

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4987773号
(P4987773)

(45) 発行日 平成24年7月25日 (2012. 7. 25)

(24) 登録日 平成24年5月11日 (2012. 5. 11)

(51) Int. Cl.

F 1

E O 1 B 11/52 (2006. 01)
B 2 3 K 23/00 (2006. 01)
B 2 3 K 31/00 (2006. 01)
C 2 1 D 9/04 (2006. 01)
C 2 1 D 7/06 (2006. 01)

E O 1 B 11/52
 B 2 3 K 23/00 A
 B 2 3 K 31/00 A
 C 2 1 D 9/04 A
 C 2 1 D 7/06 Z

請求項の数 8 (全 20 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2008-78402 (P2008-78402)
 (22) 出願日 平成20年3月25日 (2008. 3. 25)
 (65) 公開番号 特開2008-274745 (P2008-274745A)
 (43) 公開日 平成20年11月13日 (2008. 11. 13)
 審査請求日 平成22年2月9日 (2010. 2. 9)
 (31) 優先権主張番号 特願2007-90716 (P2007-90716)
 (32) 優先日 平成19年3月30日 (2007. 3. 30)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(73) 特許権者 000006655
 新日本製鐵株式会社
 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号
 (74) 代理人 100110858
 弁理士 柳瀬 睦肇
 (74) 代理人 100110777
 弁理士 宇都宮 正明
 (74) 代理人 100100413
 弁理士 渡部 温
 (72) 発明者 狩峰 健一
 北九州市戸畑区飛幡町1-1 新日本製鐵
 株式会社 八幡製鐵所内
 (72) 発明者 上田 正治
 北九州市戸畑区飛幡町1-1 新日本製鐵
 株式会社 八幡製鐵所内
 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ロングレール

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

2本のレールをテルミット溶接することにより製造されたロングレールであって、溶接部のビードの止端部に形成された鋳バリが、レール足裏部において1mm以下であり、レール足表部に位置する前記ビードの止端部において鋳バリが除去されており、前記ビードの止端部のうち少なくとも前記レール足表部に位置する領域において、表面から50μm以内の組織がパーライトを有しており、前記表面に対して垂直な断面において該パーライトの60%以上のラメラが前記表面に対して±45°以下の角度を成していることを特徴とするロングレール。

【請求項 2】

前記ビードの止端部のうち前記レール足表部に位置する領域の前記断面において、表面から50μm以内に位置するパーライトの40%以上のラメラが前記表面に対して±15°以下の角度を成していることを特徴とする請求項1に記載のロングレール。

【請求項 3】

前記ビードの止端部のうち前記レール足表部に位置する領域の前記断面において、表面から50μm以内のパーライトの10%以上は、ラメラ間隔が70nm以下であることを特徴とする請求項1又は2に記載のロングレール。

【請求項 4】

前記ビードの止端部のうち前記レール足表部に位置する領域の前記断面において、表面から50μm以内のパーライトの5%以上は、ラメラ間隔が50nm以下であることを

10

20

特徴とする請求項 3 に記載のロングレール。

【請求項 5】

前記ビードの止端部のうち前記レール足表部に位置する領域は、前記ロングレールの長手方向の断面における断面の曲率半径が 1.5 mm 以上であることを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれか一項に記載のロングレール。

【請求項 6】

前記ビードの止端部の表面のうち前記レール足表部に位置する領域は、前記ロングレールの長手方向の残留応力が中立又は圧縮であることを特徴とする請求項 1 ～ 5 のいずれか一項に記載のロングレール。

【請求項 7】

前記ビードの止端部のうち前記レール足表部に位置する領域は、超音波ピーニング処理されていることを特徴とする請求項 1 ～ 6 のいずれか一項に記載のロングレール。

【請求項 8】

荷重繰り返し回数 200 万回での疲労限界が 280 MPa 以上であることを特徴とする請求項 1 ～ 7 のいずれか一項に記載のロングレール。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ロングレール及びその製造方法に関する。特に本発明は、従来と比較して疲労強度が向上したロングレール及びその製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

レールの中で最も損傷の起こりやすく、保守コストがかかる部分はレールの継目部である。また継目部は列車通過時に生じる騒音・振動の主要な発生源となる。旅客鉄道の高速化や貨物鉄道の高積載化が国内外で進められているため、上記問題点を有するレール継目を溶接によって連続化してロングレールする技術が一般化している。

【0003】

主なレールの溶接方法の一つにテルミット溶接（例えば特許文献 1 参照）がある。テルミット溶接法は、アルミと酸化鉄の化学反応によって生成した溶鋼を溶接部に流し込んでレールを溶接する溶接法である。詳細には、溶接されるレールを 20 ～ 30 mm の端面間隙間を設けて対向設置し、このレール端面間の隙間を鋳型で取り囲み、テルミット反応によって生じた溶鋼をレール端面間の隙間に流し込んで溶接する。テルミット溶接法は装置が小さく機動性が高いため、軌道現地での溶接方法として多用されている。

【0004】

一方、列車の通過の際にレールには曲げ荷重が加わり、レール底部には引張応力が生じる。この応力は車輪の通過ごとに発生するため、レールには高い疲労強度が必要となる。レールの溶接部は断面形状や材質の変化が生じる為、他の部分と比較して疲労強度が低下する場合が多い。レールの溶接部の疲労強度を向上させる技術としては、例えば特許文献 2 のようにショットピーニングを用いる方法や、ハンマーピーニング、グラインダー処理、TIG ドレッシングを用いる方法がある。

【0005】

前記ショットピーニングは直径数 mm の鋼球を材料に打ち付けて材料表層を塑性変形させて加工硬化し、残留応力を圧縮化することで疲労強度を向上することができる。しかし、その処理には鋼球を投射、回集、粉塵防止のための大掛かりな設備が必要となり、大型の溶接部には適用が制限される。加えて投射材の摩滅、損壊を補給する必要があり、そのためのランニングコストが必要となる。

また、前記ハンマーピーニングは工具の先端を材料に打撃して溶接部に塑性変形を与えて、圧縮応力を導入するとともに、塑性変形により応力集中を低減することで疲労強度が向上すると言われている。しかし、打撃時の振動が大きく、作業への負担が大きいことに加え、細かいコントロールが難しく、処理むらが生じやすい。例えば、非特許文献 1 に

10

20

30

40

50

よると、処理条件によっては加工によって生じるシワ状の溝部が影響し、疲労強度の向上効果は小さいことが示されている。

【0006】

また、前記グラインダー処理はビード止端部を滑らかにすることで応力集中を下げることで、確実な疲労強度の向上効果が期待できるが、削りすぎた場合は溶接部の肉厚が不足して強度低下を招くことから、処理に熟練を要し、作業に長時間を要するという欠点がある。

【0007】

また、前記TIGドレッシングは、溶接ビードの止端部をタングステン電極から発生するアークで再溶融させて、滑らかな形状に再凝固させて、応力集中を軽減することにより疲労強度を向上するものである。しかし、レールなどの難溶接材料では高い熟練技能と、厳格な施工管理が必要となる。

【0008】

【特許文献1】特開昭48-95337号公報

【特許文献2】特開平3-249127号公報

【非特許文献1】三木、穴見、谷、杉本、「溶接止端部改良による疲労強度向上」、溶接学会論文集、Vol.17, No.1, P111-119(1999)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

ロングレールの耐久性を向上させる為には、溶接部の疲労強度をさらに向上させることが必要である。また、上述した溶接部の疲労強度を向上させる従来技術であるショットピーニング、ハンマーピーニング、グラインダー処理、TIGドレッシングに比べてより効果的に疲労強度の向上を実現することが要求される。

【0010】

本発明は上記のような従来技術の課題を考慮してなされたものであり、その目的は、従来と比較して疲労強度が向上したロングレール及びその製造方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0011】

レールの溶接部に対して疲労試験を行うと、溶接部に形成されたビードの止端部に疲労亀裂が発生し、この疲労亀裂を起点として破断が生じる。本発明は、ビードの止端部に疲労亀裂が生じにくくすることにより、レールの溶接部の疲労強度を向上させるものである。

【0012】

すなわち本発明の要旨は以下の通りである。

(1) 2本のレールをテルミット溶接することにより製造されたロングレールであって、溶接部のビードの止端部に形成された鑄バリが、レール足裏部において1mm以下であり、レール足表部に位置する前記ビードの止端部において鑄バリが除去されており、前記ビードの止端部のうち少なくとも前記レール足表部に位置する領域において、表面から50μm以内の組織がパーライトを有しており、前記表面に対して垂直な断面において該パーライトの60%以上のラメラが前記表面に対して±45°以下の角度を成していることを特徴とするロングレール。

【0013】

(2) 前記ビードの止端部のうち前記レール足表部に位置する領域の前記断面において、表面から50μm以内に位置するパーライトの40%以上のラメラが前記表面に対して±15°以下の角度を成していることを特徴とする上記(1)に記載のロングレール。

(3) 前記ビードの止端部のうち少なくとも前記レール足表部に位置する領域において、表面から50μm以内のパーライトの10%以上は、ラメラ間隔が70nm以下であることを特徴とする上記(1)又は(2)に記載のロングレール。

(4) 前記ビードの止端部のうち前記レール足表部に位置する領域の前記断面において、

表面から $50\text{ }\mu\text{m}$ 以内のパーライトの 5% 以上は、ラメラ間隔が 50 nm 以下であることを特徴とする上記 (3) に記載のロングレール。

(5) 前記ビードの止端部のうち前記レール足表部に位置する領域は、前記ロングレールの長手方向の断面における断面の曲率半径が 1.5 mm 以上であることを特徴とする上記 (1) ~ (4) のいずれか一つに記載のロングレール。

(6) 前記ビードの止端部の表面のうち前記レール足表部に位置する領域は、前記ロングレールの長手方向の残留応力が中立又は圧縮であることを特徴とする上記 (1) ~ (5) のいずれか一つに記載のロングレール。

(7) 前記ビードの止端部のうち前記レール足表部に位置する領域は、超音波ピーニング処理されていることを特徴とする上記 (1) ~ (6) のいずれか一つに記載のロングレール。

10

(8) 荷重繰り返し回数 200 万回での疲労限界が 280 MPa 以上であることを特徴とする上記 (1) ~ (7) のいずれか一つに記載のロングレール。

【発明の効果】

【0016】

本発明によれば、ビードの止端部に疲労亀裂が生じにくくすることにより、レールの溶接部の疲労強度を向上させることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0017】

まず図1を用いてロングレールの形状について説明する。図1はロングレールの長手方向の側面図である。ロングレールは、少なくとも2本のレールを溶接することにより製造される。このためロングレールには溶接部11が含まれる。溶接部11にはビード10が形成されている。

20

【0018】

図2は溶接前のレールの断面をテルミット溶接法で用いられる鋳型とともに示した図であり、図1のA-A'断面に相当する。レールは、車輪との接触が生じるレール上部である頭部1、枕木に接地するレール下部である足部3、頭部1と足部3の中間の垂直部分である柱部2を有する。以下、足部3の裏側をレール足裏3aとし、表側をレール足表3bとする。レール足裏3aの範囲はレール底面の直線部、レール足表3bは足部3の表面側の直線部及び足部3と柱部2の間の曲線部を含むこととする。

30

【0019】

列車が通過する際、レールには車輪の通過ごとに曲げ荷重が作用し、レールには引張応力が生じる。レールの残留応力が圧縮応力になっている場合、曲げ荷重によって生じる応力は残留応力によって相殺され、実効応力は小さくなる。逆にレールの残留応力が引張応力になっている場合、実効応力は、曲げ荷重によって生じる応力と残留応力の相乗効果によって大きくなる。

【0020】

本図に示すテルミット溶接用の鋳型は左右2分割の鋳型4a、4bから構成される2分割形式である。2分割形式の鋳型4a、4bはレール及び鋳型の製造寸法変動に対応するために、鋳型のレールにはめ込む空間をレールの標準断面より幾分 ($1\sim 2\text{ mm}$) 大きめに製作される。このため鋳型をレールにセットした際に、レールと鋳型の間に隙間が生じる。溶接の際にこの隙間に溶鋼が差し込むと鋳バリが生成する。この鋳バリは応力集中を生じさせ、レールの疲労特性を低下させる。

40

【0021】

図3(A)は図1のA-A'断面図すなわちレールの溶接部11の断面図であり、図3(B)は図3(A)のB-B'断面図である。上記したように、ロングレールの溶接部11にはビード10が形成されており、車輪の通過によって生じる応力はビード10の止端部10a、すなわちビード10とレール本体の境界部分に集中する。このため、ロングレールの疲労破壊は、足部3のビード10の止端部10aを起点にする場合がほとんどである。また、溶接部11のうちレール足表3bは、部位ごとの熱履歴の差に起因して、残留

50

応力が引張応力になっているため、レール足表 3 b に位置するビード 1 0 の止端部 1 0 a の表面は、破壊起点になりやすい。特にテルミット溶接法を用いてレールを溶接した場合、上記したように、レールと鋳型の間に隙間が生じるため、溶接の際にこの隙間に溶鋼が差し込んで鋳バリが生成する。この鋳バリはさらに応力集中を生じさせ、レールの疲労特性を低下させる。鋳バリによる応力集中を少なくする為には、図 4 に示すように、鋳バリの厚さを 1 mm 以下にする

【0022】

以上のことから、テルミット溶接法を用いて製造されたロングレールの溶接部 1 1 の疲労強度を向上させる為には、足部 3 のビード 1 0 の止端部 1 0 a の表面の疲労強度を増加させて亀裂を入りにくくすること、足部 3 の止端部 1 0 a への応力集中を緩和すること、足部 3 の止端部 1 0 a の表面の残留応力を中立又は圧縮方向にすること、及び足部 3 の鋳バりをなくすことの 4 点が効果的である。

10

【0023】

パーライト組織のラメラ構造はセメンタイトラメラとフェライトラメラの層状構造となっている。ラメラ間隔は試料を鏡面研磨した後、1～10%硝酸アルコール溶液（ナイタール）などでラメラ構造を現出させることで観察することができる。本発明においてラメラ間隔は、図 1 2 に示すように、継手の長手方向を含みビード方向に直角な断面内において測定する。ラメラ間隔 L は図 1 3 の A 部断面の拡大図に示すように、セメンタイトラメラ 5 0 もしくはフェライトラメラ 5 2 の中心間隔である。ラメラの向きと表面 4 0 の角度 θ は、図 1 3 に示すように、測定部位におけるラメラ方位と、測定部位に最も近い表面に平行な線との角度として測定する。

20

【0024】

ビード 1 0 の止端部 1 0 a の表面の疲労強度を増加させる為には、これらの部分の表面から 50 μm 以内の組織が含んでいるパーライトの 60% 以上のラメラを、止端部 1 0 a の表面に対して垂直な断面（例えばレールの長手方向の断面）において表面に対して $\pm 45^\circ$ 以下の角度にすることが有効である。これは、一般的なパーライトのラメラの配向方向がランダムであるのに対して、パーライトの半分以上のラメラの配向方向が、応力が加わる方向に対して直角に近くなり、組織の強度に異方性を持たせることができるためである。なお、ビード 1 0 の止端部 1 0 a の表面から 50 μm 以内の組織は、ほとんどがパーライトであるが、初析フェライトや残留している場合や、溶接金属が止端部 1 0 a にかぶっている場合はフェライトまたはベイナイトが含まれる場合もある。

30

【0025】

この場合、上記した断面において止端部 1 0 a の表面から 50 μm 以内に位置するパーライトの 40% 以上のラメラを表面に対して $\pm 15^\circ$ 以下の角度にすると、特に疲労強度が向上する。

また、上記した断面において止端部 1 0 a の表面から 50 μm 以内のパーライトの 10% 以上のラメラ間隔（隣り合う 2 つのフェライト相の中心間隔）が 70 nm 以下である場合も硬度が上昇する（例えば Hv 50 以上）為、特に疲労強度が向上する。この場合、止端部 1 0 a の表面から 50 μm 以内に位置するパーライトの 5% 以上のラメラ間隔が 50 nm 以下である場合、さらに疲労強度が向上する。

40

【0026】

止端部 1 0 a への応力集中を緩和するためには、止端部 1 0 a の断面の曲率半径を 1.5 mm 以上にして止端部 1 0 a の表面形状を滑らかにすることが有効である。

【0027】

止端部 1 0 a の表面を上記した組織にし、止端部 1 0 a の断面の曲率半径を上記した値にし、かつ、止端部 1 0 a の残留応力を中立又は圧縮方向にする方法としては、止端部 1 0 a に超音波ピーニング処理（UIT: Ultrasonic Impact Treatment）を行う方法がある。これにより、荷重繰り返し回数 200 万回での溶接部の疲労限界を、非処理材と比較して 30 MPa 以上増加させ、280 MPa 以上にすることができる。なお、鋳バリ 1 0 b がある場合、止端部 1 0 a に超音波ピーニング処理を行う前に、鋳バリ 1 0 b を除去す

50

るのが好ましい。

【0028】

また、止端部10aの鋳バリ10bをなくす方法としては、例えばテルミット溶接に用いられる2分割式の鋳型の内面をレール足裏3aに密着させてレール足裏3aに形成される鋳バリ10bを1mm以下にして、かつレール足表3bの止端部10aに形成される鋳バリ10bを除去することが有効である。レール足表3bの鋳バリ10bを除去する方法としては、図5に示すように、止端部10aに超音波ピーニング処理を行う方法がある。超音波ピーニング処理を行うことにより鋳バリ10bがレールから浮き上がり、その後ビード10から切り離される。またこの場合、鋳バリ10bの除去と同一工程で止端部10aに超音波ピーニング処理を行うことができる。

10

【0029】

鋳型をレール足裏3aに密着させる理由は、湯漏れに対する配慮によるものである。すなわち溶鋼が鋳型の外面で留まらずに、さらに鋳型外まで漏れると溶接失敗につながる。鋳型とレールの隙間をレール足表3bに多くなるように鋳型をセットしておけば、仮に溶鋼が漏れだしても発見しやすく、またレール足表3bがレール足裏3aより位置が高いため静水圧が幾分低くなり、湯漏れ時の勢いが小さく、漏れ止めの対処を行いやすいという利点がある。

【0030】

超音波ピーニング処理を行う領域は、柱部2及び足部3に位置する止端部10aの全域であってもよいが、一部であっても良い。後者の場合、少なくとも足部3に位置する止端部10aの全域を含む必要がある。

20

【0031】

超音波ピーニング処理は、打撃用部材（例えばピン形状）を振幅10 μ m～100 μ m、周波数15kHz以上（好ましくは20kHz）で振動させ、この打撃用部材の先端で被処理部の表面を打撃する処理である。超音波ピーニング処理は、一回一回の打撃エネルギーはハンマーピーニングより小さくショットピーニングより大きい。また、超音波ピーニング処理は非常に多くの回数の打撃を表面に与える。このため、超音波ピーニング処理を行うことにより、ハンマーピーニング及びショットピーニングにはない効果を得ることができる。

【0032】

なお、超音波ピーニング処理の周波数が20kHz未満の場合（特に15kHz未満の場合）、振動周波数が可聴音域になる為、作業者や環境への影響が生じる。超音波ピーニング処理の周波数は高くなるほど加工エネルギーが大きくなるため好ましいが、超音波ピーニング処理の工具の製造費用を考えると、60kHzが上限になる。

30

【0033】

超音波ピーニングを行う温度について以下に説明する。鋼材温度が500℃以上では鋼材の降伏点が極端に低く、超音波ピーニング処理によって著しく深い凹みが生じ、溶接部の応力集中が大きくなる。また、高温では回復現象が起こるため、加工による残留応力の圧縮化効果は得られない。温度の低下とともに鋼材の降伏点は回復し、300℃以下では室温の状態の80%～90%、100℃では室温の状態の90%以上となり、回復現象も起きにくくなる。したがって必要以上に深い凹みの発生を避け、残留応力の圧縮化効果を得るためには材料温度は300℃以下、さらに望ましくは100℃以下で処理を行うことが望ましい。

40

【0034】

一方、鋼材温度がさらに低下するに従って、鋼材の靱性、延性は低下していく。このため、周囲温度が-20℃を下回ると、超音波ピーニング処理部に加工による亀裂発生の懸念があるため、-20℃以上の温度で処理を行うことが望ましい。

【0035】

また、超音波ピーニング処理の振幅が10 μ m未満の場合、加工エネルギーが小さくなり処理時間が長くなる為、好ましくない。また振幅が100 μ m超の場合、超音波ピーニ

50

ング処理の工具が大型化し、また処理効率の向上も多くない為、好ましくない。

【0036】

超音波ピーニング処理により上記した効果を得るためには、打撃用部材を、5 mm/秒以上20 mm/秒以下の速度で止端部10 aに沿って少なくとも3パス以上移動させるのが好ましい。2パス以下の場合、処理が不十分な部分（例えばビード10とレール本体の境界線が残存する領域）が残ってしまい、この不十分な部分を起点として疲労亀裂が生じる可能性がある。なお、超音波ピーニング処理のパス回数が6回までは、回数を増やすごとに疲労強度が増加するが、7回以上にしても疲労強度はほとんど増加しない。このため、超音波ピーニング処理のパス回数は6回以下であるのが好ましい。

【0037】

また打撃用部材の直径は2 mm以上5 mm以下であるのが好ましい。打撃用部材の直径が2 mm未満である場合は1パスにおける加工面積が小さくなり、止端部10 aの断面の曲率半径を1.5 mm以上にすることが難しくなる。一方、打撃用部材の直径が5 mm超の場合は、加工エネルギーが分散されて処理効率が低下してしまう為、好ましくない。

【0038】

また打撃用部材の先端の曲率半径は1 mm以上4 mm以下であるのが好ましい。曲率半径が1 mm未満の場合は、止端部10 aの断面の曲率半径を1.5 mm以上にすることが難しくなる。また、打撃用部材の先端の曲率半径が4 mm超の場合、止端部10 aの表面を滑らかにするために必要な処理面積が広がってしまい、処理効率が低下してしまう為、好ましくない。

【0039】

疲労強度の評価試験は3点曲げ方式で行った。1 mの距離でセットした台座の中心に1.5 mに切断したレール溶接部を正立させた姿勢で置き、その中心部にレール頭部から押し治具で荷重を与えた。台座および押し治具のレールに接する部位の曲率半径は100 mm Rとした。付与する荷重はレール足裏に歪ゲージを接着し、その指示値が設定応力となるように調整した。試験応力は最低応力を3 kgf/mm²とし、試験する応力範囲に応じて最大応力を設定した。

荷重繰返し速度は5 Hzとし、溶接部が破断した時点で試験を終了した。また、荷重繰返し回数が200万回まで非破断であった場合は、そこで試験を終了した。

【実施例】

【0040】

（実施例1）

2分割式鋳型によるテルミット溶接法を用いて複数のロングレールを製造した。そして、このとき、鋳型の内面をレール足裏部に密着させ、レール足裏部に形成された鋳バリを1 mm以下にした。そして、レール足表部に位置するビードの止端部の鋳バリを超音波ピーニング法により除去し、さらにビードの止端部に超音波ピーニング処理を行うことにより、複数の試料を作製した。複数の試料相互間は、超音波ピーニング処理の処理回数が異なっているが、他の作製条件は同じである。また、比較例として溶接まますなわち超音波ピーニング処理を行わないロングレールを作製した。

【0041】

図6（A）は、超音波ピーニング処理のパス回数が3回の試料における、ビード止端部の組織を示す断面SEM写真であり、図6（B）は図6（A）のビード止端部の表面部分を拡大した断面SEM写真である。この断面は、ビード止端部の表面に対して垂直な断面であり、レールの長手方向の断面である。本図から明らかなように、超音波ピーニング処理を所定量以上行うことにより、ビード止端部の表面部分の組織がパーライトとなり、該パーライトの多くのラメラが表面に対して±45°以下の角度になった。

【0042】

また、超音波ピーニング処理のパス回数が5回である試料1、及びパス回数が3回である試料2それぞれで、ビード止端部の表面から深さ50 μmの範囲内において、ラメラ配向角度が±45°以下及び±15°以下の角度となっている領域それぞれの厚みを用い

10

20

30

40

50

て測定し（表１）、かつラメラ間隔が１００ｎｍ以下、７０ｎｍ以下、及び５０ｎｍ以下となっている領域それぞれの厚みを測定した（表２）。これらの測定には断面ＳＥＭ写真を用いた。なお、各表は、それぞれの領域の厚みが深さ５０μｍの範囲内でどの程度の割合を占めるかを示す数値も含んでいる。

【００４３】

【表１】

	確度範囲	厚み (μm)	全領域厚み	比率 (%)
試料１	±４５°以内	４０	５０	８０
	±１５°以内	３０	５０	６０
試料２	±４５°以内	３３	５０	６６
	±１５°以内	３３	５０	６６

10

【００４４】

【表２】

	ラメラ間隔	厚み (μm)	全領域厚み	比率 (%)
試料１	１００ｎｍ以下	９	５０	１８
	７０ｎｍ以下	８	５０	１６
	５０ｎｍ以下	５	５０	１０
試料２	１００ｎｍ以下	２５	５０	５０
	７０ｎｍ以下	２０	５０	４０
	５０ｎｍ以下	１８	５０	３６

20

【００４５】

試料１において、ラメラ配向角度が±４５°以下及び±１５°以下の角度となっている領域の厚みは、それぞれ４０μｍ及び３０μｍであり、試料２において、ラメラ配向角度が±４５°以下及び±１５°以下の角度となっている領域の厚みは、それぞれ３３μｍであった。

【００４６】

また、試料１において、ラメラ間隔が１００ｎｍ以下、７０ｎｍ以下、及び５０ｎｍ以下となっている領域の厚みは、それぞれ９μｍ、８μｍ、及び５μｍであり、試料２において、ラメラ間隔が１００ｎｍ以下、７０ｎｍ以下、及び５０ｎｍ以下となっている領域の厚みは、それぞれ２５μｍ、２０μｍ、及び１８μｍであった。

30

【００４７】

また、試料１の硬度、残留応力、加工深さ、及び疲労強度は、 $H_v 410$ 、 $180 \sim 200 \text{ MPa}$ 、 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 、及び 300 MPa であり、試料２の硬度、残留応力、加工深さ、及び疲労強度は、 $H_v 520$ 、 $180 \sim 200 \text{ MPa}$ 、 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 、及び 300 MPa であった。

【００４８】

図７は、ビード止端部の表面から深さ５０μｍの範囲に位置するパーライトにおいて、ラメラ配向角度が±４５°以下の角度となっている組織の比率及び±１５°以下の角度となっている組織の比率と、超音波ピーニング処理のパス回数との関係を示すグラフである。上記した組織の比率は、断面ＳＥＭ写真を目視で観察することにより算出した。

40

【００４９】

超音波ピーニング処理のパス回数が２回以下の場合、ラメラ配向角度が±４５°以下の角度となっている組織の比率は６０％未満であり、またラメラ配向角度が±１５°以下の角度となっている組織の比率は４０％未満であった。これに対し、パス回数が３回以上になった場合、ラメラ配向角度が±４５°以下の角度となっている組織の比率は７０％以下になった。特にラメラ配向角度が±１５°以下の角度となっている組織の比率は６５％前後と、急激に上昇した。

50

【0050】

これらのことから、超音波ピーニング処理を一定以上行うことにより、ビード止端部の表面から深さ $50\mu\text{m}$ の範囲に位置するパーライトにおいて、パーライトの60%以上のラメラを表面に対して $\pm 45^\circ$ 以下の角度にし、かつ40%以上のラメラを表面に対して $\pm 15^\circ$ 以下の角度にできることが示された。

【0051】

図8は、ビード止端部の表面から深さ $50\mu\text{m}$ の範囲に位置するパーライトにおいて、ラメラ間隔が 100nm 以下、 70nm 以下、及び 50nm 以下となっている領域の比率と、超音波ピーニング処理のパス回数との関係を示すグラフである。上記した組織の比率は、断面SEM写真を目視で観察することにより算出した。

10

【0052】

超音波ピーニング処理のパス回数が2回以下の場合、ラメラ間隔が 100nm 以下、 70nm 以下、及び 50nm 以下となっている領域の比率は、それぞれ20%未満、8%未満、及び5%未満であった。これに対し、パス回数が3回以上になった場合、ラメラ間隔が 100nm 以下、 70nm 以下、及び 50nm 以下となっている領域の比率は、それぞれ45%超、35%超、及び25%超であった。

【0053】

これらのことから、超音波ピーニング処理を一定以上行うことにより、ビード止端部の表面から深さ $50\mu\text{m}$ の範囲に位置するパーライトの10%以上を、ラメラ間隔が 70nm 以下にし、かつ5%以上をラメラ間隔が 50nm 以下にできることが示された。

20

【0054】

図9(A)、(B)、(C)は、ビード止端部の表面下 $50\mu\text{m}$ のビッカース硬度Hv(図9(A))、ビード止端部の表面のレール長手方向の残留応力(図9(B))、及びビード止端部の加工深さ(図9(C))それぞれが超音波ピーニング処理のパス回数によってどのように変化するかを示すグラフである。ビッカース硬度Hv測定時の押下力は 100N であり、残留応力は歪ゲージを用いた切り出し法により測定した。また加工深さは、超音波ピーニング処理によって形成された凹みの深さであり、加工深さが深いとビード止端部の曲率半径が大きくなり、かつ滑らかになる。

【0055】

超音波ピーニング処理のパス回数が6回以下の場合、パス回数が増加するにつれてビッカース硬度Hvが増加し、残留応力が引張方向から圧縮方向に変化し、かつ加工深さが大きくなっていった。そしてビード止端部の曲率半径は 1.5mm 以上になった。しかしパス回数が7回以上になっても6回の場合と比較してビッカース硬度、残留応力、及び加工深さのいずれも変化がほとんど無かった。

30

【0056】

図10は、ロングレールの溶接部の疲労試験結果を示すグラフであり、縦軸に応力振幅を、横軸に破断回数を示している。超音波ピーニング処理のパス回数が6回以下の場合、いずれの応力振幅においても破断回数は増加しているが、パス回数が7回を超えても破断回数の増加はほとんどなかった。具体的には、比較例すなわち超音波ピーニング処理を行わない試料における溶接部の200万回疲労強度は 230MPa であったのに対して、超音波ピーニング処理のパス回数が1回、3回、6回、及び12回それぞれの試料における溶接部の200万回疲労強度は、それぞれ 240MPa 、 270MPa 、 300MPa 、及び 305MPa であった。

40

【0057】

以上をまとめると、テルミット溶接法を用いて製造されたロングレールにおいて、鋳型の内面をレール足裏部に密着させ、レール足裏部に形成された鋳バリを 1mm 以下にし、レール足表部に位置するビードの止端部の鋳バリを超音波ピーニング法により除去した。さらにレール足表部に位置するビードの止端部に所定量以上の超音波ピーニング処理を行うことにより、表面から $50\mu\text{m}$ 以内の組織がパーライトを含み、該パーライトの60%以上のラメラを表面に対して $\pm 45^\circ$ 以下の角度を成すようにし、ラメラ間隔が 70

50

n m以下の組織の割合は10%以上にして、レール足表部に位置するビード止端部の断面の曲率半径が1.5 mm以上にして、かつレール足表部に位置するビード止端部のレール長手方向の圧縮応力を中立又は圧縮方向にした。

【0058】

その結果、ロングレールの溶接部の疲労強度が向上した。また、超音波ピーニング処理のパス回数が3回を超えると比較例すなわち非処理材と比較して200万回疲労強度が30 MPa以上増加し、6回を超えると非処理材と比較して200万回疲労強度が60 MPa以上増加した。

【0059】

表3は、テルミット溶接法を用いて製造されたロングレールに本発明を適用した場合（10 発明例A1～A24）と適用しなかった場合（比較例A1～A9）の200万回疲労限界（MPa）を示している。発明例A1～A24は、いずれも200万回疲労限界が240 MPa以上であった。以下、詳細に説明するが、この説明において、組織、ラメラ率、及びパーライト比率は、ビード止端部の表面から50 μm以内の組織を見た結果である。また発明例A1～A24、及び比較例A2～A9は、いずれもビード止端部の足表部の錆バリを除去している。

【0060】

【表 3】

	ビード止端部		足表部ビード止端部の表面から深さ50μm以内				ビード止端部		UIT 有無	200万回 疲労限界 (MPa)	備考
	足裏部 足裏部 の鍍バリ(mm) ≤1.0	足表部 除去	ラメラ比率(%)		パーラット比率(%)		曲率半径 (mm)	残留応力			
			表面とラメラの角度 ±45° 以下	±15° 以下	70nm以下	ラメラ間隔 50nm以下					
発明例A1	0.8	除去	60	30	0	0	1	引張	無し	240	
発明例A2	0.3	除去	60	35	0	0	0.9	引張	無し	240	
発明例A3	0.7	除去	65	30	5	0	1.2	引張	無し	240	
発明例A4	0.5	除去	60	40	5	0	1	引張	無し	240	
発明例A5	0.9	除去	65	45	5	0	1.3	引張	無し	240	
発明例A6	0.4	除去	70	45	5	0	1.2	引張	無し	240	
発明例A7	0.1	除去	65	35	15	0	1.4	引張	無し	250	
発明例A8	0	除去	70	45	10	0	1	引張	無し	250	
発明例A9	0.9	除去	70	50	15	0	1.2	引張	無し	250	
発明例A10	0.5	除去	65	35	5	5	1.3	引張	無し	260	
発明例A11	0.2	除去	70	45	5	5	0.9	引張	無し	260	
発明例A12	0.5	除去	75	50	10	10	1.4	引張	無し	260	
発明例A13	0.1	除去	65	45	5	0	1.6	引張	無し	260	
発明例A14	0.6	除去	70	50	15	0	1.5	引張	無し	260	
発明例A15	0.1	除去	70	50	15	5	1.8	引張	無し	260	
発明例A16	0.2	除去	75	50	5	10	1.3	中立	有り	270	
発明例A17	0.5	除去	75	55	15	0	1.9	圧縮	有り	270	
発明例A18	0.7	除去	70	50	20	10	1.6	圧縮	無し	270	
発明例A19	0.2	除去	70	55	15	0	1.5	引張	有り	260	
発明例A20	0.7	除去	65	35	10	5	2	中立	有り	260	
発明例A21	0.6	除去	75	50	15	5	1.8	圧縮	有り	270	
発明例A22	0.1	除去	80	60	20	0	1.4	圧縮	無し	280	
発明例A23	0.7	除去	85	55	25	15	2	引張	有り	290	
発明例A24	0.5	除去	90	65	30	20	1.5	圧縮	有り	310	
比較例A1	1.5	除去無	—	—	—	—	1.5	中立	有	190	鍍バリ有
比較例A2	0.4	除去	50	45	15	5	1.8	中立	有	215	±45° 以下ラメラ比率下限未達
比較例A3	0.4	除去	30	15	10	5	1.6	圧縮	有	210	±15° 以下ラメラ比率下限未達
比較例A4	0.6	除去	45	20	5	5	2	圧縮	有	225	70nm以下パーラット比率下限未達
比較例A5	0.8	除去	25	5	0	0	1.5	中立	有	210	50nm以下パーラット比率下限未達
比較例A6	0.7	除去	40	20	5	3	0.8	圧縮	有	215	曲率半径下限未達
比較例A7	0.3	除去	55	35	5	3	0.5	引張	有	220	残留応力形態
比較例A8	0.7	除去	30	10	0	0	0.4	引張	無	220	UIT実施無
比較例A9	0.4	除去	30	15	5	3	0.6	引張	無	225	疲労限界下限値未達

【0061】

詳細には、発明例A1～A3は、表面とパーライトラメラの角度が±45°以下の組織が60%以上であるため、200万回疲労限界が240MPaとなった。

また発明例A4～A6は、表面とパーライトラメラの角度が±45°以下の組織が60%以上であり、かつ表面とパーライトラメラの角度が±15°以下の組織が40%以上であるため、200万回疲労限界が240MPaとなった。

【0062】

10

20

30

40

50

また、発明例 A 7 ~ A 9 は、表面とパーライトラメラの角度が $\pm 45^\circ$ 以下の組織が 60% 以上であり、かつラメラ間隔が 70 nm 以下のパーライトが 10% 以上であるため、200 万回疲労限界が 250 MPa となった。

また、発明例 A 10 ~ A 12 は、表面とパーライトラメラの角度が $\pm 45^\circ$ 以下の組織が 60% 以上であり、かつラメラ間隔が 50 nm 以下のパーライトが 5% 以上であるため、200 万回疲労限界が 260 MPa となった。

【0063】

また、発明例 A 13 ~ A 15 は、表面とパーライトラメラの角度が $\pm 45^\circ$ 以下の組織が 60% 以上であり、かつビード止端部の曲率半径が 1.5 mm 以上であるため、200 万回疲労限界が 260 MPa 以上となった。

10

【0064】

また、発明例 A 16 ~ A 18 は、表面とパーライトラメラの角度が $\pm 45^\circ$ 以下の組織が 60% 以上であり、かつビード止端部の残留応力が中立又は圧縮方向であるため、200 万回疲労限界が 270 MPa 以上となった。

【0065】

また、発明例 A 19 ~ A 21 は、表面とパーライトラメラの角度が $\pm 45^\circ$ 以下の組織が 60% 以上であり、かつビード止端部に超音波ピーニング処理を行ったため、200 万回疲労限界が 260 MPa 以上となった。

【0066】

また、本発明例 A 22 ~ A 24 に示すように、200 万回疲労限界が 280 MPa 以上となる例もあった。

20

【0067】

これに対し、比較例 A 1 はビード止端部の足表部の鋳バリを除去せず、かつ足裏部の鋳バリが 1.5 mm である為、超音波ピーニング処理を行ったにもかかわらず、200 万回疲労限界が 190 MPa であった。また、比較例 A 2 ~ A 7 は、表面とパーライトラメラの角度が $\pm 45^\circ$ 以下の組織が 50% 以下であるため、超音波ピーニング処理を行ったにもかかわらず、200 万回疲労限界が 225 MPa 以下であった。また比較例 8, 9 はピーニング処理の周波数（振動数）が超音波領域未満であり、かつ打撃用部材の先端径が小さかった為、200 万回疲労限界が 220 MPa となった。

【0068】

30

このことから、テルミット溶接法を用いて製造されたロングレールにおいて、レール足裏部に形成された鋳バリを 1 mm 以下にし、レール足表部に位置するビードの止端部の鋳バリを除去し、かつビード止端部の表面から 50 μ m 以内の組織がパーライトを含み、該パーライトの 60% 以上のラメラが表面に対して $\pm 45^\circ$ 以下の角度を成すようになると、溶接部の疲労強度が向上することが示された。さらに、ラメラ間隔が 70 nm 以下の組織の割合が 10% 以上になると、溶接部の疲労強度がさらに向上することが示された。さらに、ラメラ間隔が 50 nm 以下の組織の割合が 5% 以上になると、溶接部の疲労強度がさらに向上することが示された。さらに、レール長手方向の応力が中立又は圧縮方向になると、溶接部の疲労強度がさらに向上することが示された。またビード止端部の曲率半径が 1.5 mm 以上になると、溶接部の疲労強度がさらに向上することが示された。

40

【0069】

表 4 は、テルミット溶接法を用いて製造されたロングレールのビード止端部に超音波ピーニング処理を行った場合において、超音波ピーニング処理を行う打撃用部材の移動速度と 200 万回疲労限界の値の関係を示す表である。なお、200 万回疲労限界の値は、鋳バリを除去せず、かつ超音波ピーニング処理を行わなかった比較例 1 の 200 万回疲労限界の値（230 MPa）との差で示している。

【0070】

【表 4】

	溶接部	足表部	UIT		非処理材との200万回疲労強度差 (MPa)	備考
	鋳バリ足裏側に 鋳型密着 足表鋳バリ除去	ビード止端部 UIT有無 足表にUIT	速度 (mm/秒)	パス数 (回)		
発明例B1	鋳バリ除去	有	3	1	25	
発明例B2	鋳バリ除去	有	10	4	40	
発明例B3	鋳バリ除去	有	25	2	30	
発明例B4	鋳バリ除去	有	15	6	50	
比較例B1	鋳バリ除去無	無	-	-	0	鋳バリ有、UIT無
比較例B2	鋳バリ除去無	有	40	3	10	UIT速度上限超
比較例B3	鋳バリ除去無	有	3	1	10	UIT速度下限未満
比較例B4	鋳バリ除去無	有	30	1	5	疲労限界差下限未満

【0071】

発明例B1、B3は打撃用部材の移動速度がそれぞれ3mm/秒、25mm/秒であるが、鋳型をレール足裏部に密着させ、ビード止端部に超音波ピーニング処理を行い、レール足表部の鋳バリを除去したため、比較例1に対して200万回疲労限界が25MPa、30MPa向上した。また、発明例B2、B4は、さらに打撃用部材の移動速度が5mm/秒以上20mm/秒以下であるため、非処理材と比較して200万回疲労限界が40MPa以上向上した。

【0072】

これに対し、比較例B2～B4は、ビード止端部に超音波ピーニング処理を行わず、レール足表部の鋳バリを除去せず、かつ打撃用部材の移動速度が5mm/秒未満又は20mm/秒超であるため、非処理材と比較して200万回疲労限界が最大で10MPaしか向上しなかった。

【0073】

(実施例2)

2分割式鋳型によるテルミット溶接法を用いて複数のロングレールを製造した。このとき、鋳型の内面をレール足裏部に密着させ、レール足裏部に形成された鋳バリを1mm以下にした。そして、レール足表部に位置するビードの止端部の鋳バリを超音波ピーニング法により除去した試料7(図11(A)では「足表UIT(非付け根)」と記載)と、レール足表部に位置するビードの止端部の鋳バリを超音波ピーニング法により除去し、さらにビード止端部に追加の超音波ピーニング処理を3パス行った試料8(図11(A)では「足表UIT処理」と記載)とを作製した。なお、試料7のビード止端部は、鋳バリを除去する際にある程度の超音波ピーニング処理が行われている。

【0074】

また、比較例として溶接まますなわち超音波ピーニング処理を行わない試料9(図11(A)では「溶接まま」と記載)を作製した。また比較例として、ビードの止端部の鋳バリを超音波ピーニング法により除去せずに、レール足表部及び足裏部のビードの止端部に超音波ピーニング処理を行った試料10(図11(A)では「両面UIT処理」と記載)を作製した。

【0075】

試料7～10の溶接部の疲労試験結果を、図11(A)のグラフに示す。このグラフにおいて、縦軸は応力振幅を、横軸は破断回数を示している。

【0076】

さらに比較例として、2分割式鋳型によるテルミット溶接法において鋳型の内面をレール足表部に密着させ、レール足表部に形成された鋳バリを1mm以下にした試料11(図11(B)では「溶接まま」と記載)を作製した。さらに比較例として、鋳型の内面をレール足表部に密着させ、レール足表部に形成された鋳バリを1mm以下にし、さらにレール足表部のビード止端部に超音波ピーニング処理を3パス行った試料12(図11(B)

では「足表U I T処理」と記載）とを作製した。

【0077】

試料11, 12の溶接部の疲労試験結果を、図11(B)のグラフに示す。このグラフにおいて、縦軸は応力振幅を、横軸は破断回数を示している。

【0078】

図11(A)及び(B)のグラフに示すように、試料7, 8の疲労強度は、試料9, 11, 12と比較して高かった。具体的には、試料7, 8, 9, 10, 11, 12の溶接部の200万回疲労強度は、それぞれの300MPa、310MPa、230MPa、及び290MPa、260MPa、及び270MPaであった。なお、試料10の疲労強度は試料7, 8と比較してわずかに小さい程度であった。ただし、レールの敷設を行っている現場でレール足裏に超音波ピーニング処理を行うことは難しいため、あまり実用的ではない。

【0079】

(実施例5)

表5は様々な疲労強度改善方策をレールのテルミット溶接部に適用した場合の疲労試験の結果と処理時間を示したものである。

【0080】

【表5】

	内容	加工幅	平均的加工深さ (μ):最大値	非処理材との 200万回疲労限 界の差(MPa)	処理時間
比較例C1	ショットピー ニング	溶接中心から の両側100 mm	0.1mm (0.15mm)	40	10分
比較例C2	ハンマーピー ニング	ビード止端部	0.5mm (1.5mm)	-10(劣化)	10分
比較例C3	同上	ビード止端部 から約10mm	0.1mm (0.5mm)	20	40分
比較例C4	グライインディ ング	ビード止端部	0.5mm (2mm)	20	20分
比較例C5	TIGドレッ シング	ビード止端部 5mm	0.1mm (0.5mm)	20	10分 (予熱20分)
発明例C1	超音波ピーニ ング	ビード止端部 に3mm	0.2mm	80	10分

【0081】

比較例C1はショットピーニングの適用例である。ショット材には直径1mm ϕ 、硬度Hv500の鋼球を用いた。処理範囲は、長手方向には溶接部の両側を各100mm、全幅で200mmとし、ショット材をレール足表部3b、柱部2に投射した。処理時間は、レール片側ずつを各10分間ずつとした。ショット材の噴射量は約0.5kg/秒、ショット材の鋼材への衝突速度は5m/秒とした。この結果、疲労強度は非処理材に比べて約40MPa向上した。しかしレール現地溶接には大掛かりなショットピーニング装置を搬入することは難しく、その工業化は難しいと思われる。

【0082】

比較例C2、C3はハンマーピーニングを適用した例である。ハンマーピーニングの動力として圧縮空気を用い、打撃頻度は毎秒40回とした。工具の移動速度は20mm/秒とした。

比較例C2は、鋼材表面に打撃される工具の先端曲率が15mm ϕ の工具を用い、ビード10の止端部を集中的にハンマーピーニングした例である。加工は同じ位置を10パス繰り返した。加工部の凹みは深い部分ではレール母材表面から1.5mm程度あり、疲労強度は非処理材に比較してむしろ低下した。

【0083】

比較例 C 3 はビード 1 0 の止端部から長さ方向に 1 0 mm の範囲で足表、足裏にハンマーピーニングした例である。工具先端の曲率半径を 4 mm φ の工具を使い、凹みが大きくならないように、エア圧力を下げて (5 bar) 丹念に処理した。疲労強度は約 2 0 MPa 向上したが、処理時間は約 4 0 分間を要した。

【0084】

比較例 C 4 はビード 1 0 の止端部をグラインディングによって滑らかにした例である。工具は小型のペンシル型のグラインダーを用いた。疲労強度は向上したが、処理時間は 2 0 分を要した。

比較例 C 5 は、ビード 1 0 の止端部を T I G 溶接機により幅約 5 mm の範囲で再溶融させて、滑らかな形状に再凝固させた例である。疲労強度は非処理材にくらべて向上したが、処理部の割れ防止のために 4 0 0 °C に予熱するために 2 0 分を要した。

10

【0085】

発明例 C 1 はビード止端部に超音波ピーニングを適用した例で、処理条件は発明例 A 2 3 と同様の条件を適用したものであるが、上記比較例に比べて良好な性能が短時間の処理で得られた。

このことから、超音波ピーニングは、他の疲労強度改善方法より効率的で効果的に疲労強度の向上が得られることが示された。

【図面の簡単な説明】

【0086】

【図 1】ロングレールの長手方向の側面図。

20

【図 2】溶接前のレールの断面をテルミット溶接法で用いられる鋳型とともに示した図。

【図 3】(A) は図 1 の A - A ' 断面図すなわちレールの溶接部 1 1 の断面図、(B) は (A) の B - B ' 断面図。

【図 4】レール足表の鋳バリの厚さと疲労強度の関係を示す図。

【図 5】超音波ピーニング処理により鋳バリを除去する方法を説明する図。

【図 6】(A) は超音波ピーニング処理のパス回数が 3 回の試料における、ビード止端部の組織を示す断面 S E M 写真、(B) は (A) のビード止端部の表面部分を拡大した断面 S E M 写真。

【図 7】ラメラ配向角度が ± 4 5 ° 以下の角度となっている組織の比率及び ± 1 5 ° 以下の角度となっている組織の比率と、超音波ピーニング処理のパス回数との関係を示すグラフ。

30

【図 8】ビード止端部の表面から深さ 5 0 μ m の範囲に位置するパーライトにおいて、ラメラ間隔が 1 0 0 nm 以下、7 0 nm 以下、及び 5 0 nm 以下となっている領域の比率と、超音波ピーニング処理のパス回数との関係を示すグラフ。

【図 9】ビード止端部の表面下 5 0 μ m のビッカース硬度 H v ((A))、ビード止端部の表面のレール長手方向の残留応力 ((B))、及びビード止端部の加工深さ ((C)) それぞれが超音波ピーニング処理のパス回数によってどのように変化するかを示すグラフ。

【図 1 0】実施例 1 におけるロングレールの溶接部の疲労試験結果を示すグラフ。

【図 1 1】(A)、(B) は実施例 2 における試料の疲労試験結果を示すグラフ。

40

【図 1 2】ラメラ間隔及びラメラの角度の測定方法を説明するための図。

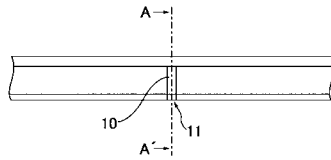
【図 1 3】図 1 2 の A 部の拡大図。

【符号の説明】

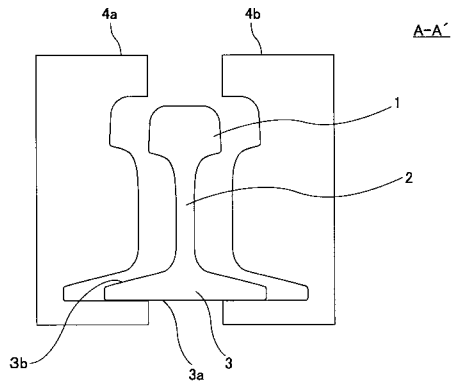
【0087】

1 …レールの頭部、2 …レールの柱部、3 …レールの足部、3 a …レール足裏、3 b …レール足表、1 0 …ビード、1 0 a …止端部、1 0 b …鋳バリ、1 1 …溶接部

【図 1】

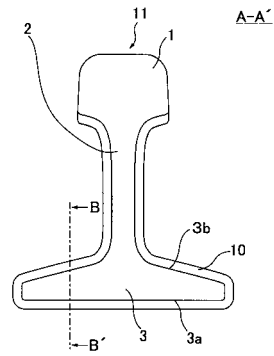


【図 2】

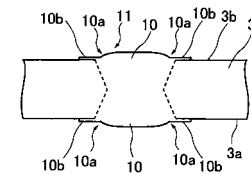


【図 3】

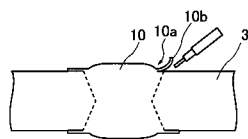
(A)



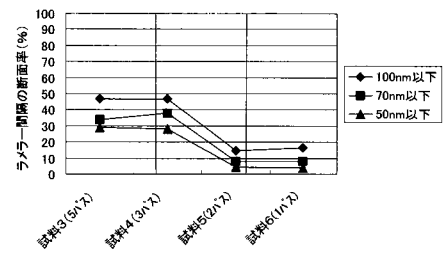
(B)



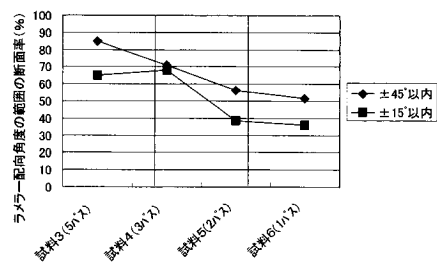
【図 5】



【図 8】

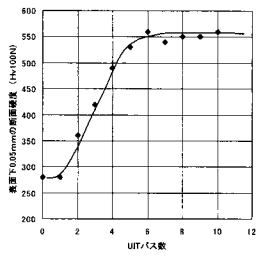


【図 7】

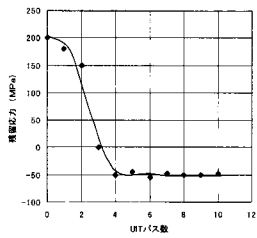


【図 9】

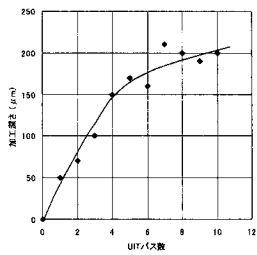
(A)



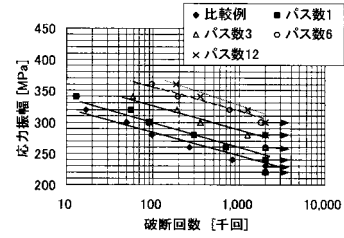
(B)



(C)

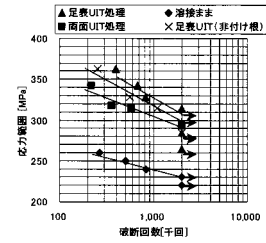


【図 10】

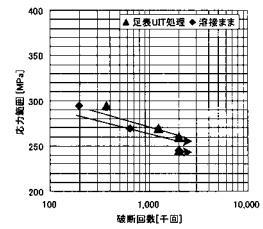


【図 11】

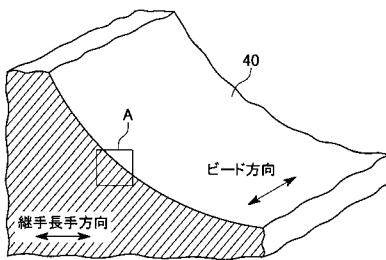
(A)



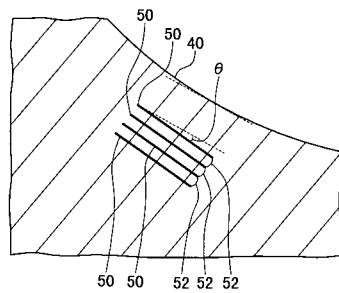
(B)



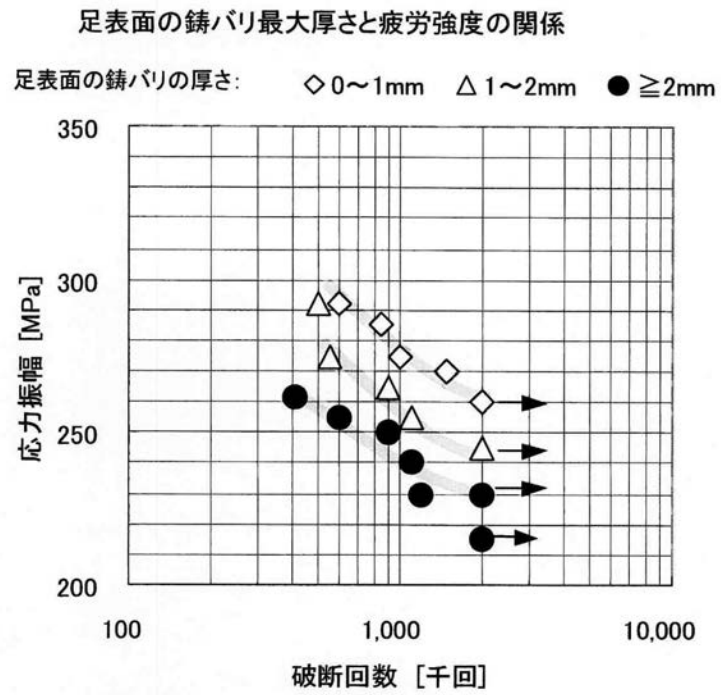
【図 12】



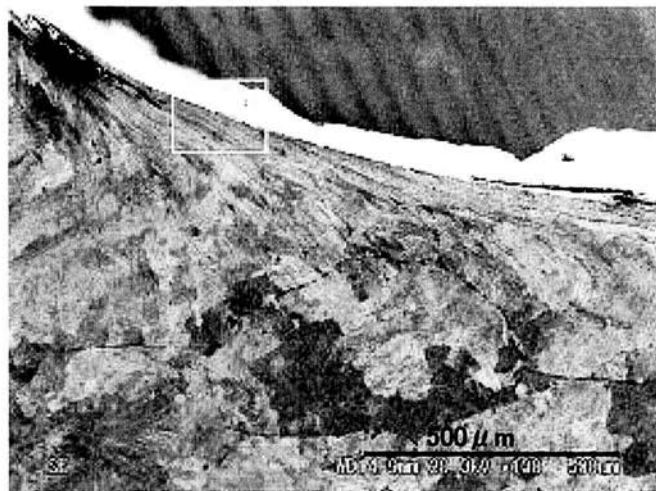
【図 13】



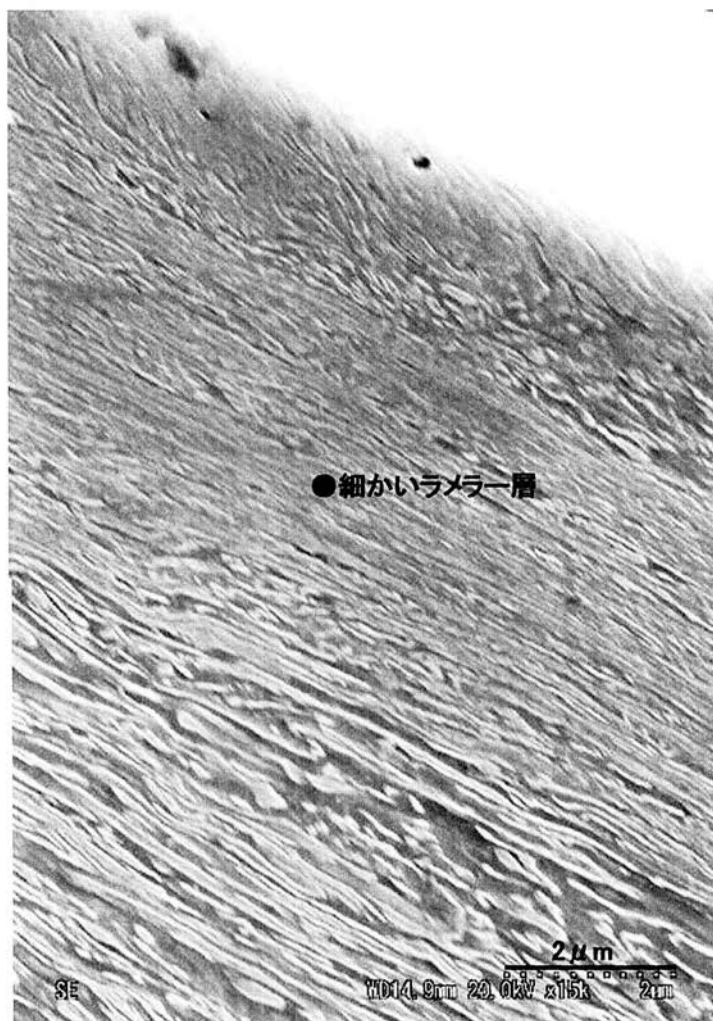
【図 4】



【図 6】
(A)



(B)



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
B 2 3 K 101/26 (2006.01) C 2 1 D 9/04 Z
B 2 3 K 101:26

審査官 須永 聡

(56)参考文献 特開2005-118871 (JP, A)
特表2008-544861 (JP, A)
特開2002-180201 (JP, A)
特開平03-297586 (JP, A)
特開昭48-095337 (JP, A)
特開平03-249127 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
E 0 1 B 1 1 / 5 2
B 2 3 K 2 3 / 0 0
B 2 3 K 3 1 / 0 0
C 2 1 D 7 / 0 6
C 2 1 D 9 / 0 4
B 2 3 K 1 0 1 / 2 6
C i N i i