

Fig. 3. Relative wear rate of high strength steels, 5% Cr steel and ferritic stainless steels.

造用鋼，溶接性高張力鋼，5%Cr 工具鋼，フェライト系およびオーステナイト系不銹鋼の摩耗試験を行なった。実験はユーデン方格を採用し摩耗に因する因子の摩耗量におよぼす効果が積の型となるとして解析することにより

(i) 摩耗量と硬度の関係は鋼種とは無関係にフェライト・パーライト組織とベイナイト，マルテンサイトおよびその焼戻組織で異なり，前者の方が同一硬度での耐摩耗性が大である。

(ii) 同一組織では硬度の上昇につれて耐摩耗性が向上する。

(iii) 1.5% 以上の Cr を含む鋼は同一硬度，同一組織で考えると耐摩耗性がすぐれている。

(iv) オーステナイト系不銹鋼は同一硬度のフェライト・パーライト鋼よりも耐摩耗性が良い。

などのことが明らかとなった。

文 献

- 1) H. S. AVERY: Wear, 4 (1961), p. 427
- 2) R. D. HAWORTH; Metal Progress, June (1949), p. 842
- 3) 宮野, 他: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 431

(153) 軸受鋼中の非金属介在物とベアリングボールの寿命について

(軸受鋼中の非金属介在物に関する研究—II)

神戸製鋼所，中央研究所

工博 成田 貴一・○那須 進

日本高周波鋼業，富山工場 佐々木 威

Relation between Nonmetallic Inclusion in Ball Bearing Steel and Fatigue Life of Bearing Ball.

(Study on nonmetallic inclusion in ball bearing steel—II)

Dr. Kiichi NARITA, Susumu NASU and Takeshi SASAKI.

1. 緒 言

著者らは前報¹⁾で各種の溶製法による軸受鋼中の非金属介在物とその特性について調査した結果を報告したが，本報告においては，ひきつづいて軸受鋼中の非金属介在物と軸受鋼の寿命との関係を明らかにする目的で塩基性電弧炉溶製材（以下大気溶解材と記す）および消耗電極式アーク再溶解材より製造したベアリングボールを供試材とし，曾田式動荷重試験機によつて寿命試験をおこなつたのち，破面状況の観察，非金属介在物の化学分析および組織などについて比較検討をおこなつた。以下その検討結果について報告する。

2. 供 試 材

試験に使用した供試材は軸受鋼 2 種 (SUJ-2, JIS) の大気溶解材 9 種類，消耗電極式アーク再溶解材 3 種類の合計 12 種類であり，材料切断—冷間プレス—粗研磨—830°C 水焼入—140°C 油中 1 hr 低温焼戻—研磨仕上の加工工程によつて製造されたものであり，その化学成分組成は Table 1 に示したとおりである。

3. 試験項目および試験方法

3.1 曾田式動荷重試験機による供試材の寿命試験
寿命試験に使用した曾田式動荷重試験機の原理図は，Fig. 1 に示したとおりであり，試験方法の概略はつぎのとおりである。

まず被試験ボールは組立前に双眼顕微鏡でキズ検査をおこない，ベアリングの外輪および内輪に被試験ボール 9 コを組合せて，主軸 a および中軸 b に取付ける。運転時の固定荷重はスプリング c によつて 1,200 kg あたえられ，変動荷重は偏心錘 d で 2000 r.p.m の回転によつて ±800 kg の荷重があたえられる。主軸 a は 2000 r.p.m で回転し，潤滑油は 60# Spindol oil を使用。試験時に試験ボールにあたえられる最大応力は $P_{max} = 500 \text{ kg}$ となる。もし運転中に試験ボールにフレーキングが発生した場合は，固定荷重伝達レバーにより Vibration meter に異常振動が起り，メーターの指示で G10 以上になると自動的にマグネットスイッチが働いて運転が止まり，この実運転時間が時間計に表示される。

3.2 光学顕微鏡による破壊供試材のクラック発生状態の観察

3.3 ガス分析および非金属介在物

i) 真空溶融法による O 分析および蒸留法による N

Table 1. Chemical composition of specimens.

Specimen	Steel making process	C	Si	Mn	P	S	Cr
B-1	Basic electric arc furnace	1.00	0.31	0.42	0.013	0.013	1.39
B-2		1.10	0.33	0.43	0.013	0.008	1.46
B-3		1.05	0.31	0.39	0.016	0.012	1.39
C-1		1.01	0.32	0.41	0.016	0.012	1.46
C-2		1.08	0.31	0.39	0.015	0.009	1.50
C-3		0.99	0.30	0.46	0.011	0.012	1.39
F-1		1.07	0.32	0.43	0.016	0.006	1.46
F-2		1.04	0.26	0.44	0.009	0.006	1.43
F-3		1.01	0.32	0.39	0.014	0.017	1.48
D-1	Consumable electrode arc remelting	1.09	0.32	0.41	0.014	0.006	1.50
D-2		1.10	0.32	0.41	0.014	0.009	1.52
D-3		1.03	0.25	0.41	0.006	0.010	1.45

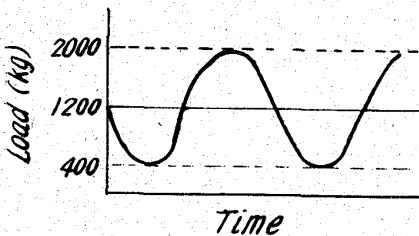
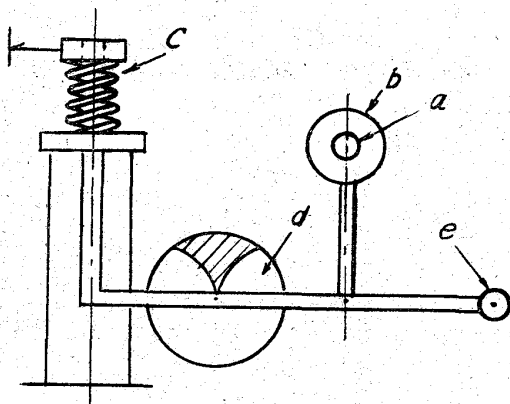


Fig. 1. Fundamental view of SODA-type dynamic loading tester.

iii) ロックウェル硬度計による硬度の測定

4. 試験結果

4.1 供試材の寿命試験結果

曾田式動荷重試験機による供試材の寿命試験結果を示すと Table 2 のとおりである。

Table 2 の結果によれば大気溶解材の平均寿命時間が 16~59hr であるのに対して消耗電極式アーク再溶解材の平均寿命時間は 52~100hr であり、その耐久時間は大気溶解材の約 2 倍を示している。

4.2 破壊された供試材のクラック発生部の観察

破壊された供試材のクラック発生状況の一例を示すと Photo. 1 のとおりであり、さらにクラック発生部の任意の断面状況を示すと Photo. 2 のとおりである。Photo. 1 より明らかなようにクラックは供試材表面下部の浅い部分に発生伝播しており、一般的に Photo. 2 (a)~(c)

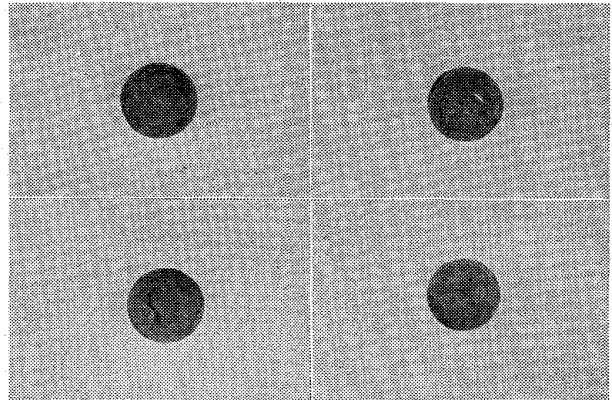


Photo. 1. Crack appearance of bearing ball.

分析

ii) 温硫酸法による酸化物系介在物分析

iii) JIS 法による清浄度の測定

3.4 組織

i) lineal analysis による残留炭化物量の測定

ii) 残留炭化物の粒度分布の測定

Table 2. Results of the fatigue life of bearing ball.

Steel making	Basic electric arc furnace									Consumable electrode arc remelting		
	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	F-1	F-2	F-3	D-1	D-2	D-3
Average fatigue life (hr) <i>n</i> = 6~10	42	30	33	59	21	40	33	16	71	100	92	52
Min. fatigue life (hr)	7	11	9	29	3	10	13	4	32	41	46	18
Max. fatigue life (hr)	77	58	56	98	33	62	58	37	99	177	200	116

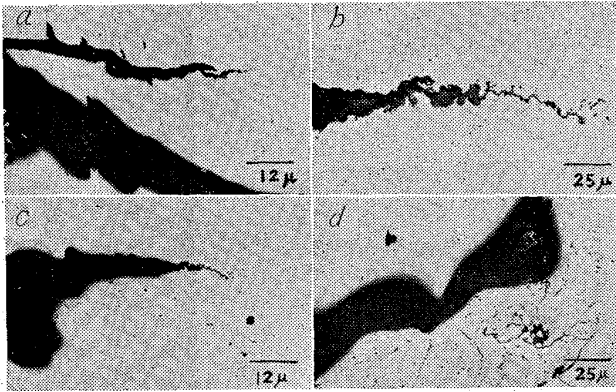


Photo. 2. Microscopic observation of the crack.

に示した形状を有し、主として供試材の表面に平行に発達していることが観察される。このクラックの発生する位置に H. Hertz の接触論の拡張によつて計算される表面に平行な応力振巾が最大になる位置であり²⁾、この位置におけるクラックの発生源、発生核の数とともにこれらのクラックの伝播成長する段階について観察し、さらに材質上の相違点を検討することが本質的な究明方法と考えられるが、本試験の範囲内における顕微鏡観察結果からはクラックの近傍における介在物ならびに組織には異常が認められなかつた。しかし、まれに Photo. 2-(d) に示したようにクラックがループ状に発生し、その周囲にクラックが密集した部分においては、3%硝酸アルコールに腐食されず、また硬度も高く 882~1064Hv を示し、他の部分の硬度に比較してかなり高い値を示すことが認められた。この場合の硬度の増加は応力による変形歪み硬化と考えられる。

4.3 非金属介在物

4.3.1 ガス分析結果

真空溶融法による O 分析および蒸留法による N 分析結

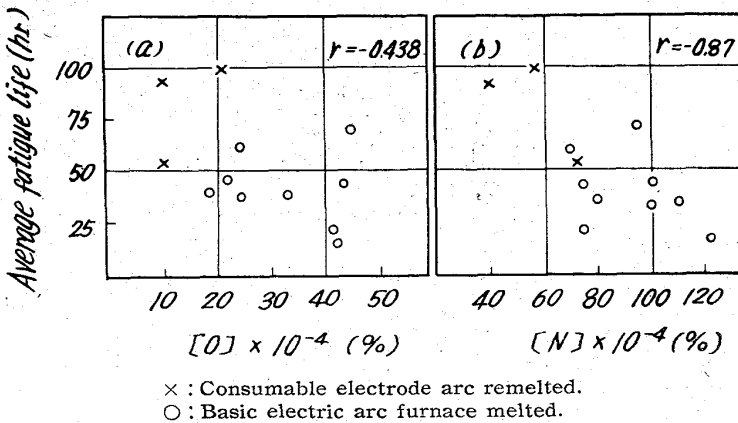


Fig. 2. Relation between oxygen or nitrogen content and fatigue life of the bearing ball.

Table 3. Chemical analysis of oxygen and nitrogen.

Specimen	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	F-1	F-2	F-3	D-1	D-2	D-3
O (%)	0.0023	0.0037	0.0019	0.0027	0.0043	0.0047	0.0027	0.0042	0.0049	0.0021	0.0010	0.0010
N (%)	0.0076	0.0100	0.0080	0.0070	0.0076	0.0101	0.0111	0.0121	0.0095	0.0058	0.0040	0.0072

果を Table 3 に示す。さらに Table 2 の寿命試験結果と O および N 分析結果を比較し、相関係数を求め Fig. 2 に示した。Fig. 2 より明らかなように、本試験の範囲においては O 量と平均寿命時間との間には明瞭な相関は認められなかつたが、消耗電極式アーク再溶解材と大気溶解材の O 量の水準および平均寿命時間の水準を比較すると、O 量の低い消耗電極式アーク再溶解材は寿命が比較的長いことが認められる。この傾向は寿命時間が O 量の多少に依存していることを示していると考えられる。また N 量と平均寿命時間との間には相関が認められ、N 量の減少によつて供試材の寿命時間が延長する傾向が認められる。Table 3 の結果から明らかなように消耗電極式アーク再溶解材は O 量とともに N 量もかなり減少しており、これらのガス成分の減少が寿命時間を延長するものと考えられる。

4.3.2 酸化物系介在物分析結果

供試材中に含まれる酸化物系介在物を温硫酸法によつて求めた結果は Table 4 に示すとおりである。この結果によれば供試材中の全酸化量と寿命時間との間には明瞭な相関は認められず、また Al₂O₃ 量および SiO₂ 量のいずれとも相関は認められなかつた。

4.3.3 清浄度の測定結果

JIS 法によつて測定した供試材の清浄度は Table 5 に示すとおりであり、これらの清浄度と平均寿命時間との関係は Fig. 3 に示すとおりである。Fig. 3 から明らかなように清浄度と寿命との間には相関が認められ、比較的清浄な消耗電極式アーク溶解材は大気溶解材に比べて寿命時間の長いことが認められた。

4.4 組織

4.4.1 残留炭化物量の測定

供試材を研磨したのち、5%ピクリン酸アルコールで残留炭化物を現出させ、2000 倍に拡大した写真について、liner analysis 法により残留炭化物の量を測定し、平均寿命時間との比較をおこなつたが本試験の範囲内では両者に明らかな関係は認められなかつた。

4.4.2 残留炭化物の粒度分布

3.4.1 項の場合と同様に 2000 倍に拡大した写真について残留炭化物の粒度分布を調べ、平均寿命時間との比較をおこなつたが炭化物量の場合と同様に本試験においては平均寿命時間との間に明らかな関係は認められなかつた。

4.4.3 硬度の測定

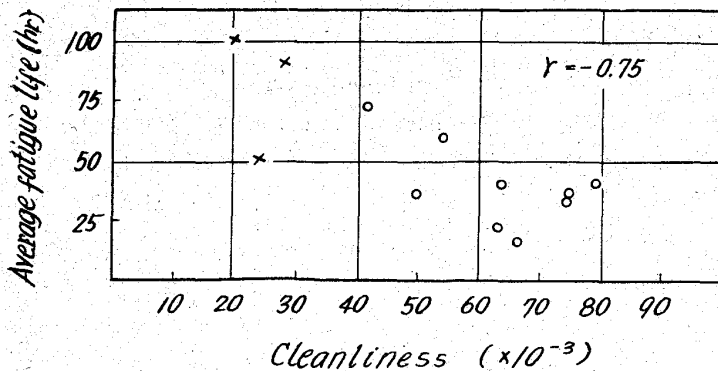
供試材の表面をグラインダーで削り取り、さらに研磨したのち、ロックウェル硬度計によつて硬度の測定をおこなつた。一般に硬度とボール寿命との間には高い相関が認められるといわれているが³⁾⁴⁾、本試験の場合、供試材の硬度が Rc 63~66 の範囲に収まつており、また試験数も少なく明瞭な関係は認められなかつた。

Table 4. Chemical analysis of non-metallic inclusion.

Specimen	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	Cr ₂ O ₂
B-1	0.0005	0.0036	0.0002	None	Trace
B-2	0.0009	0.0035	Trace	"	"
B-3	0.0009	0.0029	0.0002	Trace	None
C-1	0.0104	0.0007	Trace	None	None
C-2	0.0112	0.0005	0.0001	"	Trace
C-3	0.0105	0.0004	0.0002	"	"
F-1	0.0037	0.0005	0.0001	None	None
F-2	0.0047	0.0005	Trace	"	Trace
F-3	0.0064	0.0015	"	"	"
D-1	0.0016	0.0023	None	None	None
D-2	0.0017	0.0013	0.0002	"	"
D-3	0.0010	0.0004	0.0001	"	"

Table 5. Cleanliness of the specimens.

	A	B	C	A+B+C
B-1	0.004	0.004	0.071	0.079
B-2	0.004	0.004	0.042	0.050
B-3	0	0.021	0.054	0.075
C-1	0	0	0.054	0.054
C-2	0	0	0.063	0.063
C-3	0	0	0.063	0.063
F-1	0	0.004	0.071	0.075
F-2	0	0.008	0.058	0.066
F-3	0	0	0.042	0.042
D-1	0	0	0.021	0.021
D-2	0.004	0.008	0.017	0.029
D-3	0	0	0.025	0.025



x : Consumable electrode arc remelted.
o : Basic electric arc furnace melted.

Fig. 3. Relation between cleanliness and fatigue life of the bearing ball.

5. 考 察

本試験結果を総括すると、O量ならびにN量が低く、さらに清浄度の良好な消耗電極式アーク再溶解材は他の大気溶解材に比較して寿命時間が長く、中島⁵⁾らの試験結果と一致する。また Moore⁶⁾のおこなった結果では真空誘導溶解による軸受鋼の疲労強度がかなり改善されることを示しており、これらの結果からも酸化物系介在物の減少が軸受鋼の寿命改善に大きな役割を果していると考えられる。また介在物の形状については、C型介在物が影響をおよぼしており、従来からいわれているように軸受鋼のように部分的に集中応力のかかる状態において、応力集中部に介在物が存在すると、繰返し集中応力によつて介在物周囲に転位が集積され、クラック源となりやすく、さらに介在物と母材との密着度、両者間の間隙および介在物の大きさ、形状などが影響して弾性力学的に切欠き効果⁷⁾が起り疲労強度を低下せしめるものと考えられる。また寿命におよぼすN量の影響については、その信頼度ならびに影響の機構について今後検討の余地がある。

6. 結 言

軸受鋼の材質改善の立場から、塩基性電弧炉溶製材および消耗電極式アーク再溶解材についてベアリングボールの寿命と非金属介在物の量、形態ならびに組成との関係について比較検討をおこなった結果、

1. 消耗電極式アーク再溶解材は塩基性電弧炉溶製材に比較してベアリングボールの寿命はかなり長く、本試験結果では約2倍に達している。
2. 消耗電極式アーク再溶解材より製造されたベアリングボールの寿命時間の延長はO量およびN量が少なく、さらに清浄度が良好なためであり、本試験の範囲内では残留炭化物量、残留炭化物の粒度および硬度などには関係が認められなかつた。

文 献

- 1) 成田, 那須, 佐々木: 鉄と鋼, 50 (1964) 11, p. 1873
- 2) 黒田: 機械の研究, 16 (1964) 4, p. 509
- 3) L. D. COBB: Lub. Engg., Apr. (1963)
- 4) 黒田, 機械の研究, 16 (1964) 5, p. 612
- 5) 中島, 池田, 上野: 金材技研報, 6 (1963) 2, p. 77
- 6) J. H. MOORE: Iron Age, 171 (1953), p. 156
- 7) R. H. EDWARDS: J. Appl. Mech., 18 (1951), p. 19