

疲労特性に優れた高密度焼結体を得られる 温間金型潤滑成形用偏析防止処理鉄粉 「JIP クリーンミックス DL」

Segregation Free Premixed Iron Powder “JIP Clean Mix DL” for High Density Sintered Parts with Excellent Fatigue Property by Warm Compaction Method with Die Wall Lubrication

宇波 繁 UNAMI Shigeru JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員(副課長)
尾崎由紀子 OZAKI Yukiko JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員(課長)・理博
上ノ蘭 聡 UENOSONO Satoshi JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員(副部長)・工博

要旨

JFE スチールは、温間金型潤滑成形(WD)法およびその工法に適した偏析防止処理鉄粉「JIP クリーンミックス DL」を開発した。温間金型潤滑成形法は、粉末潤滑剤を金型に帯電塗布し、温間成形法を行う工法であり、偏析防止処理鉄粉中に混合する潤滑剤(内部潤滑剤)の添加量低減が可能であるため、高密度の圧粉体を実現できる。JIP シグマロイ 2010(Fe-2 mass%Ni-1 mass%Mo 部分合金化鋼粉)を原料粉とし、内部潤滑剤量を 0.2 mass%まで低減した JIP クリーンミックス DL では、WD 法による圧粉密度 7.4 Mg/m^3 、さらに焼結浸炭熱処理後では、焼結密度 7.5 Mg/m^3 、面圧疲れ強さ 4.4 GPa という優れた特性が得られた。

Abstract:

JFE Steel has developed a warm compaction method with die wall lubrication (WD) and a segregation-free premixed iron powder “JIP Clean Mix DL” suitable for this method. WD method, in which an electrostatically charged lubricant powder is coated on the die wall before a warm compaction, can reduce the amount of lubricants mixed with iron powder (internal lubricant), and provide high-density green compacts. JIP Clean Mix DL, using JIP SIGMALOY 2010 (Fe-2 mass%Ni-1 mass%Mo partially alloyed steel powder) with a reduced amount of internal lubricant of 0.2 mass%, showed the high green density of 7.4 Mg/m^3 by WD method, and the high rolling contact fatigue strength of 4.4 GPa after sintering and carburizing treatment.

1. 緒言

自動車の軽量化および自動車エンジンの高性能化にとまない、自動車用部品への高強度化・高疲労強度化の要求が高まっている。

鉄系焼結機械部品において、密度を向上させることは引張強さ、シャルピー衝撃値および疲れ強さなどの機械的特性の改善に非常に効果的である。密度向上を目的として、粉末をあらかじめ加熱し、 130°C 程度に加熱した金型中で1回成形し、その後焼結する温間成形法^{1~3)}(WC法)、常温成形・焼結のプロセスを2回繰り返す2回成形2回焼結法、あるいは1回成形1回焼結法で製造した焼結体を熱間鍛造する焼結鍛造法などの高密度化工法が提案されてきた。しかし、いずれの工法でも到達密度の増加に応じて製

造コストが増大するため、より安価な高密度化工法が求められている。

JFE スチールでは、新規な高密度化工法として、WC法および帯電塗布型金型潤滑法^{4,5)}を組み合わせた温間金型潤滑成形法^{6~8)}(WD法)を開発するとともに、本工法に適した、潤滑剤の添加量を低減した高密度成形用プレミックス粉「JIP クリーンミックス DL」を開発した。WD法は、金型に粉末潤滑剤を塗布する工程と、あらかじめ必要最少量の潤滑剤が混合された原料粉末を加熱した後、加熱金型中に充填して加圧成形を行う工程から構成される(**Fig. 1**)。原料粉末中に混合される潤滑剤(内部潤滑剤)は、通常成形では0.8 mass%程度必要なのに対し、WD法では、0.2 mass%程度で十分成形が可能である。WD法では、WC法より高い密度が実現できることから、高密度圧粉磁芯や高密度焼結部品の量産製造への適用検討が開始されてい

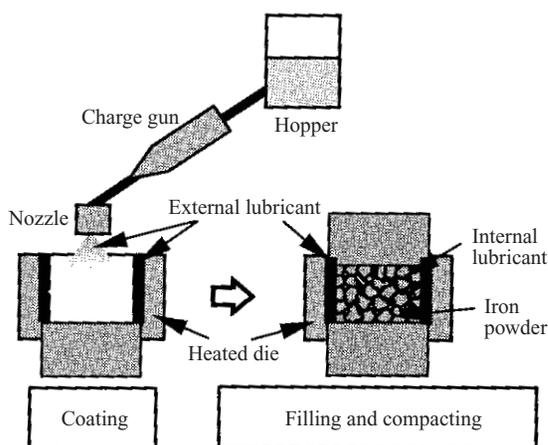


Fig. 1 Schematic diagram of warm compaction method with die wall lubrication

る。

本報では、WD 法により作製した高密度焼結体について、機械的特性および浸炭熱処理後の面圧疲れ強さを述べ、さらに面圧疲労時の組織変化と面圧疲れ強さの関係について考察する。

2. 実験方法

2.1 原料

ベース粉末として、JIP シグマロイ 415S(Fe-4 mass%Ni-1.5 mass%Cu-0.5 mass%Mo 部分合金化鋼粉)、JIP シグマロイ 2010(Fe-2 mass%Ni-1 mass%Mo 部分合金化鋼粉)および Fe-1 mass%Mo 部分合金化鋼粉、添加剤として黒鉛粉および内部潤滑剤からなるプレミックス粉を供試粉とした。黒鉛粉は、日本黒鉛工業(株)製の天然黒鉛粉(J-CPB)、内部潤滑剤は、陽光産業(株)製のステアリン酸亜鉛(ZNS-730)および WC 法用潤滑剤「KW ワックス」³⁾を用いた。金型潤滑剤として WD 法用粉末潤滑剤「WD2」⁸⁾を用いた。

2.2 試験片作製条件

抜出力および圧粉密度に及ぼす成形法の影響を調べる試験片は、ベース粉末として JIP シグマロイ 415S を用いて、Table 1 に示した配合組成のプレミックス粉を作製し、成形を行った。WD 法では、130°C に加熱した金型の表面に、

循環型帯電潤滑剤塗布装置⁸⁾を用いて潤滑剤 WD2 を塗布した後、あらかじめ 130°C に加熱した上記プレミックス粉を充填し、成形を行った。常温成形法(CC 法)では、室温のプレミックス粉を用い室温の金型で成形した。WC 法では、金型潤滑剤を用いず、プレミックス粉、金型ともに 130°C に加熱して成形体を作製した。いずれの成形法においても、成形圧力は 686 MPa とし、成形体の寸法を、長さ 55 mm、幅 10 mm、高さ 10 mm とした。

焼結体の機械的特性調査用試験片は、ベース粉末として JIP シグマロイ 415S を用い、Table 1 に示した配合組成のプレミックス粉を作製した後、上記した WD 法および CC 法の条件により成形を実施した。成形圧力は 490, 588, 686 MPa とした。その後、N₂-10 vol%H₂ 雰囲気中、1250°C で 60 min 保持して焼結を行った。

浸炭熱処理材の面圧疲れ強さを調べる試験片は、Table 2 に示した配合組成のプレミックス粉および成形条件により成形を実施した。成形体の寸法は、外径 60 mm、厚さ 5 mm とした。N₂-10 vol%H₂ 雰囲気中、1250°C で 60 min 保持して焼結を行った後、870°C で 60 min、カーボンポテンシャル 0.8% で浸炭、60°C の油中に焼入れ、200°C で 60 min 焼もどしを行った。

2.3 特性評価方法

抜出力は、長さ 55 mm、幅 10 mm、高さ 10 mm の成形体を型から抜き出す際の抜出荷重を成形体の側面積で割ることにより算出した。圧粉密度、焼結密度は、JIS Z 2501 にしたがって測定した。

引張強さは、平行部径 5 mm、長さ 15 mm に機械加工した丸棒試験片を用いて、引張速度 5 mm/min で測定した。シャルピー衝撃値は、JIS Z 2550 に準拠したノッチなしの長さ 55 mm、幅 10 mm、高さ 10 mm の試験片を用いて測定した。

面圧疲労試験は、Fig. 2 に示すように、外径 60 mm、厚さ 5 mm の円板型試験片を用い、1500 番で研磨した試験片表面で鋼球を転動させる 6 球式面圧疲労試験機(回転数 1000 rpm)により行った。試験鋼球として直径 9.525 mm の SUJ-2 鋼球、潤滑油としてトヨタ純正モーターオイル(SJ 10W-30)を用いた。繰り返し数 10⁷ 回において剥離が生

Table 1 Chemical compositions and compacting conditions of the studied powders for investigating the effect of compaction methods

	Powder		Compacting condition		
	Graphite	Internal lubricant	Method	Compacting temperature	External lubricant
Mixed powder	0.6 mass%	Zinc stearate 0.75 mass%	CC method	Room temperature	-
JIP Clean Mix HW		KW-wax* 0.6 mass%	WC method	130°C	
JIP Clean Mix DL		KW-wax* 0.2 mass%	WD method	130°C	

* Lubricant for warm compaction

** Lubricant for heated die

Table 2 Chemical compositions and compacting conditions of the studied powders for investigating the rolling contact fatigue properties of sintered and carburized compacts

Symbol	Base powder		Graphite (mass%)	Internal lubricant	Compacting condition				
	Partial alloy (mass%)				Name	Method	Temperature	Pressure	External lubricant
	Ni	Mo							
2Ni-1Mo/CC	2	1	0.5	Zinc stearate 0.75 mass%	CC method	Room temperature	588 MPa	—	
2Ni-1Mo/WD				KW-wax* 0.2 mass%	WD method	130°C	686 MPa	WD2**	
1Mo/WD	—	1		Reference					

* Lubricant for warm compaction
** Lubricant for heated die

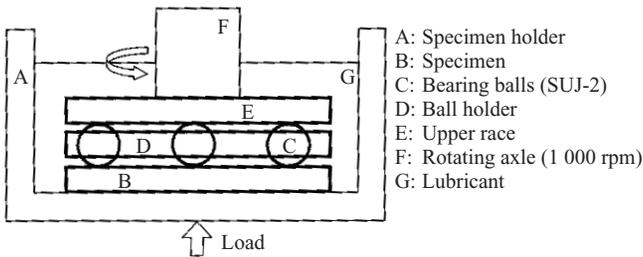


Fig. 2 Loaded state in thrust type rolling contact fatigue test

じない荷重を疲労限の負荷荷重とし、(1)式⁹⁾にしたがい、最大接触応力(ヘルツ応力)を算出し、面圧疲れ強さとした。焼結体のヤング率は、今回の実験範囲では、組成によらず、密度に依存するものとし、(2)式¹⁰⁾にしたがい、算出した。

$$\sigma_w = 0.62\{P/r^2(1/E + 1/E')^2\}^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

- P : 試験鋼球の負荷荷重 (kN)
- r : 試験鋼球の半径 (mm)
- E : 試験鋼球のヤング率 (206 GPa)
- E' : 焼結体のヤング率 (GPa)

$$E' = -342 + 69.2\rho \dots\dots\dots (2)$$

ρ : 焼結体の密度 (Mg/m³)

面圧疲労過程の組織変化を観察するため、ヘルツ応力 4.4 GPa を所定の繰り返し数 (1.2, 3.6 および 5.4×10^6) 負荷

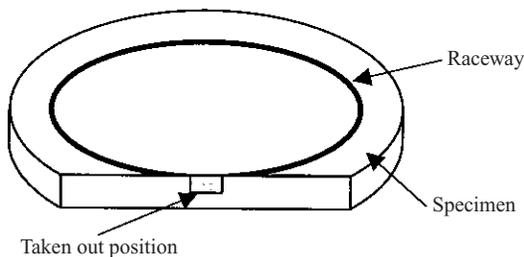


Fig. 3 Taken out position of the specimen for microstructural analysis

した後、疲労試験を中断し、試料を採取した。試料は Fig. 3 の位置から採取し、軌道直下の断面を 3% ナイタル溶液で腐食し、観察した。

3. 実験結果

3.1 抜出力および圧粉密度

ベース粉末として JIP シグマロイ 415S を用い、686 MPa の圧力で成形した場合の各成形法における抜出力および圧粉密度を Fig. 4 に示す。WD 法における抜出力は、WC 法の場合より低く、CC 法の場合とほぼ同等の値である。同一成形圧力で比較すると、WD 法における圧粉密度は、CC 法の場合に比べ約 0.2 Mg/m³、WC 法に比べ約 0.1 Mg/m³

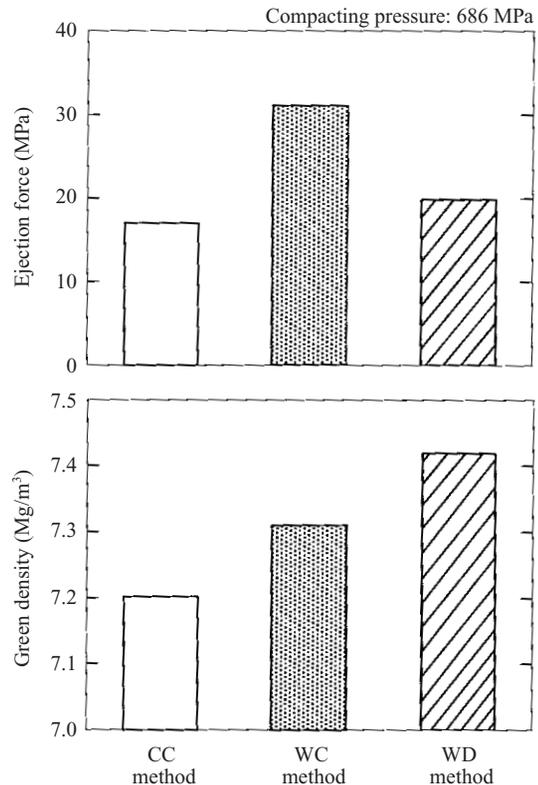


Fig. 4 Ejection forces and green densities of the compacts made of JIP SIGMALOY 415S by several compaction methods

向上し、 7.4 Mg/m^3 の高い値を示す。この密度向上は、内部潤滑剤の添加量の低減および金型潤滑により金型への圧力散逸が抑制された効果によるものと考えられる。一般に、圧粉密度の上昇とともに径方向への鉄粉の塑性変形量が増大し、脱型時の金型と成形体間の摩擦力(抜出力)が増大するが、WD法では、CC法、WC法よりも、高い圧粉密度が得られるにもかかわらず、低い抜出力で成形することが可能である。

3.2 焼結体の機械的特性

ベース粉末として JIP シグマロイ 415S を用いて、WD 法および CC 法により成形した焼結体の引張強さおよびシャルピー衝撃値を Fig. 5 に示す。引張強さおよびシャルピー衝撃値のいずれも、焼結密度の増加とともに高くなる。同一成形圧力で比較すると、WD 法では、CC 法に比べ焼結密度が約 0.2 Mg/m^3 高く、引張強さは 100 MPa 、シャルピー衝撃値は 10 J/cm^2 向上する。 686 MPa の圧力で成形した場合に 7.5 Mg/m^3 の焼結密度となり、引張強さ 1000 MPa 、シャルピー衝撃値 40 J/cm^2 という高い値が得られる。

WD 法によって作製した焼結体断面の気孔分布状態を

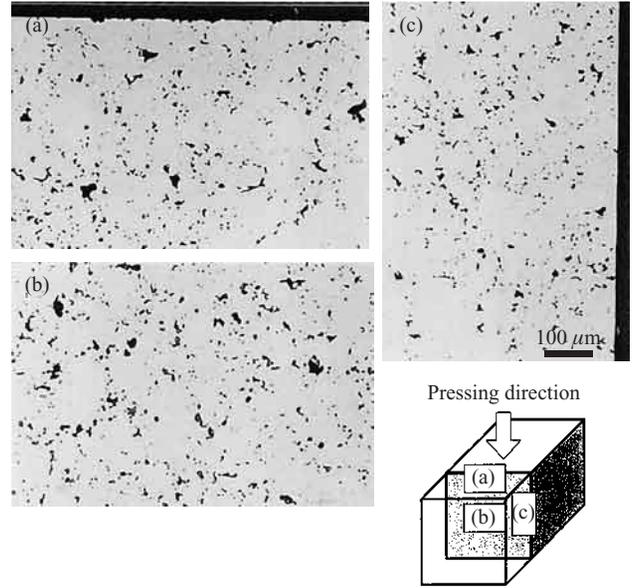


Photo 1 Pore structure of sintered compacts made by WD method

Photo 1 に示す。金型に塗布した潤滑剤が成形体表層部に入り込み、焼結後に気孔となることが懸念されたが、表層部と内部には気孔分布状態の差異は認められない。

3.3 焼結浸炭材の特性

Table 2 に示した配合組成のプレミックス粉を WD 法および CC 法を用いて成形した試験片の圧粉密度、さらにそれを焼結した焼結体の密度を Fig. 6 に示す。WD 法を用いることにより、CC 法に比べ、 0.2 Mg/m^3 以上高い圧粉密度が得られる。WD 法を用いた場合には、いずれの供試粉でも、圧粉密度には差がなく、 7.4 Mg/m^3 程度の高い密度が得られる。焼結体の密度は、いずれの供試粉の場合も圧粉密度より高くなり、 $2 \text{ mass\%Ni-1 mass\%Mo}$ 材の方が 1 mass\% Mo 材より高い焼結密度が得られる。これは、鉄粉に拡散付着させている微細な Ni 粉により焼結が促進された¹¹⁾ため、 $2 \text{ mass\%Ni-1 mass\%Mo}$ 材の焼結時の収縮が Ni を含まない 1 mass\% Mo 材より大きくなったものと考え

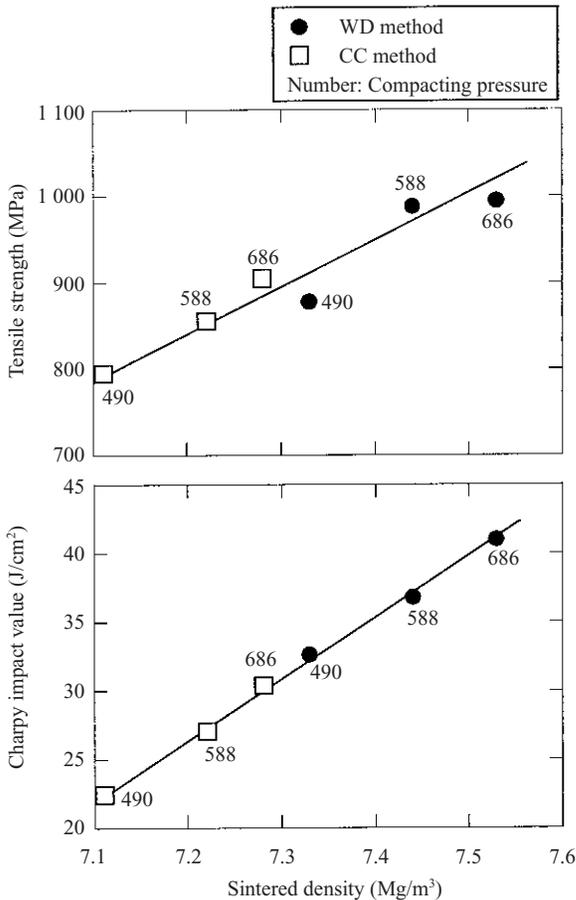


Fig. 5 Tensile strength and Charpy impact value of the sintered compacts made of JIP SIGMALOY 415S by different compaction methods

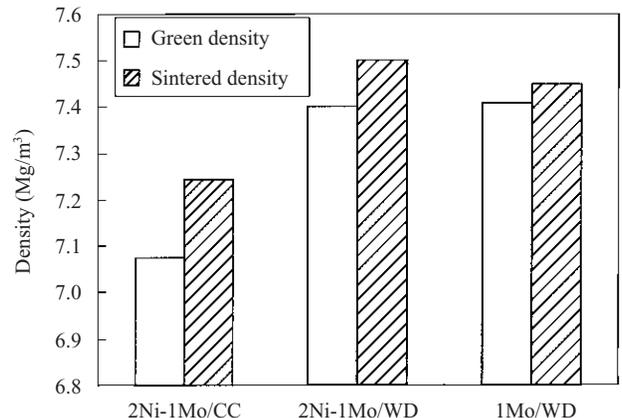


Fig. 6 The green and sintered densities of specimens

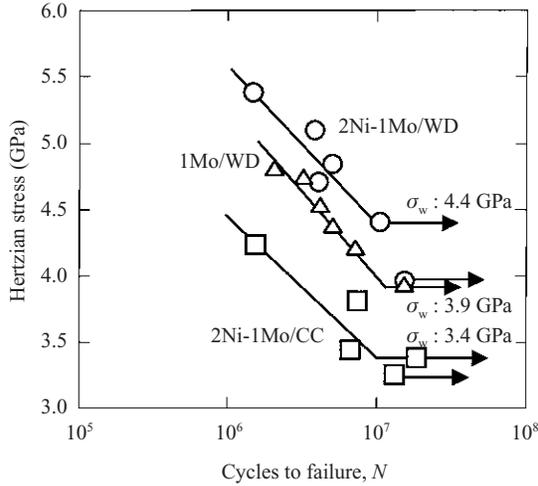


Fig. 7 S-N curves of rolling contact fatigue test in 2 mass%Ni-1 mass%Mo and 1 mass% Mo

られる。

焼結浸炭材の面圧疲労試験の結果を Fig. 7 に示す。2 mass%Ni-1 mass%Mo 材において、WD 法と CC 法を比較すると、WD 法を用いて作製した 2 mass%Ni-1 mass%Mo 材の面圧疲れ強さは 4.4 GPa であり、CC 法を用いて作製したものより 1.0 GPa 高い値が得られる。また、同じ WD 法で作製した 2 mass%Ni-1 mass%Mo 材と 1 mass% Mo 材の面圧疲れ強さを比較すると、2 mass%Ni-1 mass%Mo 材の方が 1 mass% Mo 材より 0.5 GPa 高い値が得られる。

4. 考察

4.1 面圧疲労時の組織変化と面圧疲れ強さの関係

Fig. 7 に示したように、2 mass%Ni-1 mass%Mo 材の方が 1 mass% Mo 材より高い面圧疲れ強さが得られた要因について考察する。

焼結鋼の面圧疲れ強さは、密度や硬度分布に影響を受けることが知られている^{10,12)}。Fig. 6 に示したように、2 mass%Ni-1 mass%Mo 材の方が焼結密度が 0.05 Mg/m³ 高い。小倉らの報告¹⁰⁾に基づき、密度増加による面圧疲れ強さの上昇分を推定すると、0.05 Mg/m³ の密度上昇分は、0.2 GPa の上昇分に相当する。したがって、2 mass%Ni-1 mass%Mo 材の高い面圧疲れ強さは、密度上昇分だけでは説明できない。また、硬度分布は、Fig. 8 に示すように、いずれの材料においても HV550 以上の硬化層深さが 1 mm 以上であり、ほぼ同等である。

面圧疲労試験により生じた剥離の状況を、断面から観察した結果を Photo 2 に示す。2 mass%Ni-1 mass%Mo 材、1 mass% Mo 材いずれの材料においても、剥離は幅 0.4 mm、深さ 0.1 mm 程度である。基底組織はマルテンサイト組織であるが、剥離の近傍において、矢印で示すエッチングされない白色相が観察される。また、白色相中には微小なク

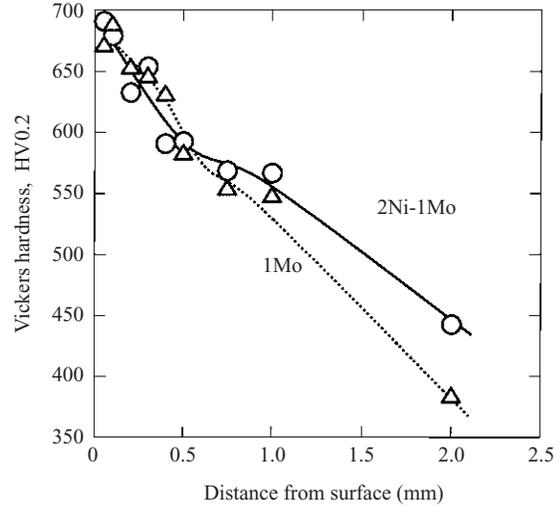
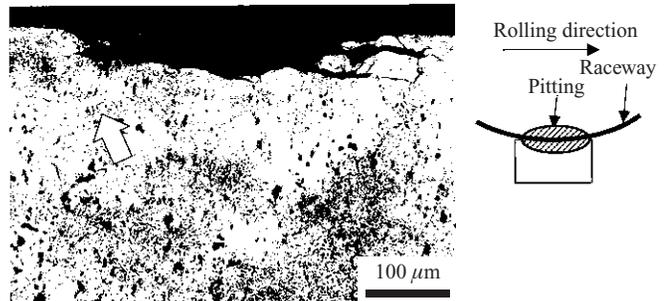
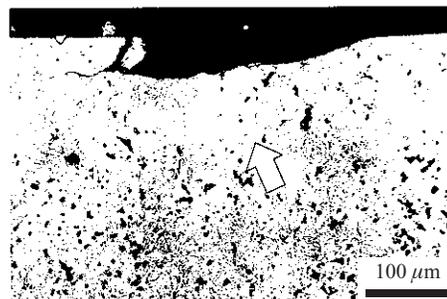


Fig. 8 Microhardness profiles of 2 mass%Ni-1 mass%Mo and 1 mass% Mo



(a) 2 mass%Ni-1 mass%Mo ($S = 4.8$ GPa, $N = 5.0 \times 10^6$ cycles)



(b) 1 mass%Mo ($S = 4.7$ GPa, $N = 3.2 \times 10^6$ cycles)

Photo 2 Cross-sectional microstructure of the pitting in 2 mass%Ni-1 mass%Mo and 1 mass% Mo

ラックが存在しており、これらのクラックが発達し、剥離につながったものと考えられる。

そこで、本報では疲労面での組織変化に着目して、疲れ強さとの関係を考察する。溶製材では軸受鋼、肌焼き鋼における面圧疲労の過程において、高面圧下、高繰返し数下で、特異組織が生成することが知られている。これらの特異組織は、「dark etching constituent (D. E. C.)」、 「white etching constituent (W. E. C.)」、あるいは非金属介在物周辺で生成するものは「バタフライ」と呼ばれている。これらの特異組織は面圧疲れ強さと密接な関係があり、種々の調査が行われている^{13~16)}。

2 mass%Ni-1 mass%Mo 材、1 mass% Mo 材の焼結浸炭

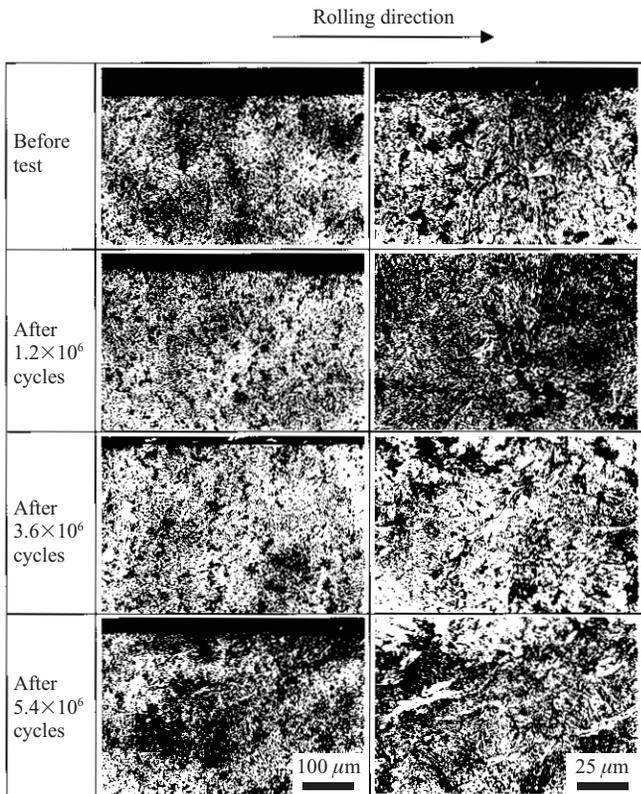


Photo 3 Microstructural change under rolling contact stress of 4.4 GPa in 2 mass%Ni-1 mass%Mo

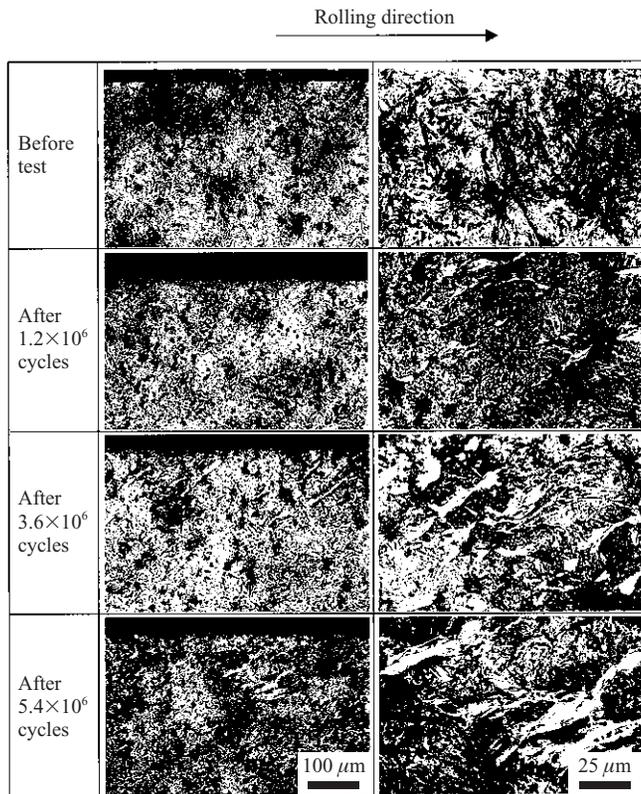


Photo 4 Microstructural change under rolling contact stress of 4.4 GPa in 1 mass% Mo

材では、剥離の近傍で前述の白色相の存在が確認されたので、面圧疲労時の白色相生成状態を詳しく調べることを目的に、剥離に至らない繰り返し応力(1.2, 3.6および5.4 × 10⁶回)を負荷した試料について、応力負荷面直下の組織を観察し比較した。

2 mass%Ni-1 mass%Mo材, 1 mass% Moの組織変化をPhoto 3, 4にそれぞれ示す。いずれの材料でも繰り返し応力負荷前には、ほぼ均一なマルテンサイト組織であるが、繰り返し数1.2 × 10⁶回ですでに、白色相の存在が認められる。また、繰り返し数が多くなるほど、白色相の数、大きさが増加している。白色相は、表面から0.1～0.3 mmの深さの範囲に存在し、荷重の移動方向に対し約30～45°傾いている。また、白色相中には微小なクラックが存在しているのが確認される。同じ繰り返し数では、2 mass%Ni-1 mass%Mo材に比べ、1 mass% Mo材では白色相の数が明らかに多い。

白色相の状態を定量化するため、表面から0.2 mmの深さの範囲を画像解析処理して白色相の面積率を算出し、繰り返し数に対してプロットした。その結果をFig. 9に示す。直線の傾き(白色相の生成速度)はほとんど同じであるが、繰り返し数と同じ位置で比較すると2 mass%Ni-1 mass%Mo材の方が白色相の生成量は少ない。白色相が生成し始める時間(繰り返し数)は、2 mass%Ni-1 mass%Mo材の方が遅い。軸受鋼において、Niには、局所すべりあるいはC拡散を抑制し、微細結晶粒のフェライ

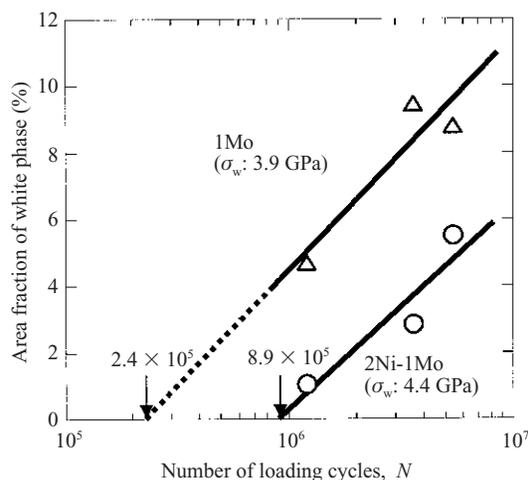


Fig. 9 Relations between number of loading cycles and area fraction of white phase at the depth of 0.2 mm from the rolling surface in 2 mass%Ni-1 mass%Mo and 1 mass% Mo

トであるホワイトバンド(白色相)の生成を抑制する効果があり、面圧疲労寿命を改善することが報告¹⁷⁾されている。したがって、2 mass%Ni-1 mass%Mo材においても、Niの影響により白色相の生成が抑制されたことが高い面圧疲れ強さが得られた一因と考えられる。

4.2 白色相の微細組織

白色相は、表面から0.1～0.3 mmの深さの範囲に、荷重の移動方向に対し、約30～45°傾いて存在している。

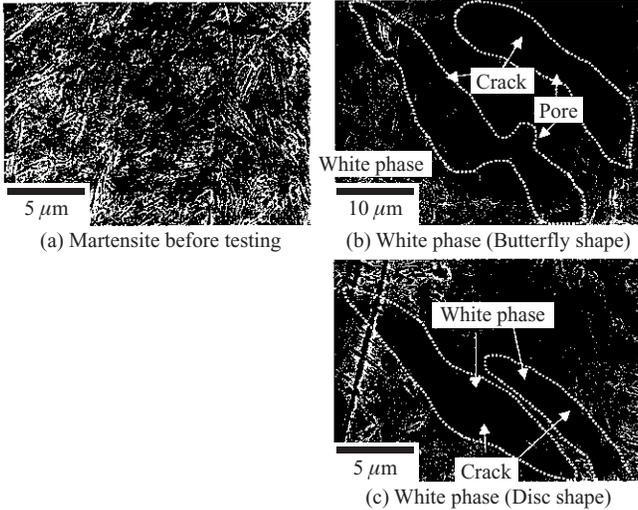


Photo 5 SEM pictures of martensite and white phases in 2 mass%Ni-1 mass%Mo

軸受鋼では、面圧疲労時に応力負荷面と45°の方向に作用するせん断応力 τ_{st} と、応力負荷面と平行に作用するせん断応力 τ_{zy} が存在し、式(3)によって示される鋼球を平板に押し付けた場合の接触域の半径 a を用いると、 τ_{st} は表面から $0.786a$ 、 τ_{zy} は表面から $0.5a$ の位置で最大となることが知られている⁹⁾。本実験では、それぞれ0.25 mm、0.16 mmとなる。白色相が生成している領域は0.1～0.3 mmであり、両せん断応力が最大となる位置を中心に分布している。また、実際に白色相の生成する角度は30～45°の範囲内であり、両方のせん断応力が作用する角度の範囲に分布している。以上の結果から、本実験では軸受鋼と同様にせん断応力が白色相の生成に関与していると考えられる。

$$a = 0.88\{Pr(1/E + 1/E')\}^{1/3} \dots\dots\dots (3)$$

- P : 試験鋼球の負荷荷重
- r : 試験鋼球の半径(mm)
- E : 試験鋼球のヤング率(206 GPa)
- E' : 焼結体のヤング率(GPa)

白色相の微細組織についてSEMで観察した結果をPhoto 5に示す。(a)に示す繰り返し応力を受けていない組織では、焼もどしマルテンサイト組織の特徴である針状組織と微細な析出物(炭化物)が観察される。この微細な析出物は、焼もどし時に生成する ϵ 炭化物と考えられる¹⁸⁾。白色相は、バタフライ形状のもの(b)とディスク形状のもの(c)が観察される。どちらも白色相内に微小なクラックが存在する。バタフライ形状のものは、空孔のエッジ部から両側に生成しており、軸受鋼の介在物の周りに生成するバタフライと同様の形状である。白色相内には、繰り返し応力を受けていないマルテンサイト組織には認められる針状組織および炭化物が認められない。白色相の周囲の組織は、

繰り返し応力を受けていないマルテンサイト組織とほとんど変わらない。越智らの報告¹⁶⁾では、軸受鋼、浸炭鋼の疲労過程では、せん断ひずみの集中とそれにもなう発熱により、擬似パーライト組織である筋状組織が生成し、次に炭素が拡散してフェライト相が発達し白色相に変化するとされている。したがって、この焼結浸炭鋼に生成した白色相内にも内部に炭化物が認められないことから、軸受鋼と同様に、マルテンサイト中からCが拡散したフェライトであると推定される。

5. 結言

潤滑剤添加量を低減した偏析防止処理鉄粉「JIP クリーンミックス DL」を用いて、温間金型潤滑成形法(WD法)により作製した高密度焼結体の密度、機械的特性を調べ、以下の結果を得た。

- (1) JIP シグマロイ 415S(Fe-4 mass%Ni-1.5 mass%Cu-0.5 mass%Mo 部分合金化鋼粉)を原料粉とし、内部潤滑剤量を0.2 mass%まで低減したJIP クリーンミックス DLでは、常温成形法の場合に比べ約0.2 Mg/m³向上し、成形圧力686 MPaで7.4 Mg/m³の高い圧粉密度が得られた。さらに焼結後では、焼結密度7.5 Mg/m³、引張強さ1000 MPa、シャルピー衝撃値40 J/cm²の高い値が得られた。
- (2) JIP シグマロイ 2010(Fe-2 mass%Ni-1 mass%Mo 部分合金化鋼粉)を原料粉としたクリーンミックス DLでは、WD法による圧粉密度7.4 Mg/m³、さらに焼結浸炭熱処理後では、焼結密度7.5 Mg/m³、面圧疲れ強さ4.4 GPaという優れた特性が得られた。この高い面圧疲れ強さは、高い焼結密度と、面圧疲労過程において特異組織(白色相)の生成を抑制したことが要因と考えられる。

参考文献

- 1) Engstrom, U. et al. "Porosity and properties of warm compacted high strength sintered steels." Proc. of 1998 Powder Metallurgy World Cong. & Exhibition. Granada, 1998-10, EPMA. p. 21-26.
- 2) Ozaki, Y. et al. "An analysis of compaction behaviors of iron powder during warm compaction." Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials. Vancouver, 1999-06, MPIF. vol. 1. part 2, p. 109-116.
- 3) 尾崎由紀子ほか. 温間成形用部分合金化鋼粉クリーンミックス「KIP クリーンミックス HW シリーズ」. 川崎製鉄技報. vol. 33. no. 4. 2001. p. 170-174.
- 4) Ball, W. G. et al. New die wall lubrication system. Int. J. Powder Metallurgy. vol. 33, no. 1, 1997, p. 23-32.
- 5) Gasbarre, G. P. Jr. "Die wall lubrication system, consistency and reliability." Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials. 2001-06. part 3, p. 38-46.
- 6) 宇波繁ほか. 焼結密度7.5 Mg/m³を有する光輝焼入れ鋼の疲労強度に及ぼす残留オーステナイトの影響. 粉体粉末冶金協会平成14年度春季講演大会概要集. 東京, 2002-05. 粉体粉末冶金協会. p. 256.
- 7) 宇波繁ほか. 温間金型潤滑成形法による高密度焼結体の面圧疲労特性.

- 粉体粉末冶金協会平成14年度秋季講演大会概要集. 京都, 2002-11, 粉体粉末冶金協会. p. 28.
- 8) 宇波繁ほか. 高密度自動車焼結部品用鋼粉—疲労特性に優れた高密度焼結体が得られる鋼粉およびその成形法—. JFE 技報. no. 4, 2004, p. 70-76.
 - 9) 曾田範宗. 軸受. 岩波書店, 1964.
 - 10) 小倉邦明ほか. 合金鋼粉焼結体の再圧縮による高密度化とその特性. 川崎製鉄技報. vol. 21, no. 3, 1989, p. 250.
 - 11) 花立有功ほか. Fe-Ni-C3 元系混合圧粉体の焼結特性. 粉体および粉末冶金. vol. 25, no. 4, 1978, p. 116-121.
 - 12) Hoffmann, G. et al. "Effect of pores and porosity on rolling contact fatigue of sinter hardened P/M steel." Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, LasVegas, 2003-06, MPIF part 7, p. 299-313.
 - 13) Gentile, A. J. et al. Phase transformations in high-carbon, high-hardness steels under contact loads. 1965-06, Trans. TMS-AIME. vol. 233, p. 1085-1093.
 - 14) Swahn, H. et al. Martensite decay during rolling contact fatigue in ball bearings. Metallurgical Transactions A. vol. 7A, 1976, p. 1099-1110.
 - 15) 室賀啓ほか. 転動疲労により生成した白色異常組織. 鉄と鋼. vol. 84, no. 5, 1998, p. 351-356.
 - 16) 越智達朗ほか. 軸受用鋼の転動疲労過程での組織, 材質変化挙動. 新日鉄技報. no. 370, 1999, p. 20-26.
 - 17) 木南俊哉ほか. 軸受鋼の転動疲労特性に及ぼす Ni 添加の影響. 電気製鋼. vol. 73, no. 1, 2002, p. 23-28.
 - 18) 須藤一ほか. 金属組織学. 丸善, 1972, p. 187.



宇波 繁



尾崎由紀子



上ノ園 聡