軸受鋼の耐久寿命におよぼす炭化物粒度 および未溶解炭化物量の影響*

門 間 改 三** 丸 田 良 平***
山 本 俊 郎*** 脇 門 恵 洋***

Kaizo Monma, Ryohei Maruta, Toshiro Yamamoto and Yoshihiro Wakikado :
Effects of Particle Sizes of Carbide and Amounts of Undissolved Carbide on the Fatigue Life of Bearing Steel. The effects of carbide particle sizes and amounts of undissolved carbides in martensite matrix on the fatigue life and other properties have been investigated by using the SUJ 2 kind (JIS) of bearing steel having coarse particle carbides and fine particle ones, respectively, and low chromium steels with different carbon contents.

The specimens were previously quenched from various austenitizing temperatures in order that the carbon content in the martensite matrix was made constant, and accordingly the amounts of undissolved carbide in the low chromium steels were changed variously.

The results obtained are summarized as follows :

(1) The bearing steel with fine particle carbides are superior in fatigue life, hardness and compressive breaking strength to that with coarse particle carbides.

** 東北大学工学部金属材料工学科 (Department of Materials Science, Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai)

*** 愛知製鋼株式会社 (Aichi Steel Works, Ltd., Nagoya)

* 1967 年 10 月本会札幌大会に発表

(2) In the neighbourhood of the fatigue flaking surface caused by the fatigue life test, cracks do not take place in carbides themselves but proceed along the boundary between carbide and matrix.

(3) When the carbon content in the martensite matrix is constant, the hardness rises slightly with the increase in undissolved carbides, but the fatigue life shortens and the compressive breaking strength decreases.

(4) The presence of some amount of the undissolved carbide is desirable in view of the wear resistance and the control of heat treatment.

(Received May 20, 1968)

I. 緒 言

前報⁽¹⁾においては耐久寿命におよぼすマルテンサイト素地の性質そのものについて種々検討した。すなわち軸受鋼の耐久寿命を左右する要因は、マルテンサイト中の炭素量が圧倒的であり、焼入後、150°C 程度に焼戻した状態で比較すれば耐久寿命は 0.4~0.5% 程度の炭素を固溶した場合に、最良の結果がえられることを明らかにした。またマルテンサイト中のクロムは上記低温焼戻状態では、耐久寿命にはほとんど影響をあたえず、軸受鋼の化学組成におけるクロムの役割はむしろ球状化組織および焼入性をはじめとする焼入熱処理作業性を改善するものであることを示した。

本研究では、さらに軸受鋼の焼入焼戻組織に介在するもう一つの要素である未溶解炭化物をとりあげ、とくにそれが耐久寿命におよぼす影響について検討した。まずはじめに、同一組成の素材を用いて炭化物粒度の異なる 2 種の試料をつくり、耐久寿命におよぼす炭化物粒度の影響を検討した。ついで炭素量の異なる試料を用いて、オーステナイト化処理を変化させて、マルテンサイト中の炭素量をほぼ一定とし、未溶解炭化物量が異なる試験片を調整し、耐久寿命におよぼす未溶解炭化物量の影響を検討した。

II. 試 料

試料は A, B, C および D の 4 系列からなる。Table 1 に各試料の化学組成を示す。A 系列の試料で、耐久寿命にお

Table 1 Chemical composition of specimens (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
A-1	0.95	0.30	0.40	0.010	0.015	0.08	0.05	1.44
A-2	0.95	0.29	0.40	0.010	0.020	0.10	0.05	1.44
B-1	0.70	0.35	0.38	0.010	0.025	0.16	0.07	1.50
B-2	0.78	0.35	0.38	0.010	0.025	0.16	0.07	1.50
B-3	0.88	0.35	0.41	0.010	0.025	0.16	0.07	1.48
B-4	0.95	0.33	0.39	0.007	0.024	0.16	0.07	1.45
B-5	1.17	0.35	0.42	0.007	0.024	0.16	0.07	1.45
C-1	0.23	0.20	0.25	0.008	0.026	0.16	0.07	1.43
C-2	0.36	0.17	0.25	0.010	0.026	0.16	0.07	1.42
C-3	0.59	0.23	0.28	0.038	0.026	0.16	0.07	1.45
D	0.78	0.16	0.32	0.017	0.009	0.13	0.14	1.32

よぼす炭化物粒度の影響を検討したが、塩基性電気炉で溶製した軸受鋼第 2 種 (SUJ 2), 250 kg 鋼塊より均熱処理後、65 mm φ に圧延した鋼材について、粗粒および細粒炭化物

(1) 門間, 丸田, 山本, 脇門: 本誌, **32** (1968), 1193.

組織をうるための 2 種の球状化焼鈍を施した後、寿命試験片を切削加工して試験に供した。なお、各試料につき耐久寿命のほか、硬度、圧壊値などの機械的性質も検討した。また A 2 試料は、出鋼時に真空脱ガス処理を施したものである。

未溶解炭化物量の影響の検討には、B 系列の試料、すなわち、炭素含有量を 0.7~1.2% に変化させた低クロム鋼を選んだ。各試料は実験用高周波炉で 20 kg 鋼塊に溶製後、鍛伸、据込、球状化焼鈍を施した後、旋削加工して試験片を作製した。さらに C および D 系列の試料について、軸受鋼における未溶解炭化物の役割について検討した。C および D 系列の試料はそれぞれ炭素量の異なる低クロム鋼であるが、C 系列試料の試験片は B 系列試料のそれと同一方法で、D 試料の試験片は A 系列試料のそれと同一方法 (ただし球状化焼鈍は施さない) で作製した。

III. 実験結果および考察

1. 軸受鋼の炭化物粒度

軸受の耐久寿命からみた炭化物については種々な項目について厳重な要求が課せられているが、そのうちの重要な一つとして炭化物の粒度の問題がある。

一般に軸受用材料としては炭化物が細かく、しかも均一に分布しているものがよいとされている。その理由は粗い炭化物が存在すると、鋼の硬化性⁽²⁾、圧壊値⁽³⁾⁽⁴⁾、耐久寿命⁽⁵⁾を悪化するからであるといわれている。しかしその原因の基礎的な解明はなされていない。

本実験では同一軸受鋼材において適当な球状化焼鈍により、粗粒および細粒炭化物の典型的な 2 種の球状化焼鈍組織の試料を作り、これらについて寿命試験を行なつて、炭化物粒度が耐久寿命におよぼす影響を比較検討した。粗粒炭化物試料の調整にあつては、圧延材を焼準した後、バッチ型連続炉で 780°C に 20 hr 保持した後、3°~5°C/hr 程度の徐冷 (球状化焼鈍の総所要時間、約 80 hr) によつて球状化処理を行なつた。一方、細粒炭化物試料をうるには、圧延材を現場作業的に焼準工程で加熱後、水冷処理し、つづいて Ofag 社製連続焼鈍炉で球状化焼鈍⁽⁶⁾ (総所要時間、約 13 hr) を行なつた。

(2) W. Hulsbuch and E. Theis: Stahl u. Eisen, **72** (1952), 123.

(3) 武田, 岩間, 山本: 鉄と鋼, **45** (1959), 339.

(4) 瀬戸, 高橋: 鉄と鋼, **48** (1962), 569.

(5) 大沢, 近藤: 鉄と鋼, **50** (1964), 2030.

(6) W. Connert: Stahl u. Eisen, **80** (1960), 1049.

さて粗粒および細粒炭化物試料について、炭化物の粒度分布を比較してみよう。実験に用いた試料は A1 である。粒度分布の測定にあつては、電子顕微鏡写真を使用した。粗粒および細粒炭化物試料について、それぞれの代表的と考えられる組織、5 視野よりもとめた各粒度分布を図示すると、Fig.1 のようになる。同図の炭化物粒度分布の

Fig.1 The distribution of carbide particles in coarsed carbide and fined carbide specimens

ヒストグラムによれば、両者の粒度差を定量的にみることができる。

2. 炭化物粒度と耐久寿命との関係

耐久寿命におよぼす炭化物粒度の影響の検討にさきだつて、粗粒および細粒炭化物試料について焼入硬度を比較した。Fig.2 には両試料の硬度試験片 (20 mm × 10 mm × 10

Fig.2 Effect of austenitizing temperature on hardness of coarsed carbide and fined carbide specimens

mm) を 790°~950°C の範囲の種々の温度 (各 30 min 保持) でオーステナイト化後、油冷した場合の焼入硬度をそれぞれの焼入温度に対して示した。細粒炭化物試料の方が全般的に焼入硬度が高いが、その差は低焼入温度側で顕著で、高温になると次第に両者の値は接近する。同図から知られるように、JIS 規定の焼入温度範囲 (800°~850°C) では、同じ値の硬度をうるには細粒炭化物試料ではオーステナイト化温度は粗粒炭化物試料より大体 20°C 低くなる。たとえば、粗粒炭化物試料についてオーステナイト化温度 820°, 840° および 855°C でえられる焼入硬度と同じ値の硬度を細粒炭化物試料についてうるには、それぞれ 790°, 820° および 840°C のオーステナイト化温度を選べばよい。

粗粒および細粒炭化物試料の耐久寿命の比較検討には A2 試料を用い、スラスト型軸受鋼寿命試験機⁽⁷⁾で寿命試験を行なつた。試験片寸法および試験条件は、前報⁽¹⁾のそれとまったく同様である (後出の寿命試験のそれも同様)。

両試料の電解分離による炭化物分析の結果によりマルテンサイト中の炭素量が比較的 low、残留オーステナイトの影響の比較的少ないオーステナイト化温度範囲 (約 860°C 以下) では、硬度とマルテンサイト中の炭素量との間には明らかに相関が認められ、硬度が同じ値の試料のマルテンサイト中の平均炭素量は同程度であると考えられることができるので、前述の硬度試験の結果を参考にして、オーステナイト化温度は粗粒炭化物試料では 855°C、細粒炭化物試料では 840°C と同一の硬度値のえられる温度を選んだ。したがつて、これらの熱処理後のそれぞれの試料のマルテンサイト中の炭素量は、ほぼ同一 (炭化物分析の結果では、マルテンサイト中の炭素量約 0.5%) であるから、固溶炭素量の差から生じる耐久寿命への影響は排除され、炭化物粒度の影響のみが明確に把握しうる。

Fig.3 に寿命試験の結果を示した。同図にみるごとく、

Fig.3 Fatigue life of coarsed carbide and fined carbide specimens (Carbon content in martensite matrix, about 0.5%)

細粒炭化物試料の寿命の方が粗粒炭化物試料の値とくらべて圧倒的にすぐれており、平均寿命 (50% 寿命) で 2.5 : 1 程度の比率となつている。

つぎに粗粒および細粒炭化物試料について、寿命試験後の試験片のはくりした部分を試験片円板の表面に垂直 (圧延方向に平行) に切断し、はくり面の近傍の顕微鏡組織を観察した。はくりした後も鋼球は試験片上をなおある程度回転すると考えられるので、はくりした面の直接表面は複雑な変形をうけてかなり不明瞭となるが、はくり面より内部につながつた、あるいははくり面よりやや離れたところ

(7) 上野, 中島, 池田: 金属材料技術研究所報告, 4 (1961), 73.

に存在する sub crack について観察すると、粗粒および細粒炭化物試料とも crack はいずれも炭化物とマルテンサイトの境界をむすんで伝播しているのが認められた。

軸受鋼の転動疲労はくりを考える場合には、転送面の最大剪断応力振巾を考えるのがもつとも妥当であり⁽⁸⁾、この最大剪断応力のはたらく個所に材質的な欠陥があつた場合、これより亀裂が発生するであろうと思われる。炭化物も当然この欠陥の一つとして考えられ、炭化物とマルテンサイトとの境界の高炭素濃度部に応力集中が起こつて亀裂が発生するのであろう。

粗粒炭化物試料が細粒炭化物試料と比較して耐久寿命のおとる理由として、オーステナイト化温度の高いために生じた結晶粒の粗大化、残留オーステナイトの増加によるものと考え方もあるが、本実験でのオーステナイト化温度が高々 855°C であり、オーステナイト中の炭素量も高々 0.5% 程度であることよりみて、この考え方は妥当とは考えられない。この点についての著者らの考え方はつぎのとおりである。もともと軸受鋼の焼入は非平衡のオーステナイト化状態から行なわれる。本研究の場合には地質マルテンサイト中に約 0.5% の炭素を固溶しているとはいえ、これは平均値であつて、炭化物近傍と遠いところでは炭素濃度が異なるはずである。炭化物粒の大きい場合には、個々の距離が大きくなるためその濃度差も大きく、炭化物粒が細かい場合には隣接距離が小さいため、濃度差も比較的小さいであろう。濃度差が大きければ、すでに前報⁽¹⁾で報告したとおり、炭素濃度の高いところも低いところも耐久寿命は低いのであるから、平均としての寿命も当然低いこととなる。

3. 未溶解炭化物量による圧壊値および耐久寿命の変化

軸受鋼の機械的性質のうち、とくに圧壊値におよぼす未溶解炭化物量の影響については、今日まではほとんどその文献はみあたらないが、その耐久寿命におよぼす影響に関しては、未溶解炭化物量が 7~8% のとき、寿命がもつとも長くなるという報告がある⁽⁹⁾。しかしながら、この実験結果は含有炭素量一定の鋼 (1% C の軸受鋼) についてえられたものである。したがつて、未溶解炭化物量の多くなるような焼入処理の場合には、マルテンサイトの炭素量は低く、逆に未溶解炭化物量の少なくなるような処理の場合には、マルテンサイトの炭素量が高くなつていいるため、マルテンサイトの炭素量の耐久寿命におよぼす影響が同時に現われてくる。しかも前報⁽¹⁾にも述べたように、マルテンサイトの炭素量の変化は耐久寿命にいちじるしい影響をおよぼすのであるから、この結果からただちに未溶解炭化物量 7~8% のとき、寿命が最高となると結論することは問題である。そこで未溶解炭化物量の真の影響を知るために、炭素量以外は軸受鋼 (SUJ 2) の組成と同じで、炭素量を 0.70~

1.17% に変化させた鋼、すなわち B 系列の試料 (球状化焼鈍材、平均炭化物粒度、約 0.6 μ) を用い、これらに適当な熱処理を施して、マルテンサイトの炭素量を一定としたときの圧壊値および耐久寿命におよぼす未溶解炭化物量の影響を検討した。

本実験の各試料の固溶炭素量は、前報⁽¹⁾の結果にもとづいて最良の耐久寿命のえられる 0.45% を目標とした。まず予備実験としてオーステナイト化条件と未溶解炭化物量の関係を lineal analysis の方法でもとめたが、その値と各試料に対して 0.45% C をマルテンサイトに固溶せしめた場合の未溶解炭化物量を理論的に計算よりもとめた値とを比較した。この結果、5 種の炭素量を異にする試料について、そのマルテンサイト中の炭素量を約 0.45% にするときのそれぞれのオーステナイト化条件は、Table 2 のよ

Table 2 Heat treatment to dissolve about 0.45% carbon in matrix for each specimen

Specimen No.	Carbon in specimen (%)	Austenitizing temperature (°C)	Holding time (min)	Amount of undissolved carbide measured (%)
B-1	0.70	870	30	3.5
B-2	0.78	850	30	4.8
B-3	0.88	840	30	6.5
B-4	0.95	830	30	7.8
B-5	1.17	810	30	10.6

うになる。また同表には各試料をこのようにオーステナイト化処理したときの未溶解炭化物量の実測値を併示した。各試料について、このようなオーステナイト化温度 (保持時間, 30 min) を選べば、その含有炭素量は異なるけれども焼入後のマルテンサイト地質の炭素量はすべて同じになるので、強度におよぼすマルテンサイト中の炭素量の効果は除外され、未溶解炭化物量の影響のみを検討することができる。なお、各試料について、このような熱処理条件を選んだときのオーステナイト結晶粒度はいずれも JIS 8 であつた。

さて各試料について、同一炭素量がマルテンサイト中に固溶し、したがつてこれらの間で未溶解炭化物量のみが異

Fig. 4 Relation between the amount of undissolved carbide and hardness, and compressive breaking strength (Carbon content in martensite matrix, about 0.45%)

(8) 黒田：日本機械学会論文集，26(1960)，1258.

(9) 上野，三橋，中野：鉄と鋼，41(1955)，1102.

なつた状態での圧壊値および耐久寿命を比較してみよう。15~25 mm $\phi \times 10$ mm の圧壊試験片 (規格下限値, 2000 kg) を Table 2 に示した条件で熱処理し, 150°C, 90 min 焼戻した場合の各試料の圧壊試験の結果 (3 個の平均値) を未溶解炭化物量および試料の炭素量について図示すると Fig. 4 のようになる。同図にはまた, 圧壊試験片の端面で測定した各試料の硬度の結果もあわせて示した。同図において, マルテンサイト中の固溶炭素量が 0.45% と同一であつても, 硬度が試料の炭素含有量とともにやや上昇するのは, 未溶解炭化物量の影響によるものと考えられる。一方, 圧壊値は試料の炭素含有量が増加するとともに低下するが, この原因もやはり未溶解炭化物量の増加によるものと思われる。

つづいて各試料の寿命試験片につき, 上述の熱処理条件と同一の焼入焼戻をして寿命試験を行なつた。Fig. 5 にそ

Fig. 5 Fatigue life of the specimens having various amounts of undissolved carbide

の実験結果を示す。各試料の試験片数は 15 個であり, それぞれの寿命の最大値と最小値とを比較すると, 15~30:1 程度に大きくばらついているが, マルテンサイト中の炭素量が約 0.45% 一定の場合, 未溶解炭化物量が 10.5% (1.17% C 試料) から 4.5% (0.70% C 試料) と減少するにしたがつて, 耐久寿命が向上するという結果が明瞭に認められる。これは従来考えられていた未溶解炭化物量が 7~8% のとき最高の寿命がえられるという結果とまったく相違なるものである。

この結果をさらに明確にみるために, 未溶解炭化物量, したがつて試料の炭素含有量に対する定格寿命 (90% 寿命) および平均寿命 (50% 寿命) の関係を Fig. 6 に示した。

以上述べたごとく本実験の結果からすれば, 0.4~0.5% C を固溶したマルテンサイト中に未溶解炭化物が共存する場合は, その量の増加につれて圧壊値および耐久寿命が低下することが実験的に確認された。これは本実験によつてはじめて明らかにされたきわめて興味ある結果である。

4. 軸受鋼における未溶解炭化物の役割

繰返し述べるように, 軸受鋼の耐久寿命および機械的性

質には, マルテンサイト中の炭素量は 0.4~0.5% 程度が最適であり, また上述の検討結果より, 未溶解炭化物はか

Fig. 6 Relation between the amount of undissolved carbide and fatigue life (Carbon content in martensite matrix, about 0.45%)

かる性質にとつてむしろ負にはたらくことが明らかとなつた。それでは現用の軸受鋼が 1% 程度の高炭素鋼を使用しているのはなぜであろうか。また未溶解炭化物は果して必要なのか否か, そしてその役割は一体何であろうかという疑問が起こる。この問題に関し, 未溶解炭化物の必要性, すなわちその役割はつぎのように考えられる。以下, 例をあげて簡単に説明しよう。

(1) 未溶解炭化物が残存することにより, 耐摩耗性が向上する。

未溶解炭化物量と耐摩耗性との関係を見るためには, B および C 系列の試料を使用した。摩耗試験の場合も寿命試験の場合と同様, マルテンサイトの固溶炭素量を約 0.45% 一定になるような熱処理を施した試験片について試験を行なつた (試料 C1, C2, C3 のオーステナイト化条件は, それぞれ 900°, 880°, 880°C, 30 min)。したがつて, 未溶解炭化物量を 0~10.6% に変化させたときの耐摩耗性を検討したことになる。

Fig. 7 Relation between the amount of undissolved carbide and wear resistance

実験には大越式迅速送り摩耗試験機を使用し、実験条件は、前報⁽¹⁾の場合と同様である。Fig.7 には3種類の条件で摩耗試験を行なった結果を示した。同図において試料の炭素含有量が0.23%から0.70%まで増加するにしたがつて急激に比摩耗量は減少するが、それ以上炭素含有量が増加しても、比摩耗量はほとんど変わらない。すなわち、0.2~0.4%にかけての耐摩耗性の向上は焼入時のマルテンサイト中の固溶炭素量の増加に起因するもので、前報⁽¹⁾の結果とその様相は一致するが、0.4~0.7%にかけての耐摩耗性の向上は未溶解炭化物量の増加に起因するものであると思われる。ただそれ以上未溶解炭化物量を増加しても、ほとんど耐摩耗性に大きな変化がないという事実は注目すべきことである。したがって、本実験の結果からすれば耐摩耗性にとってある程度の未溶解炭化物が必要であるといえることができる。しかしかかる性質にとって未溶解炭化物は大量には必要としないと考えられる。

(2) 未溶解炭化物が存在すると、存在しない場合に比べて熱処理による結晶粒粗大化の危険性が少ない。

この点に関してはD試料(圧延材)を用い、未溶解炭化物の存在しない状態でのオーステナイト化温度の上昇にともなう結晶粒の粗大化傾向を検討するとともに、結晶粒度が圧壊値および耐久寿命にいかなる影響をおよぼすかを検討した。その結果、未溶解炭化物の存在しない本試料の場合には、オーステナイト化温度が800°Cより上昇するにつれて、また保持時間の増加にともなう結晶粒は粗大化し、結晶粒の粗大化にともなう圧壊値および耐久寿命は敏感に影響をうけ低下することが知られた(Fig.8およびFig.

Fig.8 Effect of austenitizing temperature on grain size No. and compressive breaking strength

9). なお、圧壊試験の条件は Fig.4 に示した実験結果の場合と同一である。また寿命試験の場合、オーステナイト化温度として825°、875°および900°C(保持時間、30 min)を選んだ。焼戻はいずれも150°C、90 minである。

以上の実験結果の示すとおり、オーステナイト化のときに未溶解炭化物の存在しない場合には、オーステナイト結

晶粒の粗大化が起こり、その結果として圧壊値および耐久寿命はいちじるしく低下する。したがって、熱処理に際し

Fig.9 Fatigue life of the specimens having various grain sizes

てオーステナイト結晶粒の粗大化防止という観点から考えてもある程度の未溶解炭化物の存在は必要である。

ただ、ここで注意を要することは、軸受鋼の焼入は非平衡状態で行なうものであるから、耐久寿命、耐摩耗性および熱処理管理の容易さなどの観点に立つて、その含有炭素量および熱処理法を決定する必要があることである。

IV. 結 言

軸受鋼の耐久寿命におよぼす炭化物粒度および未溶解炭化物量の影響を考察するために、軸受鋼第2種において、粗、細2種の球状炭化物組織を有する試料ならびに炭素量の異なる低クロム鋼において、オーステナイト化処理を変化させてマルテンサイト中の炭素量を一定に保ちながら、未溶解炭化物量の異なる状態にした試料について、耐久寿命およびその他の性質を比較検討してつぎの諸結果をえた。

(1) マルテンサイト地質中に0.5%程度炭素を含有せしめた状態で比較すると、粗粒炭化物試料の場合よりも、細粒炭化物試料の方が耐久寿命、圧壊値などの値はいずれもすぐれた結果を示す。

(2) 上記両試料とも寿命試験片の試験後のはくり面近傍において、crackは炭化物自身の内には観察されず、炭化物とマルテンサイトとの境界をむすぶようにして進行している。

(3) マルテンサイト中の炭素量が一定の場合、未溶解炭化物量の増加とともに硬度はやや上昇し、耐久寿命および圧壊値はいずれも低下する。

(4) しかし未溶解炭化物量が皆無というのは好ましくな

く、耐摩耗性および熱処理作業の管理を考慮すると、ある程度の炭化物の残存していた方が良好な結果をあたえる。

(5) 前報⁽¹⁾における研究結果、すなわちマルテンサイト地質中に 0.4~0.5% C を固溶した状態のものが、もつとも耐久寿命が長いという点を基礎において、圧壊値、耐久寿命および熱処理の安定性などの立場から軸受鋼の炭素含

有量の適正値を考えると、現用規格値の 0.95~1.10% C は高すぎると考えられる。

(6) 著者らの考えでは、炭素量を JIS 規格値以下にする方がむしろ耐久寿命が上昇するだけでなく、造塊時の炭化物の偏析による縞状炭化物および網状炭化物の問題などの困難をさけえられる利点があると考えられる。