微粒子ショットピーニングがオーステンパ処理球状黒鉛鑄鉄の 面圧強さに及ぼす影響*

森 川 浩 次^{*1}, 有 浦 泰 常^{*2}
石 丸 良 平^{*2}, 五 家 政 人^{*3}

Influences of Fine Particle Shot-Peening on Surface Durability of Austempered Ductile Iron

Hiroshi MORIKAWA^{*4}, Yasutsune ARIURA,
Ryohei ISHIMARU and Masahito GOKA

^{*4} Sasebo College of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Okishinmachi 1-1, Sasebo-shi, Nagasaki, 857-1193 Japan

For Austempered Ductile Iron (ADI) gears, a shot-peening is utilized to improve the bending fatigue strength. However, under some shot-peening conditions, the increase of surface roughness by shot-peening may deteriorate the surface durability of ADI gear. The authors in this paper investigate the influence of the fine particle shot-peening on surface durability of ADI (austempering temperature 375°C) roller using a disk machine with rolling and sliding. The results are summarized as follows: (i) After the fine particle shot-peening, the hardness and compressive residual stress near the surface are risen. Furthermore, the surface roughness is smaller than that after the conventional shot-peening. (ii) The surface durability of ADI roller with the fine particle shot-peening is superior to that of ADI roller with the conventional shot-peening. Consequently, if a shot-peening is applied to improve the bending fatigue strength of ADI gear, the fine particle shot-peening is available to prevent the deterioration of the surface durability.

Key Words: Gear, Fine Particle Shot-Peening, Austempered Ductile Iron (ADI), Surface Durability, Surface Roughness, Hardness, Residual Stress

1. 結 言

オーステンパ処理球状黒鉛鑄鉄(ADI)は球状黒鉛鑄鉄のなかでも引張強さが高く、強じん性を有している。さらに製品に近い形状に鑄込むことにより省資源・省エネルギーの点から、中・大型動力伝達用歯車への利用が期待されている。近年では社会的経済的なニーズから自動車関連の機械部品を中心に、歯車材としてもADIの採用が試みられており^{(1)~(5)}、調質歯車および浸炭焼入れ歯車をADI歯車に転換しようという研究が活発に行われている^{(1)~(17)}。

一般にショットピーニングを高硬度(浸炭焼入れ)歯車の歯面および歯元に施すことで、歯の曲げ強さが向上することはよく知られている。これは表面近傍の硬さおよび圧縮残留応力の増加によるものである。高硬度材では、高い硬さゆえに、ショットピーニング後の表面粗さの増大が少なく、ショットピーニングを施

すことで面圧強さが向上するという報告が多い⁽¹⁸⁾。しかしADI歯車の歯の曲げ強さを向上させるためにショットピーニングを施した例^{(19)~(23)}はわずかであり、多くの場合、ショットピーニングによる面圧強さの低下が指摘されている。以前に著者ら⁽²³⁾は一般に多く用いられているショットピーニング(ショット径0.8mm)をADIローラ試験片に施し、表面性状の変化を調べた。また、このローラ試験片を用いて二円筒試験を行い、ショットピーニングがADIの面圧強さに及ぼす影響について調べた。その結果、ADIにショットピーニングを施すと、表面粗さが著しく増大したためにショットピーニング前に比べて面圧強さが低下することがわかった。またこれと併せて行った基礎試験の結果から、ショットピーニングを施したADIの面圧強さを向上させるには、表面粗さの増大を最小限に抑える必要があることを示した。

そこで、本研究ではショットピーニング後の表面粗さの増大を抑えるために、直径50μm未満のショットを高速で投射する微粒子ショットピーニング^{(24)~(29)}をADIローラ試験片に施した。そしてこのローラ試験片を用いて二円筒試験を行い、微粒子ショットピーニン

* 原稿受付 2000年5月19日。

^{*1} 正員, 佐世保工業高等専門学校(〒857-1193 佐世保市沖新町1-1)。

^{*2} 正員, 九州大学大学院工学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)。

^{*3} 正員, 日立金属(株)(〒321-4367 真岡市鬼怒ヶ丘11)。

E-mail: morik@post.cc.sasebo.ac.jp

グが ADI の面圧強さに及ぼす影響について調べた。その結果、ADI 歯車の曲げ強さ向上の目的で歯面および歯元にショットピーニングを施す場合、面圧強さの低下を防ぐには微粒子ショットピーニングが有効であることがわかったので、ここに報告する。

2. 試験片・微粒子ショットピーニング・実験方法

2・1 ローラ試験片 ローラ試験片の形状を図 1 に示す。ローラ試験片材種は、ADI (FCAD1000 相当) である。ADI の化学成分を表 1 に示す。熱処理は、875℃×2h のオーステナイト化処理後、375℃×2h のオーステンパ処理を行い、基底組織を上部ベイナイト組織と残留オーステナイト組織の混合組織とした。この ADI の機械的性質を表 2 に示す。以前の著者らの研究⁽⁹⁾⁽¹¹⁾から、オーステンパ処理温度 375℃の ADI 歯車をサーメット仕上げホブ切り⁽³⁰⁾⁽³¹⁾することにより、歯面粗さは 2 μm Ry に、また歯形・歯すじ誤差も 2~4 μm 程度 (JIS B1702-1:1998 1~3 級) に収められることがわかっていて、この歯面をシミュレートするため、上記の熱処理後、ローラ試験片外周部 (接触部) の表面粗さを約 2 μm Ry になるように円筒研削を行った (以下、Ground と呼ぶ)。その後、ローラ試験片外周部に微粒子ショットピーニングを施した。

2・2 微粒子ショットピーニング 本研究では、2 種類の異なる微粒子ショットピーニングを用いた。それぞれを FP1、FP2 と呼ぶこととする。また参考のため、一般に多く用いられているショットピーニング⁽²³⁾ (ショット径 0.8 mm) を SP と表し、その結果も併せ

Fig.1 Shapes and dimensions of rollers

Table 1 Chemical compositions of rollers [%]

	C	Si	Mn	S	Mg	Mo
ADI	3.73	2.23	0.41	0.015	0.047	0.36

Table 2 Mechanical properties of ADI

Tensile strength [N/mm ²]	Yield stress [N/mm ²]	Elongation [%]	Hardness [HB]
995	840	7.9	310

て示す。それぞれのショットピーニングに用いたショットの様子は図 2 のようである。巨視的に見ると、SP のショットは粒状であるが、FP1 および FP2 のショットは粉末状である。さらに拡大すると、この粉末は 1 粒ごとに球形を成していることがわかる。それぞれのショットピーニング条件を表 3 に示す。FP1 では平均 φ40 μm の高速度鋼ショットで空気圧方式、FP2 では平均 φ45 μm のガラスショットで水圧方式を採用している。なお、FP2 はショット投射量 (360g/min) で工程管理しており、アークハイトの測定を行っていないが、そのアークハイトは FP1 と同程度であると考えられる。すべてのショットピーニングにおいて、図 3 のようにローラ試験片外周部に対してほぼ垂直方向に設置した投射ノズルに送りの揺動運動を与え、空気圧または水圧を利用してショットを投射した。

Fig.2 Photographs of shots

Table 3 Shot-peening conditions

	Method	Shot size [μm]	Shot material	Shot hardness [HV]	Pressure [MPa]	Peening time [sec]	Arc height
SP	Air	800	Steel	720	0.075	64	0.29mmA
FP1	Air	40	HSS	600	0.3	36	0.064mmN
FP2	Water	45	Glass	550	60	5.2	—

Fig.3 Appearance of peening

Table 4 Conditions of rolling-sliding

	Lower speed roller	Higher speed roller
Speed of rotation [rpm]	2 635	3 190
Peripheral speed [m/s]	9.65	11.69
Specific sliding [%]	-21.1	17.5
Sliding velocity [m/s]	2.04	

Table 5 Conditions and results of experiments

Test No.	Surface finish*	Surface roughness Ry μm				Max. Hertzian stress σ _H MPa	Cycles run in Higher speed roller N _i	Number of pits in Lower speed roller (at N _i)
		Before test		After test				
		H	L	H	L			
1	Ground	2.1	2.7	0.8	0.9	1 960	5.00×10 ⁶	1 (Spalling)
2	Ground	2.5	3.2	1.1	1.2	1 790	1.21×10 ⁷	0
3	Ground	3.2	2.3	0.9	1.1	1 700	1.21×10 ⁷	0
4	Ground	3.5	2.0	1.8	1.2	1 530	1.00×10 ⁷	0
5	SP	14.1	16.1	4.6	5.7	1 700	2.40×10 ⁶	1 (Spalling)
6	SP	14.3	14.6	4.8	6.6	1 530	6.90×10 ⁶	1 (Spalling)
7	SP	13.7	14.3	6.7	6.3	1 450	1.21×10 ⁷	0
8	SP	16.3	16.6	5.5	13.4	1 360	1.21×10 ⁷	0
9	FP1	5.3	5.9	1.8	1.9	1 960	1.91×10 ⁶	1 (Spalling)
10	FP1	5.5	5.9	1.5	1.7	1 790	5.76×10 ⁶	1 (Spalling)
11	FP1	4.5	5.6	2.1	2.2	1 700	1.21×10 ⁷	0
12	FP1	6.0	6.1	2.2	1.8	1 620	1.21×10 ⁷	0
13	FP2	5.8	5.8	1.4	1.6	2 040	6.53×10 ⁶	1 (Spalling)
14	FP2	5.1	6.3	1.8	2.0	1 960	5.65×10 ⁶	2 (Spalling)
15	FP2	4.9	6.1	1.7	2.1	1 870	6.97×10 ⁶	1 (Spalling)
16	FP2	5.2	6.2	1.8	1.7	1 790	1.21×10 ⁷	0

* "SP" = Conventional shot-peening after "Ground", "FP1" and "FP2" = Fine Particle shot-peening after "Ground".

Fig.4 Spalling

2・3 試験機・潤滑油および実験方法 試験機はバックアップロール式ローラ試験機を用いた⁽³²⁾. 表4に転がり滑り条件を示す. 潤滑油はISO VG 150 相当基油[比重 0.8905 (15℃), 粘度 $149.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (40℃), $14.67 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (100℃)]を用い, 油温 $40 \pm 2^\circ\text{C}$, 油量 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ でローラ試験片接触部直上から供給した.

試験中は, ローラ試験片の表面粗さ測定および表面状態の観察を適時行い, $\phi 0.3 \text{ mm}$ 以上のピット (またはスポーリング) が発生するまで運転を行った. なお, 高速側ローラ繰返し数 $N_1 = 1.21 \times 10^7$ (低速側ローラ繰返し数 $N_2 = 10^7$) まで運転を行い, 損傷が発生しない場合は, この時点で運転を中止した.

Fig.5 Influence of the fine particle shot-peening on surface durability

3. 実験結果および考察

3・1 微粒子ショットピーニングが面圧強さに及ぼす影響 表5に二円筒試験の実験条件およびその結果の概要を示す. ただし, Test No. [1] ~ [8] は比較のために文献(23)から再録した. 損傷はすべて低速側ローラに発生し, その表面疲労損傷形態は微粒子ショットピーニングの有無によらず, スポーリングであった. FP1, FP2に発生したスポーリングの例を図4に示す.

表5をS-N曲線にまとめると図5になる. ここで, 高速側ローラ繰返し数 $N_1 = 1.21 \times 10^7$ (低速側ローラ繰返し数 $N_2 = 10^7$) まで損傷が発生しなかった場合の最大ヘルツ応力のうちもっとも高い面圧を耐久限と呼ぶこととする. ショットピーニング前 (Ground) に比べて, SPの面圧強さは著しく低下しており, SPを施した場合

Fig.6 SEM micrographs of surface and cross section

の耐久限は最大ヘルツ応力 $\sigma_H=1450\text{MPa}$ になっている。しかし、FP1、FP2 を施した場合の耐久限は、Ground の場合とほぼ同程度であり、最大ヘルツ応力 $\sigma_H=1700 \sim 1800\text{MPa}$ となった。したがって、ADI 歯車の曲げ強さ向上の目的で歯面および歯元にショットピーニングを施す場合、面圧強さの低下を防ぐには微粒子ショットピーニングが有効であることがわかる。

3・2 微粒子ショットピーニングによる表面性状の変化 図6は、微粒子ショットピーニングを施した場合の表面および軸直角断面における走査電子顕微鏡

Fig.7 Surface roughness before test

写真である。二円筒試験前では、Ground に比べ、SP は著しく表面が荒れており、研削目がほとんど消滅していることがわかる。一方、FP1 および FP2 では、SP よりも表面粗さが小さい。また FP1 と FP2 のショット痕に違いが見られる。FP1 のショット痕は直径約 $10\mu\text{m}$ 以下であり、微粒子ショットが表面に存在していた黒鉛およびその周辺に衝突することで黒鉛周辺が凹み、黒鉛上部が粉碎されている。そして FP2 のショット痕は、微粒子ショットが比較的強い圧力で投射されたために直径約 $20\mu\text{m}$ (FP1 ショット痕の2倍) の滑らかな半球形となっており、研削により塑性流動した基体組織に微粒子ショットが衝突することによって表面直下の黒鉛をつぶし、封孔処理としての作用をしているようである。二円筒試験後では、すべての表面処理において、二円筒試験前に比べ表面粗さが小さくなっている。また、き裂は表面から発生し、内部へ進展している。スポーリング起点付近の破面を走査電子顕微鏡観察したところ、起点に近いほど黒鉛の痕跡が多く見られた。それゆえ、これらのき裂は内部の黒鉛を縫うようにして進展し、損傷に至ることがわかった。

二円筒試験前の軸方向断面曲線を図7に示す。図6で比較したように、FP1、FP2 を施した場合の表面粗さは、SP を施した場合に比べて小さく、 $6\mu\text{m Ry}$ 程度(黒鉛の凹部を含む)となっており、表面粗さの増大がかなり抑えられている。表面粗さの増大は中硬度材の面圧強さを著しく低下させる要因である⁽²²⁾⁽²³⁾⁽³³⁾。そのため、微粒子ショットピーニングを施すことによって、図5のように面圧強さの低下を防止できたのは、表面粗さの増大が抑えられたためであると考えられる。

図8は、微粒子ショットピーニングが硬さ分布に及ぼす影響を示す。Ground の場合、表面近傍で 450HV に加工硬化している。SP では表面からの深さ約 $100\mu\text{m}$ まで加工硬化し、表面では 600HV に達している。一方、

Fig. 8 Influence of the fine particle shot-peening on hardness before test

Fig. 11 Influence of the fine particle shot-peening on residual stress before test

Fig. 9 Hardness before and after test (FP1)

Fig. 10 Hardness before and after test (FP2)

FP1, FP2 を施した場合の加工硬化はどちらも表面近傍のみであり、表面では約 500 HV 程度である。Ground の段階で既に 450 HV に加工硬化していたため、微粒子ショットの持つ運動エネルギーでは 50 HV 程度の上昇に留まっている。また FP1 (硬化深さ約 10 μm) に比べて、FP2 の方が少し深く (深さ約 40 μm) まで加工硬化しているのは、ショットを投射する手段として用いた

水圧による加工硬化であると考えられる。

図 9, 10 には、二円筒試験前後での硬さ分布の変化を示す。FP1 (図 9) では、表面からの深さ約 20 μm まで二円筒試験によってさらに加工硬化しており、FP2 (図 10) では、極く表面近傍のみ加工硬化している。どちらの場合も、表面では約 600 HV 以上に達している。以前の著者らの研究⁽²³⁾では、SP を施した場合の二円筒試験後における表面の硬さは 630 HV であった。したがって、FP1, FP2 の場合も表面では SP の場合と同程度の硬さを示していることになる。この加工硬化は面圧強さの向上に寄与すると考えられる。

図 11 は、微粒子ショットピーニングが残留応力 (円周方向) に及ぼす影響を示す。残留応力は X 線回折法により Cr-K α 線を用い α-Fe (211) 面の回折から測定した。深さ方向への試験片部材の除去には電解研磨を用い、測定面を得た。負号は圧縮残留応力を示す。FP1, FP2 による圧縮残留応力は表面で最大となり、表面における圧縮残留応力は SP の場合よりも高く、800 MPa を越えている。しかし、表面からの深さ約 20 μm では圧縮残留応力はほとんど現れておらず、圧縮残留応力の作用する領域は極く表面近傍に限られている。これは図 8 のように研削後の段階で表面近傍が硬化していたため、微粒子ショットの運動エネルギーでは圧縮残留応力 (格子のひずみ) が内部まで与えられなかったと考えられる。また以前の著者らの研究⁽²³⁾において、投射時間が短いほど圧縮残留応力の作用する領域は浅くなる傾向を得た。今回用いた微粒子ショットピーニングの投射時間は SP を施した場合よりも短いために、圧縮残留応力の作用する領域が極く表面近傍に限られた可能性もある。

図 12, 13 に、二円筒試験前後での残留応力分布の変化を示す。FP1 (図 12), FP2 (図 13) とともに二円筒試験後の表面における圧縮残留応力は、二円筒

Fig. 12 Residual stress before and after test (FP1)

Fig. 13 Residual stress before and after test (FP2)

試験前に比べて減少しており、450 MPa となっている。著者らの研究⁽²³⁾では、SP の二円筒試験後の表面における圧縮残留応力は 300 MPa であった。したがって表面で比較すると、FP1, FP2 の場合の方が圧縮残留応力は高いことがわかる。このことから微粒子ショットピーニングを施すことによって、表面では SP の場合よりも高い圧縮残留応力が与えられ、表面からのき裂の発生および進展に対する抑制作用が期待でき、ADI 歯車の曲げ強さおよび面圧強さの向上に効果があると言える。

4. 結 言

2 μm Ry に研削仕上げした ADI ローラ試験片に微粒子ショットピーニングを施し、二円筒試験により ADI の面圧強さに及ぼす影響について調べた。またその表面性状の変化についても調べた結果、次の点が明らかになった。

(1) 面圧強さは、一般的なショットピーニングを施した場合よりも向上し、研削仕上げの場合とほぼ同程度となった。また、その耐久限は最大ヘルツ応力 $\sigma_H = 1\,700 \sim 1\,800$ MPa であった。

(2) 微粒子ショットピーニングを施す前（研削仕上げ）に約 2 μm Ry であった表面粗さは、微粒子ショットピーニング後、約 6 μm Ry となった。一般的なショットピーニングを施した場合に比べて、表面粗さの増大が抑えられた。

(3) 微粒子ショットピーニングを施した場合の加工硬化は表面近傍に限られていたが、表面における硬さは約 500 HV となった。

(4) 微粒子ショットピーニングを施した場合の圧縮残留応力の作用している領域は極く表面近傍のみであった。しかし、表面における圧縮残留応力は、一般的なショットピーニングを施した場合に比べて高く、800 MPa 以上であった。

以上の結果から、ADI 歯車の曲げ強さ向上の目的で歯面および歯元にショットピーニングを施す場合、面圧強さの低下を防ぐには微粒子ショットピーニングが有効であることがわかった。

本研究を実施するにあたり、ローラ試験片へのショットピーニングに関して（株）不二機販、ホンダエンジニアリング（株）、豊精密工業（株）の協力をいただいた。ここに深く感謝する。

文 献

- (1) 久保田鉄工機、素形材、28-1 (1987), 17.
- (2) 田中・ほか 1 名、自動車技術、45-6 (1991), 79-85.
- (3) 岡崎・ほか 2 名、鋳物、65-6 (1993), 506-512.
- (4) 沼尻・ほか 3 名、三菱自動車テクニカルレビュー、7 (1995), 94-98.
- (5) 日立金属機、日立金属技報、15 (1999), 27.
- (6) 佐藤・ほか 3 名、第 68 回 DCI 技術委員会提出資料、(1983), 1-18.
- (7) 有浦・ほか 5 名、機講論、No.878-1 (1987), 45-47.
- (8) Y.Ariura et al., Proc. of JSME MPT'91 Int. Conf. On Motion and Power Transmissions, (1991), 843-848.
- (9) 有浦・ほか 7 名、平成 3 年度科学研究補助金研究成果報告書、研究課題番号 02555035, (1992-3), 2-78.
- (10) 矢野、機械の研究、44-1 (1992), 29-35.
- (11) Y.Ariura et al., Proc. of 1994 Int. Gearing Conf., (1994), 29-34.
- (12) 丹野・ほか 2 名、住友重機械技報、42-126 (1994), 19-22.
- (13) 矢野、鋳造と熱処理、48-2 (1995), 25-30.
- (14) Y.Ariura・R.Ishimaru et al., Proc. of World Congress On Gearing and Power Transmission, (1999), 1515-1524.
- (15) 有浦・石丸・ほか 2 名、機講論、No.998-2 (1999), 53-54.
- (16) 有浦・石丸・ほか 3 名、機論、65-633, C (1999), 288-293.
- (17) 原田・ほか 4 名、球状黒鉛鉄の強度評価、(1999), 252, アグネ技術センター.
- (18) 例えば、鈴木・ほか 2 名、機論、65-637, C (1999), 287-293.
- (19) 小田・ほか 3 名、機論、56-532, C (1990), 256-259.
- (20) 橋本・ほか 3 名、機論、61-585, A (1995), 21-25.
- (21) 穂屋下・ほか 3 名、機論、62-599, C (1996), 302-308.
- (22) 有浦・森川・石丸・ほか 1 名、機講論、No.998-2 (1999), 51-52.
- (23) 有浦・森川・石丸・ほか 2 名、機論、66-643, C (2000), 936-943.
- (24) 加賀谷・ほか 3 名、機講論、No.962-1 (1996), 25-26.
- (25) 宇佐見・ほか 1 名、機講論、No.962-1 (1996), 29-30.
- (26) 杉下・ほか 2 名、機講論、No.982-1 (1998), 91-92.
- (27) 杉下・ほか 1 名、機講論、No.992-1 (1999), 2-3.
- (28) 杉下・ほか 1 名、機講論、No.992-1 (1999), 4-5.
- (29) 微粒子衝突表面改質研究会、最新の表面改質技術—微粒子衝突による表面改質への応用—, (1999-8), 2-27.
- (30) 有浦・ほか 2 名、機論、55-509, C (1989), 158-161.
- (31) 丘・有浦・ほか 1 名、機論、55-509, C (1989), 162-165.
- (32) 上野・有浦・ほか 1 名、機講論、No.768-2 (1976), 77-80.
- (33) 有浦・ほか 2 名、機論、55-512, C (1989), 1004-1009.