

(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  
2022年4月7日(07.04.2022)



(10) 国際公開番号

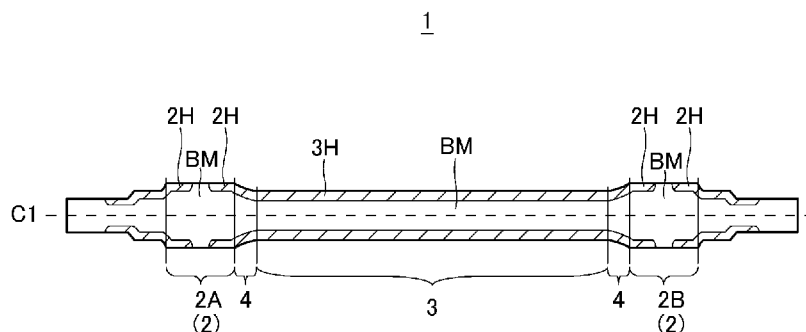
WO 2022/071262 A1

- (51) 国際特許分類:  
C21D 6/00 (2006.01) C22C 38/54 (2006.01)  
C21D 9/28 (2006.01) C21D 1/10 (2006.01)  
C22C 38/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2021/035498
- (22) 国際出願日: 2021年9月28日(28.09.2021)
- (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 2020-164135 2020年9月29日(29.09.2020) JP
- (71) 出願人: 日本製鉄株式会社 (NIPPON STEEL CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 牧野 泰三(MAKINO, Taizo); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP). 小塚 千尋 (KOZUKA, Chihiro); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP). 山本 雄一郎(YAMAMOTO, Yuichiro); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP). 秦 利行(HATA, Toshiyuki); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP). 山根 明仁(YAMANE, Akihito); 〒1008071 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: アセンド特許業務法人 (ASCEND IP LAW FIRM); 〒5300003 大阪府大阪市北区堂島一丁目5番17号 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, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,

(54) Title: RAILWAY AXLE

(54) 発明の名称: 鉄道用車軸

FIG. 2



(57) Abstract: Provided is a railway axle (1) having fitting parts (2) in which fitting fatigue is minimized, and a central parallel part (3) exhibiting an excellent fatigue strength. The railway axle (1) according to the present disclosure comprises: a pair of fitting parts (2) into which train wheels are press fitted, the fitting parts (2) including a fitting part hardened layer (2H) and a base material part (BM); and a central parallel part (3) positioned between the pair of fitting parts (2), the central parallel part (3) including a central parallel part hardened layer (3H) and a base material part (BM). The base material (BM) has the chemical composition set out in the description. In a region of the central parallel part hardened layer (3H) in which the Vickers hardness is 480 HV or above, the dislocation density  $\rho$  obtained on the basis of a Co-K $\alpha$  characteristic X-ray diffraction result is  $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  or below, the full width at half maximum B of the (211) diffraction plane is  $1.34^\circ$  or below, and the dislocation density  $\rho$  and the full width at half maximum B of the (211) plane according to X-ray diffraction satisfy expression (1).  $(-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho \geq 1.00$  (expression 1)

WO 2022/071262 A1

HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, 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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約：フレット疲労が抑制されたはめ合い部 (2) と、優れた疲労強度を示す中央平行部 (3) とを有する鉄道用車軸 (1) を提供する。本開示による鉄道用車軸 (1) は、鉄道用車輪が圧入され、はめ合い部硬化層 (2H) と母材部 (BM) とを含む一対のはめ合い部 (2) と、一対のはめ合い部 (2) の間に配置され、中央平行部硬化層 (3H) と母材部 (BM) とを含む中央平行部 (3) とを備え、母材部 (BM) は、明細書に記載の化学組成からなり、中央平行部硬化層 (3H) のうち、ビッカース硬さが480HV以上の領域において、 $C\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} m^{-2}$ 以下であり、(211)回折面の半価幅Bが1.34度以下であり、転位密度 $\rho$ と、X線回折による(211)面の半価幅Bとが、式(1)を満たす。 $(-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho \geq 1.00$  (1)

## 明 細 書

発明の名称：鉄道用車軸

### 技術分野

[0001] 本発明は車軸に関し、さらに詳しくは、鉄道車両に用いられる鉄道用車軸に関する。

### 背景技術

[0002] 鉄道用車軸は、鉄道用車輪が圧入される一対のはめ合い部と、一対のはめ合い部の間に配置される中央平行部とを有する。使用時において、鉄道用車軸は、鉄道車両の重量を支える。具体的には、鉄道用車軸のはめ合い部の直径よりも、鉄道用車輪のボス部の孔径の方が少し小さくなるように、鉄道用車軸のはめ合い部における締め代が設けられている。鉄道用車軸はさらに、鉄道車両が曲線状のレールを通過（曲線通過）するごとに、鉄道用車輪とレールとの接触による水平方向の力を受ける。つまり、曲線通過の際に、鉄道用車軸は、鉄道用車輪一回転ごとに回転曲げ応力を繰返し受ける。そして、曲線通過の際にその曲げ応力の振幅が大きくなる。

[0003] 上述のとおり、鉄道用車軸において、鉄道用車輪が圧入されるはめ合い部では、鉄道用車輪のボス部の孔に対して接触面圧を有している。そのため、鉄道用車輪のはめ合い部では、鉄道用車輪との接触によって、微小なすべりが繰返し生じることがある。以下、鉄道用車輪のはめ合い部と鉄道用車輪との接触により生じる微小なすべりをフレットングともいう。鉄道用車軸のはめ合い部では、フレットングによる損傷（以下、「フレットング疲労」ともいう）を受ける場合があることが知られている。

[0004] このようなフレットング疲労を抑制するために、鉄道用車軸の上記はめ合い部に対して高周波焼入れを実施する場合がある。はめ合い部の表層のうち、高周波焼入れされた領域では、硬さが高まる。このように、はめ合い部の表層のうち、高周波焼入れにより硬さが高まった領域を「硬化層」と称する。硬化層では圧縮残留応力が生じる。硬化層によって生じた圧縮残留応力

は、フレットングによるき裂の開口を抑制する。つまり、高周波焼入れによって形成される鉄道用車軸の硬化層は、鉄道用車軸のフレットング疲労を抑制できる。

[0005] 高周波焼入れを実施して、はめ合い部におけるフレットング疲労を抑制する鉄道用車軸が、特開平10-8202号公報（特許文献1）、特開平11-279696号公報（特許文献2）、特開2000-73140号公報（特許文献3）に提案されている。

[0006] 特許文献1に開示される鉄道用車軸は、質量%で、C：0.3～0.48%、Si：0.05～1%、Mn：0.5～2%、Cr：0.5～1.5%、Mo：0.15～0.3%、Ni：0～2.4%を含む。この鉄道用車軸のはめ合い部は、ピッカース硬さが400以上の硬化層を有し、その内部にマルテンサイト又はベイナイトの領域を有する。この鉄道用車軸において、硬化層の深さは、1～4.5mmである。この鉄道用車軸は、高い疲労限度を有する、と特許文献1には記載されている。

[0007] 特許文献2に開示される鉄道用車軸は、質量%で、C：0.3～0.48%、Si：0.05～1%、Mn：0.5～2%、Cr：0.5～1.5%、Mo：0.15～0.3%、及び、Ni：0～2.4%を含む。この鉄道用車軸のはめ合い部は、ピッカース硬さが400以上の硬化層を有し、その内部に焼戻しマルテンサイト又はベイナイトの領域を有する。この鉄道用車軸において、硬化層の深さは、5.0mm以上であり、かつ、はめ合い部直径の10%以下である。この鉄道用車軸は、高いフレットング疲労限度を有する、と特許文献2には記載されている。

[0008] 特許文献3に開示される鉄道用車軸は、質量%で、C：0.3～0.48%、Si：0.05～1%、Mn：0.5～2%、Cr：0～1.5%、Mo：0～0.3%、Ni：0～2.4%を含む。この鉄道用車軸のはめ合い端部とその周辺領域は、ピッカース硬さが400以上の硬化層を有する。硬化層の厚さ（K）のはめ合い部直径（D）に対する比（K/D）は0.005～0.05である。硬化層の上側部分は、0.02～2%のBを含有する

。この鉄道用車軸は、優れた疲労限度を有する、と特許文献3には記載されている。

## 先行技術文献

### 特許文献

- [0009] 特許文献1：特開平10-8202号公報  
特許文献2：特開平11-279696号公報  
特許文献3：特開2000-73140号公報  
特許文献4：特開2007-321190号公報

### 非特許文献

- [0010] 非特許文献1：生田文昭、外4名、「リング状試験片の高周波焼入れにおける変形と残留応力」、熱処理、一般社団法人日本熱処理技術協会、平成27年2月、第55巻、第1号、p. 37-43

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

- [0011] 特許文献1～3に開示される鉄道用車軸では、高周波焼入れを実施し、はめ合い部のフレットング疲労を抑制する技術が開示されている。上述のとおり、鉄道用車軸のはめ合い部に高周波焼入れを実施して、硬化層を形成した場合、はめ合い部におけるフレットング疲労を抑制することができる。
- [0012] ところで、鉄道用車軸の疲労強度を高めるためには、フレットング疲労だけでなく、中央平行部における疲労破壊も低減できると好ましい。一方、上記特許文献1～3では、鉄道用車軸の中央平行部における疲労強度について検討がされていない。
- [0013] 本開示の目的は、フレットング疲労が抑制されたはめ合い部と、優れた疲労強度を示す中央平行部とを有する鉄道用車軸を提供することである。

### 課題を解決するための手段

- [0014] 本開示による鉄道用車軸は、  
鉄道用車輪が圧入される、一対のはめ合い部と、

前記一対のはめ合い部の間に配置される中央平行部とを備え、  
前記はめ合い部は、  
前記はめ合い部の表層に形成されているはめ合い部硬化層と、  
前記はめ合い部硬化層よりも内部の母材部とを含み、  
前記中央平行部は、  
前記中央平行部の表層に形成されている中央平行部硬化層と、  
前記中央平行部硬化層よりも内部の前記母材部とを含み、  
前記母材部は、質量%で、  
C : 0.22~0.29%、  
Si : 0.15~0.40%、  
Mn : 0.50~0.80%、  
P : 0.020%以下、  
S : 0.040%以下、  
Cr : 0.90~1.20%、  
Mo : 0.15~0.30%、  
N : 0.0200%以下、  
O : 0.0040%以下、  
Ca : 0~0.0010%、  
Cu : 0~0.30%、  
Ni : 0~0.30%、  
Al : 0~0.100%、  
V : 0~0.060%、  
Ti : 0~0.020%、  
Nb : 0~0.030%、  
B : 0~0.0050%、及び、  
残部がFe及び不純物、からなり、  
前記中央平行部硬化層のうち、ピッカース硬さが480HV以上の領域に  
おいて、

C<sub>o</sub>-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下であり、

C<sub>o</sub>-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが1.34度以下であり、

前記C<sub>o</sub>-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ と、前記C<sub>o</sub>-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bとが、式(1)を満たす。

$$(-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho \geq 1.00 \quad (1)$$

ここで、式(1)中の $\rho$ にはC<sub>o</sub>-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度が $\text{m}^{-2}$ で代入され、BにはC<sub>o</sub>-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅が度で代入される。

### 発明の効果

[0015] 本開示による鉄道用車軸は、フレットング疲労が抑制されたはめ合い部と、優れた疲労強度を示す中央平行部とを有する。

### 図面の簡単な説明

[0016] [図1]図1は、本実施形態による鉄道用車軸の側面図である。

[図2]図2は、図1に示す本実施形態の鉄道用車軸1の中心軸C1を含む面での断面図である。

[図3]図3は、本実施例における粗製品の断面図である。

[図4]図4は、本実施例における鉄道用車軸の側面図である。

[図5]図5は、本実施例における鉄道用車軸1の疲労試験装置の模式図である。

[図6]図6は、本実施例で用いた供試材の断面図である。

[図7]図7は、本実施例で用いた疲労試験片の断面図である。

### 発明を実施するための形態

[0017] 本発明者らは、高周波焼入れを実施して、はめ合い部の表層に硬化層(以下、「はめ合い部硬化層」ともいう)を形成して、はめ合い部におけるフレットング疲労を抑制した鉄道用車軸について、中央平行部の疲労強度を高

める手法を調査及び検討した。その結果、次の知見を得た。

[0018] (A) 化学組成について

鉄道用車軸の中央平行部に対して高周波焼入れを実施すると、中央平行部の表層に硬化層（以下、「中央平行部硬化層」ともいう）が形成される。中央平行部硬化層が形成されれば、中央平行部の表層の硬さが高まり、中央平行部における疲労強度が高まると考えられる。そこで本発明者らは、まず、中央平行部硬化層を形成させることを前提に、中央平行部の疲労強度を十分に高められる化学組成について、詳細に検討した。

[0019] その結果、鉄道用車軸のうち、中央平行部硬化層よりも内部の母材部の化学組成が、質量%で、C：0.22～0.29%、Si：0.15～0.40%、Mn：0.50～0.80%、P：0.020%以下、S：0.040%以下、Cr：0.90～1.20%、Mo：0.15～0.30%、N：0.0200%以下、O：0.0040%以下、Ca：0～0.0010%、Cu：0～0.30%、Ni：0～0.30%、Al：0～0.100%、V：0～0.060%、Ti：0～0.020%、Nb：0～0.030%、B：0～0.0050%、及び、残部がFe及び不純物、からなれば、高周波焼入れによって中央平行部硬化層が形成された中央平行部の疲労強度を高められる可能性があると考えた。

[0020] 次に本発明者らは、上述の化学組成を有する鉄道用車軸の形状をした鋼材に対して、高周波焼入れ及び焼戻しを実施して、はめ合い部硬化層及び中央平行部硬化層を有する鉄道用車軸を種々製造した。その結果、上述の化学組成の母材部を有し、中央平行部の表面の硬さが同程度の鉄道用車軸であっても、中央平行部の疲労強度が異なる場合があることを、本発明者らは知見した。すなわち、中央平行部硬化層の硬さを単純に高めただけでは、中央平行部における疲労強度を十分に高められないことが、本発明者らの検討により明らかになった。

[0021] (B) 転位密度について

高周波焼入れが実施された鉄道用車軸において、上述の化学組成の母材部

を有し、表面の硬さが同程度であっても中央平行部の疲労強度が異なる理由について、本発明者らは、高周波焼入れ及び焼戻しによる熱履歴が、何らかの影響を与えているのではないかと考えた。そこで本発明者らは、転位密度に着目して、中央平行部の疲労強度を高める方法を調査及び検討した。具体的に、本発明者らは、中央平行部硬化層のうち、ビッカース硬さが480HV以上の領域を「特定硬さ領域」と定義して、特定硬さ領域における転位密度について、調査及び検討を行った。

[0022] ここで、高周波焼入れが実施されて形成される特定硬さ領域は、ビッカース硬さが480HV以上と硬さが非常に高いため、転位密度が高くなりやすい。一方、繰り返し応力が負荷された鋼材中のミクロ組織では、転位が動いて集積することにより、き裂の起点となる可能性がある。すなわち、転位密度が高い特定硬さ領域では、転位が集積しやすく、疲労強度が低下しやすい傾向がある。したがって、転位密度が高い特定硬さ領域において転位密度を低減すれば、き裂の起点となる転位の集積が起こりにくくなるため、疲労強度が高まる可能性がある。

[0023] 以上の知見に基づいた本発明者らの詳細な検討の結果、上述の化学組成の母材部と、中央平行部硬化層とを有する中央平行部では、特定硬さ領域におけるC $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ を $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下にまで低減すれば、本実施形態のその他の構成を満たすことを条件に、中央平行部の疲労強度を高められる可能性があることが明らかになった。したがって、本実施形態による鉄道用車軸の中央平行部では、母材部が上述の化学組成を有し、特定硬さ領域におけるC $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ を $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下とする。

[0024] (C) 格子歪みについて

一方、中央平行部が、上述の化学組成の母材部と、中央平行部硬化層とを有し、中央平行部硬化層の特定硬さ領域において、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下であっても、疲労強度が十分に高められない場合があった。そこで本発明者らは、次に格子

歪みに着目して、中央平行部の疲労強度を高める方法を調査及び検討した。ここで、X線回折法（XRD：X-Ray Diffraction）によって得られる複数の回折面のうち（211）回折面であれば、高周波焼入れ及び焼戻しによる炭素（C）の固溶及び析出に起因する、結晶格子のc軸の変化を観察することができる。そこで本発明者らは、特定硬さ領域における格子歪みの指標として、（211）回折面の半価幅に着目して、中央平行部の疲労強度との関係を調査及び検討した。

[0025] 上述のとおり、繰り返し応力が負荷された鋼材中のミクロ組織では、転位が動いて集積することにより、き裂の起点となる可能性がある。一方、特定硬さ領域は高周波焼入れを実施することによって形成される。ここで、高周波焼入れは鋼材のミクロ組織に変態を伴うため、高周波焼入れを実施した鋼材のミクロ組織では、結晶格子に微視的な歪みが生じると考えられる。結晶格子に生じた微視的な歪みが局所的に大きい領域では、応力によって動いた転位が滞留しやすい可能性がある。その結果、格子歪みが大きい領域において、転位が集積することにより、き裂の起点となる可能性がある。

[0026] 以上の知見に基づいた本発明者らの詳細な検討の結果、上述の化学組成の母材部と、中央平行部硬化層とを有する中央平行部では、特定硬さ領域における $C\alpha$ 特性X線回折による（211）回折面の半価幅 $B$ を1.34度以下にまで低減すれば、本実施形態によるその他の構成を満たすことを条件に、中央平行部の疲労強度を高められる可能性があることが明らかになった。したがって、本実施形態による鉄道用車軸の中央平行部では、母材部が上述の化学組成を有し、特定硬さ領域において、 $C\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ を $2.5 \times 10^{16} m^{-2}$ 以下とした上で、さらに、 $C\alpha$ 特性X線回折による（211）回折面の半価幅 $B$ を1.34度以下とする。

[0027] 本発明者らのさらなる詳細な検討の結果、 $C\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ と、 $C\alpha$ 特性X線回折による（211）回折面の半価幅 $B$ とが、次の式（1）を満たせば、中央平行部の疲労強度を

安定して高められることが明らかになった。

$$(-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho \geq 1.00 \quad (1)$$

ここで、式(1)中の $\rho$ にはC $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度が $m^{-2}$ で代入され、BにはC $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅が度で代入される。

[0028]  $F_n = (-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho$ と定義する。 $F_n$ は、特定硬さ領域における転位の集積度合いを示す指標である。 $F_n$ が1.00未満の場合、繰り返し応力が負荷された特定硬さ領域において、転位が集積し、き裂の起点となる。その結果、中央平行部における疲労強度が十分に得られない。一方、 $F_n$ が1.00以上であれば、繰り返し応力が付加された特定硬さ領域においても、転位の集積が抑制され、中央平行部における疲労強度を高めることができる。

[0029] この理由について、本発明者らは次のように考えている。上述のとおり、上述の化学組成の母材部と、中央平行部硬化層とを有する中央平行部では、繰り返しの応力によって転位が動くことにより、き裂が生じる可能性がある。すなわち、単に転位密度を低減するのではなく、転位が密になり、き裂やすべりが生じることを抑制できれば、中央平行部の疲労強度が高められる可能性がある。そのため、本実施形態による鉄道用車軸では、転位密度が高くなりやすい特定硬さ領域において、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ を $2.5 \times 10^{16} m^{-2}$ 以下とし、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bを1.34度以下とした上で、さらに、 $F_n$ を1.00以上とする。その結果、転位密度と格子歪みとのバランスを取ることができ、中央平行部の疲労強度を高められる、と本発明者らは考えている。

[0030] したがって、本実施形態による鉄道用車軸では、上述の化学組成の母材部と、中央平行部硬化層とを有する中央平行部において、特定硬さ領域におけるC $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} m^{-2}$ 以下であり、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価

幅Bが1.34度以下であり、さらに、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ と、Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bとが式(1)を満たす。その結果、本実施形態による鉄道用車軸では、中央平行部において、優れた疲労強度を有する。

[0031] 以上の知見に基づいて完成した、本実施形態の鉄道用車軸の要旨は次のとおりである。

[0032] [1]

鉄道用車軸であって、  
鉄道用車輪が圧入される、一対のはめ合い部と、  
前記一対のはめ合い部の間に配置される中央平行部とを備え、  
前記はめ合い部は、  
前記はめ合い部の表層に形成されているはめ合い部硬化層と、  
前記はめ合い部硬化層よりも内部の母材部とを含み、  
前記中央平行部は、  
前記中央平行部の表層に形成されている中央平行部硬化層と、  
前記中央平行部硬化層よりも内部の前記母材部とを含み、  
前記母材部は、質量%で、  
C : 0.22~0.29%、  
Si : 0.15~0.40%、  
Mn : 0.50~0.80%、  
P : 0.020%以下、  
S : 0.040%以下、  
Cr : 0.90~1.20%、  
Mo : 0.15~0.30%、  
N : 0.0200%以下、  
O : 0.0040%以下、  
Ca : 0~0.0010%、  
Cu : 0~0.30%、

Ni : 0 ~ 0.30%、

Al : 0 ~ 0.100%、

V : 0 ~ 0.060%、

Ti : 0 ~ 0.020%、

Nb : 0 ~ 0.030%、

B : 0 ~ 0.0050%、及び、

残部がFe及び不純物、からなり、

前記中央平行部硬化層のうち、ビッカース硬さが480HV以上の領域において、

Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下であり、

Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが1.34度以下であり、

前記Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ と、前記Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bとが、式(1)を満たす、

鉄道用車軸。

$$(-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho \geq 1.00 \quad (1)$$

ここで、式(1)中の $\rho$ にはCo-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度が $\text{m}^{-2}$ で代入され、BにはCo-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅が度で代入される。

[0033] [2]

[1]に記載の鉄道用車軸であって、

前記母材部は、質量%で、

Cu : 0.01 ~ 0.30%、

Ni : 0.01 ~ 0.30%、

Al : 0.005 ~ 0.100%、

V : 0.005 ~ 0.060%、

$T_i$  : 0.002~0.020%、  
 $N_b$  : 0.002~0.030%、及び、  
 $B$  : 0.0003~0.0050%からなる群から選択される1元素以上  
を含有する、  
鉄道用車軸。

[0034] 以下、本実施形態による鉄道用車軸について詳述する。

[0035] [鉄道用車軸の構成]

図1は、本実施形態による鉄道用車軸の側面図である。図1を参照して、本実施形態の鉄道用車軸1は、一対のはめ合い部2A及び2Bと、中央平行部3とを備える。一対のはめ合い部2A及び2Bの各々は、直径 $D_w$ を有する円柱である。はめ合い部2A及び2Bの中心軸は、鉄道用車軸1の中心軸C1と一致する。鉄道用車軸1の中心軸C1は、鉄道用車軸1の長手方向に延びている。以降の説明では、鉄道用車軸1の「中心軸C1方向」は、鉄道用車軸1の「長手方向」と同義である。

[0036] はめ合い部2Aは、図1中において、中央平行部3の左端とつながる。はめ合い部2Bは、図1において、中央平行部3の右端につながる。以降の説明では、はめ合い部2A及び2Bを総称する場合、「はめ合い部2」と称する。各はめ合い部2には、図示しない鉄道用車輪が圧入される。

[0037] 中央平行部3は、一対のはめ合い部2A及び2Bの間に配置されている。図1において、中央平行部3の左端は、鉄道用車軸1の左部に配置されたはめ合い部2Aとつながっている。中央平行部3の右端は、鉄道用車軸1の右部に配置されたはめ合い部2Bとつながっている。中央平行部3は、直径 $D_A$ を有する円柱である。中央平行部3の直径 $D_A$ は、はめ合い部2の直径 $D_w$ よりも小さい。中央平行部3の中心軸は、鉄道用車軸1の中心軸C1と一致する。要するに、中央平行部3は、一対のはめ合い部2と同軸に配置されている。

[0038] 一対のはめ合い部2は、中実であってもよく、中空であってもよい。同様に、中央平行部3は、中実であってもよいし、中空であってもよい。中央平

行部の直径 $D_A$ は特に限定されないが、たとえば、100～200 mmである。はめ合い部2の直径 $D_W$ は特に限定されないが、たとえば、110～260 mmである。

[0039] 図1を参照して、鉄道用車軸1はさらに、中央平行部3の端部と、はめ合い部2の内側端との間に、中央平行部3とはめ合い部2とを連続的につなぐテーパ部4を備える。テーパ部4の直径は、鉄道用車軸1の中心軸C1方向において、中央平行部3の端部からはめ合い部2の内側端に向かって大きくなる。図1に示すとおり、鉄道用車軸1の中心軸C1を含む断面において、テーパ部4の表面は曲線的であってもよいし、直線的であってもよい。なお、鉄道用車軸1は、テーパ部4を備えなくてもよい。この場合、中央平行部3の端部がはめ合い部2の内側端とつながっており、中央平行部3の端部とはめ合い部2の内側端との間に段差が形成される。

[0040] 図2は、図1に示す本実施形態の鉄道用車軸1の中心軸C1を含む面での断面図である。図2を参照して、各はめ合い部2(2A及び2B)はいずれも、表層に形成されているはめ合い部硬化層2Hと、はめ合い部硬化層2Hよりも内部の母材部BMとを含む。はめ合い部硬化層2Hは、はめ合い部2の表面から所定の深さに至る範囲の表層に形成されている。

[0041] 図2を参照して、はめ合い部硬化層2Hは、はめ合い部2の表面全体に形成されていなくてもよい。図2では、はめ合い部硬化層2Hは、鉄道用車軸1の中心軸C1方向において、はめ合い部2の中央位置よりも外側の領域の一部と、はめ合い部2の中央位置よりも内側の領域の一部とに形成されており、はめ合い部2の中央位置を含む一部の領域には、はめ合い部硬化層2Hが形成されていない。このように、はめ合い部硬化層2Hは、はめ合い部2の表面全体に形成されていなくてもよく、中心軸C1方向において、はめ合い部2の表面の少なくとも一部の領域に形成されていてもよい。また、はめ合い部硬化層2Hは、はめ合い部2の表面全体に形成されていてもよい。はめ合い部硬化層2Hについては後述する。

[0042] 図2を参照して、中央平行部3は、中央平行部3の表層に形成されている

中央平行部硬化層 3 H と、中央平行部硬化層 3 H よりも内部の母材部 B M とを含む。中央平行部硬化層 3 H は、中央平行部 3 の表面から所定の深さに至る範囲の表層に形成されている。中央平行部硬化層 3 H は、中央平行部 3 の表面全体に形成されている。中央平行部硬化層 3 H については後述する。

[0043] [中央平行部 3 の母材部 B M の化学組成について]

本実施形態において、一対のはめ合い部 2 の母材部 B M の化学組成、及び、中央平行部 3 の母材部 B M の化学組成は、次の元素を含有する。ここで、鉄道用車軸 1 の中心軸 C 1 に垂直な断面において、鉄道用車軸 1 の表面と中心軸 C 1 とを結ぶ線分を半径 R と定義する。このとき、母材部 B M の化学組成は、はめ合い部 2 の  $R/2$  位置、及び、中央平行部 3 の  $R/2$  位置での化学組成を意味する。以下、元素に関する％は、特に断りがない限り、質量％を意味する。

[0044] C : 0.22 ~ 0.29 %

炭素 (C) は、鋼の硬さを高める。C はさらに、高周波焼入れによる硬化層の硬さを高める。C 含有量が 0.22 % 未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、母材部 B M、はめ合い部硬化層 2 H 及び中央平行部硬化層 3 H の硬さが低下する。その結果、中央平行部 3 の疲労強度が低下する場合がある。一方、C 含有量が 0.29 % を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、高周波焼入れ時に焼割れが生じる場合がある。したがって、C 含有量は 0.22 ~ 0.29 % である。C 含有量の好ましい下限は 0.23 % であり、さらに好ましくは 0.24 % である。C 含有量の好ましい上限は 0.28 % であり、さらに好ましくは 0.27 % である。

[0045] Si : 0.15 ~ 0.40 %

シリコン (Si) は鋼を脱酸する。Si はさらに、鋼の焼戻し軟化抵抗を高め、中央平行部 3 における疲労強度を高める。Si 含有量が 0.15 % 未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、これらの効果が十分に得られない。一方、Si 含有量が 0.40 % を超えれば、他の元

素含有量が本実施形態の範囲内であっても、高周波焼入れ時に焼割れが生じる場合がある。したがって、Si含有量は0.15~0.40%である。Si含有量の好ましい下限は0.20%であり、さらに好ましくは0.23%であり、さらに好ましくは0.25%である。Si含有量の好ましい上限は0.37%であり、さらに好ましくは0.35%であり、さらに好ましくは0.33%である。

[0046] Mn : 0.50~0.80%

マンガン(Mn)は鋼の焼入れ性を高め、高周波焼入れによる硬化層2H及び3Hを厚くする。Mn含有量が0.50%未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、中央平行部硬化層3Hが薄くなりすぎる場合がある。この場合、中央平行部3における疲労強度が十分に得られない。一方、Mn含有量が0.80%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、高周波焼入れによって形成されるはめ合い部硬化層2H及び中央平行部硬化層3Hが厚くなりすぎる場合がある。この場合、はめ合い部硬化層2Hの圧縮残留応力が低下し、はめ合い部2における疲労強度が十分に得られない。したがって、Mn含有量は0.50~0.80%である。Mn含有量の好ましい下限は0.55%であり、さらに好ましくは0.57%であり、さらに好ましくは0.60%であり、さらに好ましくは0.62%である。Mn含有量の好ましい上限は0.78%であり、さらに好ましくは0.75%であり、さらに好ましくは0.73%であり、さらに好ましくは0.70%である。

[0047] P : 0.020%以下

燐(P)は不可避に含有される不純物である。つまり、P含有量は0%超である。Pは粒界に偏析して鋼の疲労強度を低下させる。P含有量が0.020%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鉄道用車軸1の疲労強度が低下する。したがって、P含有量は0.020%以下である。P含有量の好ましい上限は0.018%であり、さらに好ましくは0.016%であり、さらに好ましくは0.015%であり、さらに好まし

くは0.014%である。P含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、P含有量の極端な低減は、製造コストを大幅に高める。したがって、工業生産を考慮した場合、P含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.002%である。

[0048] S : 0.040%以下

硫黄 (S) は不可避に含有される不純物である。つまり、S含有量は0%超である。SはMnと結合してMnSを生成する。MnSは鋼の疲労強度を低下させる。S含有量が0.040%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、MnSに応力が集中し、中央平行部3の疲労強度が低下する。したがって、S含有量は0.040%以下である。S含有量の好ましい上限は0.030%であり、さらに好ましくは0.020%であり、さらに好ましくは0.015%であり、さらに好ましくは0.010%である。S含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、S含有量の極端な低減は、製造コストを大幅に高める。したがって、工業生産を考慮した場合、S含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.002%である。

[0049] Cr : 0.90~1.20%

クロム (Cr) は鋼の焼入れ性を高め、高周波焼入れによるはめ合い部硬化層2H及び中央平行部硬化層3Hの硬さを高める。Cr含有量が0.90%未満であれば、中央平行部硬化層3Hが薄くなりすぎる場合がある。この場合、中央平行部3における疲労強度が低下する。一方、Cr含有量が1.20%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、高周波焼入れによって形成されるはめ合い部硬化層2H及び中央平行部硬化層3Hが厚くなりすぎる場合がある。この場合、はめ合い部硬化層2Hの圧縮残留応力が低下し、はめ合い部2における十分な疲労強度が得られない。したがって、Cr含有量は0.90~1.20%である。Cr含有量の好ましい下限は0.95%であり、さらに好ましくは1.00%であり、さらに好ましくは1.02%であり、さらに好ましくは1.05%である。Cr含有量

の好ましい上限は1.19%であり、さらに好ましくは1.17%であり、さらに好ましくは1.15%である。

[0050] Mo : 0.15~0.30%

モリブデン (Mo) は鋼の強度を高める。Mo含有量が0.15%未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、この効果が十分に得られない。一方、Mo含有量が0.30%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が飽和する。Mo含有量が0.30%を超えればさらに、製造コストが過剰に高まる。したがって、Mo含有量は0.15~0.30%である。Mo含有量の好ましい下限は0.17%であり、さらに好ましくは0.19%であり、さらに好ましくは0.20%であり、さらに好ましくは0.21%である。Mo含有量の好ましい上限は0.29%であり、さらに好ましくは0.28%であり、さらに好ましくは0.27%である。

[0051] N : 0.0200%以下

窒素 (N) は不可避免的に含有される。すなわち、N含有量は0%超である。NはAl等と結合して微細な窒化物を形成し、結晶粒を微細化する。しかしながら、N含有量が高すぎれば、粗大な窒化物が形成され、鋼の疲労強度が低下する。N含有量が0.0200%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鉄道用車軸1の疲労強度が低下する。したがって、N含有量は0.0200%以下である。N含有量の好ましい上限は0.0150%であり、さらに好ましくは0.0120%であり、さらに好ましくは0.0100%であり、さらに好ましくは0.0090%であり、さらに好ましくは0.0080%であり、さらに好ましくは0.0070%である。上記効果をより有効に得るための、N含有量の好ましい下限は0.0010%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0030%である。

[0052] O : 0.0040%以下

酸素 (O) は不可避に含有される不純物である。すなわち、O含有量は0

%超である。Oは粗大な酸化物を生成し、疲労破壊の起点となる場合がある。O含有量が0.0040%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、中央平行部3における疲労強度が低下する。したがって、O含有量は0.0040%以下である。O含有量の好ましい上限は0.0030%であり、さらに好ましくは0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%である。O含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、O含有量の極端な低減は、製造コストを大幅に高める。したがって、工業生産を考慮した場合、O含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0002%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

[0053] Ca : 0~0.0010%

カルシウム (Ca) は不純物である。Caは含有されなくてもよい。すなわち、Ca含有量は0%であってもよい。Caはシリケート系介在物 (JIS G 0555 (2003) に規定されるグループC) を凝集させ、鋼の疲労強度を低下させる。Ca含有量が0.0010%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、シリケート系介在物が疲労破壊の起点となり、中央平行部3における疲労強度が低下する。したがって、Ca含有量は0~0.0010%である。Ca含有量の好ましい上限は0.0006%であり、さらに好ましくは0.0004%であり、さらに好ましくは0.0003%である。

[0054] 本実施形態による鉄道用車軸1のはめ合い部2及び中央平行部3の母材部BMの化学組成の残部は、Fe及び不純物である。ここで、不純物とは、鉄道用車軸1の鋼材を工業的に製造する際に、原料としての鉱石、スクラップ、又は製造環境などから混入されるものであって、本実施形態の鉄道用車軸1に悪影響を与えない範囲で許容されるものを意味する。

[0055] 本実施形態による鉄道用車軸1のはめ合い部2及び中央平行部3の母材部BMの化学組成はさらに、Feの一部に代えて、Cu、及び、Niからなる群から選択される1元素以上を含有してもよい。これらの元素は任意元素で

あり、いずれも鋼の強度を高める。

[0056] Cu : 0 ~ 0.30%

銅 (Cu) は、任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Cu含有量は0%であってもよい。Cuが含有される場合、Cuは鋼の強度を高める。Cuが少しでも含有されれば、この効果がある程度得られる。しかしながら、Cu含有量が0.30%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼の熱間加工性が低下する。したがって、Cu含有量は0~0.30%である。Cu含有量の好ましい下限は0%超であり、さらに好ましくは0.01%であり、さらに好ましくは0.02%である。Cu含有量の好ましい上限は0.25%であり、さらに好ましくは0.20%であり、さらに好ましくは0.15%であり、さらに好ましくは0.10%であり、さらに好ましくは0.05%である。

[0057] Ni : 0 ~ 0.30%

ニッケル (Ni) は任意元素であり、含有されなくてもよい。すなわち、Ni含有量は0%であってもよい。Niが含有される場合、Niは鋼の強度を高める。Niが少しでも含有されれば、この効果がある程度得られる。しかしながら、Ni含有量が0.30%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が飽和する。したがって、Ni含有量は0~0.30%である。Ni含有量の好ましい下限は0%超であり、さらに好ましくは0.01%であり、さらに好ましくは0.02%であり、さらに好ましくは0.04%である。Ni含有量の好ましい上限は0.25%であり、さらに好ましくは0.20%未満であり、さらに好ましくは0.15%であり、さらに好ましくは0.10%である。

[0058] 本実施形態による鉄道用車軸1のはめ合い部2及び中央平行部3の母材部BMの化学組成はさらに、Feの一部に代えて、Alを含有してもよい。

[0059] Al : 0 ~ 0.100%

アルミニウム (Al) は任意元素であり、含有されなくてもよい。すなわち、Al含有量は0%であってもよい。Alが含有される場合、Alは鋼を

脱酸する。Alはさらに、Nと結合してAlNを形成し、結晶粒を微細化する。その結果、鋼の靱性が高まる。Alが少しでも含有されれば、これらの効果がある程度得られる。しかしながら、Al含有量が0.100%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、粗大な酸化物系介在物が生成され、鉄道用車軸1の疲労強度が低下する。したがって、Al含有量は0~0.100%である。Al含有量の好ましい下限は0%超であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.007%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.015%であり、さらに好ましくは0.020%である。Al含有量の好ましい上限は0.080%であり、さらに好ましくは0.060%であり、さらに好ましくは0.050%であり、さらに好ましくは0.045%であり、さらに好ましくは0.040%である。本明細書において、Al含有量は、酸可溶Al (sol. Al) の含有量を意味する。

[0060] 本実施形態による鉄道用車軸1のはめ合い部2及び中央平行部3の母材部BMの化学組成はさらに、Feの一部に代えて、V、Ti、及び、Nbからなる群から選択される1元素以上を含有してもよい。これらの元素は任意元素であり、いずれも鋼の強度を高める。

[0061] V : 0~0.060%

バナジウム(V)は任意元素であり、含有されなくてもよい。すなわち、V含有量は0%であってもよい。Vが含有される場合、VはNやCと結合してV(C、N)を形成する。この場合、結晶粒を微細化し、鋼の強度を高める。Vが少しでも含有されれば、この効果がある程度得られる。しかしながら、V含有量が0.060%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼の靱性が低下する。したがって、V含有量は0~0.060%である。V含有量の好ましい下限は0%超であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.008%であり、さらに好ましくは0.010%である。V含有量の好ましい上限は0.055%であり、さらに好ましくは0.050%であり、さらに好ましくは0.045%であ

り、さらに好ましくは0.040%である。

[0062] Ti : 0~0.020%

チタン (Ti) は任意元素であり、含有されなくてもよい。すなわち、Ti含有量は0%であってもよい。Tiが含有される場合、TiはNと結合して微細なTiNを生成する。TiNは鋼の強度を高める。TiNはさらに、結晶粒を微細化し、鋼の疲労強度を高める。Tiが少しでも含有されれば、この効果がある程度得られる。しかしながら、Ti含有量が0.020%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、TiN析出物がき裂の経路となり、鋼の靱性が低下する。したがって、Ti含有量は0~0.020%である。Ti含有量の好ましい下限は0%超であり、さらに好ましくは0.002%であり、さらに好ましくは0.003%である。Ti含有量の好ましい上限は0.018%であり、さらに好ましくは0.015%であり、さらに好ましくは0.013%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.007%である。

[0063] Nb : 0~0.030%

ニオブ (Nb) は任意元素であり、含有されなくてもよい。すなわち、Nb含有量は0%であってもよい。Nbが含有される場合、NbはNやCと結合してNb (C、N) を形成する。この場合、Nb (C、N) は結晶粒を微細化し、鋼の強度、及び、靱性を高める。Nbが少しでも含有されれば、この効果がある程度得られる。しかしながら、Nb含有量が0.030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼中で生成した炭化物、及び／又は、炭窒化物が粗大化する場合がある。この場合、かえって鋼の靱性が低下する。したがって、Nb含有量は0~0.030%である。Nb含有量の好ましい下限は0%超であり、さらに好ましくは0.002%であり、さらに好ましくは0.003%であり、さらに好ましくは0.005%である。Nb含有量の好ましい上限は0.029%であり、さらに好ましくは0.027%であり、さらに好ましくは0.025%であり、さらに好ましくは0.020%である。

[0064] 本実施形態による鉄道用車軸1のはめ合い部2及び中央平行部3の母材部BMの化学組成はさらに、Feの一部に代えて、Bを含有してもよい。

[0065] B : 0 ~ 0.0050%

ボロン(B)は任意元素であり、含有されなくてもよい。すなわち、B含有量は0%であってもよい。Bが含有される場合、Bは鋼の焼入れ性を高める。Bが少しでも含有されれば、この効果がある程度得られる。一方、B含有量が0.0050%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼の靱性が低下する。したがって、B含有量は0~0.0050%である。B含有量の好ましい下限は0%超であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0007%である。B含有量の好ましい上限は0.0040%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0020%である。

[0066] [母材部BMのミクロ組織について]

好ましくは、本実施形態による鉄道用車軸1では、母材部BMのミクロ組織は、マルテンサイト及びベイナイトを主体とする。本明細書において「マルテンサイト及びベイナイトを主体とする」とは、ミクロ組織において、マルテンサイトとベイナイトとの総面積率が80%以上であることを意味する。ここで、マルテンサイトとは、焼戻しマルテンサイトも含む。ベイナイトとは、焼戻しベイナイトを含む。

[0067] 本実施形態による鉄道用車軸1の母材部BMのミクロ組織のうち、マルテンサイト及びベイナイト以外の残部は、たとえば、フェライトである。鉄道用車軸1の母材部BMのミクロ組織は、高周波焼入れ前の鉄道用車軸の表層部のミクロ組織に対応する。鉄道用車軸1の母材部BMのミクロ組織がマルテンサイト及びベイナイト主体であれば、鉄道用車軸1の表層部の硬さが高まる。ミクロ組織がマルテンサイト及びベイナイト主体であればさらに、高周波加熱時に、表層部のミクロ組織が迅速にオーステナイト化される。この場合、高周波焼入れによって形成される硬化層のマルテンサイト分率が高ま

り、硬化層の硬さが高まる。その結果、高周波焼入れ後の鉄道用車軸 1 の疲労強度がさらに高まる。

[0068] 鉄道用車軸 1 の母材部 BM のマイクロ組織におけるマルテンサイト及びベイナイトの総面積率は、以下の方法で求めることができる。はめ合い部 2 又は中央平行部 3 の中心軸 C 1 方向に垂直な断面の  $R/2$  位置から、マイクロ組織観察用のサンプルを 5 つ採取する。中心軸 C 1 に垂直な断面を観察面とする。各サンプルの観察面を鏡面に研磨した後、ナイトール腐食液に 10 秒程度浸漬して、エッチングによるマイクロ組織の現出を行う。エッチングした観察面を、光学顕微鏡にて観察する。1 視野あたり  $40000 \mu\text{m}^2$  (倍率 500 倍) とし、各サンプルにつき 1 視野 (つまり 5 つのサンプルを用いて合計 5 視野) を観察する。

[0069] 各視野において、コントラストに基づいて、マルテンサイト及びベイナイトと、マルテンサイト及びベイナイト以外の相 (フェライト等) とを特定する。マルテンサイトとベイナイトとはコントラストによる区別が困難である。しかしながら、マルテンサイト及びベイナイトと、フェライト等のマルテンサイト及びベイナイト以外の相とは、コントラストにより容易に区別可能である。特定したマルテンサイト及びベイナイトの総面積と、各視野の面積 ( $40000 \mu\text{m}^2$ ) とに基づいて、各視野のマルテンサイト及びベイナイトの総面積率を求める。各視野で求めた、マルテンサイト及びベイナイトの総面積率の算術平均値を、マルテンサイト及びベイナイトの総面積率 (%) と定義する。

[0070] [はめ合い部硬化層 2 H と中央平行部硬化層 3 H について]

本実施形態による鉄道用車軸 1 では、一対のはめ合い部 2 の各々において、はめ合い部硬化層 2 H が形成されている。本実施形態による鉄道用車軸 1 ではさらに、中央平行部 3 において、中央平行部硬化層 3 H が形成されている。本明細書において「硬化層」とは、高周波焼入れによって形成された、母材部 BM と比較してピッカース硬さが高まった領域を意味する。具体的に、本明細書において、はめ合い部硬化層 2 H 及び中央平行部硬化層 3 H は、

J I S G 0 5 5 9 ( 2 0 0 8 ) で有効硬化層深さとして規定される、限界硬さがビッカース硬さで350HVの領域と定義される。要するに、本明細書において、はめ合い部硬化層2H及び中央平行部硬化層3Hの限界硬さは、ビッカース硬さで350HVである。

[0071] [はめ合い部硬化層2H及び中央平行部硬化層3Hのマイクロ組織について]

好ましくは、本実施形態による鉄道用車軸1では、はめ合い部硬化層2H及び中央平行部硬化層3Hのマイクロ組織は、マルテンサイト及びベイナイトを主体とする。本明細書において「マルテンサイト及びベイナイトを主体とする」とは、マイクロ組織において、マルテンサイトとベイナイトとの総面積率が80%以上であることを意味する。ここで、マルテンサイトとは、焼戻しマルテンサイトも含む。ベイナイトとは、焼戻しベイナイトを含む。

[0072] 鉄道用車軸1のはめ合い部硬化層2H及び中央平行部硬化層3Hのマイクロ組織におけるマルテンサイト及びベイナイトの総面積率は、本実施形態による鉄道用車軸1の母材部BMのマイクロ組織における、マルテンサイト及びベイナイトの総面積率と同様に、求める事ができる。具体的に、上述の方法で特定した、はめ合い部硬化層2H及び／又は中央平行部硬化層3Hから、マイクロ組織観察用のサンプルを5つ採取する。中心軸C1に垂直な断面を観察面とする。各サンプルの観察面を鏡面に研磨した後、ナイトール腐食液に10秒程度浸漬して、エッチングによるマイクロ組織の現出を行う。エッチングした観察面を、光学顕微鏡にて観察する。1視野あたり40000 $\mu\text{m}^2$ (倍率500倍)とし、各サンプルにつき1視野(つまり5つのサンプルを用いて合計5視野)を観察する。

[0073] [特定硬さ領域について]

本実施形態において、中央平行部硬化層3Hのうち、ビッカース硬さで480HV以上の領域を、「特定硬さ領域」と定義する。上述のとおり、中央平行部硬化層3Hの限界硬さは、ビッカース硬さで350HVである。すなわち、特定硬さ領域とは、中央平行部硬化層3Hの中でも、特に硬さが高い

領域を意味する。

[0074] 本実施形態において、特定硬さ領域は、次の方法で特定できる。本実施形態による中央平行部硬化層3Hに対して、荷重を2.9Nとし、0.1mmピッチでJIS Z 2244(2009)に準拠したビッカース硬さ試験を実施して、ビッカース硬さ(HV)を測定する。たとえば、鉄道用車軸1の中心軸C1と垂直に切断して得られた面に対して、中央平行部3の表面から鉄道用車軸1の径方向(深さ方向)に、ビッカース硬さ(HV)を測定してもよい。このようにして得られた硬さ推移曲線に基づいて、鉄道用車軸1の表面から、ビッカース硬さで480HV以上の領域を特定する。特定されたビッカース硬さ480HV以上の領域を、特定硬さ領域と定義する。

[0075] [転位密度について]

本実施形態による鉄道用車軸1では、中央平行部硬化層3Hのうち、ビッカース硬さが480HV以上の領域において、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下である。上述のとおり、本実施形態による中央平行部硬化層3Hのうち、ビッカース硬さで480HV以上の領域を特定硬さ領域という。本実施形態では、中央平行部硬化層3Hの特定硬さ領域における、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下である。

[0076] 上述のとおり、特定硬さ領域は、中央平行部硬化層3Hの中でも特に硬さが高い領域である。そのため、特定硬さ領域は、転位密度が高くなりやすい。一方、転位は繰り返しの応力を受けて鋼材中を移動して、き裂の起点となる可能性がある。すなわち、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が高いほど、き裂の起点が生じやすく、疲労強度が低下しやすいと考えられる。したがって、本実施形態による鉄道用車軸1では、中央平行部硬化層3Hのうち、特定硬さ領域において、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ を $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下とする。その結果、本実施形態による鉄道用車軸1のその他の構成を満たすことを条件に、中央平行部3において優れた疲労強度を有する。

- [0077] 本実施形態において、中央平行部硬化層 3 H の特定硬さ領域における  $C\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  の好ましい上限は  $2.4 \times 10^{16} m^{-2}$  である。なお、中央平行部硬化層 3 H の特定硬さ領域における  $C\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  の下限は特に限定されない。しかしながら、転位密度が低すぎれば、特定硬さ領域として定義されるビッカース硬さ 480 HV 以上が得られない場合がある。したがって、本実施形態では、中央平行部硬化層 3 H の特定硬さ領域における  $C\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  の下限は、たとえば、 $1.4 \times 10^{16} m^{-2}$  である。
- [0078] 本実施形態による鉄道用車軸 1 において、 $C\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  は、次の方法で求めることができる。本実施形態による鉄道用車軸 1 の中央平行部 3 から、上述の方法で特定硬さ領域を特定する。特定硬さ領域から、転位密度測定用の試験片を作製する。試験片の大きさは特に限定されないが、たとえば、鉄道用車軸 1 に対して周方向 10 mm × 軸方向 20 mm × 径方向 5 mm である。試験片の厚さ方向は、鉄道用車軸 1 の径方向（深さ方向）である。この場合、試験片の観察面は、鉄道用車軸 1 に対して周方向 10 mm × 軸方向 20 mm の面である。
- [0079] 試験片の観察面を機械研磨し、さらに、電解研磨を行い、表層の歪みを除去する。電解研磨後の観察面に対して、X 線回折法（XRD）により回折プロファイルを得る。XRD においては、線源を  $C\alpha$  線、管電圧を 30 kV、管電流を 100 mA とする。また、回折角（ $2\theta$ ）を 45～105 度の範囲として、0.02 度ピッチで、1 点あたり 0.6 秒で測定した。なお、回折角に相当するピーク位置の較正は、Si 標準板を用いて特定面の回折ピーク位置が基準位置に対してずれがないかを確認することにより行うことができる。また、半価幅については、LaB<sub>6</sub>（六ホウ化ランタン）を標準試料として用い、予め装置の幅広がり（ $B'$ ）を計測することにより、補正を行う。
- [0080] 得られた回折プロファイルから、(110)、(211)、及び、(220) 回折面について、ピーク位置（ $2\theta$ ）と、半価幅（ $B'$ ）とをそれぞれ

求める。求めた各回折面のピーク位置 ( $2\theta$ ) と、各回折面の半価幅 ( $B'$ ) と、Williamson-Hallの式 (式 (2)) とから、不均一歪み  $\varepsilon$  を求める。

$$B' \times \cos \theta / \lambda = 0.9 / D + 2\varepsilon \times \sin \theta / \lambda \quad (2)$$

ここで、式 (2) 中において、 $\theta$  は回折角度、 $\lambda$  は X 線の波長 (0.1788965 nm)、 $D$  : 結晶子径、を意味する。

[0081] より具体的には、求めた各回折面のピーク位置 ( $2\theta$ ) と、各回折面の半価幅 ( $B'$ ) とから、 $B' \times \cos (\theta) / \lambda$  と、 $\sin (\theta) / \lambda$  とを求める。(110)、(211)、及び、(220) 回折面それぞれについて、得られた  $B' \times \cos (\theta) / \lambda$  を縦軸に、 $\sin (\theta) / \lambda$  を横軸にプロットして、カーブフィッティングにより直線を得る。得られた直線の傾き ( $2\varepsilon$ ) から、不均一ひずみ  $\varepsilon$  を得る。得られた  $\varepsilon$  と、バーガスベクトル  $b$  と、次の式 (3) とから、Co-K $\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  ( $m^{-2}$ ) を求めることができる。

$$\rho = 14.4 \times \varepsilon^2 / b^2 \quad (3)$$

ここで、式 (3) 中において、 $b$  は体心立方構造 (鉄) のバーガスベクトル (0.25 nm) を意味する。

[0082] [(211) 回折面の半価幅について]

本実施形態による鉄道用車軸 1 では、中央平行部硬化層 3H のうち、ビッカース硬さが 480HV 以上の領域において、Co-K $\alpha$  特性 X 線回折による (211) 回折面の半価幅  $B$  が 1.34 度以下である。上述のとおり、Co-K $\alpha$  特性 X 線回折による (211) 回折面の半価幅  $B$  は、結晶格子の微視的な歪みの指標である。

[0083] 上述のとおり、特定硬さ領域は、中央平行部硬化層 3H の中でも特に硬さが高く、転位密度が高くなりやすい。そのため、上述のとおり、本実施形態では特定硬さ領域における Co-K $\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  を  $2.5 \times 10^{16} m^{-2}$  以下にまで低減する。しかしながら、特定硬さ領域における Co-K $\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$

が  $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  以下にまで低減されても、結晶格子の微視的な歪みが局部的に大きくなっている領域では、繰り返し応力により転位が滞留しやすい傾向がある。そのため、本実施形態による鉄道用車軸 1 では、中央平行部硬化層 3 H の特定硬さ領域において、結晶格子の微視的な歪みを低減する。

[0084] したがって、本実施形態による鉄道用車軸 1 の中央平行部 3 では、母材部が上述の化学組成を有し、中央平行部硬化層 3 H の特定硬さ領域において、 $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  が  $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  以下であり、 $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折による (2 1 1) 回折面の半価幅 B が 1.34 度以下である。本実施形態において、中央平行部硬化層 3 H の特定硬さ領域における、 $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折による (2 1 1) 回折面の半価幅 B の好ましい上限は 1.33 度であり、さらに好ましくは 1.32 度である。なお、中央平行部硬化層 3 H の特定硬さ領域において、 $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折による (2 1 1) 回折面の半価幅 B の下限は特に限定されない。本実施形態では、中央平行部硬化層 3 H の特定硬さ領域において、 $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折による (2 1 1) 回折面の半価幅 B の下限は、たとえば、0.9 度である。

[0085] 本実施形態による鉄道用車軸 1 において、 $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折による (2 1 1) 回折面の半価幅 B は、次の方法で求めることができる。上述の  $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  を求める場合と同一の条件で試験片を作製し、上述の  $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  を求める場合と同一の条件で XRD により回折プロファイルを得る。得られた回折プロファイルから、(2 1 1) 回折面のピークを特定し、その半価幅を求める。求めた半価幅を、 $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折による (2 1 1) 回折面の半価幅 B と定義する。

[0086] [式 (1) について]

本実施形態による鉄道用車軸 1 では、中央平行部硬化層 3 H のうち、ビッカース硬さが 480 HV 以上の領域において、 $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  と、 $\text{Co-K}\alpha$  特性 X 線回折による (2 1 1

) 回折面の半価幅Bとが、式(1)を満たす。

$$(-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho \geq 1.00 \quad (1)$$

ここで、式(1)中の $\rho$ にはCo-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度が $m^{-2}$ で代入され、BにはCo-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅が度で代入される。

[0087]  $F_{n1}$  ( $= (-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho$ ) は、特定硬さ領域における転位の集積度合いを示す指標である。 $F_{n1}$ が1.00未満の場合、繰り返し応力が負荷された特定硬さ領域において、転位が集積し、き裂の起点となる。その結果、中央平行部における疲労強度が十分に得られない。一方、 $F_{n1}$ が1.00以上であれば、繰り返し応力が付加された特定硬さ領域においても、転位の集積が抑制され、中央平行部における疲労強度を高めることができる。

[0088] したがって、本実施形態による鉄道用車軸1の中央平行部3では、母材部が上述の化学組成を有し、中央平行部硬化層3Hの特定硬さ領域において、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} m^{-2}$ 以下であり、Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが1.34度以下であり、さらに、 $F_{n1}$ が1.00以上である。本実施形態において、 $F_{n1}$ の好ましい下限は1.01であり、さらに好ましくは1.03である。本実施形態において、 $F_{n1}$ の上限は特に限定されない。本実施形態では、 $F_{n1}$ の上限は、たとえば、3.0である。

[0089] [製造方法]

本実施形態による鉄道用車軸の製造方法の一例を説明する。

[0090] 上述の化学組成を有する溶鋼を製造する。溶鋼を用いてインゴットを製造する。インゴットに対して熱間鍛造を実施して、車軸形状を有する粗製品を製造する。熱間鍛造時のインゴットの加熱温度は、周知の温度範囲で足りる。加熱温度はたとえば、 $1000 \sim 1300^\circ C$ である。製造された粗製品に対して、焼入れ及び焼戻し処理、又は、焼ならし処理を実施する。

[0091] 焼入れ及び焼戻し処理を実施する場合、焼入れ処理及び焼戻し処理の上限

は周知の条件で足りる。具体的には、焼入れ処理では、焼入れ温度を  $A_{c3}$  変態点以上とする。焼入れ温度で粗製品を保持し、その後、水冷又は油冷によって急冷する。焼戻し処理では、焼戻し温度を  $A_{c1}$  変態点以下とする。焼戻し温度で粗製品を保持し、その後放冷する。焼ならし処理を実施する場合、粗製品を  $A_{c1}$  変態点よりも高い熱処理温度で保持し、その後、放冷する。なお、焼ならし処理に続いて、焼戻し処理を実施してもよい。

[0092] 焼入れ焼戻し処理、又は、焼ならし処理が実施された粗製品に対して、必要に応じて、機械加工を実施する。その後、粗製品に対して、高周波焼入れ処理、及び、焼戻し処理を実施する。以下、高周波焼入れ処理及び焼戻し処理について詳述する。

[0093] [高周波焼入れ処理について]

高周波焼入れ処理では、高周波加熱によって、粗製品の表層部分を  $A_{c3}$  変態点よりも高い温度にした後、冷却する。この場合、粗製品の表層部分がオーステナイトからマルテンサイト又はベイナイトに変態する。その結果、粗製品の表層部分に硬化層が形成される。

[0094] 高周波焼入れ処理は、周知の高周波加熱装置と、周知の冷却装置とを用いて実施することができる。たとえば、高周波加熱装置として、円環状の高周波加熱装置を用いてもよく、冷却装置として、円環状の冷却装置を用いてもよい。この場合、鉄道用車軸 1 の中心軸 C 1 と、円環状の高周波加熱装置及び円環状の冷却装置とが、同軸に配置されることにより、鉄道用車軸 1 のはめ合い部 2 及び中央平行部 3 の表面に効率よく高周波焼入れ処理を実施することができる。

[0095] 本実施形態による高周波焼入れ処理では、高周波加熱において、粗製品の表層部分を  $A_{c3}$  変態点以上に加熱できれば、特に限定されない。すなわち、本実施形態では、高周波加熱として、周知の高周波加熱を実施すればよい。たとえば、高周波加熱装置の交流電流の周波数を  $1 \sim 10 \text{ kHz}$  としてもよい。

[0096] 本実施形態による高周波焼入れ処理では、冷却において、冷却速度を適宜

制御する。ここで、焼入れ時の冷却速度が遅すぎれば、はめ合い部硬化層 2 H 及び中央平行部硬化層 3 H がマルテンサイト及びベイナイト主体のミクロ組織とならず、製造された鉄道用車軸 1 において、はめ合い部硬化層 2 H 及び中央平行部硬化層 3 H の硬さを十分に高められない場合がある。そのため、従来の高周波焼入れでは、高周波焼入れ時の冷却は、急冷を実施する。一方、高周波加熱によって  $A_{c3}$  変態点よりも高い温度まで加熱されることから、急冷時に変態を伴う。その結果、冷却速度が速いほど、高周波焼入れ後の転位密度が高くなる。

[0097] 本実施形態による高周波焼入れ処理ではさらに、粗製品の表層部分のみが加熱され、冷却される。その結果、製造される鉄道用車軸 1 には、はめ合い部硬化層 2 H と、中央平行部硬化層 3 H と、母材部 BM とが形成される。つまり、本実施形態による高周波焼入れ処理では、粗製品の一部のみが加熱された後、急冷される。そのため、本実施形態による高周波焼入れでは、熱処理炉等を用いて鋼材全体を加熱した後急冷する焼入れと比較して、冷却速度が速くなりやすい。

[0098] 高周波焼入れ処理によって、表層部分のみを加熱した後冷却する場合における冷却速度について、具体例を挙げて説明する。特許文献 4（特開 2007-321190 号公報）では、疲労特性に優れた鋼材の製造方法を開示する。特許文献 4 の段落 [0051] には、高周波焼入れ時の冷却速度を  $200^{\circ}\text{C}/\text{秒}$  以上とするのが好ましいことが記載されている。より具体的には、特許文献 4 の段落 [0054] 及び表 2-1~2-3 を参照して、硬化層深さを 2~7 mm 程度とする場合、高周波焼入れの加熱保持後の冷却速度は  $1000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$  であることが開示されている。

[0099] さらに、非特許文献 1 では、高周波焼入れ処理における、 $500\sim 200^{\circ}\text{C}$  の範囲の冷却速度を開示する。具体的に、非特許文献 1 の第 5 頁に記載される図 13~図 15 は、高周波焼入れ処理における加熱開始からの時間 (s) と、ワーク（被加熱材料）の温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) との関係を示す。非特許文献 1 の図 13~15 を参照して、ワークが冷却される際、 $500^{\circ}\text{C}$  から  $200^{\circ}\text{C}$  に

到達するまでにかかる時間は、いずれも2秒以下となっている。つまり、非特許文献1の図13～15には、高周波焼入れ処理において、500～200℃の範囲における冷却速度は、複数の測定点において、いずれも150℃/秒以上であることが示されている。

[0100] このように、従来の高周波焼入れ処理では、非常に速い冷却速度で急冷される。一方、本実施形態による高周波焼入れ処理では、Ms点到達前の500℃から、Mf点通過後の200℃までにおける、冷却速度を制御して、転位密度 $\rho$ が高くなりすぎないように調整する。具体的に、本実施形態による高周波焼入れ処理では、500～200℃の範囲における冷却速度CRを80℃/秒以下に低減する。その結果、製造された鉄道用車軸1の中央平行部硬化層3Hの特定硬さ領域において、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ を $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下に低減することができる。

[0101] 500～200℃の範囲における冷却速度CRの好ましい上限は60℃/秒であり、さらに好ましくは50℃/秒であり、さらに好ましくは40℃/秒である。一方、上述のとおり、500～200℃の範囲における冷却速度CRが遅すぎれば、マルテンサイト及びベイナイト主体のマイクロ組織とならない場合がある。したがって、本実施形態による高周波焼入れ処理では、500～200℃の範囲における冷却速度CRの下限は、たとえば、10℃/秒である。

[0102] なお、500～200℃の範囲における冷却速度CRは、K型熱電対を用いて、粗製品の表面温度を測定することによって求めることができる。また、500～200℃の範囲における冷却速度CRを調整する方法は、特に限定されない。たとえば、シャワー水冷又はミスト水冷により粗製品を冷却する場合、シャワー又はミストの水量を調整することによって、500～200℃の範囲における冷却速度CRを調整することができる。

[0103] [焼戻し処理について]

本実施形態では、高周波焼入れ処理が実施された粗製品に対して、焼戻し処理を実施する。焼戻し処理では、粗製品のマイクロ組織において、 $\epsilon$ 炭化物

の析出、転位の回復（消滅）、及び、格子歪みの低減が生じる。すなわち、焼戻し処理を実施することによって、上述の高周波焼入れ処理によって高まった転位密度 $\rho$ 、及び、X線回折における（2 1 1）面の半価幅Bのいずれも低下させることができる。

[0104] 本実施形態による焼戻し処理では、次の式（A）で定義される $\lambda$ を8600～10000にする。

$$\lambda = T (\log_{10} (t) + 20) \quad (A)$$

ここで、式（A）中のTには、焼戻し温度がKで代入され、tには焼戻し時間が時間で代入される。

[0105] 本明細書において、焼戻し温度T（K）とは、焼戻しを実施する熱処理炉の温度（K）に相当する。本明細書においてさらに、焼戻し時間とは、鉄道用車軸1が焼戻し温度T（K）で保持される時間（時間）に相当する。

[0106]  $\lambda$ が小さすぎれば、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ 、及び／又は、Co-K $\alpha$ 特性X線回折による（2 1 1）回折面の半価幅Bが十分に低減できない場合がある。一方、 $\lambda$ が大きすぎれば、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が低下しすぎ、中央平行部硬化層3Hにおいて、ピッカース硬さで480HV以上の硬さが得られない場合がある。したがって、本実施形態における焼戻し処理では、 $\lambda$ を8600～10000とする。その結果、本実施形態による鉄道用車軸1は、中央平行部硬化層3Hの特定硬さ領域において、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ を $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下に低減でき、かつ、Co-K $\alpha$ 特性X線回折による（2 1 1）回折面の半価幅Bを1.34度以下にすることができる。

[0107] 本実施形態による鉄道用車軸1では、中央平行部硬化層3Hの特定硬さ領域において、転位密度（すなわち、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ ）と、格子歪み（すなわち、Co-K $\alpha$ 特性X線回折による（2 1 1）回折面の半価幅B）とのバランスを取ることによって、中央平行部3の疲労強度を高める。一方、上述のとおり、高周波焼入れ処理にお

ける500～200℃の範囲での冷却速度によって、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が変化する。また、焼戻し処理における $\lambda$ によって、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ 及びCo-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが変化する。そこで、本実施形態による高周波焼入れ処理と、焼戻し処理とのバランスを取る。

[0108] 具体的に、本実施形態による高周波焼入れ処理と焼戻し処理とは、次の式(B)で定義されるFを90000～400000とする。

$$F = CR \times \lambda \quad (B)$$

ここで、式(B)中のCRには、500～200℃の範囲における冷却速度が℃/秒で代入され、 $\lambda$ には、式(A)で定義される $\lambda$ が代入される。

[0109] Fが小さすぎれば、中央平行部硬化層3Hの特定硬さ領域において、Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが高くなりすぎる場合がある。一方、Fが大きすぎれば、Fn1が1.00未満になる場合がある。したがって、本実施形態では、Fを90000～400000とする。その結果、本実施形態による鉄道用車軸1は、中央平行部硬化層3Hの特定硬さ領域において、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ を $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下に低減でき、Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bを1.34度以下にでき、さらに、Fn1を1.00以上にすることができる。

[0110] 焼戻し処理が実施された粗製品は、室温まで冷却される。この場合、焼戻し処理後の冷却は、特に限定されない。たとえば、焼戻し処理がされた粗製品に対して、室温まで放冷してもよい。焼戻し処理が実施された粗製品に対してさらに、最終の機械加工を実施してもよい。つまり、機械加工は任意の処理工程である。なお、機械加工を実施する場合、必要な深さの硬化層を確保できる範囲内で、機械加工(旋削及び研磨)を実施する。以上の工程により、本実施形態による鉄道用車軸1が製造できる。

[0111] 上述の鉄道用車軸1の製造方法は、本実施形態の鉄道用車軸1の製造方法

の一例である。したがって、はめ合い部 2 及び中央平行部 3 の母材部 B M の化学組成中の各元素が上述の範囲内であって、中央平行部硬化層 3 H の特定硬さ領域において、C o - K  $\alpha$  特性 X 線回折結果に基づいて得られる転位密度  $\rho$  が  $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  以下であり、C o - K  $\alpha$  特性 X 線回折による (2 1 1) 回折面の半価幅 B が 1.34 度以下であり、F n 1 が 1.00 以上である本実施形態による鉄道用車軸 1 が製造できれば、上述の製造方法には限定されない。

[0112] 以下、実施例により本実施形態の鉄道用車軸 1 の効果をさらに具体的に説明する。以下の実施例での条件は、本実施形態の鉄道用車軸 1 の実施可能性及び効果を確認するために採用した一条件例である。したがって、本実施形態の鉄道用車軸 1 はこの一条件例に限定されない。

### 実施例 1

[0113] 実施例 1 では、鉄道用車軸 1 を製造して、中央平行部 3 における疲労強度を評価した。具体的に、C : 0.26%、S i : 0.29%、M n : 0.69%、P : 0.012%、S : 0.006%、C r : 1.11%、M o : 0.26%、N : 0.0036%、O : 0.0019%、A l : 0.032%、及び、残部が F e 及び不純物からなる化学組成を有する溶鋼を製造した。製造された溶鋼からインゴットを製造した。インゴットを 1250°C に加熱した後、熱間鍛造して図 3 に示される車軸形状の粗製品 10 を製造した。図 3 は、本実施例における粗製品の断面図である。粗製品 10 は、一対のはめ合い部 20 と、一対のはめ合い部 20 の間に配置される中央平行部 30 とを備えた。

[0114] 各試験番号の粗製品 10 に対して、焼入れ及び焼戻しを実施した。焼入れ時の熱処理温度は、鋼の A<sub>3</sub> 変態点よりも高い 890°C とした。熱処理温度で保持した後、水焼入れを実施した。焼入れ後の各試験番号の粗製品 10 に対して、焼戻しを実施した。焼戻し条件は、各試験番号の粗製品 10 が同程度の表面硬さを有するように、焼戻し温度を 550~670°C で調整した。粗製品 10 を焼戻し温度で 120 分保持した後、常温になるまで空冷した。

[0115] 焼戻しされた粗製品10に対して、高周波焼入れ処理を実施した。高周波焼入れ処理は、図3に示す粗製品10のうち、ハッチングで示した領域について実施した。高周波焼入れ時の焼入れ温度は各試験番号の鋼の $A_{c3}$ 変態点以上であった。各試験番号の粗製品10について、高周波焼入れ時の500～200℃の範囲における冷却速度CR(℃/秒)を表1に示す。なお、冷却速度CR(℃/秒)は、K型熱電対を用いて測定した。また、冷却速度CR(℃/秒)の調整は、冷却時の水量を調整することにより行った。

[0116] [表1]

TABLE 1

試験番号	CR(℃/秒)	T(℃)	t(時間)	$\lambda$	F	転位密度 $\rho$ ( $10^{16}m^{-2}$ )	半価幅B(度)	Fn1	疲労試験
1-1	20	200	1.0	9460	189200	2.1	1.25	1.19	E
1-2	100	200	3.0	9686	968600	2.6	1.21	1.04	NA
1-3	12	150	0.3	8239	98868	2.0	1.35	1.01	NA
1-4	50	200	1.5	9543	477150	2.4	1.29	0.96	NA

[0117] 高周波焼入れが実施された各試験番号の粗製品10に対して、焼戻し処理を実施した。各試験番号の粗製品10に実施した焼戻し処理における焼戻し温度(℃)を「T(℃)」として、焼戻し時間を「t(時間)」として、表1に示す。さらに、各試験番号の粗製品10に対して実施した焼戻しにおける焼戻し温度T(℃)と、焼戻し時間t(時間)と、上述の式(A)とから、 $\lambda(=(273+T) \times (\log_{10}(t)) + 20)$ を求めた。求めた各試験番号における $\lambda$ を表1に示す。さらに、各試験番号の粗製品10に実施した高周波焼入れ時の500～200℃の範囲における冷却速度CR(℃/秒)と、焼戻し時の $\lambda$ と、上述の式(B)とから、 $F(=CR \times \lambda)$ を求めた。求めた各試験番号におけるFを表1に示す。

[0118] 高周波焼入れ処理を実施した粗製品10に対して、機械加工を実施して、図4に示す鉄道用車軸1を製造した。図4は、本実施例における鉄道用車軸の側面図である。各試験番号の鉄道用車軸1は、一対のはめ合い部2と、中央平行部3とを備えた。各はめ合い部2は、幅が200mmであり、直径 $D_w$ が150mmであった。中央平行部3は、直径 $D_A$ が136mmであった。は

め合い部2と中央平行部3との間のフィレット部は、曲率半径が10mmであった。以上の製造工程により、鉄道用車軸1を製造した。

[0119] [評価試験]

製造された鉄道用車軸1に対して、以下に説明するX線回折測定試験、及び、疲労試験を実施した。

[0120] [X線回折測定試験]

製造された各試験番号の鉄道用車軸1の中央平行部硬化層3Hから、特定硬さ領域を特定した。各試験番号の中央平行部硬化層3Hの特定硬さ領域から、X線回折測定試験用の試験片を作製した。試験片の大きさは、鉄道用車軸1の周方向10mm×軸方向20mm×径方向5mmであった。周方向10mm×軸方向20mmを観察面とし、観察面に対して機械研磨及び電解研磨を実施して、上述の方法でX線回折測定を実施した。測定にはX線回折装置を用い、測定条件は $\text{Co-K}\alpha$ 特性X線、管電圧30kV、管電流100mAとした。回折角に相当するピーク位置の較正は、Si標準板を用いて特定面の回折ピーク位置が基準位置に対してずれがないかを確認することにより行った。また、半価幅については、LaB<sub>6</sub>（六ホウ化ランタン）を標準試料として用い、予め装置の幅広がりを計測することにより、補正を行った。

[0121] 得られた $\text{Co-K}\alpha$ 特性X線回折プロファイルから、(110)、(211)、(220)面のピーク位置( $2\theta$ )と半価幅( $B'$ )とを求め、上述の式(2)及び式(3)を用いて、試験片における転位密度 $\rho$  ( $10^{16}\text{m}^{-2}$ )を求めた。求めた各試験番号の $\text{Co-K}\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$  ( $10^{16}\text{m}^{-2}$ )を「転位密度 $\rho$ 」として表1に示す。

[0122] 得られた $\text{Co-K}\alpha$ 特性X線回折プロファイルからさらに、(211)回折面のピークを特定し、その半価幅を求めた。求めた各試験番号の $\text{Co-K}\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅B(度)を「半価幅B(度)」として表1に示す。さらに、各試験番号において、 $\text{Co-K}\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$  ( $10^{16}\text{m}^{-2}$ )と、 $\text{Co-K}\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅B(度)と、上述の式(1)とから

、 $F_{n1} (= (-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho)$  を求めた。求めた各試験番号の $F_{n1}$ を表1に示す。

[0123] [疲労試験]

図5は本実施例における鉄道用車軸1の疲労試験装置の模式図である。図5を参照して、各試験番号の鉄道用車軸1の片側のはめ合い部2Aに、車輪に相当する治具200を圧入した。車輪に相当する治具200を固定した。これにより、鉄道用車軸1を片持ち梁状態にした。鉄道用車軸1のうち、固定されているはめ合い部2Aの内側端から700mm内側（図5中の点P）位置に、鉄道用車軸1の中心軸C1方向に垂直な向きで繰返し負荷を与える曲げ疲労試験を実施した。試験機として、鷺宮製作所製電気油圧サーボ型疲労試験機（荷重容量500kN）を用いた。

[0124] 試験条件は、応力比-1の両振り負荷とし、周波数は1~3Hzとした。繰返し回数は $5 \times 10^6$ 回を上限として、破断まで実施した。 $5 \times 10^6$ 回まで破断しない場合、そこで試験を打ち切り、未破断と判断した。ここで、 $5 \times 10^6$ 回までに破断した試験応力の最小値を $F_B$ とする。また、 $F_B$ 以下で $5 \times 10^6$ 回に到達して未破断であった試験応力の最大値を $F_M$ とする。 $F_M$ と $F_B$ との平均値を $F_A$ とし、 $(F_B - F_M) / F_A \leq 0.10$ となった場合の $F_A$ を、疲労限度と定義した。このようにして求めた試験番号1-1の疲労限度を用いて、各試験番号の鉄道用車軸1に負荷する試験応力とした。

[0125] 各試験番号の鉄道用車軸1に対して、上述のとおり決定された試験応力（すなわち、試験番号1-1の疲労限度）を負荷して、疲労試験を実施した。試験条件は上述の条件と同一とし、繰返し回数は $5 \times 10^6$ 回を上限として、破断まで実施した。 $5 \times 10^6$ 回の繰返し数に到達した鉄道用車軸1は、優れた疲労強度を有すると評価した（表1中「E」（Excellent））。一方、 $5 \times 10^6$ 回の繰返し数に到達せずに破断した鉄道用車軸1は、優れた疲労強度を有しないと評価した（表1中「NA」（Not Acceptable））。各試験番号に対する疲労試験の評価結果を表1に示す。

[0126] [評価結果]

表1を参照して、試験番号1-1の鉄道用車軸1は、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下であり、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが1.34度以下であり、さらに、Fn1が1.00以上であった。その結果、疲労試験において、優れた疲労強度を有していた。

[0127] 一方、試験番号1-2の鉄道用車軸1は、高周波焼入れ時の500~2000°Cの範囲における冷却速度CR (°C/秒)が速すぎた。さらに、高周波焼入れ処理及び焼戻し処理におけるFが高すぎた。その結果、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ を超えた。その結果、疲労試験において、優れた疲労強度を有さなかった。

[0128] 試験番号1-3の鉄道用車軸1は、焼戻し条件における $\lambda$ が低すぎた。その結果、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが1.34度を超えた。その結果、疲労試験において、優れた疲労強度を有さなかった。

[0129] 試験番号1-4の鉄道用車軸1は、高周波焼入れ処理及び焼戻し処理におけるFが高すぎた。その結果、Fn1が1.00未満であった。その結果、疲労試験において優れた疲労強度を有さなかった。

## 実施例 2

[0130] 実施例2では、鉄道用車軸1を模擬した試験片を作製し、中央平行部における疲労強度を評価した。具体的に、表2に記載の化学組成を有する溶鋼を製造した。ここで、表2中の「-」は、対応する元素の含有量が不純物レベルであることを意味する。具体的には、Cu、Ni、V含有量における「-」は、各元素の含有量が0.01%未満であることを意味する。Al含有量における「-」は、Al含有量が0.002%未満であることを意味する。Ti及びNb含有量における「-」は、各元素の含有量が0.001%未満であることを意味する。B及びCa含有量における「-」は、各元素の含有量が0.0001%未満であることを意味する。

[0131]

[表2]

TABLE 2

鋼  
番号

化学組成(単位は質量%、残部はFe及び不純物)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	O	Cu	Ni	Al	V	Ti	Nb	B	Ca
1	0.26	0.29	0.69	0.012	0.006	1.11	0.26	0.0036	0.0019	-	-	0.032	-	-	-	-	-
2	0.25	0.31	0.73	0.012	0.008	1.08	0.25	0.0032	0.0013	0.10	0.05	0.032	-	-	-	-	-
3	0.25	0.30	0.72	0.011	0.008	1.08	0.25	0.0039	0.0014	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.26	0.30	0.71	0.009	0.012	1.11	0.26	0.0056	0.0012	0.10	0.05	0.032	0.040	-	-	-	-
5	0.25	0.29	0.70	0.015	0.013	1.07	0.24	0.0045	0.0016	-	-	0.033	-	0.010	-	-	-
6	0.27	0.32	0.69	0.012	0.006	1.05	0.25	0.0048	0.0017	-	-	0.030	-	-	0.022	-	-
7	0.25	0.33	0.68	0.014	0.008	1.13	0.27	0.0037	0.0020	-	-	0.028	-	-	-	0.0014	-
8	0.26	0.29	0.72	0.013	0.009	1.11	0.26	0.0034	0.0017	-	-	0.026	-	-	-	-	0.0001

[0132] 鋼番号1～8の溶鋼から、インゴットを製造した。鋼番号1については、インゴットを1250℃に加熱した後、熱間鍛造して、図3に示される車軸形状の粗製品10を製造した。鋼番号2～8については、インゴットを1250℃に加熱した後、熱間鍛造して、直径180mm×長さ300mmの粗製品を製造した。これは、図3に示される車軸形状の中央平行部30と直径をほぼ同じにした形状である。各鋼番号の粗製品10に対して、焼入れ及び焼戻しを実施した。焼入れ時の熱処理温度は、鋼の $A_{c3}$ 変態点よりも高い890℃とした。熱処理温度で保持した後、水焼入れを実施した。焼入れ後の各試験番号の粗製品10に対して、焼戻しを実施した。焼戻し条件は、各試験番号の粗製品10が同程度の表面硬さを有するように、焼戻し温度を550～670℃で調整した。粗製品10を焼戻し温度で120分保持した後、常温になるまで空冷した。

[0133] 各鋼番号の粗製品から、各試験番号の供試材を作製した。供試材100は、図6に示される形状を有していた。図6は、本実施例で用いた供試材の断面図である。各試験番号の供試材100に対して、高周波焼入れを実施した。高周波焼入れは、供試材100が全て硬化層となるように実施した。高周波焼入れ時の焼入れ温度は、各試験番号の鋼の $A_{c3}$ 変態点以上であった。高周波焼入れ時の500～200℃の範囲における冷却速度CR(℃/秒)を表3に示す。なお、冷却速度CR(℃/秒)は、K型熱電対を用いて測定した。また、冷却速度CR(℃/秒)の調整は、冷却時の水量を調整することにより行った。

[0134]

[表3]

TABLE 3

試験番号	鋼番号	CR (°C/秒)	T (°C)	t (時間)	$\lambda$	F	転位密度 $\rho$ ( $10^{16}m^{-2}$ )	半価幅B (度)	Fn1	正規化疲労限度
2-1	1	20	200	1.0	9460	189200	2.1	1.25	1.19	1.58
2-2	2	20	200	1.0	9460	189200	1.9	1.26	1.29	1.55
2-3	3	20	200	1.0	9460	189200	2.0	1.19	1.39	1.54
2-4	4	20	200	1.0	9460	189200	2.2	1.23	1.18	1.59
2-5	5	20	200	1.0	9460	189200	2.0	1.26	1.23	1.55
2-6	6	20	200	1.0	9460	189200	1.9	1.18	1.49	1.56
2-7	7	20	200	1.0	9460	189200	2.1	1.22	1.26	1.55
2-8	8	20	200	1.0	9460	189200	2.2	1.20	1.25	1.54
2-9	1	100	200	3.0	9686	968568	2.6	1.21	1.04	1.42
2-10	1	12	150	0.3	8239	98866	2.0	1.35	1.01	1.46
2-11	1	50	200	1.5	9543	477165	2.4	1.29	0.96	1.47
2-12	1	80	200	2.0	9602	768191	2.5	1.26	0.98	1.48

[0135] 高周波焼入れが実施された各試験番号の供試材100に対して、焼戻しを実施した。各試験番号の供試材100に実施した焼戻しにおける焼戻し温度(°C)を「T(°C)」として、焼戻し時間を「t(時間)」として、表3に示す。さらに、各試験番号の供試材100に対して実施した焼戻しにおける焼戻し温度T(°C)と、焼戻し時間t(時間)と、上述の式(A)とから、 $\lambda (= (273 + T) \times (\log_{10}(t)) + 20)$ を求めた。求めた各試験番号における $\lambda$ を表3に示す。さらに、各試験番号の供試材100に実施した高周波焼入れ時の500~200°Cの範囲における冷却速度CR(°C/秒)と、焼戻し時の $\lambda$ と、上述の式(B)とから、 $F (= CR \times \lambda)$ を求めた。求めた各試験番号におけるFを表3に示す。焼戻しが実施された各試験番号の供試材100に対して機械加工を実施して、図7に示される疲労試験片500を製造した。図7は、本実施例で用いた疲労試験片の断面図である。

[0136] [評価試験]

各試験番号の疲労試験片500に対して、以下に説明するX線回折測定試験、及び、疲労試験を実施した。

[0137] [X線回折測定試験]

製造された各試験番号の疲労試験片500から、X線回折測定試験用の試験片を作製した。試験片の大きさは、鉄道用車軸1の周方向10mm×軸方

向20mm×径方向5mmであった。周方向10mm×軸方向20mmを観察面とし、観察面に対して機械研磨及び電解研磨を実施して、上述の方法でX線回折測定を実施した。測定にはX線回折装置を用い、測定条件はCo-K $\alpha$ 特性X線、管電圧30kV、管電流100mAとした。回折角に相当するピーク位置の較正は、Si標準板を用いて特定面の回折ピーク位置が基準位置に対してずれがないかを確認することにより行った。また、半価幅については、LaB<sub>6</sub>（六ホウ化ランタン）を標準試料として用い、予め装置の幅広がりを計測することにより、補正を行った。

[0138] 得られたCo-K $\alpha$ 特性X線回折プロファイルから、(110)、(211)、(220)面のピーク位置(2 $\theta$ )と半価幅(B')とを求め、上述の式(2)及び式(3)を用いて、試験片における転位密度 $\rho$ ( $10^{16}m^{-2}$ )を求めた。得られた各試験番号のCo-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ ( $10^{16}m^{-2}$ )を「転位密度 $\rho$ 」として表3に示す。得られたCo-K $\alpha$ 特性X線回折プロファイルからさらに、(211)回折面のピークを特定し、その半価幅を求めた。求めた各試験番号のCo-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅B(度)を「半価幅B(度)」として表3に示す。

[0139] さらに、各試験番号において、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ ( $10^{16}m^{-2}$ )と、Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅B(度)と、上述の式(1)とから、Fn1(= $(-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho$ )を求めた。求めた各試験番号のFn1を表3に示す。なお、試験番号2-9、2-10、及び、2-11については、事前実施した予備試験において、表1に示したX線回折プロファイルとほとんど差が認められなかった。そのため、試験番号2-9、2-10、及び、2-11においては、Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ 、Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅B、及び、Fn1について、表1に示した測定値を用いた。

[0140] [疲労試験]

各試験番号の疲労試験片500に対して、小野式回転曲げ疲労試験を実施した。試験周波数は60Hz、室温(25℃)大気雰囲気中とし、繰返し数 $1 \times 10^7$ 回まで実施した。疲労限度近傍では、複数の試験片を用いて疲労試験を実施して、修正ステアケース法に沿って疲労限度を求めた。各試験番号の疲労試験片500のつかみ部の横断面に対して、ビッカース硬さを求めた。押し付け力は9.8Nとし、5点法(横断面の中心1点、R/2部4点)を用いて、測定平均値を各試験番号のビッカース硬さ(HV)と定義した。各試験番号について、得られた疲労限度(MPa)をビッカース硬さ(HV)で除し、各試験番号の正規化された疲労限度と定義した。得られた正規化された疲労限度を「正規化疲労限度」として表3に示す。

[0141] [評価結果]

表2及び表3を参照して、試験番号2-1~2-8の供試材100は、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下であり、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが1.34度以下であり、さらに、Fn1が1.00以上であった。その結果、正規化疲労限度が1.50以上となり、優れた疲労強度を有していた。

[0142] 一方、試験番号2-9の供試材100は、高周波焼入れ時の500~2000℃の範囲における冷却速度CR(℃/秒)が速すぎた。さらに、高周波焼入れ処理及び焼戻し処理におけるFが高すぎた。その結果、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ を超えた。その結果、正規化疲労限度が1.50未満となり、優れた疲労強度を有さなかった。

[0143] 試験番号2-10の供試材100は、焼戻し条件における $\lambda$ が低すぎた。その結果、C $\alpha$ -K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが1.34度を超えた。その結果、正規化疲労限度が1.50未満となり、優れた疲労強度を有さなかった。

[0144] 試験番号2-11及び2-12の供試材100は、高周波焼入れ処理及び焼戻し処理におけるFが高すぎた。その結果、Fn1が1.00未満であっ

た。その結果、正規化疲労限度が1.50未満となり、優れた疲労強度を有さなかった。

[0145] 以上、本開示の実施の形態を説明した。しかしながら、上述した実施の形態は本開示を実施するための例示に過ぎない。したがって、本開示は上述した実施の形態に限定されることなく、その趣旨を逸脱しない範囲内で上述した実施の形態を適宜変更して実施することができる。

### 符号の説明

- [0146]
- 1 鉄道用車軸
  - 2 はめ合い部
  - 3 中央平行部
  - 2 H はめ合い部硬化層
  - 3 H 中央平行部硬化層
  - BM 母材部

## 請求の範囲

### [請求項1]

鉄道用車軸であって、  
鉄道用車輪が圧入される、一対のはめ合い部と、  
前記一対のはめ合い部の間に配置される中央平行部とを備え、  
前記はめ合い部は、  
前記はめ合い部の表層に形成されているはめ合い部硬化層と、  
前記はめ合い部硬化層よりも内部の母材部とを含み、  
前記中央平行部は、  
前記中央平行部の表層に形成されている中央平行部硬化層と、  
前記中央平行部硬化層よりも内部の前記母材部とを含み、  
前記母材部は、質量%で、  
C : 0.22~0.29%、  
Si : 0.15~0.40%、  
Mn : 0.50~0.80%、  
P : 0.020%以下、  
S : 0.040%以下、  
Cr : 0.90~1.20%、  
Mo : 0.15~0.30%、  
N : 0.0200%以下、  
O : 0.0040%以下、  
Ca : 0~0.0010%、  
Cu : 0~0.30%、  
Ni : 0~0.30%、  
Al : 0~0.100%、  
V : 0~0.060%、  
Ti : 0~0.020%、  
Nb : 0~0.030%、  
B : 0~0.0050%、及び、

残部がFe及び不純物、からなり、  
前記中央平行部硬化層のうち、ビッカース硬さが480HV以上の領域において、

Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ が $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以下であり、

Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bが1.34度以下であり、

前記Co-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度 $\rho$ と、前記Co-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅Bとが、式(1)を満たす、

鉄道用車軸。

$$(-4.8 \times 10^{16} \times B + 8.5 \times 10^{16}) / \rho \geq 1.00 \quad (1)$$

ここで、式(1)中の $\rho$ にはCo-K $\alpha$ 特性X線回折結果に基づいて得られる転位密度が $\text{m}^{-2}$ で代入され、BにはCo-K $\alpha$ 特性X線回折による(211)回折面の半価幅が度で代入される。

[請求項2]

請求項1に記載の鉄道用車軸であって、

前記母材部は、質量%で、

Cu: 0.01~0.30%、

Ni: 0.01~0.30%、

Al: 0.005~0.100%、

V: 0.005~0.060%、

Ti: 0.002~0.020%、

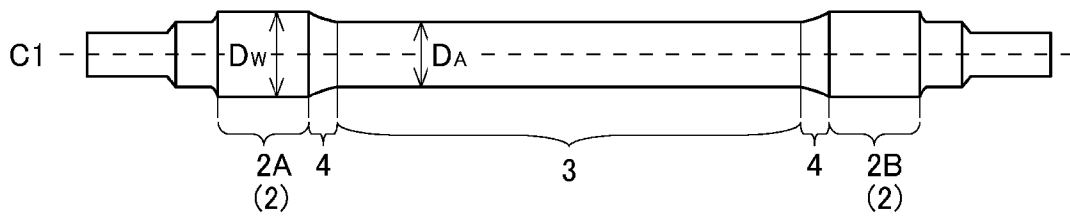
Nb: 0.002~0.030%、及び、

B: 0.0003~0.0050%からなる群から選択される1元素以上を含有する、

鉄道用車軸。

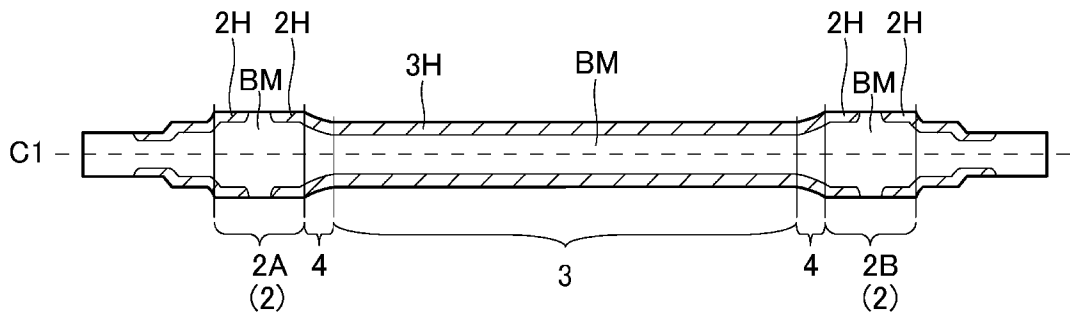
[図1]

FIG. 1

1

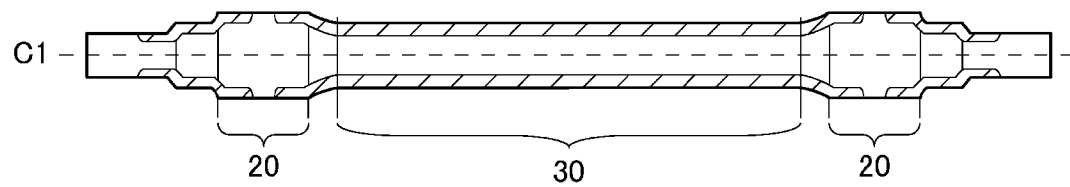
[図2]

FIG. 2

1

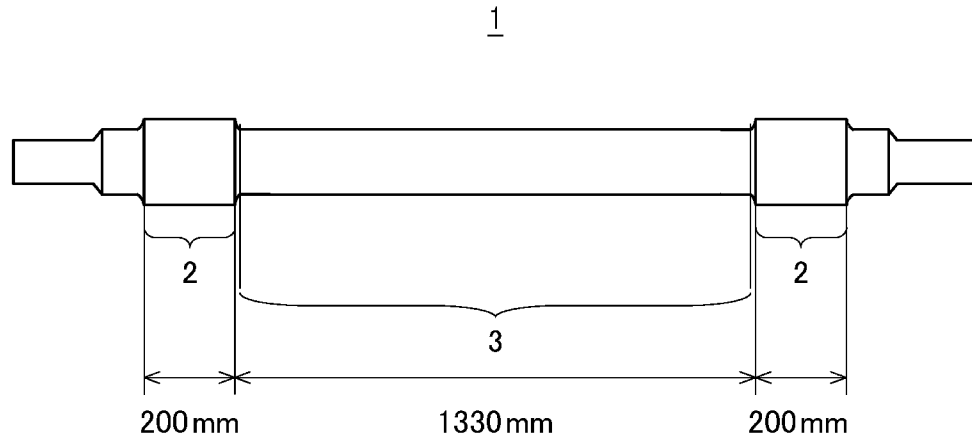
[図3]

FIG. 3

10

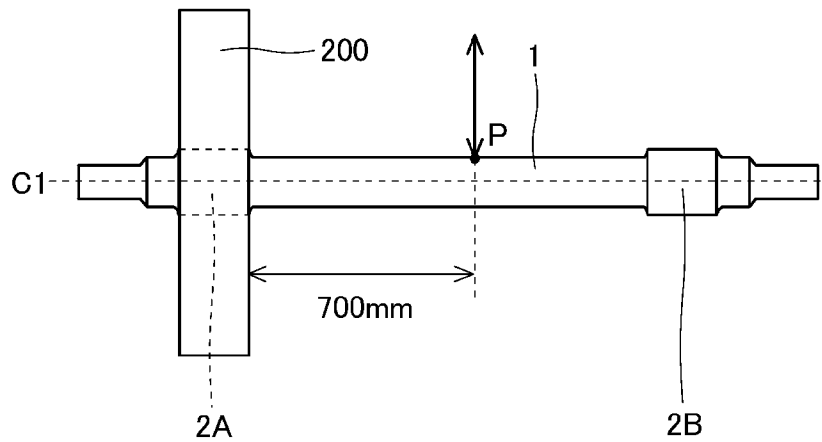
[図4]

FIG. 4



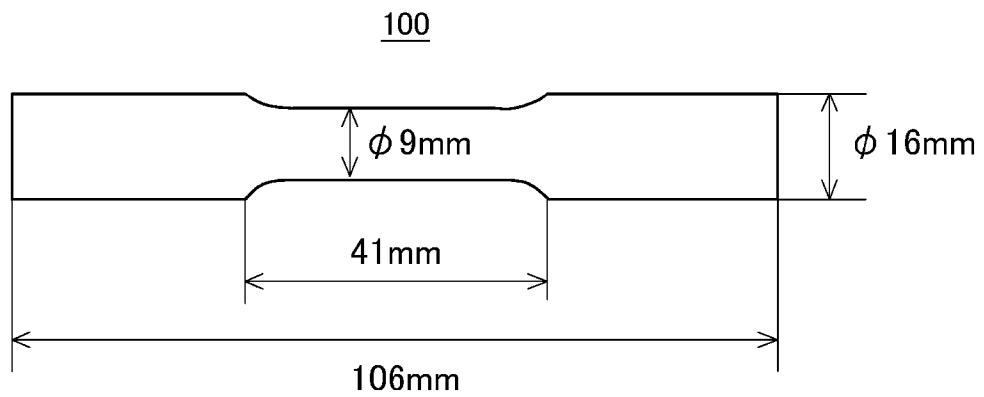
[図5]

FIG. 5



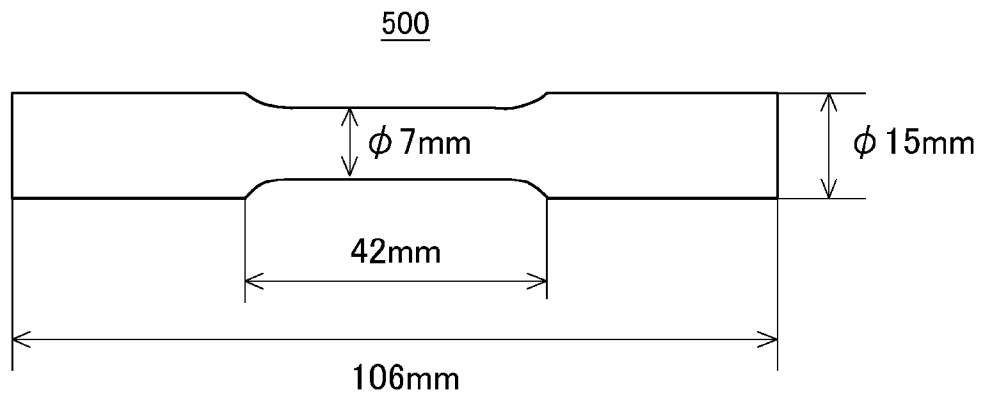
[図6]

FIG. 6



[図7]

FIG. 7



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/035498

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>C21D 6/00</i> (2006.01)i; <i>C21D 9/28</i> (2006.01)i; <i>C22C 38/00</i> (2006.01)i; <i>C22C 38/54</i> (2006.01)i; <i>C21D 1/10</i> (2006.01)i FI: C22C38/00 301Z; C22C38/54; C21D6/00 H; C21D9/28 A; C21D1/10 H		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) C21D6/00; C21D9/28; C22C38/00-38/60; C21D1/10; B60B1/00-11/10; B60B17/00-19/14; B60B15/00-15/28; B60B39/00-39/12; B60B21/00-31/06; B60B35/00-37/12; B60B33/00-33/08; B60G1/00-99/00		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2021 Registered utility model specifications of Japan 1996-2021 Published registered utility model applications of Japan 1994-2021		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2019/194274 A1 (NIPPON STEEL CORP) 10 October 2019 (2019-10-10) entire text, all drawings	1-2
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents:	"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	
"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		
Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report	
03 December 2021	14 December 2021	
Name and mailing address of the ISA/JP	Authorized officer	
Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		
	Telephone No.	

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/JP2021/035498**

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO 2019/194274 A1	10 October 2019	EP 3778967 A1	
..... entire text, all drawings .....			

<p>A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））                  C21D 6/00(2006.01)i; C21D 9/28(2006.01)i; C22C 38/00(2006.01)i; C22C 38/54(2006.01)i;                  C21D 1/10(2006.01)i                  FI: C22C38/00 301Z; C22C38/54; C21D6/00 H; C21D9/28 A; C21D1/10 H</p>										
<p>B. 調査を行った分野</p>										
<p>調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））                  C21D6/00; C21D9/28; C22C38/00-38/60; C21D1/10; B60B1/00-11/10; B60B17/00-19/14; B60B15/00-15/28;                  B60B39/00-39/12; B60B21/00-31/06; B60B35/00-37/12; B60B33/00-33/08; B60G1/00-99/00</p>										
<p>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</p> <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2021年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2021年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2021年
日本国実用新案公報	1922 - 1996年									
日本国公開実用新案公報	1971 - 2021年									
日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年									
日本国登録実用新案公報	1994 - 2021年									
<p>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）</p>										
<p>C. 関連すると認められる文献</p>										
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	WO 2019/194274 A1（日本製鉄株式会社）10.10.2019（2019-10-10） 全文、全図	1-2								
<p><input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。</p>										
<p>* 引用文献のカテゴリー</p> <p>“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの</p> <p>“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</p> <p>“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）</p> <p>“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</p> <p>“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</p> <p>“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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“&amp;” 同一パテントファミリー文献</p>										
国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日									
03.12.2021	14.12.2021									
名称及びあて先	権限のある職員（特許庁審査官）									
日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	河川 展明 4K 3770									
	電話番号 03-3581-1101 内線 3435									

国際調査報告  
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2021/035498

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO 2019/194274 A1	10.10.2019	EP 3778967 A1 全文、全図	