

機関番号：82108
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2008～2010
課題番号：20560096
研究課題名（和文） ギガサイクル疲労特性に優れた高強度鋼創製指針の確立
研究課題名（英文） Establishment of high strength steel with good gigacycle fatigue properties
研究代表者 蛭川 寿（HIRUKAWA HISASHI） 独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性センター・主任研究員 研究者番号：40354253

研究成果の概要(和文):本研究では、微細な炭化物と窒化物の形態を変化させた材料を作製し、疲労特性向上指針を得ることを目的にしている。具体的には、化学成分を変化させた超微細粒鋼に窒化を施し、ギガサイクル疲労特性を調べた。その結果、微細なセメンタイト粒子の析出と微細な窒化物との相乗効果で、ギガサイクル疲労特性が向上することを明らかにした。また、高纯净度を施すことにより、内部破壊が抑制されることも判明した。

研究成果の概要（英文）：This study aims at developing materials with different types of carbides and nitrides and setting guidelines for improving the fatigue properties of these materials. Ultrafine-grained steel, the chemical ingredients in which were appropriately controlled, was nitrided, and gigacycle fatigue properties were examined. The results confirmed that the gigacycle fatigue properties were improved by the synergetic effect of the precipitated fine cementite particles and fine nitrides. In addition, it was confirmed that internal fracture can be suppressed by effectively cleaning the material.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：疲労

1. 研究開始当初の背景

記憶に新しい、ジェットコースター車軸破損事故のように疲労破壊は機械構造物の事故原因のトップであることから、疲労特性は材料を開発する上できわめて重要な特性である。また、最近では省エネルギー、CO₂削減の観点から機械部品等の軽量化の要望が高くなり高強度鋼の需要が高まっている。しかし、疲労に強い高強度鋼を開発するのは困難である。通常、鋼の一千万回疲労限度 σ_{w7} は

引張強度 σ_B の約半分すなわち $0.5\sigma_B$ であることが知られている。このことは、疲労限度は強度特性で決まることを意味しており、強度を上げても $0.5\sigma_B$ という制限が存在することになる。さらに最近では、引張強度が1200MPaを越えるような高強度鋼において、一億回を越えるギガサイクル領域で介在物等を起点とした内部破壊が生じ、疲労強度が大きく低下する問題が明らかになっている。このような状況を打破するためには最新

のギガサイクル疲労の観点から材料開発に取り組む必要がある。

2. 研究の目的

最新のギガサイクル疲労の観点から、ブレークスルーにつながる疲労特性向上指針を導き出す鍵はマルテンサイトブロックやフェライト粒の均一・微細化等の母地組織強化とナノサイズの炭・窒化物による析出強化の相乗効果にある。

そこで本研究では超微細粒化技術と熱処理により母地組織を変化させると同時に、微細析出物の種類と密度を系統的に変化させ、ギガサイクル疲労特性との関係を調査する。将来的にはこれらの情報について組織をパラメータとしてデータベース化することにより、ギガサイクル疲労特性向上指針を導き出すことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 供試材

本研究では、代表者が今までの研究において、高纯净度を施したり、化学成分を変化させたりして作製した数十鋼種にも及ぶ超微細粒鋼を供試材としている。供試材の化学成分を表1に示す。(a)は基本組成鋼で、高纯净度を図るため、真空溶解の後に真空アーク再溶解を行うダブルメルトで作成してある。この材料は、基本組成鋼窒化材のギガサイクル疲労特性の調査で問題となった硬化層内の介在物を起点とした内部破壊(図9参照)の克服を目的に採用した。(b)はMn量

表1 供試材の化学成分 (mass%)
(a) 基本組成鋼

Material	C	Si	Mn	P
15C	0.16	0.31	1.51	0.010
45C-1.5Mn	0.47	0.30	1.49	0.009
15C-P	0.18	0.30	1.48	0.117
45C-P	0.48	0.30	1.49	0.108
45C-0.4Mn	0.47	0.32	0.36	0.011

(b) Fe-Mn 鋼

Material	C	Si	Mn
0.0Mn	0.04	0.00	<0.01
0.5Mn	0.05	0.00	0.44
1.0Mn	0.05	0.00	0.96
2.0Mn	0.05	0.01	2.01
4.0Mn	0.04	0.00	3.70

(c) 単独元素添加鋼

Material	C	Si	Mn	Ti	Nb	B	V
Ti	0.05	0.30	1.51	0.36	-	-	-
Nb	0.05	0.31	1.48	-	0.26	-	-
B1	0.05	0.30	1.49	-	-	0.00	-
B2	0.05	0.30	1.49	-	-	0.01	-
V1	0.15	0.31	1.48	-	-	-	0.20
V2	0.05	0.30	1.49	-	-	-	0.40

を0~3.7mass%まで変化させたFe-Mn鋼シングルメルト材で、Mn量の影響を検討するために採用した。(c)はさらなる高疲労強度化を

図るため、基本組成鋼に微細炭・窒化物を形成させる元素として、1種類単独添加した材料で、V2はダブルメルト材、その他はシングルメルト材である。

図1に供試材の金属組織を示す。表1(a)の基本組成鋼と表1(c)の単独元素添加鋼では、すべての材料で、(a)の15Cと(b)の45C-1.5Mnと同様な超微細フェライトセメント組織である。フェライト結晶粒径は0.5ミクロン以下、セメントの析出はカーボン(C)量が0.45mass%では(b)のように密に析出、0.15mass%以下では(a)のように密な部分と粗な部分が混在している。表1(b)のFe-Mn鋼は焼きならし熱処理を行い、4.0Mn以外は(c)のようにフェライト・パーライト組織、4.0Mnでは(d)のようにマルテンサイト組織となった。また、表1(c)のV1では母地組織の影響を調べるため、さらに熱処理を施し、(d)に近いマルテンサイト組織(V1-M1とV1-M2)と(c)のようなフェライト・パーライト組織(V1-N)に調整した。

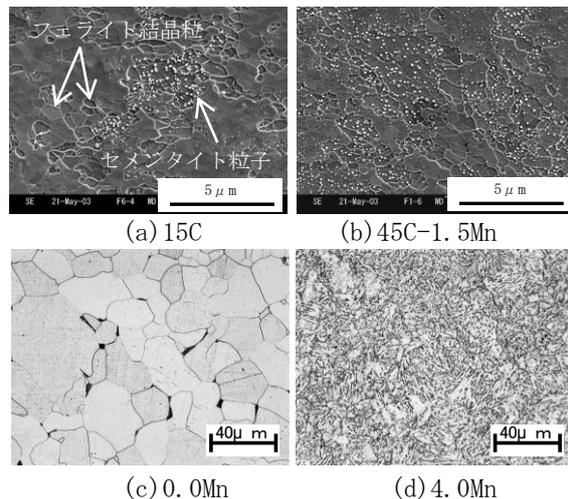


図1 金属組織

(2) 疲労試験方法

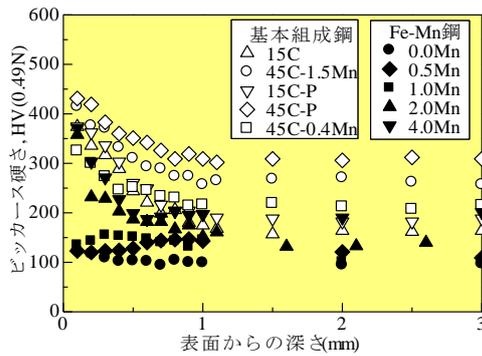
すべての供試材について、最小部直径6mmの砂時計型試験片(図3参照)に加工後、プラズマ窒化を施した。図2に窒化後の硬度分布を示す。0.0Mn、0.5Mn及び1.0Mn以外の試験片では、表面から1mm程度まで硬化層が形成されていた。

疲労試験は、図3に示す回転曲げ疲労試験機を用い、室温大気中で行った。回転曲げ疲労試験機は、試験片を回転させながら荷重を負荷させ、試験片に引張と圧縮の応力を交互に与える装置である。

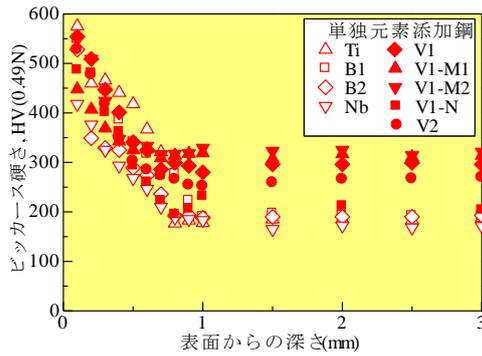
4. 研究成果

(1) Mn 窒化物単独による疲労特性向上指針

図4に基本組成鋼の窒化材と窒化前の母材の試験片の応力振幅と破断寿命の関係(S-N



(a) 基本組成鋼と Fe-Mn 鋼



(b) 単独元素添加鋼

図2 窒化後の硬度分布



図3 回転曲げ疲労試験機

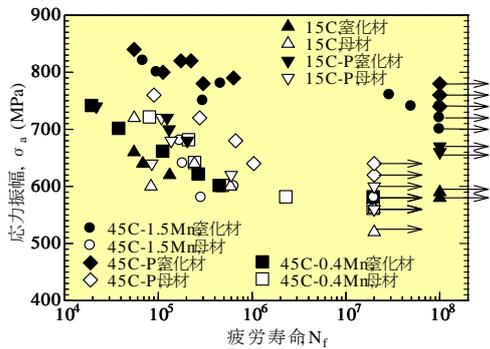


図4 基本組成鋼の S-N 特性

特性) を示す。窒化材の破壊形態は図5のように、すべて表面破壊となり、表面硬化材でも高 cleanliness 化し、介在物の極小化を図ることにより、内部破壊の抑制が可能であることが

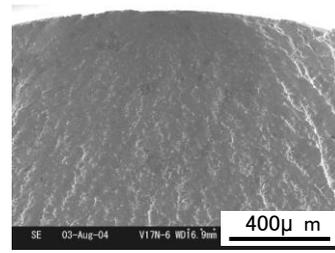


図5 表面破壊の破面様相

判明した。

窒化材の疲労強度は高C材では母材に比べて上昇し、リン(P)添加でさらに上昇するが、低C材ではその差が小さくなった。このことから、このような単純組成の窒化材の表面破壊特性は高C添加とP添加で改善されることが判明した。なお、高C添加による疲労強度の向上は、図1(b)のように、微細に析出したセメントライトによるピン止め効果により、窒化時の母地部での粗粒化を抑制させた効果が大きい。また、Mnの影響を検討するために作製した45C-0.4Mnでは窒化材と母材の疲労強度の差はほとんどないことから、基本組成鋼の硬化層はMn窒化物により形成されていることが明らかになった。さらに、上述のいずれの窒化材でも、硬化層と硬化していない母地部との境(硬化層直下、図2ではほぼ表面から1mmの深さ)付近には硬さから期待される局所的な疲労限より大きな応力が作用していたが、硬化層直下を起点とした内部破壊が生じないことが明らかになった。

これらの結果を考慮に入れるとMn窒化物による表面硬化は内部破壊を起こさない良質な硬化層であると考えられた。

図6に最適Mn量の検討を行うために実施したFe-Mn鋼の窒化材と母材のS-N特性、図7に得られた疲労限度とMn添加量の関係を示す。これらの結果から、Mn量が2mass%では窒化材の疲労強度は母材に比べて大きく上昇することから、最適Mn量は2mass%前後であることが判明した。この場合も、硬化層直下付近には硬さから期待される局所的な疲労限より大きな応力が作用していたが、硬化

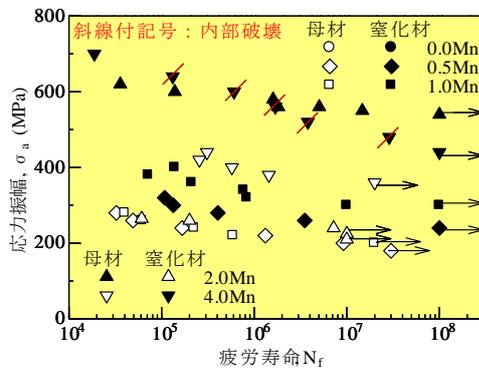


図6 Fe-Mn 鋼の S-N 特性

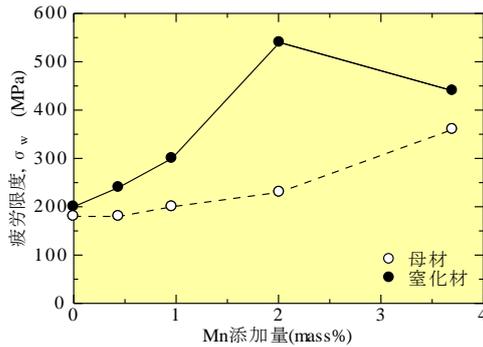


図7 疲労限度と Mn 添加量の関係

層直下を起点とした内部破壊が生じずに表面破壊となった。

しかし、Mn 量が 3.7mass% 添加の 4.0Mn 窒化材では、硬化層直下での内部破壊が生じ疲労強度が低下した。このことから、硬化層直下での内部破壊を防ぐためにも最適 Mn 量が重要なファクターとなることも判明した。

(2) 添加元素による疲労特性向上指針

図8に単独元素添加鋼の窒化材のS-N特性を示す。Ti、B1、B2、Nb、V1、V1-M1、V1-M2及びV1-Nは経済的・効率的な試験を行うため、必要最小限の試験片で 10^7 回までの試験を行った。そのため、データは少ないがV2は現時点でのチャンピオンデータであることが判明したため、充分量の試験片を作成し、 10^8 回までの試験を行った。また、破壊の形態はすべての材料で図9のような内部破壊となった。図8と窒化試験片の母地部の組織から、

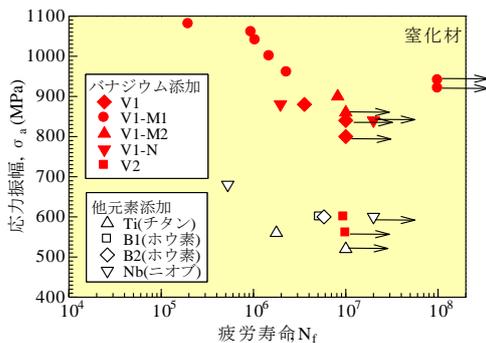


図8 単独元素添加鋼のS-N特性

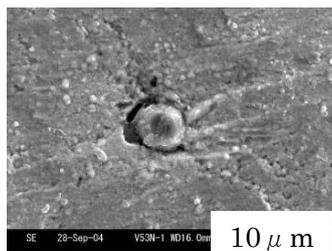


図9 内部破壊の破面様相

以下のような向上指針が明らかになった。

①超微細フェライトセメンタイト組織であるTi、B1、B2、Nb、V1及びV2のうちNb以外は、高Cを添加しなくても窒化時の母地部の粗粒化が抑制できることが明らかになった。

②Ti、B1、B2及びNbでは、Mn窒化物単独の場合よりも疲労強度が向上しないのに対し、V1では向上しており、バナジウム(V)添加による高疲労強度化の可能性は高い。また、Tiでは内部破壊の起点がTi系介在物であり、破壊の起点を増やす可能性があったがV1ではアルミナ介在物(Al_2O_3)が主な起点であり、その可能性も低い。

③微細なマルテンサイト組織であるV1-M1とV1-M2の疲労強度はV1と同程度であるのに対し、粗大なフェライト・パーライト組織であるV1-Nの疲労強度は低く、母地組織の微細化・均一化による疲労強度向上指針が確認できた。

④V添加量と高纯净度化の影響を、0.2mass%添加通常材であるV1と0.4mass%添加高纯净度材であるV2の疲労特性を比較することにより検討した。その結果、高V添加で疲労強度が高くなること及び両材料ともに内部破壊が生じ、高纯净度化の効果は認められないことが判明した。

⑤以上の結果から、最適V量の検討が課題として残るが、今回のV添加による疲労特性向上指針は貴重な知見であるものと考えられる。

(3) まとめ

母地組織を変化させるとともに、微細析出物の種類と密度を系統的に変化させ、ギガサイクル疲労特性との関係を調査した。得られた疲労特性向上指針は以下の通りである。

①Mn窒化物単独(基本組成鋼)による最適Mn量は2mass%前後、高CとP添加で疲労特性が向上し、高纯净度化で内部破壊が抑制できた。
②基本組成鋼のさらなる高疲労強度化のためには、V添加が有望であることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① 蛭川 寿、古谷佳之、窒化した超微細フェライトセメンタイト組織鋼の疲労特性に及ぼす諸因子の影響、鉄と鋼、査読有、95巻、(2009)pp. 79-85.

[学会発表] (計3件)

① 蛭川 寿、プラズマ窒化を施したFe-C-Mn鋼の疲労特性に及ぼすMn添加量の影響、日本機械学会 M&M2010

材料力学カンファレンス、平成 22 年 10 月 11 日、長岡技術科学大学

- ② 蛭川 寿、窒化した Fe-C-Mn 鋼の疲労特性に及ぼす Mn 添加量の影響、日本鉄鋼協会第 159 回春期講演大会、平成 22 年 3 月 29 日、筑波大学
- ③ 蛭川 寿、プラズマ窒化を施した超微細粒鋼の疲労特性、日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス、平成 20 年 9 月 18 日、立命館大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蛭川 寿 (HIRUKAWA HISASHI)
独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性センター・主任研究員
研究者番号：40354253

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携分担者

なし