特許文献2：特開2001-158940号公報
特許文献3：特開2005-350769号公報
特許文献4：特開2004-315928号公報
特許文献5：特開平9-202937号公報
特許文献6：米国特許第7559999号公報
特許文献7：米国特許第7591909号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0014] 特許文献１に開示された鋼は、Ｃの含有量が０．５０～０．６０％と低い
ため、硬度が低い。したがって、この鋼は、十分な耐転動疲労性を有さず、
近年の積載荷重の増加に対応できない。
- [0015] 特許文献２に開示された鋼は、Ｃの含有量が０．４５～０．５５％と低い
ため、硬度が低い。したがって、この鋼も、十分な耐転動疲労性を有さず、
近年の積載荷重の増加に対応できない。
- [0016] 特許文献３に開示された車輪は、踏面部がベイナイト組織、焼戻しマルテ
ンサイト組織、または、ベイナイトと焼戻しマルテンサイトの混合組織から
なるものである。このため、高強度であるにも拘わらず、踏面部がパーライ
ト組織からなる場合に比べて耐摩耗性が低く、汎用貨車用車輪材以上の耐摩
耗性を得ることは困難である。すなわち、加工硬化特性に優れ、さらに摩耗
の進行に伴いそのラメラが表面に平行に再配列する挙動を示すパーライト組
織に比べて、ベイナイト組織および焼戻しマルテンサイト組織では摩耗量が
多くなる（例えば、山本定弘：「組織制御による鋼の耐摩耗性向上技術－溶
接性を備えた耐摩耗鋼の組織制御技術－」、第１６１・１６２回西山記念技
術講座、平成８年、日本鉄鋼協会編、ｐ．２２１参照）。
- [0017] 特許文献４に開示された車輪の素材鋼は、「踏面焼入れ法」と称される車
輪独特の処理で製造する車輪には適用し難い。車輪の一例として「一体車輪
」の模式図を図１に示す。車輪の場合、全体を加熱した後、リム部に圧縮残
留応力を付与するために、車輪の外周からリム部を冷却する熱処理が施され
る。この冷却処理は、リム部近傍では急冷されるが、ボス部の冷却速度は遅
い。そのため、この文献に記載されている車輪の素材鋼を踏面焼入れ法で熱
処理する場合、ボス部のオーステナイト粒界に過共析セメンタイトが析出す
可能性がある。過共析セメンタイトは粗大な介在物と同じ作用をして靱性
および疲労寿命を極度に低下させてしまう（例えば、村上敬宜：微小欠陥と
介在物の影響（２００４）、ｐ．１８２〔養賢堂〕参照）。

[0018] 特許文献５に開示された車輪は、硬度が不十分な場合がある。したがって、必ずしも近年の積載荷重の増加に対応できるというものではない。

[0019] 特許文献６に開示された鉄道車輪用鋼には、０．２０～０．３０％という多くのＭｎが含まれている。このため、ベイナイト組織または擬似パーライト組織といった耐摩耗性の低い組織が発生しやすくなり、良好な耐摩耗性が得られにくい。しかも、上記の鋼には０．０１～０．１２％のＮｂが必ず含まれる。Ｎｂを含む鋼には粗大な介在物が形成されることがあり、これは上述の過共析セメンタイトと同様に靱性および疲労寿命を極度に低下させてしまう。

[0020] 特許文献７に開示された鉄道車輪用鋼にも０．００９～０．０１３％のＮｂが必ず含まれる。上記のとおり、Ｎｂを含む鋼には粗大な介在物が形成されることがあり、これは過共析セメンタイトと同様に靱性および疲労寿命を極度に低下させてしまう。

[0021] 本発明は、上記の問題を解決するためになされたもので、耐摩耗性、耐転動疲労性および耐スポーリング性のバランスに優れ、車輪に長い寿命を具備させることが可能な車輪用鋼を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0022] 本発明者らが、耐摩耗性、耐転動疲労性および耐スポーリング性について種々検討した結果、下記（ａ）～（ｃ）の事項が判明した。

[0023] （ａ）耐摩耗性は、鋼材の組織をパーライト組織とし、かつ硬度が高いほど向上する。

[0024] （ｂ）耐転動疲労性は、組織によらず硬度が高いほど向上する。

[0025] （ｃ）耐スポーリング性は焼入れ性が低いほど向上する。

[0026] このことから、本発明者らは、前記した課題を解決するためには、踏面焼入れによってパーライト組織が得られ、しかも高硬度で焼入れ性が低い鋼を開発すればよいとの結論に達した。

[0027] 以下、本発明者らが検討した内容の一例によって、詳しく説明する。

[0028] 本発明者らは、実車輪の踏面焼入れと熱処理条件が類似しているジョミニ

一式一端焼入れ試験（以下、「ジョミニー試験」という。）によって、硬度と焼入れ性に及ぼす各元素の影響を評価した。

[0029] まず、表 1 に示す化学組成を有する鋼 1 ～ 2 4 を真空溶解炉にて実験室規模で溶解してインゴットを作製した。

[0030] 次に、各鋼について、インゴットから熱間鍛造によって直径 3 5 m m の丸棒、直径 1 6 0 m m の丸棒および直径 7 0 m m の丸棒を作製した。

[0031] さらに鋼 1 については、後述する転動疲労試験の「レール試験片」を作製するため、直径 2 2 0 m m の丸棒も作製した。

[0032] なお、表 1 中の鋼 1 は、A A R (A s s o c i a t i o n o f A m e r i c a n R a i l r o a d s) の M - 1 0 7 / M - 2 0 7 規格における「C l a s s C」の鉄道車輪用鋼に相当するものである。

[0033]

[表1]

表 1

鋼	化 学 組 成 (質量%)										残部 : F e および不純物
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
1	0.69	0.29	0.82	0.013	0.007	0.01	0.02	0.08	0.01	0.01	0.056
2	0.69	0.80	0.76	0.011	0.007	—	0.03	0.10	0.01	0.01	0.050
3	0.70	0.82	0.82	0.004	0.008	—	0.04	0.09	0.01	0.10	0.034
4	0.77	0.83	0.82	0.004	0.007	—	0.04	0.09	0.01	0.09	0.036
5	0.86	0.85	0.83	0.004	0.008	—	0.04	0.10	0.01	0.01	0.037
6	0.88	0.50	0.61	0.004	0.008	—	0.04	0.25	0.01	0.01	0.034
7	0.74	0.80	0.39	0.004	0.008	—	0.04	0.45	0.01	0.09	0.033
8	0.71	0.79	0.77	0.014	0.007	0.01	0.02	0.10	0.01	0.09	0.036
9	0.80	0.78	0.76	0.014	0.006	0.01	0.02	0.10	0.01	0.09	0.039
10	0.63	0.79	0.79	0.014	0.009	0.01	0.02	0.10	0.01	0.09	0.037
11	0.72	0.23	0.18	0.003	0.001	0.01	0.01	—	0.01	—	0.031
12	0.72	0.25	0.77	0.003	0.001	0.01	0.01	0.19	0.01	—	0.021
13	0.76	0.25	0.78	0.003	0.001	0.01	0.01	—	0.09	—	0.031
14	0.75	0.25	0.79	0.004	0.001	0.01	0.01	—	0.20	—	0.035
15	0.74	0.23	0.74	0.003	0.001	0.01	0.01	—	0.01	0.09	0.026
16	0.74	0.79	0.80	0.004	0.001	0.01	0.01	—	0.01	0.05	0.034
17	0.75	0.86	0.79	0.004	0.001	0.01	0.01	0.15	0.15	—	0.041
18	0.75	0.81	0.82	0.003	0.001	0.01	0.02	0.42	0.07	0.07	0.023
19	0.74	0.65	0.82	0.004	0.001	0.01	0.02	0.54	0.11	—	0.032
20	0.74	1.10	0.82	0.003	0.001	0.01	0.01	—	0.01	—	0.041
21	0.74	0.23	2.10	0.004	0.001	0.01	0.01	—	0.01	—	0.038
22	0.73	0.25	0.81	0.003	0.001	0.01	0.01	—	0.01	0.21	0.028
23	0.75	0.79	0.83	0.003	0.001	0.01	0.02	0.82	0.18	—	0.026
24	0.74	0.84	0.82	0.004	0.001	0.01	0.02	0.54	0.25	0.08	0.031

[0034] 上記直径35mmの丸棒からジョミニ試験片を採取し、大気雰囲気中、900℃で30分のオーステナイト化後、一端焼入れを行い、次いで、1.0mmの平行切削を施して、ロックウェルC硬度（以下、「HRC」ともいう。）の測定を行った。

[0035] 水冷端から40mm位置のHRC（以下、「40mm硬度」という。）を測定し、その値に及ぼす各元素の影響を評価した。その結果、図2に示すように、「40mm硬度」は、下記の式(1)で表されるF_{n1}と比例関係を有することが判明した。さらに鋼23および鋼24のように、F_{n1}が43を超

えると、少なくとも一部にベイナイト組織が形成され、比例関係が成り立たなくなることも判明した。

[0036] なお、水冷端から40mm位置のHRCを測定したのは、車輪は踏面焼入れをした後に研削して製造されるためである。また、使用された車輪はその後研削を行い、研削を繰返して使用される場合もあり、表面よりも硬度が低い内部の鋼の特性が車輪の寿命に大きく影響するためである。

[0037] 図2では、AARの「Class C」の鉄道車輪用鋼に相当する鋼1をマーク「▲」で示した。なお、組織は水冷端から40mm位置を鏡面研磨してからナイトールで腐食し、光学顕微鏡観察して判定した。

[0038]
$$F n 1 = 2.7 + 29.5 \times C + 2.9 \times Si + 6.9 \times Mn + 10.8 \times Cr + 30.3 \times Mo + 44.3 \times V \cdots (1)$$

上記の式(1)におけるC、Si、Mn、Cr、MoおよびVは、その元素の質量%での含有量を意味する。

[0039] 表2に、上記「40mm硬度」の測定値と式(1)で表されるFn1を整理して示す。

[0040] 焼入れ性は、ASTM A255規格に記載されているマルテンサイト組織分率が50%になった場合の硬度に基づき、ジョミニー硬度から、このマルテンサイト組織分率が50%になるmm単位での水冷端からの距離（以下、「M50%」という。）を測定して評価した。その結果、図3に示すように、「M50%」は、下記の式(2)で表されるFn2と相関を有することが判明した。なお、図3においても、鋼1をマーク「▲」で示した。

[0041]
$$F n 2 = 0.76 \times \exp(0.05 \times C) \times \exp(1.35 \times Si) \times \exp(0.38 \times Mn) \times \exp(0.77 \times Cr) \times \exp(3.0 \times Mo) \times \exp(4.6 \times V) \cdots (2)$$

上記の式(2)におけるC、Si、Mn、Cr、MoおよびVも、その元素の質量%での含有量を意味する。「 $\exp(0.05 \times C)$ 」などは「 $e^{0.05 \times C}$ 」などの指数表示を意味する。なお「e」は数学定数の一つの「ネイピア数」であり、自然対数の底として用いられる。

[0042] 表 2 に、上記「M50%」の測定値と式(2)で表される $F_n 2$ を整理して示す。

[0043] [表2]

表 2

鋼	40mm硬度 (HRC)	$F_n 1$	M50% (mm)	$F_n 2$	転動疲労寿命 (cycle)	摩耗量 (g)
1	31.1	31.2	5.6	5.1	1830898	0.320
2	32.3	32.4	8.3	10.1	2191425	0.312
3	36.6	37.1	13.6	16.0	3283349	0.268
4	39.3	38.7	16.5	15.5	4453779	0.242
5	38.6	38.1	10.6	11.2	4114188	0.241
6	37.3	37.8	6.3	7.2	3675793	0.249
7	38.9	38.7	14.2	16.7	4342381	0.225
8	37.8	36.6	16.2	14.5	3688978	0.247
9	39.6	39.2	15.7	14.3	4480886	0.241
10	35.0	34.4	15.5	14.6	2867978	0.279
11	25.4	26.2	3.8	3.3	814399	0.384
12	32.6	32.3	4.6	5.0	2138325	0.312
13	34.1	34.0	4.5	5.5	2583220	0.286
14	37.2	37.1	6.8	7.7	3602246	0.253
15	35.8	34.6	5.4	6.3	3089949	0.263
16	34.8	34.9	9.2	11.3	2785571	0.279
17	38.9	38.9	15.0	16.8	4258560	0.242
18	42.1	42.6	21.8	21.3	5621775	0.201
19	41.0	41.2	16.5	15.4	5092738	0.223
20	32.4	33.7	14.9	13.8	2085608	0.327
21	39.7	40.0	7.1	6.9	4587370	0.227
22	38.7	40.2	11.2	11.4	4266610	0.235
23	42.5	47.2	29.7	28.5	5892201	0.314
24	42.6	49.6	46.9	43.7	5675736	0.312
$F_n 1 = 2.7 + 29.5 \times C + 2.9 \times Si + 6.9 \times Mn + 10.8 \times Cr + 30.3 \times Mo + 44.3 \times V$ $F_n 2 = 0.76 \times \exp(0.05 \times C) \times \exp(1.35 \times Si) \times \exp(0.38 \times Mn) \times \exp(0.77 \times Cr) \times \exp(3.0 \times Mo) \times \exp(4.6 \times V)$						

[0044] 本発明者らは、次に、前記表 1 に示した鋼 1～24 を用いて、耐転動疲労性および耐摩耗性と、式(1)で表される $F_n 1$ との関係を調査した。

[0045] すなわち、各鋼について上記直径 160 mm の丸棒を 100 mm 長さに切断後、温度 900℃ で 30 分加熱後に油焼入れした試験片を作製した。

[0046] 鋼 1 ～ 24 について、先ず、上記のようにして作製した試験片の中心の部位から、転動疲労試験に用いる「車輪試験片」として図 4 (a) に示す形状の試験片を採取した。

[0047] 鋼 1 については、上記の直径 220 mm の丸棒を 100 mm 長さに切断後、900℃ で 30 分加熱後に油焼入れした試験片を作製し、その試験片の中央部から、転動疲労試験に用いる「レール試験片」として図 4 (b) に示す形状の試験片も採取した。

[0048] 同様に、鋼 1 ～ 24 について、上記直径 70 mm の丸棒を 100 mm 長さに切断後、900℃ で 30 分加熱後に油焼入れした試験片を作製した。この試験片の中心の部位から、摩耗試験に用いる「車輪試験片」として図 5 (a) に示す形状の試験片を採取した。

[0049] 鋼 1 については、上記の車輪試験片と同様の熱処理を実施した直径 70 mm で 100 mm 長さの丸棒試験片を作製し、その中心の部位から、摩耗試験に用いる「レール試験片」として図 5 (b) に示す形状の試験片も採取した。

[0050] 先ず、上記の鋼 1 ～ 24 の図 4 (a) に示す車輪試験片と、鋼 1 の図 4 (b) に示すレール試験片を用いて、図 6 に模式的に示す方法で転動疲労試験を実施した。

[0051] 転動疲労試験の具体的な条件は、ヘルツ応力：1100 MPa、すべり率：0.28%、回転速度：車輪側が1000 rpm、レール側が602 rpmであり、水潤滑下での試験とした。試験は振動加速度計で加速度をモニタリングしながら実施し、0.5 Gを検出した繰返し数を転動疲労寿命として評価した。なお、0.5 Gを基準としたのは、事前の予備試験で検出加速度と損傷状態の関係を評価した結果、0.5 Gを超えた場合には転動面に明らかに剥離が生じていることが確認できたためである。

[0052] 表 2 に、上記転動疲労寿命を併せて示す。また、図 7 に転動疲労寿命と式(

1)で表される $F_n 1$ の関係を示す。

[0053] なお、上記図7における「 $2. E + 0 6$ 」などは「 $2. 0 \times 1 0^6$ 」などを意味する。図7においても、鋼1をマーク「▲」で示した。

[0054] 図7に示すように、転動疲労寿命は式(1)で表される $F_n 1$ と相関を有し、 $F_n 1$ が34以上であれば、AARの「Class C」の鉄道車輪用鋼に相当する鋼1よりも40%以上転動疲労寿命が向上することが判明した。

[0055] さらに、前記の鋼1～24の図5(a)に示す車輪試験片と、鋼1の図5(b)に示すレール試験片を用いて、図8に模式的に示す方法で摩耗試験を実施した。なお、摩耗試験には西原式摩耗試験機を用いた。

[0056] 具体的な試験条件は、ヘルツ応力： 2200MPa 、すべり率：0.8%、回転速度：車輪側が776rpm、レール側が800rpmであり、繰返し数 5×10^5 回まで試験した後、試験前後の試験片の質量差から摩耗量を求めた。

[0057] 表2に、上記摩耗量を併せて示す。また、図9に摩耗量と式(1)で表される $F_n 1$ の関係を示す。図9においても、鋼1をマーク「▲」で示した。

[0058] 図9に示すように、組織がパーライト組織である限り、摩耗量は式(1)で表される $F_n 1$ に比例して減少し、 $F_n 1$ が34以上であれば、鋼1よりも10%以上摩耗量が減少し、耐摩耗性が向上することが判明した。

[0059] 一方、 $F_n 1$ が43を超えると前述のとおり少なくとも一部にベイナイト組織が形成される。そして、ベイナイト組織を含む場合には、 $F_n 1$ が増加しても摩耗量が減少せず、パーライト主体の組織の場合に比べて耐摩耗性が劣ることが確認できた。

[0060] 金鷹らは、鉄道総研報告、Vol. 19 (2005) No 9、p. 17で、白色層と呼ばれる焼入れ層の厚さが厚いほど亀裂深さが大きくなり、剥離（文中では「シェリング」と記載されているが、これは「スポーリング」のことである。）が生じやすくなることを報告している。

[0061] そこで、本発明者らは、スポーリングに及ぼす焼入れ性の影響についても詳細に検討した。

- [0062] 金鷹らの報告から、焼入れ性が大きくなるほど白色層の厚みが増し、き裂が発生して剥離寿命が低下することが予想されるため、白色層が形成された場合の焼入れ性とき裂発生寿命の関係を調査した。
- [0063] 具体的には、表 1 に記載の鋼 1、鋼 2、鋼 5、鋼 1 1、鋼 1 2 および鋼 1 4 の図 4 (a) に示す形状の「車輪試験片」、鋼 1 の図 4 (b) に示す形状の「レール試験片」を用いた。「車輪試験片」の試験面に剥離につながる分厚い白色層を YAG レーザーによって形成し、その後に転動疲労試験を実施して、き裂発生寿命（耐スポーリング性）を調べた。YAG レーザーの照射条件は、レーザー出力：2500W、送り速度：1.2m/min であり、レーザー照射後は空冷した。
- [0064] なお、転動疲労試験の具体的な条件は、ヘルツ応力：1100MPa、すべり率：0.28%、回転速度：車輪側が100rpm、レール側が60rpm であり、水潤滑下での試験とした。なお、転動数が2000回までは200回ごとに、2000回を超えた場合は2000回ごとに試験を止めて、目視で試験片の表面のき裂の有無を確認した。
- [0065] その結果、図 10 および図 11 に示すように、焼入れ性の指標となる「M50%」と相関のある前記の式(2)で表される F_n2 の増加に伴い白色層の厚みが増し、それに伴って、き裂発生寿命は急激に減少することが判明した。
- [0066] さらに、 F_n2 が 25 を超えると、最初の目視検査（つまり、転動数 200 回での目視検査）で既にき裂が確認できるほど、き裂発生寿命が極度に低下することも判明した。
- [0067] 上記の結果から、本発明者らは、鋼の化学組成を、前記の式(2)で表される F_n2 で 25 以下にすれば、剥離寿命、つまり、スポーリング発生寿命の極端な低下を避けることができると結論付けた。
- [0068] 本発明は、上記の知見に基づいて完成されたものであり、その要旨は、下記 (1) および (2) に示す車輪用鋼にある。
- [0069] (1) 質量%で、C：0.65～0.84%、Si：0.02～1.00%、Mn：0.50～1.90%、Cr：0.02～0.50%、V：0.

0.2～0.20%およびS:0.04%以下を含有するとともに、下記の式(1)で表される F_n1 が34～43、かつ式(2)で表される F_n2 が25以下であり、残部がFeおよび不純物からなり、不純物中のP、CuおよびNiがそれぞれ、P:0.05%以下、Cu:0.20%以下およびNi:0.20%以下である化学組成を有することを特徴とする、車輪用鋼。

$$F_n1 = 2.7 + 29.5 \times C + 2.9 \times Si + 6.9 \times Mn + 10.8 \times Cr + 30.3 \times Mo + 44.3 \times V \cdots (1)$$

$$F_n2 = 0.76 \times \exp(0.05 \times C) \times \exp(1.35 \times Si) \times \exp(0.38 \times Mn) \times \exp(0.77 \times Cr) \times \exp(3.0 \times Mo) \times \exp(4.6 \times V) \cdots (2)$$

上記の式(1)および式(2)におけるC、Si、Mn、Cr、MoおよびVは、その元素の質量%での含有量を意味する。

[0070] (2) Feの一部に代えて、質量%で、Mo:0.20%以下を含有することを特徴とする、上記(1)に記載の車輪用鋼。

[0071] (3) Feの一部に代えて、質量%で、Al:0.20%以下を含有することを特徴とする、上記(1)または(2)に記載の車輪用鋼。

[0072] 「不純物」とは、鉄鋼材料を工業的に製造する際に、原料としての鉱石、スクラップ、または製造環境などから混入するものを指す。

発明の効果

[0073] 本発明の車輪用鋼は、耐摩耗性、耐転動疲労性および耐スポーリング性のバランスに優れ、車輪に長い寿命を具備させることができる。具体的には、本発明の車輪用鋼を素材とする車輪は、AARの「Class C」の鉄道車輪用鋼を素材とする車輪と比較して、摩耗量が10～35%減少し、かつ転動疲労寿命が1.4～3.2倍に長寿命化するとともに、スポーリングも発生し難い。したがって、本発明の車輪用鋼は、走行距離の増加および積載荷重の増加という極めて過酷な環境下で使用される鉄道用車輪の素材として用いるのに極めて好適である。

図面の簡単な説明

[0074] [図1]車輪の一例として「一体車輪」について模式的に説明する図である。

[図2]鋼1～24について、水冷端から40mm位置のロックウェルC硬度である「40mm硬度」と式(1)で表される「 $F_n 1$ 」との関係を整理して示す図である。図中の「ベイナイト」は、一部にベイナイト組織が形成されたことを示す。

[図3]鋼1～24について、マルテンサイト組織分率が50%になるmm単位での水冷端からの距離である「M50%」と式(2)で表される「 $F_n 2$ 」との関係を整理して示す図である。

[図4]転動疲労試験に用いた「車輪試験片」と「レール試験片」の形状を示す図である。図中(a)が「車輪試験片」であり、(b)が「レール試験片」である。なお、図中の寸法の単位は「mm」である。

[図5]摩耗試験に用いた「車輪試験片」と「レール試験片」の形状を示す図である。図中(a)が「車輪試験片」であり、(b)が「レール試験片」である。なお、図中の寸法の単位は「mm」である。

[図6]図4(a)に示す車輪試験片と、図4(b)に示すレール試験片を用いた転動疲労試験の方法について模式的に説明する図である。

[図7]転動疲労寿命と式(1)で表される「 $F_n 1$ 」との関係を整理して示す図である。図中の「ベイナイト」は、一部にベイナイト組織が形成されたことを示す。

[図8]図5(a)に示す車輪試験片と、図5(b)に示すレール試験片を用いた摩耗試験の方法について模式的に説明する図である。

[図9]摩耗量と式(1)で表される「 $F_n 1$ 」との関係を整理して示す図である。図中の「ベイナイト」は、一部にベイナイト組織が形成されたことを示す。

[図10]鋼1、鋼2、鋼5、鋼11、鋼12および鋼14について、白色層の厚みと式(2)で表される「 $F_n 2$ 」との関係を整理して示す図である。

[図11]鋼1、鋼2、鋼5、鋼11、鋼12および鋼14について、き裂発生寿命と式(2)で表される「 $F_n 2$ 」との関係を整理して示す図である。

[図12]車輪にいわゆる「踏面焼入れ」を行うために実施例で用いた装置を説明する図である。

[図13]実施例において作製した車輪のブリネル硬度の測定位置を説明する図である。

[図14]実施例において作製した車輪のリム部ミクロ組織を調査した位置を説明する図である。

[図15]実施例において作製した車輪のボス部ミクロ組織を調査した位置を説明する図である。

[図16]実施例において作製した車輪から摩耗試験片、転動疲労試験片およびジョミニ試験片を採取した位置を説明する図である。図中「a」、「b」および「c」で示す位置を基準にして、それぞれ、摩耗試験片、転動疲労試験片およびジョミニ試験片を採取した。

発明を実施するための形態

[0075] 以下、本発明の各要件について詳しく説明する。なお、各元素の含有量の「%」は「質量%」を意味する。

[0076] C : 0.65 ~ 0.84 %

Cは、硬度を高めて、耐摩耗性および耐転動疲労性を向上させる。さらにCは、含有量の増加に伴う焼入れ性の増加量が少ないため、耐スポーリング性を低下させずに硬度を高めることができる元素である。Cの含有量が0.65%を下回る場合には十分な硬度が得られず、さらにフェライトの面積率が増加して耐摩耗性が低下する。一方、Cの含有量が0.84%を超えると、車輪ボス部に過共析セメントライトが発生して、靱性および疲労寿命を極度に低下させることがあり、安全上好ましくない。そこで、Cの含有量を0.65 ~ 0.84%とした。Cの含有量は0.68%以上とすることが好ましく、また0.82%以下とすることが好ましい。

[0077] Si : 0.02 ~ 1.00 %

Siは、パーライトのラメラの間隔を減少させるとともに、パーライト組織中のフェライトを固溶強化することによって、硬度を高める元素である。

Siの含有量が0.02%を下回る場合には、前記の効果が不十分である。一方、Siの含有量が1.00%を超えると、靱性が低下し、さらに焼入れ性が増加して耐スポーリング性も低下する。そのため、Siの含有量を0.02~1.00%とした。また、Siは硬度を増加させる効果が小さいため、高硬度を得るためには多量の添加が必要で、結果として焼入れ性を増加させやすい。そのため、Siの含有量は0.90%以下とすることが好ましく、0.50%以下、さらには0.40%未満とするのがより好ましい。

[0078] Mn : 0.50~1.90%

Mnは、パーライトのラメラ間隔を減少させるとともに、パーライト組織中のフェライトを固溶強化することによって、硬度を高める元素である。さらにMnは、MnSを形成して鋼中のSを捕捉し、粒界脆化を抑制する作用も有する。Mnの含有量が0.50%未満では前記の効果、なかでも、Sの捕捉効果が不十分となる。一方、Mnの含有量が1.90%を超えると、ベイナイト組織が形成されて耐摩耗性が低下し、さらに焼入れ性が増加して耐スポーリング性も低下する。そこでMnの含有量を0.50~1.90%とした。Mnの含有量は1.40%以下とすることが好ましい。

[0079] Cr : 0.02~0.50%

Crは、パーライトのラメラ間隔を減少させることにより、パーライトの硬度を顕著に増加させる効果がある。Crの含有量が0.02%未満では、その効果が十分ではない。一方、Crの含有量が0.50%を超えると、加熱時に炭化物がオーステナイト中に固溶しにくくなり、加熱条件によっては未固溶の炭化物が形成されて硬度、靱性、疲労強度等を低下させる可能性がある。さらに焼入れ性が増加して耐スポーリング性が低下する。そこでCrの含有量を0.02~0.50%とした。Crの含有量は0.05%以上とすることが好ましく、また0.45%以下とすることが好ましい。

[0080] V : 0.02~0.20%

Vは、パーライト中のフェライトにV炭化物として析出し、パーライトの硬度を顕著に増加させる効果がある。Vの含有量が0.02%未満では、そ

の効果が十分ではない。一方、0.2%を超える量のVを含有させても通常の熱処理では硬度が飽和してコストが嵩むことに加えて、焼入れ性が増加して耐スポーリング性が低下する。そこでVの含有量を0.02~0.20%とした。Vの含有量は0.03%以上とすることが好ましく、また0.15%以下とすることが好ましい。

[0081] S : 0.04%以下

Sは、鋼に含有される不純物である。また、Sを積極的に含有させた場合、硬さおよび焼入れ性に及ぼす影響は小さいが、被削性を向上させる効果を有する。Sの含有量が0.04%を超えると、靱性が低下する。そのため、Sの含有量を0.04%以下とした。Sの含有量は、0.03%以下とすることが好ましい。なお、被削性の向上効果を得る場合には、Sの含有量は0.005%以上とすることが好ましい。

[0082] $F_{n1} : 34 \sim 43$

本発明の車輪用鋼は、

$$F_{n1} = 2.7 + 29.5 \times C + 2.9 \times Si + 6.9 \times Mn + 10.8 \times Cr + 30.3 \times Mo + 44.3 \times V \cdots (1)$$

の式(1)で表される F_{n1} が34~43でなければならない。ただし、式(1)におけるC、Si、Mn、Cr、MoおよびVは、その元素の質量%での含有量を意味する。

[0083] F_{n1} が34未満では、耐摩耗性および耐転動疲労性が、AARの「Class C」の鉄道車輪用鋼を素材とする場合と比較してほとんど向上せず、場合によっては「Class C」より低くなる。このため、走行距離の増加および積載荷重の増加という極めて過酷な環境下で使用される鉄道用車輪の素材として用いることは難しい。

[0084] 一方、 F_{n1} が43を超えると、パーライト主体の組織を得ることが困難になって、耐摩耗性が低下する。さらに硬度が上昇しすぎるため、靱性が低下する。

[0085] F_{n1} は、34以上ならば、AARの「Class C」の鉄道車輪用鋼

を素材とする場合と比較して、転動疲労寿命は40%以上増加するが、35以上ならば50%以上増加し、36以上ならば70%以上の増加が見込まれるため、 F_{n1} は35以上が好ましく、36以上ではさらに好ましい。また43以下であることが好ましい。

[0086] F_{n2} : 25以下

本発明の車輪用鋼は、

$$F_{n2} = 0.76 \times \exp(0.05 \times C) \times \exp(1.35 \times Si) \times \exp(0.38 \times Mn) \times \exp(0.77 \times Cr) \times \exp(3.0 \times Mo) \times \exp(4.6 \times V) \cdots (2)$$

の式(2)で表される F_{n2} が25以下でなければならない。ただし、(2)式におけるC、Si、Mn、Cr、MoおよびVは、その元素の質量%での含有量を意味する。

[0087] F_{n2} が25を超えると、焼入れ性が高くなって、耐スポーリング性の低下をきたす。 F_{n2} は、20以下であることが好ましく、15以下であることがさらに好ましい。

[0088] なお、 F_{n2} が3未満の場合は、式(1)で表される F_{n1} を34以上にすることが困難になる。このため、 F_{n2} は3以上であることが好ましい。

[0089] 本発明の車輪用鋼の一つは、上記元素のほか、残部がFeおよび不純物からなる化学組成を有するものである。

[0090] 本発明においては、不純物中のP、CuおよびNiの含有量はそれぞれ、 P : 0.05%以下、 Cu : 0.20%以下および Ni : 0.20%以下でなければならない。

[0091] 以下、このことについて説明する。

[0092] P : 0.05%以下

P は、鋼に含有される不純物である。 P の含有量が0.05%を超えると、靱性が低下する。したがって、不純物中の P の含有量を0.05%以下とした。より好ましい P の含有量は0.025%以下である。

[0093] Cu : 0.20%以下

Cuは、鋼に含有される不純物である。Cuの量が0.20%を超えると、製造時の表面疵の発生が増加し、さらに焼入れ性が増加して耐スポーリング性が低下する。したがって、不純物中のCuの含有量を0.20%以下とした。より好ましいCuの含有量は0.10%以下である。

[0094] Ni : 0.20%以下

Niは、鋼に含有される不純物である。Niの量が0.20%を超えると、焼入れ性が増加して耐スポーリング性が低下する。したがって、不純物中のNiの含有量を0.20%以下とした。より好ましいNiの含有量は0.10%以下である。

[0095] 本発明の車輪用鋼の化学組成の他の一つは、必要に応じてFeの一部に代えて、下記の量のMoを含有してもよい。

[0096] Mo : 0.20%以下

Moは、パーライトの硬度を増加させる作用を有するので、含有させてもよい。しかしながら、Moの含有量が0.20%を超えると、ベイナイト組織が形成されて耐摩耗性が低下し、さらに焼入れ性が増加して耐スポーリング性も低下する。したがって、含有させる場合のMoの量を0.20%以下とした。なお、含有させる場合のMoの量は0.07%以下であることが好ましい。

[0097] 一方、前記したMoの効果を安定して得るためには、Moの量は0.02%以上であることが好ましい。

[0098] また、本発明の車輪用鋼の化学組成の他の一つは、必要に応じてFeの一部に代えて、下記の量のAlを含有してもよい。

[0099] Al : 0.20%以下

Alは、結晶粒を微細化して靱性を向上する効果を有するので、含有させてもよい。しかし、Alの含有量が0.20%を超えると、粗大な介在物が多くなり、靱性および疲労強度を低下させる。したがって、含有させる場合のAlの量を0.20%以下とした。より好ましいAlの量は0.15%以下である。

[0100] 一方、A I の結晶粒を微細化する効果を安定して得るためには、A I の量は0.002%以上とすることが好ましい。

[0101] 本発明の車輪用鋼を素材とする車輪の組織は、リム部についてはパーライト組織の面積率が95%以上であることが望ましく、100%パーライト組織であることが最も望ましい。その理由はフェライト、ベイナイト等のパーライト以外の組織は耐摩耗性が低いためであり、パーライト以外の組織の合計面積率が5%以下であることが望ましい。さらに、過共析セメンタイトが析出していない組織が望ましい。その理由は、過共析セメンタイトの析出が耐転動疲労性を低下させるためである。

[0102] ボス部についても、リム部と同様の組織であることが望ましいが、パーライト以外の組織の面積率が5%を超えても特に問題はない。しかし、過共析セメンタイトが析出していない組織が望ましい。その理由は、過共析セメンタイトの析出が靱性および疲労寿命の極度の低下を招く場合があるためであり、少なくとも光学顕微鏡で観察される過共析セメンタイトの形成は避けなければならない。

[0103] 本発明の車輪用鋼を素材とする車輪は、例えば、下記〈1〉～〈3〉に述べる処理を順に施すことによって製造することができる。〈3〉の処理の後に焼戻し処理を行ってもよい。

[0104] 〈1〉鋼の溶製および鑄造：

電気炉、転炉などによって溶製した後、鑄造して鋼塊にする。なお、鋼塊は連続鑄造による鑄片、鑄型に鑄込まれたインゴットのいずれであっても構わない。

[0105] 〈2〉車輪への成形：

所定の車輪形状とするために、鋼塊から直接に、あるいは鋼塊を一端鋼片に加工した後に、熱間鍛造、機械加工など適宜の方法で成形する。なお、鑄造によって直接車輪形状にしても構わないが、熱間鍛造することが望ましい。

[0106] 〈3〉焼入れ：

「踏面焼入れ法」のような、リム部に圧縮残留応力が発生する焼入れ方法を採用する。なお、焼入れに際しての加熱温度は、 A_{c3} 点～(A_{c3} 点+250℃)とすることが好ましい。加熱温度が A_{c3} 点未満では、オーステナイトに変態せず、加熱後の冷却によって硬度の高いパーライトを得ることができない場合があり、一方、(A_{c3} 点+250℃)を超えると、結晶粒が粗大化して靱性が低下する場合があって、車輪の性能上好ましくない。

[0107] 加熱後の冷却は、車輪の寸法、設備などを勘案して、車輪に上述した望ましい組織が得られるように、水冷、油冷、ミスト冷却、空気冷却など、適宜の方法で行うことが好ましい。

[0108] 以下、実施例によって本発明をより具体的に説明するが、本発明はこれらの実施例に限定されるものではない。

実施例

[0109] 表3に示す化学成分を有する鋼25～46を電気炉にて溶解した後、直径513mmの鋳型に鋳造してインゴットを作製した。

[0110] 表3中の鋼28、鋼29、鋼31、鋼33、鋼34および鋼38～46は、化学組成が本発明で規定する範囲内にある本発明例の鋼である。一方、鋼25～27、鋼30、鋼32および鋼35～37は、化学組成が本発明で規定する条件から外れた比較例の鋼である。

[0111] 上記の比較例の鋼のうちで鋼25は、AARの「Class C」の鉄道車輪用鋼に相当する鋼である。

[0112]

[表3]

表 3

鋼	化 学 組 成 (質量%)						残 部 : F e お よ び 不 純 物						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Fe1	Fe2
2 5	0.69	0.29	0.78	0.012	0.008	0.01	0.02	0.09	-	*	0.024	* 30.25	4.7
2 6	*0.58	0.31	0.82	0.014	0.009	0.02	0.03	0.07	-	0.16	0.024	34.21	10.1
2 7	*0.87	0.29	0.81	0.011	0.008	0.02	0.02	0.07	-	*	0.015	35.55	4.7
2 8	0.72	0.98	0.83	0.016	0.009	0.03	0.02	0.18	-	0.06	0.023	37.11	17.3
2 9	0.73	0.25	1.39	0.014	0.009	0.03	0.03	0.11	-	0.08	0.019	39.28	8.3
3 0	0.71	0.97	0.88	0.017	0.010	0.02	0.03	0.43	0.02	0.09	0.027	41.77	* 25.6
3 1	0.73	0.28	0.82	0.013	0.012	0.03	0.02	0.17	0.07	0.09	0.018	38.65	9.4
3 2	0.71	0.32	0.83	0.014	0.009	0.02	0.02	0.07	*0.30	*	0.014	40.15	12.1
3 3	0.75	0.31	0.83	0.013	0.011	0.02	0.02	0.14	-	0.04	0.015	34.74	6.2
3 4	0.71	0.29	0.81	0.014	0.008	0.02	0.03	0.09	-	0.11	0.016	35.92	7.9
3 5	0.66	0.29	0.68	0.013	0.012	0.03	0.02	0.05	-	0.03	0.023	* 29.57	5.1
3 6	0.79	0.31	0.80	0.011	0.009	0.02	0.03	0.20	0.10	0.18	0.015	* 45.59	16.5
3 7	0.71	*1.02	0.82	0.015	0.007	0.03	0.02	0.07	0.10	0.10	0.017	40.48	* 27.1
3 8	0.74	0.80	0.83	0.014	0.008	0.03	0.02	0.44	0.02	0.11	0.037	42.81	22.1
3 9	0.75	0.48	0.82	0.014	0.009	0.02	0.03	0.42	-	0.07	0.031	39.51	11.1
4 0	0.76	0.21	0.81	0.015	0.008	0.03	0.02	0.39	-	0.10	0.034	39.96	8.6
4 1	0.76	0.81	0.79	0.013	0.032	0.03	0.02	0.18	-	0.11	0.042	39.74	17.1
4 2	0.72	0.48	0.83	0.012	0.037	0.03	0.03	0.31	-	0.08	0.024	37.95	10.7
4 3	0.73	0.48	0.80	0.014	0.012	0.09	0.02	0.28	-	0.09	-	38.16	10.8
4 4	0.71	0.47	0.83	0.015	0.010	0.02	0.08	0.26	-	0.09	-	37.53	10.6
4 5	0.73	0.47	0.80	0.017	0.008	0.02	0.02	0.30	-	0.09	0.092	38.35	10.8
4 6	0.72	0.47	0.81	0.014	0.011	0.03	0.02	0.10	0.05	0.05	-	35.70	9.0
F n 1 = 2 . 7 + 2 9 . 5 × C + 2 . 9 × S i + 6 . 9 × M n + 1 0 . 8 × C r + 3 0 . 3 × M o + 4 4 . 3 × V													
F n 2 = 0 . 7 6 × e x p (0 . 0 5 × C) × e x p (1 . 3 5 × S i) × e x p (0 . 3 8 × M n) × e x p (0 . 7 7 × C r) × e x p (3 . 0 × M o) × e x p (4 . 6 × V)													
*印は本発明で規定する条件から外れていることを示す。													

[0113] 各鋼のインゴットを長さ300mmに切断し、1200℃に加熱した後、通常の方法で熱間鍛造して直径965mmの車輪を製造した。なお、上記車輪はAARのM-107/M-207規格に記載の「AAR TYPE: B-38」の形状を有するものである。

[0114] 次いで、各車輪を900℃で2時間加熱した後、図12に示す装置を用いて、車輪を回転させながらノズルから水を噴射して冷却する手法（いわゆる「踏面焼入れ」）で熱処理した。

[0115] なお、上記の熱処理後に焼戻し処理（500℃で2時間保持してから大気中で冷却する処理）を実施した。

[0116] このようにして製造した車輪について、リム部の硬度試験、リム部およびボス部の組織調査、摩耗試験、転動疲労試験およびジョミニー試験を実施した。なお、各試験について、鋼25を用いた試験記号Aにおける試験結果を基準とした。

[0117] [1] リム部の硬度試験：

各鋼について、図13に示すように、リム部の踏面中央部の踏面から40mm位置におけるブリネル硬度（以下、「HBW」という。）を測定した。

[0118] [2] リム部の組織調査：

各鋼について、図14に示すように、リム部の踏面中央部の踏面から40mm位置のミクロ組織を調査した。なお、ナイトールで腐食し、400倍の倍率で光学顕微鏡観察して組織を同定した。

[0119] なお、組織にフェライトまたはベイナイト組織を含む場合にはその面積率を測定し、5%以上含まれる場合は、フェライトまたはベイナイトを含む組織と認定した。フェライトまたはベイナイトを含む場合は、後述する表4中には、「P+F」または「P+B」と記載した。

[0120] [3] ボス部の組織調査：

各鋼について、図15に示すように、ボス部中央位置のミクロ組織を調査した。なお、ナイトールで腐食し、リム部と同様にして組織を観察した。

[0121] [4] 摩耗試験：

各鋼について、図16に示すように、リム部の踏面中央部の踏面から40mm位置（図中「a」で示す位置）を基準にして、摩耗試験に用いる「車輪試験片」（図5（a）に示す形状の試験片）を採取した。

[0122] 上記の鋼25～46の「車輪試験片」と先の鋼1の「レール試験片」を用

いて、先の鋼 1 ～ 2 4 の場合と同じ条件で西原式摩耗試験機を用いた摩耗試験を行って摩耗量を求めた。

[0123] 具体的には、ヘルツ応力：2 2 0 0 M P a、すべり率：0. 8 %、回転速度：車輪側が 7 7 6 r p m、レール側が 8 0 0 r p m の条件で摩耗試験を行い、繰返し数 5×10^5 回まで試験した後、試験前後の試験片の質量差から摩耗量を求めた。

[0124] [5] 転動疲労試験：

各鋼について、図 1 6 に示すように、リム部の踏面中央部の踏面から 4 0 m m 位置（図中「b」で示す位置）を基準にして、転動疲労試験に用いる「車輪試験片」（図 4（a）に示す形状の試験片）を採取した。

[0125] 上記の「車輪試験片」を用いて、先の鋼 1 ～ 2 4 の場合と同じ条件で転動疲労試験を行って転動疲労寿命を求めた。

[0126] 具体的には、上記鋼 2 5 ～ 4 6 の「車輪試験片」と先の鋼 1 の「レール試験片」を用いて、ヘルツ応力：1 1 0 0 M P a、すべり率：0. 2 8 %、回転速度：車輪側が 1 0 0 0 r p m、レール側が 6 0 2 r p m、水潤滑下の条件で転動疲労試験を行い、加速度計で 0. 5 G を検出した繰返し数を転動疲労寿命として評価した。

[0127] [6] ジョミニー試験：

各鋼について、図 1 6 に示すように、リム部の踏面中央部の踏面から 4 0 m m 位置（図中「c」で示す位置）を基準にして、ジョミニー試験片を採取し、先の鋼 1 ～ 2 4 の場合と同じ条件でジョミニー試験を行って「M 5 0 %」を求めた。

[0128] 具体的には、大気雰囲気中、9 0 0 °C で 3 0 分のオーステナイト化後、一端焼入れを行い、次いで、1. 0 m m の平行切削を施して、水冷端から 5 0 m m 位置までの硬さ分布を測定し、前述と同様の方法で「M 5 0 %」を求めた。

[0129] 表 4 に各試験結果をまとめて示す。

[0130]

[表4]

表 4

試験 記号	銅	リム部の硬度 (HBW)	リム部の組織		ボス部の組織		摩耗量 (g)	転動疲労寿命 (cycle)	M50% (mm)	備考
			相	(過共析θ)	相	(過共析θ)				
A	*25	318	P	無し	P	無し	0.318	1865869	5.2	基準
B	*26	351	P+F	無し	P+F	無し	0.343	2773396	11.4	比較例
C	*27	360	P	無し	P	有り	0.274	3205980	5.3	比較例
D	28	363	P	無し	P	無し	0.263	3363547	17.2	本発明例
E	29	392	P	無し	P	無し	0.212	4623395	7.8	本発明例
F	*30	405	P	無し	P	無し	0.219	5118336	25.9	比較例
G	31	376	P	無し	P	無し	0.239	4182543	8.4	本発明例
H	*32	391	P+B	無し	P+B	無し	0.311	4706338	11.7	比較例
I	33	348	P	無し	P	無し	0.265	3129876	6.9	本発明例
J	34	373	P	無し	P	無し	0.256	3848436	9.0	本発明例
K	*35	308	P	無し	P	無し	0.331	1722439	5.5	比較例
L	*36	415	P+B	無し	P+B	無し	0.327	5777157	18.3	比較例
M	*37	402	P	無し	P	無し	0.208	5280593	27.8	比較例
N	38	401	P	無し	P	無し	0.202	5466597	23.6	本発明例
O	39	385	P	無し	P	無し	0.221	4212039	11.3	本発明例
P	40	389	P	無し	P	無し	0.214	4975350	9.5	本発明例
Q	41	385	P	無し	P	無し	0.215	4458924	17.2	本発明例
R	42	382	P	無し	P	無し	0.238	3975456	11.4	本発明例
S	43	375	P	無し	P	無し	0.239	4373751	11.9	本発明例
T	44	371	P	無し	P	無し	0.245	3864426	11.5	本発明例
U	45	378	P	無し	P	無し	0.247	3808409	10.2	本発明例
V	46	359	P	無し	P	無し	0.271	3123496	10.6	本発明例

リム部の組織欄およびボス部の組織欄における「P」、「F」、「B」および「θ」はそれぞれ、パーライト、フェラ、ベイナイトおよびセメンタイトを意味する。
*印は本発明で規定する条件から外れていることを示す。

- [0131] 表4から明らかなように、化学組成が本発明で規定する条件を満たす鋼を用いた本発明例の試験記号D、試験記号E、試験記号G、試験記号I、試験記号Jおよび試験記号N～Vの場合、AARの「Class C」の鉄道車輪用鋼に相当する鋼25を用いた基準の試験記号Aに比べて耐摩耗性および耐転動疲労性に優れていた。
- [0132] 上記本発明例の各試験記号で用いた鋼のFn2はいずれも25を下回って小さかった。このため、焼入れ性が低く、耐スポーリング性に優れていると予想される。
- [0133] これに対して、Cの含有量が0.58%と低く、本発明で規定する条件から外れた鋼26を用いた比較例の試験記号Bの場合は、組織に5%以上のフェライトが形成されて、摩耗量が多かった。
- [0134] Cの含有量が0.87%と高く、Vを含有していない、本発明で規定する条件から外れた鋼27を用いた比較例の試験記号Cの場合は、ボス部に過共析セメンタイトが観察された。
- [0135] Fn2が25.6と高く、本発明で規定する条件から外れた鋼30を用いた比較例の試験記号Fの場合は、焼入れ性が高い。したがって、耐スポーリング性に劣ると予想される。
- [0136] Moの含有量が0.30%と高く、Vを含有していない、本発明で規定する条件から外れた鋼32を用いた比較例の試験記号Hの場合は、組織に5%以上のベイナイトが形成されたので、摩耗量が多かった。
- [0137] Fn1が29.57と低く、本発明で規定する条件から外れた鋼35を用いた比較例の試験記号Kの場合は、リム部の硬度がHBWで308と低くなったので、摩耗量が大きくなった。さらに、転動疲労寿命も短かった。
- [0138] Fn1が45.59と高く、本発明で規定する条件から外れた鋼36を用いた比較例の試験記号Lの場合は、組織に5%以上のベイナイトが形成されたので、摩耗量が多かった。
- [0139] Siの含有量およびFn2がそれぞれ、1.02%および27.1と高く、本発明で規定する条件から外れた鋼37を用いた比較例の試験記号Mの場

合は、焼入れ性が高い。したがって、耐スポーリング性に劣ると予想される。

産業上の利用可能性

[0140] 本発明の車輪用鋼は、耐摩耗性、耐転動疲労性および耐スポーリング性のバランスに優れ、車輪に長い寿命を具備させることができる。具体的には、本発明の車輪用鋼を素材とする車輪は、AARの「Class C」の鉄道車輪用鋼を素材とする車輪と比較して、摩耗量が10～35%減少し、かつ転動疲労寿命が1.4～3.2倍に長寿命化するとともに、スポーリングも発生し難い。したがって、本発明の車輪用鋼は、走行距離の増加および積載荷重の増加という極めて過酷な環境下で使用される鉄道用車輪の素材として用いるのに極めて好適である。

請求の範囲

[請求項1] 質量%で、C : 0.65～0.84%、Si : 0.02～1.00%、Mn : 0.50～1.90%、Cr : 0.02～0.50%、V : 0.02～0.20%およびS : 0.04%以下を含有するとともに、下記の式(1)で表される F_{n1} が34～43、かつ式(2)で表される F_{n2} が25以下であり、残部がFeおよび不純物からなり、不純物中のP、CuおよびNiがそれぞれ、P : 0.05%以下、Cu : 0.20%以下およびNi : 0.20%以下である化学組成を有することを特徴とする、車輪用鋼。

$$F_{n1} = 2.7 + 29.5 \times C + 2.9 \times Si + 6.9 \times Mn + 10.8 \times Cr + 30.3 \times Mo + 44.3 \times V \cdots (1)$$

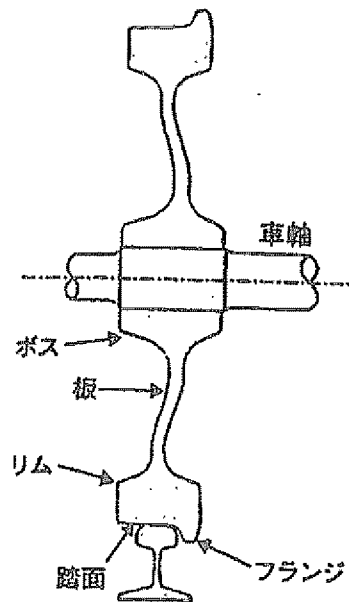
$$F_{n2} = 0.76 \times \exp(0.05 \times C) \times \exp(1.35 \times Si) \times \exp(0.38 \times Mn) \times \exp(0.77 \times Cr) \times \exp(3.0 \times Mo) \times \exp(4.6 \times V) \cdots (2)$$

上記の式(1)および式(2)におけるC、Si、Mn、Cr、MoおよびVは、その元素の質量%での含有量を意味する。

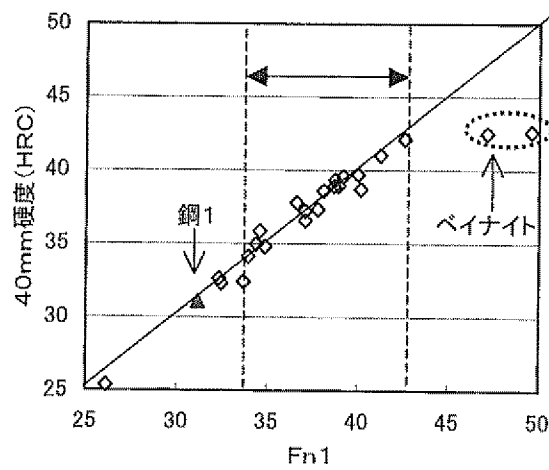
[請求項2] Feの一部に代えて、質量%で、Mo : 0.20%以下を含有することを特徴とする、請求項1に記載の車輪用鋼。

[請求項3] Feの一部に代えて、質量%で、Al : 0.20%以下を含有することを特徴とする、請求項1または2に記載の車輪用鋼。

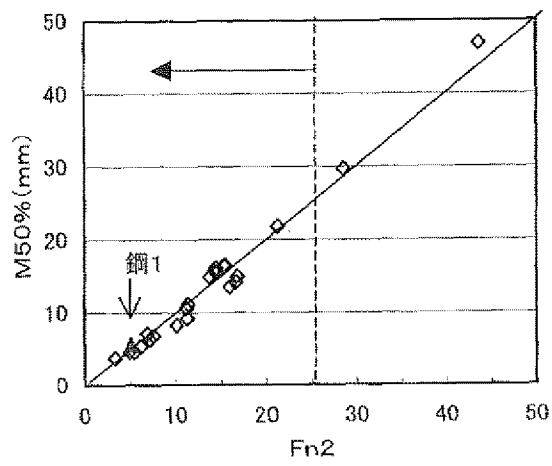
[図1]



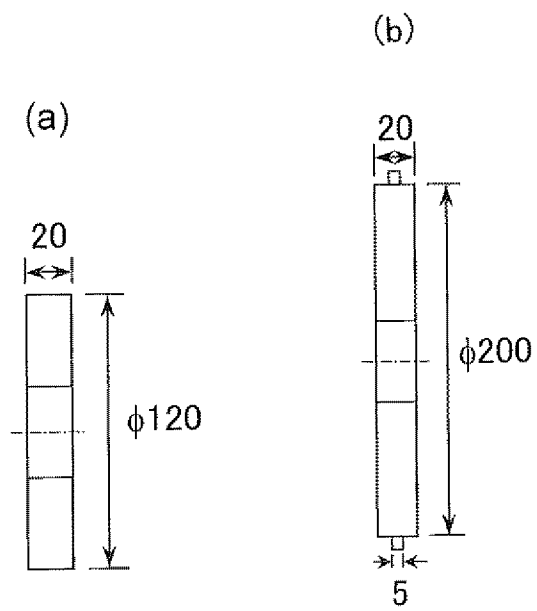
[図2]



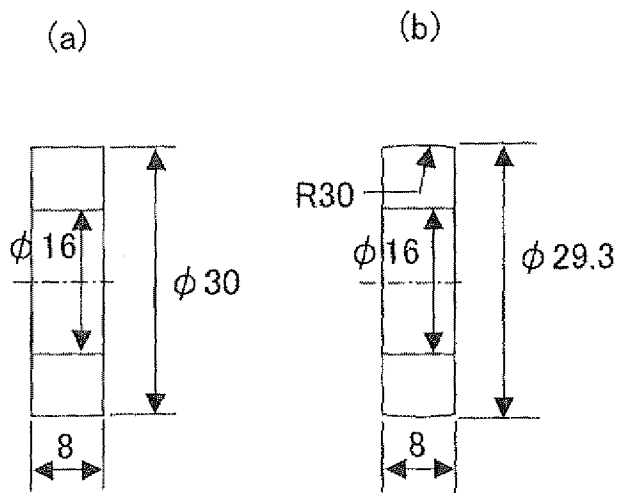
[図3]



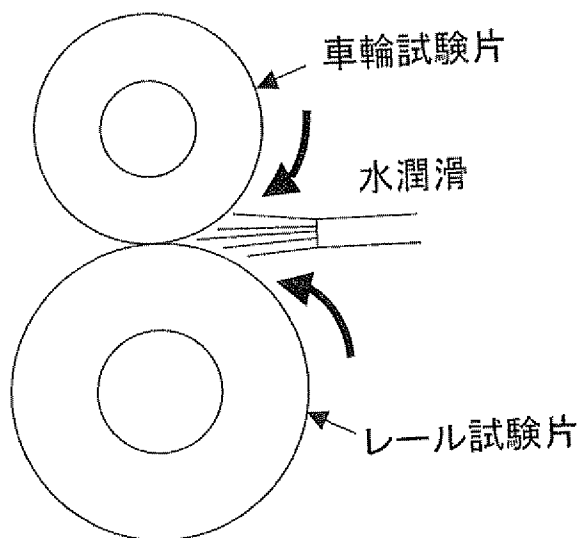
[図4]



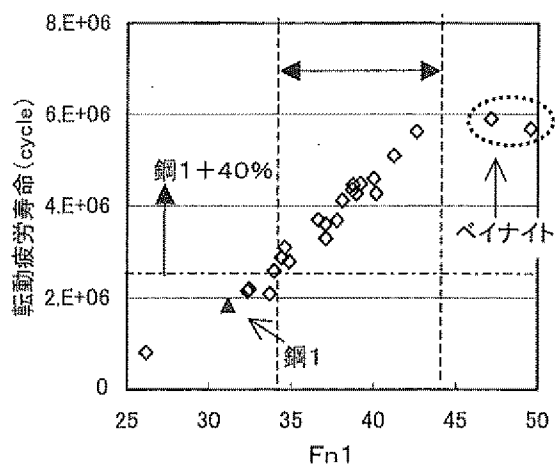
[図5]



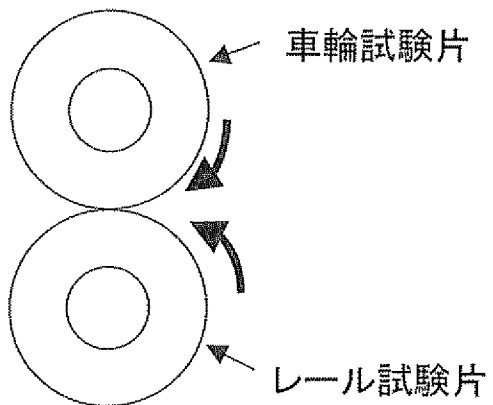
[図6]



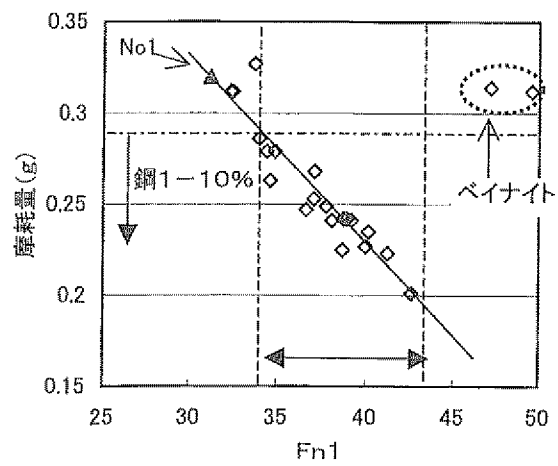
[図7]



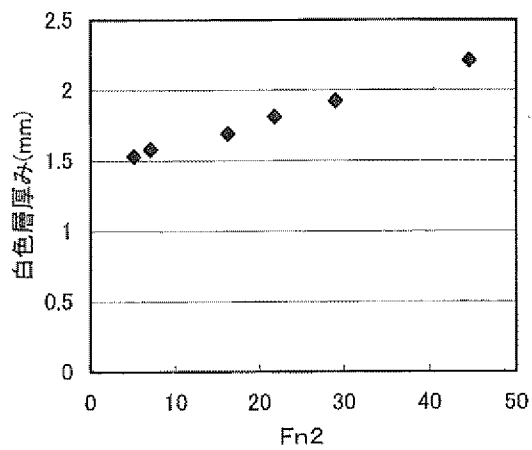
[図8]



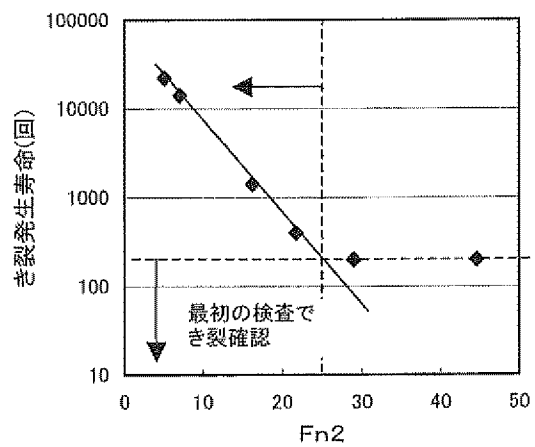
[図9]



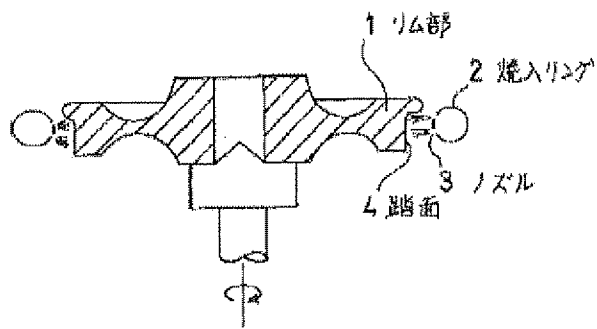
[図10]



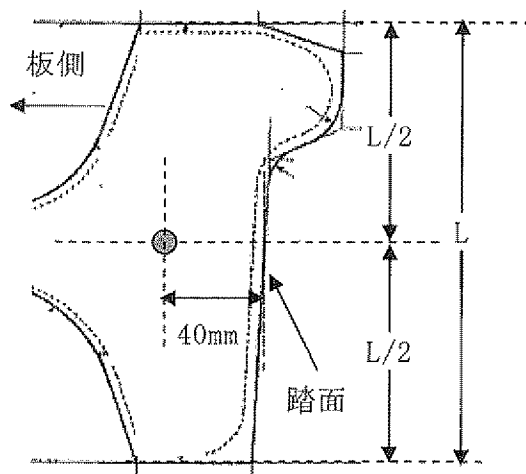
[図11]



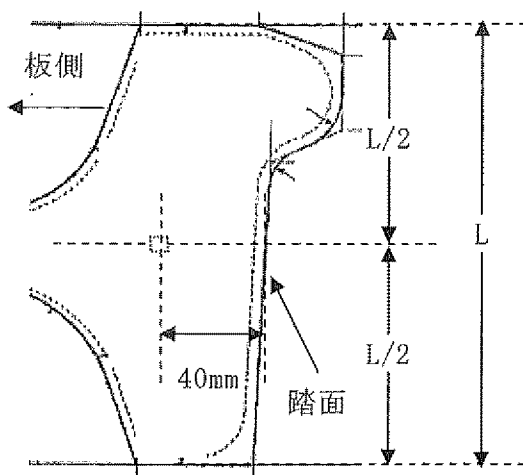
[図12]



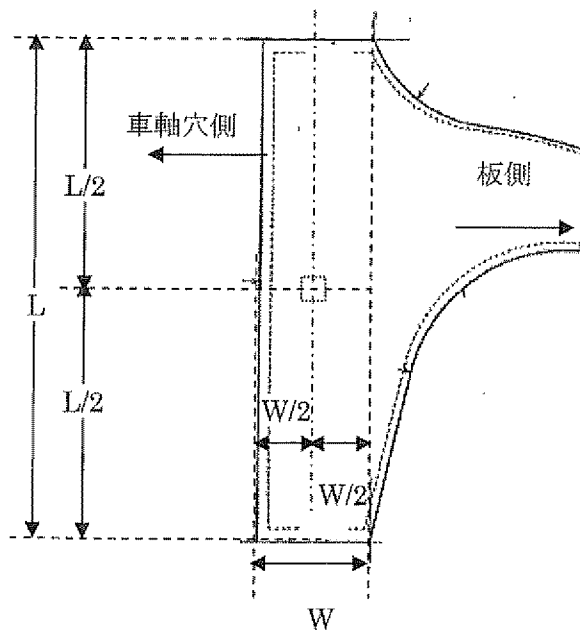
[図13]



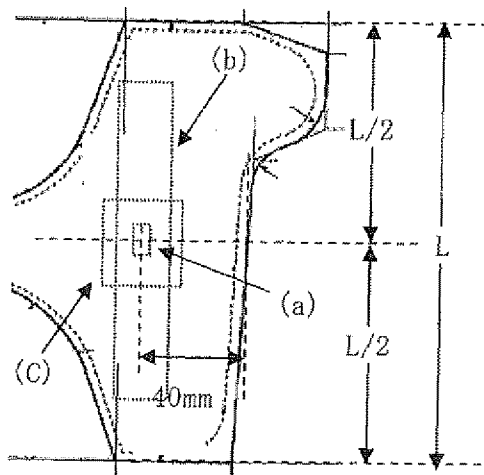
[図14]



[図15]



[図16]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/076695

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C22C38/00 (2006.01) i, C22C38/38 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C22C38/00, C22C38/38

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2012
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2012	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2012

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 57-143469 A (Sumitomo Metal Industries, Ltd.), 04 September 1982 (04.09.1982), claims; tables 1 to 2 (Family: none)	1 2-3
Y	JP 2005-350769 A (Sumitomo Metal Industries, Ltd.), 22 December 2005 (22.12.2005), claims; paragraphs [0034], [0037] & US 2005/0268995 A1 & CA 2507286 A	2-3
A	JP 63-277721 A (NKK Corp.), 15 November 1988 (15.11.1988), claims; table 1 (Family: none)	1-3

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
03 February, 2012 (03.02.12)

Date of mailing of the international search report
14 February, 2012 (14.02.12)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/076695

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 54-017316 A (Fried Krupp Huettenwerke AG.), 08 February 1979 (08.02.1979), claims & US 4230488 A & GB 2001343 A & DE 2730045 B & FR 2396091 A & BE 868654 A & CH 636906 A & AT 476378 A & NL 7806900 A & SE 7807361 A & ES 470692 A & BR 7804209 A & IT 1096854 A & ZA 7803212 A & LU 79904 A & IT 1096854 B & SE 425802 B & IT 7825123 A0	1-3

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））
Int.Cl. C22C38/00(2006.01)i, C22C38/38(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. C22C38/00, C22C38/38

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 2 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 2 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 2 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X Y	JP 57-143469 A（住友金属工業株式会社）1982.09.04, 特許請求の範囲、第1表－第2表（ファミリーなし）	1 2-3
Y	JP 2005-350769 A（住友金属工業株式会社）2005.12.22, 【特許請求の範囲】、【0034】、【0037】 & US 2005/0268995 A1 & CA 2507286 A	2-3
A	JP 63-277721 A（日本鋼管株式会社）1988.11.15, 特許請求の範囲、第1表（ファミリーなし）	1-3

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	の日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献
--	---

国際調査を完了した日

0 3 . 0 2 . 2 0 1 2

国際調査報告の発送日

1 4 . 0 2 . 2 0 1 2

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（I S A / J P）
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

小谷内 章

電話番号 03-3581-1101 内線 3435

4 K

3 4 4 0

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 54-017316 A (フリード・クルツプ・ヒュテンベルケ・アクチエ ンゲゼルシャフト) 1979.02.08, 特許請求の範囲 & US 4230488 A & GB 2001343 A & DE 2730045 B & FR 2396091 A & BE 868654 A & CH 636906 A & AT 476378 A & NL 7806900 A & SE 7807361 A & ES 470692 A & BR 7804209 A & IT 1096854 A & ZA 7803212 A & LU 79904 A & IT 1096854 B & SE 425802 B & IT 7825123 A0	1-3