

低合金鋼の降伏および 疲れ強さの結晶粒大きさ依存性について

大森宮次郎*

(昭和56年9月8日受理)

Dependence of Yield and Fatigue Strength on Grain Size in Low-Alloy Steel

MIYAJIRO OHMORI

Abstract — The dependence of yield strength and fatigue limit on grain size has been studied in a low-alloy steel heat-treated to produce microstructures from plate-let grains to nearly polygonized grains. The following Hall-Petch relations were ascertained to hold for the yield strength σ_y and the fatigue limit σ_w even in using such grain size d .

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + k_y \cdot d^{-1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_w = \sigma_{w0} + k_w \cdot d^{-1/2} \quad (2)$$

An inequality $k_y > k_w$ was found in this case and the yield strength showed stronger the grain size dependency than the fatigue limit. The negative constant σ_{y0} suggests that more refined structural factors, such as subgrains or dislocation density in these structures, may contribute to the yield strength.

1. 緒 言

大傾角粒界をもつ結晶粒から成る多結晶金属では、降伏強さや疲れ強さは、その結晶粒の大きさと Hall-Petch の関係で増加することが知られている⁽¹⁾。この事実から、金属あるいは鋼を強化する最も基本的な手法は、結晶の細粒化であることがわかる。筆者は、このような観点から、結晶の細粒化の一手法である改良オースフォームなる特殊熱処理によって、焼もどし後の副結晶粒の細粒化をはかり、疲れ強さおよびその他の性質の向上を実現してきた。そして副結晶粒大きさと疲れ強さの間にも Hall-Petch の関係が大略成り立つことを認めてきた⁽²⁾。しかし、通常の焼入れ、焼もどしを行った鋼では、副結晶粒の発達が遅く、かなり高い焼もどし温度でもマルテンサイトの板状が残存している。しかもこのような

組織状態で鋼はしばしば使用されるのである。そこで本研究では、このようなマルテンサイトの板状が残存する場合からはば多角形状の焼もどし再結晶組織に対する降伏および疲れ強さの組織サイズ依存性を調査し検討した。

2. 実験方法

実験には、直径 19 mm の市販の Ni-Cr 鋼 (SNC 631) を使用した。その化学組成を Table 1 に示す。その棒鋼を初めに温度 1100°C に 1.5 時間加熱保持して拡散焼なましを行った。

焼なましを行って後、温度 880°C に 30~35 分間保持してオーステナイト化し、その温度よりただちに油焼入れした。次いで、温度 650°C で 1, 5, 20, 50 時間および 100 時間保持して焼もどしを行い、焼もどしの度合いを変化させた。焼もどし後は、試片を油中に急冷し

* 茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

Table 1 Chemical compositions of the steel tested (wt. %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
SNC631	0.32	0.32	0.65	0.018	0.007	2.67	0.68	0.08	—

た。焼もどしを行って後、機械加工により試片を作製し、さらに#1000までの耐水研摩紙を用いて研摩仕上げを行った。引張試片は、試験部の直径10mm、平行部長さ70mmのJIS14A号試片であり、また、疲れ試片は、試験部直径10mm、平行部長さ16mmの回転曲げ疲れ試片である。

引張試験は、万能材料試験機(容量10ton)を用いて行い、降伏強さのほか引張強さおよび絞りを測定した。また、疲れ試験は、小野式回転曲げ試験機(10kg・m, 2850rpm)を用いて実施した。疲れ限度付近では、応力振幅を約1kg/mm²ずつ上下して疲れ試験を行い、10⁷回繰返しても破壊しない応力振幅をもって疲れ限度とした。また、参考としてS-N曲線から10⁶回の繰返し数に対応する時間強さも求めた。

組織は、試片を2%ナイトルに微量の界面活性剤(ドデシルベンゼンスルホン酸ソーダ)を添加した腐食液を用いて腐食し、標準の二段カーボン・レプリカ法により電子顕微鏡(JEM-30B)を用いて観察した。

結晶粒の大きさは、組織写真上にat randomに直線を引き、結晶粒の粒界から粒界までの切片長さを求め、その平均値を用いて評価することにした。

3. 実験結果

Fig. 1に降伏強さ、引張強さおよび絞りにおおよそ焼もどし保持時間の影響を示す。降伏強さおよび引張強さは、保持時間の対数の増加とともにほぼ直線的に減少し行き、絞りは、わずかに上昇する傾向を示している。

つぎに、Fig. 2に焼もどし保持時間と10⁷サイクルおよび10⁶サイクルに対する疲れ限度および時間強さを示す。両疲れ強さはともに、焼もどし保持時間の増加とともに徐々に降下するのは、降伏強さの傾向と類似している。

Fig. 3は顕微鏡組織の例である。1時間の保持で焼もどした試片の組織は、いまだマルテンサイトの板状が残存し、その境界には列をなして微細な炭化物が析出

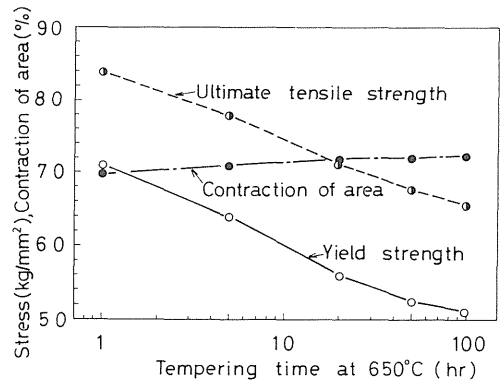


Fig. 1 Tensile properties vs tempering time at 650°C.

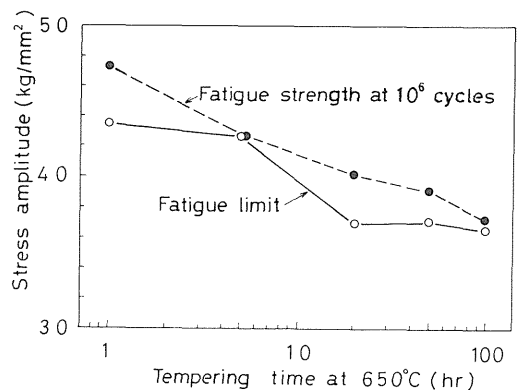


Fig. 2 Fatigue strengths vs tempering time at 650°C.

する傾向がある。20時間保持の場合、組織は板状がくずれ始めているが、なおも多角形状というよりはむしろ一方に長い結晶粒を呈している。しかし、その結晶粒の大きさは、徐々に増大しているのがわかる。また100時間保持の試片では、結晶粒は、さらに大きくなり、また炭化物も粗大化し始めている。基底は再結晶を起し始めており、結晶粒は多角形状を呈している。

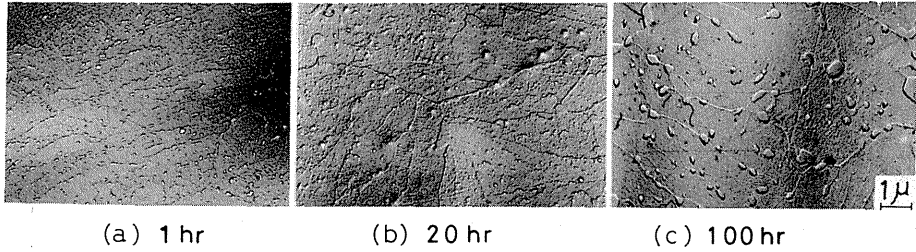


Fig. 3 Micrographs of specimens tempered at 650°C for each tempering time.

4. 降伏強さおよび疲れ強さの結晶粒大きさ依存性

前述のように、多結晶材料の降伏強さ σ_y と結晶粒大きさ d の間には、次のHall-Petchの関係が成立する。⁽³⁾
すなわち、

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + k_y d^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで σ_{y0} および k_y は、結晶粒大きさに無関係な応力および定数である。式(1)の関係は、単に降伏応力と結晶粒大きさ間ばかりではなく、流動応力や破壊応力にまで⁽⁴⁾拡張され、成立することが実証されており、さらに結晶粒大きさは、副結晶粒大きさにまで⁽²⁾拡張されることが示されている。

また、静応力による降伏現象とは、そのメカニズムが異なると考えられる繰返し応力に対する疲れ現象にまで式(1)の関係が拡張できることが検討されている。すなわち、疲れ限度を σ_w で表わすとき

$$\sigma_w = \sigma_{w0} + k_w \cdot d^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で示される。 σ_{w0} および k_w も結晶粒大きさに依存しない応力および定数と考えられている。

さて、ここで本研究の主題である降伏強さおよび疲れ強さの結晶粒大きさ依存性について比較検討しよう。そこでまず、前述のようにして求めた結晶粒から結晶粒までの切片の平均長さ \bar{l} より結晶粒寸法 d を推定する必要がある。本研究の場合、結晶粒は、板状から多角形状へと焼もどし保持時間の増加とともに変化し、結晶粒寸法 d の推定は困難であるけれども、多角形状結晶粒に対する換算式 $d = 1.68 \bar{l}$ ⁽⁶⁾を用いて推定することにした。

Fig. 4 は $d^{-1/2}$ と降伏強さおよび疲れ限度の関係を描いたものである。明らかに式(1)および(2)の関係が成立することがわかる。

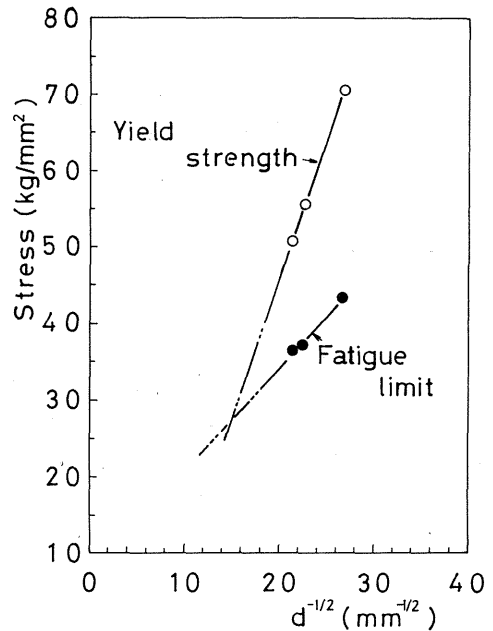


Fig. 4 Dependence of yield strength and fatigue limit on grain size.

Thompson は、降伏強さおよび疲れ強さの結晶粒大きさ依存性について、70-30黄銅、無酸素銅およびアルミニウムに関する多くの結果を調査検討し、次の関係が成立し、それがより一般性があると主張している。^{(7),(8)}

$$k_y > k_w \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_{y0} < \sigma_{w0} \quad \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、不等式(3)は、疲れ強さに比べて降伏強さの方が、結晶粒大きさ依存性が強いことを示すものであり、降伏強さの向上には、結晶の細粒化が重要な意味をもつが、疲れ強さの改善は、結晶の細粒化のみでは必ずしも大きな期待ができないことを示唆している。不等式(3)お

よび(4)は、^{(5),(9)}焼なまし、あるいは低温焼入れを行った低炭素鋼についても成立している。しかし、Puskarは、⁽¹⁰⁾炭素鋼を用い、周波数を変化させて疲れ試験を行い、 k_w および σ_{w0} が、疲れ試験における周波数が高くなるほど大きな値を示すことを明らかにし、その場合、不等式(3)は成立するが、(4)は成立せず、 $\sigma_{y0} > \sigma_{w0}$ となることを示した。⁽¹¹⁾ k_w は固溶元素や転位網からの転位の解放に必要な応力等に関係する量であり、また σ_{w0} は実験条件に関連する量であると主張している。横堀らの結果でねじり疲れに対し(4)の関係が成立しないのもPuskarの主張を示唆しているかも知れない。

大傾角粒界から成る多結晶材料の場合、式(4)の関係は問題があるにしても式(3)の関係はほぼ確実に成立するものと考えられる。本研究のように一部板状の残存する焼もどしマルテンサイト組織に対する結果を調べると、 $k_y \div 3.9 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 、 $\sigma_{y0} < 0$ 、また $k_w \div 1.39 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 、 $\sigma_{w0} \div 7.0 \text{ kg/mm}^2$ なる値が得られる。明らかに(3)および(4)の関係が成立している。すなわち、このような結晶粒大きさを用いる場合にも、降伏強さの方が結晶粒大きさへの依存性が強いことがわかる。しかし、 σ_y と $d^{-1/2}$ の関係が広範囲で直線的であるとすれば、上述のように $\sigma_{y0} < 0$ となり不合理である。このことは、降伏強さが、板状の結晶粒よりもさらに小さな組織単位によって影響を受け、焼もどし組織では、セル組織や副結晶粒あるいは転位密度等をも考慮する必要のあることを示唆していると言えよう。

5. 結 言

低合金鋼を用い、板状結晶の残存する場合からほぼ多角形状の結晶粒となるまでの焼もどし組織に対し、降伏強さおよび疲れ強さの結晶粒大きさ依存性を比較検討した。

このような焼もどし組織の結晶粒大きさと降伏強さおよび疲れ限度の間にもHall-Petchの関係が成立することがわかった。この場合、疲れ強さに比べ降伏強さの方が、結晶粒大きさへの依存性が強くあらわれた。すなわち、Thompsonの関係、 $k_y > k_w$ が成立する。また、 $\sigma_{w0} > \sigma_{y0}$ なる関係も成立するが、 $\sigma_{y0} < 0$ となり、焼入れ、焼もどし組織に対する降伏強さは、板状結晶の大きさのみでは説明つくせないことが示唆された。

参 考 文 献

- (1) M. Klesnil, ほか3名, JISI. 203-1 (1965-1), 47.
- (2) 大森ほか2名, 機論, 46-411(昭55-11), 1166.
- (3) N. J. Petch, JISI, 174-1 (1953-1), 25.
- (4) R. W. Armstrong, Metal. Trans., 1-5 (1970-5), 1169.
- (5) T. Yokobori ほか2名, Tech. Report of Tohoku Univ., 28-1 (1963-10), 81.
- (6) G. A. Miller ほか2名, Trans. AIME. 236-12 (1966-12), 1667.
- (7) A. W. Thompson and W. A. Backofen, Acta Met., 19-7 (1971-7), 597.
- (8) A. W. Thompson, Scripta Met., 5-10 (1971-10), 859.
- (9) 文献(5)の p. 64.
- (10) 長谷川ほか2名, 機論, 43-370(昭52-6), 1995.
- (11) A. Puskar, Metal. Trans., 7A-8 (1976-10), 1529.