

論 文

組織變化가 疲勞現象에 미치는 影響

姜 昌 壽* · 徐 昌 敏**

The Effect of Structure on the Fatigue of Low Carbon Steel

by

C.S. Kang,* C.M. Suh**

Abstract

This paper was studied on the behavior, crack formation and propagation of slip bands on low carbon steel which was heat-treated in three conditions in order to change metallic structure. The specimens were tested by rotating bending fatigue testing machine and also observed the variations of grains by microscope.

From the test results it was clear that fatigue endurance limit and life of low carbon steel were more increased in contrast with the case that the grain size of specimen was more decreased. Slip bands developed at oil-quenched specimen were very localized into few grains and their propagation rates were slower than those of tempering specimen and furnace-cooled specimen. Formed cracks in the first one or two grains below the surface were approximately "planar" type, there after they followed "wavy" type. It was also found that cracks at 30% higher stress than fatigue limit were usually developed inter-granular, and cracks at 12% higher stress than fatigue limit were propagated meandering path, partly trans- and partly inter-granular.

1. 緒 言

各種 機械部分品을 特別히 反復荷重과 振動을 主로 받는 自動車, 航空機, 壓縮機 turbine pump 등에서의 機械的인 破壞의 原因으로 疲勞現象이 거의 90%에 해당한다고 分析하고 있다. [1]

그러므로 反復荷重과 振動을 받는 機械部品를 製作에 는 疲勞問題가 重要한 問題가 되며 必要한 強度를 增加시키기 爲하여 熱處理 方法을 利用할 때가 있다.

이렇게 熱處理에 의하여 機械的 性質이 다른 各組織이 疲勞應力과 反復數에 따라 結晶粒子에 生成되는 塑性變形인 slip band의 變化狀態와 疲勞限度보다 아주 높은 應力狀態와 조금 높은 應力 負荷時의 變化狀態를 微視的으로 觀察할 必要性이 있다. 왜냐하면 疲勞破壞는 認知할 수 없는 사이에 突發的으로 생기기 때문이다.

國內外에서 이러한 疲勞破壞를 形成시키는 疲勞機構에 關해서 多方面으로 研究가 進行되고 있으며 特別히 炭

素鋼 및 stainless steel은 素材로서 많이 取扱되고 있는 材料들이다 [2], [3], [4], [5], [6].

그러나 同一試料로서 여러가지 熱處理條件이 다른 경우 생긴 異種組織에 對한 疲勞機構들에 關해서 考察된 것이 없다. 그래서 本實驗은 C 20%인 軟鋼을 試料로 選擇하여 세가지 熱處理 方法으로 試片을 製作하였다.

세가지 熱處理 條件에 따라 생긴 異種의 組織에 疲勞 試驗에서 얻어지는 疲勞限度보다 큰 適當한 疲勞條件下 에서 實驗하였다. 이때 各組織에 생기는 塑性變形 즉 slip band의 發生根源과 이의 舉動, 疲勞龜裂의 形成과 疲勞反復數에 따른 進展過程을 金屬顯微鏡으로 觀察하여 그의 疲勞機構를 考察하였다.

2. 試片 및 實驗方法

2-1 試 片

試片으로 使用된 材料는 mild steel로서 25 mmφ인 壓延棒을 購入하여 Fig. 1과 같이 切削加工하였으며 本試片들의 規格 및 化學組成은 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

* 正會員, 慶北大 工大

**慶北大 工大

Table 1 Chemical composition

Material	C	Mn	Si	P	S
WT, (%)	0.20	0.54	0.10	0.024	0.021

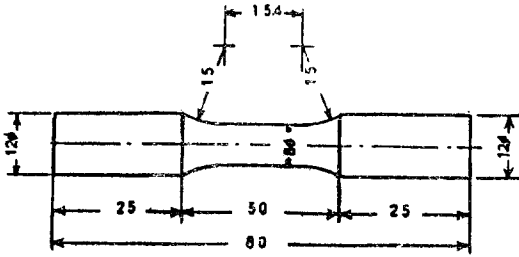


Fig. 1 Dimension of test specimen

Fig. 1 과 같은 치수로 機械加工한 試片은 最高溫度 930°C 에서 60 分間 annealing 시켜 Table 2 와 같은 세 가지 試片을 製作하였다.

Table 2 Heat treatment conditions of specimens

Marks	Heat Treatment Condition
FC	Held 60 min. at 930°C and furnace-cooled
OQ	Held 60 min. at 930°C and oil-quenched
TA	Tempered for 60 min. at 400°C and then air cooled which was pre-oil quenched

Table 2 와 같은 熱處理方法으로 製作된 試片을 各各 FC 材(930°C 에서 60 分間 annealing 시킨 後 爐冷시킨 試片) OQ 材(930°C 에서 60 分間 annealing 시킨 後 motor oil 에서 quenching 시킨 試片) TA 材(油冷된 OQ 材를 다시 400°C 에서 60 分間 tempering 시킨 試片)라稱하기로 한다. 이와같이 製作된 試片들의 機械的 性質은 Table 3 과 같았다.

Table 3 Mechanical properties of specimens

specimen	yield point kg/mm ²	tensile strength kg/mm ²	elongation %	Vicker's hardness Hv
FC	25.2	40.9	39	117.2
OQ	38.8	57.0	31	163.4
TA	35.5	53.1	34	144.4

2-2 實驗方法

實驗條件에 따라 製作된 試片은 emery paper 로 잘 研磨시킨 後 酸化크롬 가루로 buffing 시켰다. 그리고 金屬顯微鏡으로 觀察할 部分은 5% picral 과 5% nital 溶

液에 腐蝕시켰다. 疲勞試驗은 Ohno 式 回轉굽힘 疲勞試驗機에 依하였으며 이때 回轉速度는 3400 rpm 으로 하였다. 試片의 熱處理 條件에 따라 疲勞限度以上の rotating bending stress 를 加했을 때 疲勞反復數 N 에 따라 結晶粒子內의 slip band 의 發生現象과 그 變化狀態를 金屬顯微鏡으로 400×2.5 倍 擴大 撮影하여 觀察하였으며, 그 結果는 Photo 1, 2, 3 에 나타나 있다.

이와 同時에 同一條件의 여러 試片中에 생긴 많은 slip band 들의 길이와 幅의 變化를 疲勞反復數 N=1×10⁴ 다다 測定하여 그 平均値를 Fig. 3 에 圖示하였다. 그리고 FC 材의 疲勞破壞된 表面組織과 破斷面組織을 研磨腐蝕시켜 疲勞破壞를 形成시킨 龜裂의 進展現象을 觀察하였으며 各 試片에 負荷된 應力振幅이 疲勞限度보다 약 30% 높은 경우와 12% 높은 경우의 龜裂의 進展狀況과 slip bands 에 依한 塑性變形이 龜裂을 形成시키는 過程을 金屬顯微鏡으로 100×2 倍 擴大 撮影하여 觀察하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3-1. S-N 曲線

Fig. 2 는 FC 材 OQ 材 TA 材 試片들에 對하여 回轉굽힘 疲勞試驗의 結果를 나타낸다. OQ 材의 疲勞限度는 24.5 kg/mm² 이고 TA 材의 疲勞限度는 23.8 kg/mm² 이었다. 그리고 FC 材의 疲勞限度는 21.5 kg/mm² 이 됨을 疲勞試驗의 結果로 얻은 S-N 線圖에서 알았다.

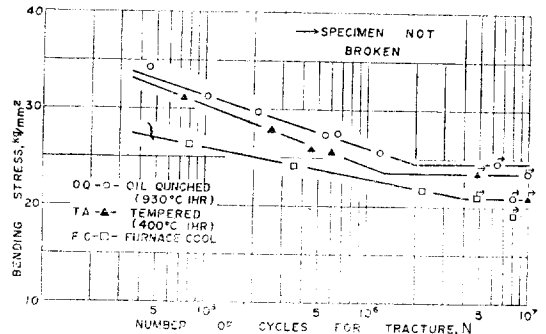


Fig. 2. S-N Diagrams for specimens

3-2. Slip band 의 形狀와 變化

3-2-1 FC 材 表面上的 slip band Photo. 1 은 FC 材에 疲勞應力振幅이 疲勞限度보다 11% 큰 23.9 kg/mm² 로 負荷했을 때 (豫想破斷壽命 : N_F=3.×10⁶) 그 表面組織의 同一結晶粒子에 對한 slip band 들의 形成과 傳播過程을 한가지 例로서 疲勞反復數의 增加에 따라 比較하여 나타내었다. 疲勞過程에서 一定應力振幅 아래 反復數 N 의 增加에 따라 slip band 가 波形처럼 形成되었고 漸次的으로 그 길이와 幅은 커지고 어떤 疲勞反復數에서

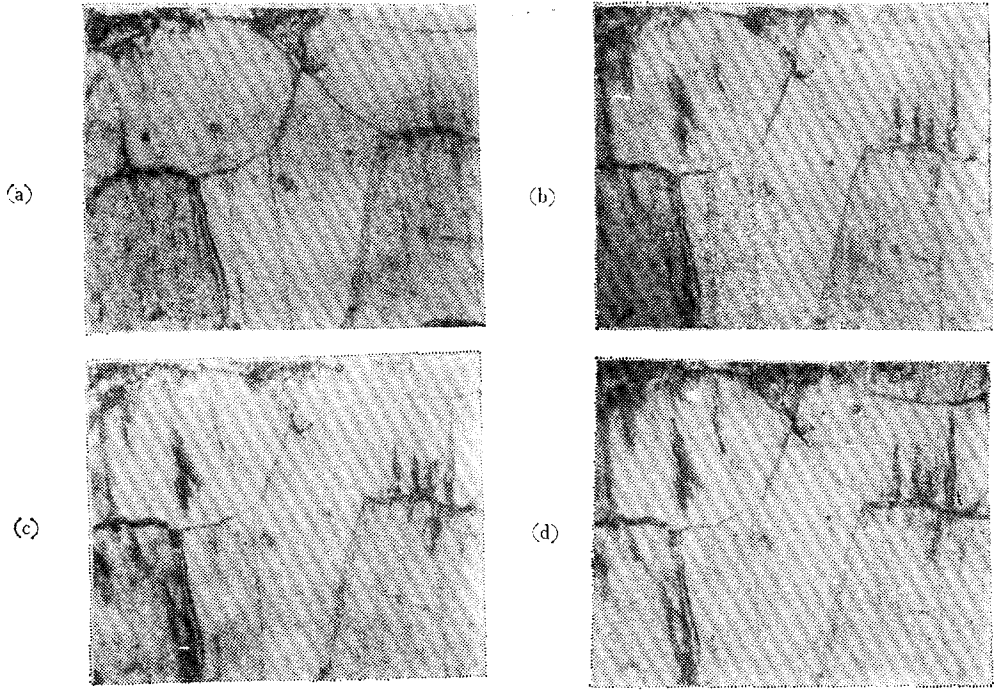


Photo. 1 Microphoto of formation and propagation of slip bands on FC-surface.
(developed at 11% high stress 23.9 kg/mm², 400×2.5)
(a) $N=2 \times 10^4$ (b) $N=5 \times 10^4$ (c) $N=8 \times 10^4$ (d) $N=10 \times 10^4$

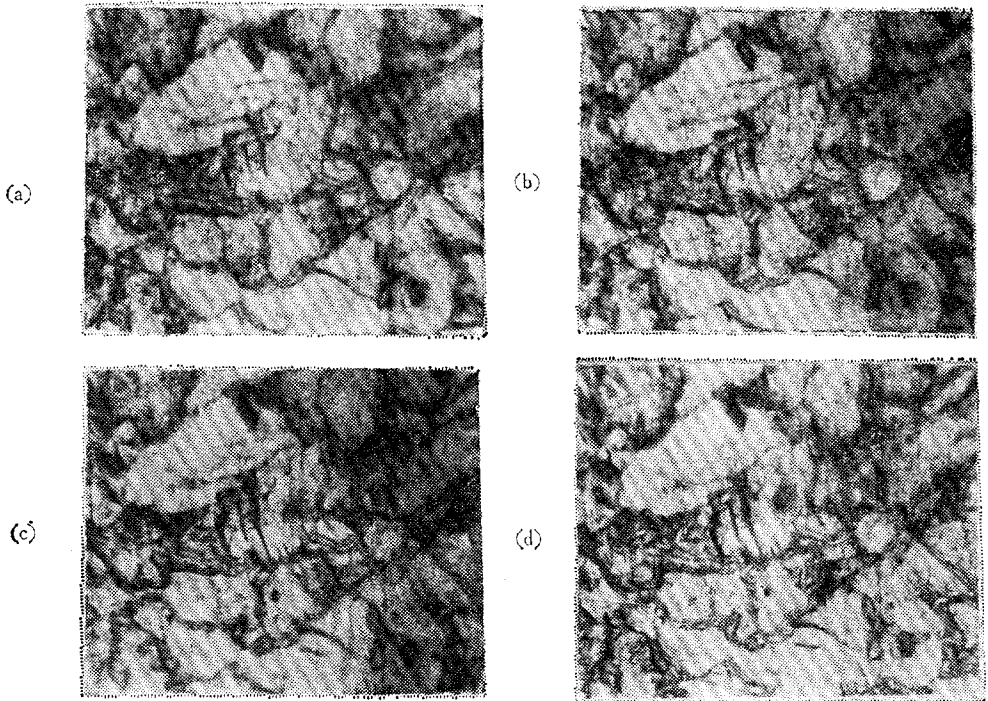


Photo. 2 Microphoto of formation and propagation of slip bands on OQ-surface.
(developed at 12% high stress 27.5 kg/mm², 400×2.5)
(a) $N=2 \times 10^4$ (b) $N=5 \times 10^4$ (c) $N=8 \times 10^4$ (d) $N=10 \times 10^4$

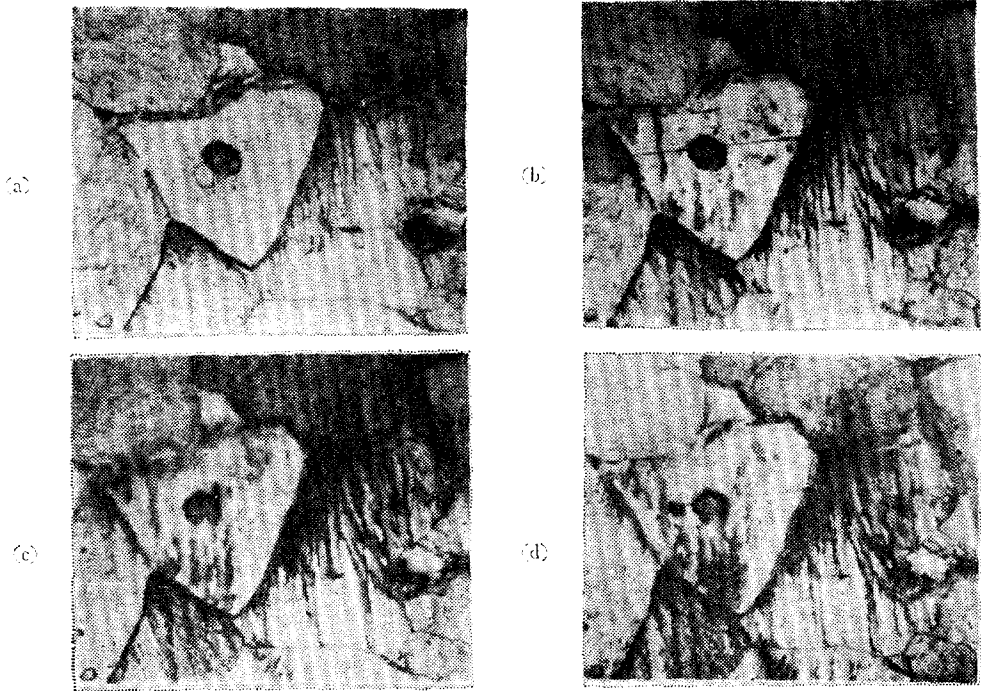


Photo. 3 Microphoto of formation and propagation of slip bands on TA-surface,
 (developed at 12% high stress 26.6 kg/mm², 400×2.5)
 (a) $N=2 \times 10^4$ (b) $N=5 \times 10^4$ (c) $N=8 \times 10^4$ (d) $N=10 \times 10^4$

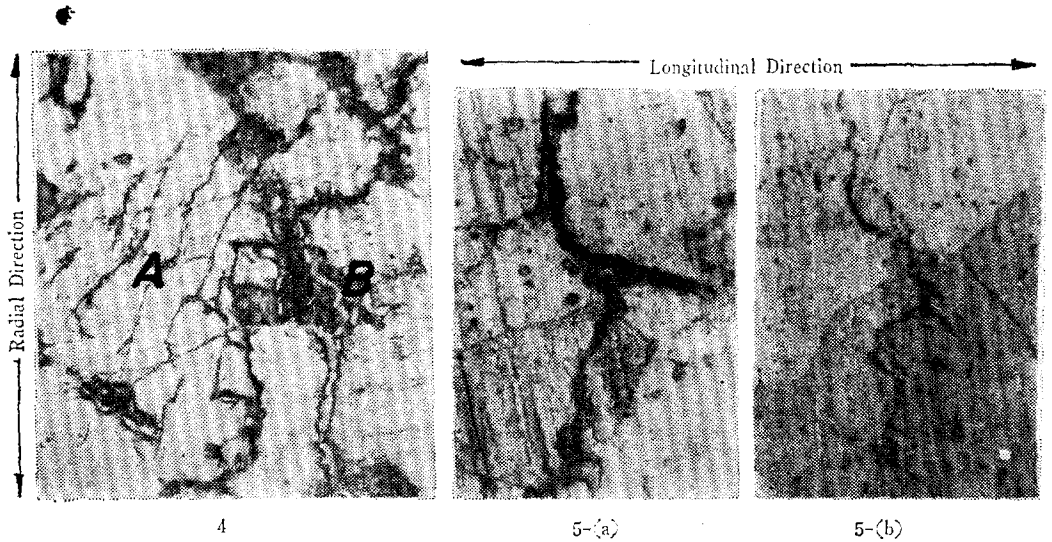


Photo. 4 Microphoto of cracks developed at the fractured FC-section to the radial direction.
 ($\sigma=26 \text{ kg/mm}^2$, 400×2.5)
 A: herring bone type cracks. B: impurity

Photo. 5 Microphoto of propagated cracks on the fractured FC-surface. ($\sigma=24 \text{ kg/mm}^2$, 400×2.5)
 (a) Formed crack in the first one or two grains below the surface
 (b) Formed crack below a few layers of a kind of (a) crack;

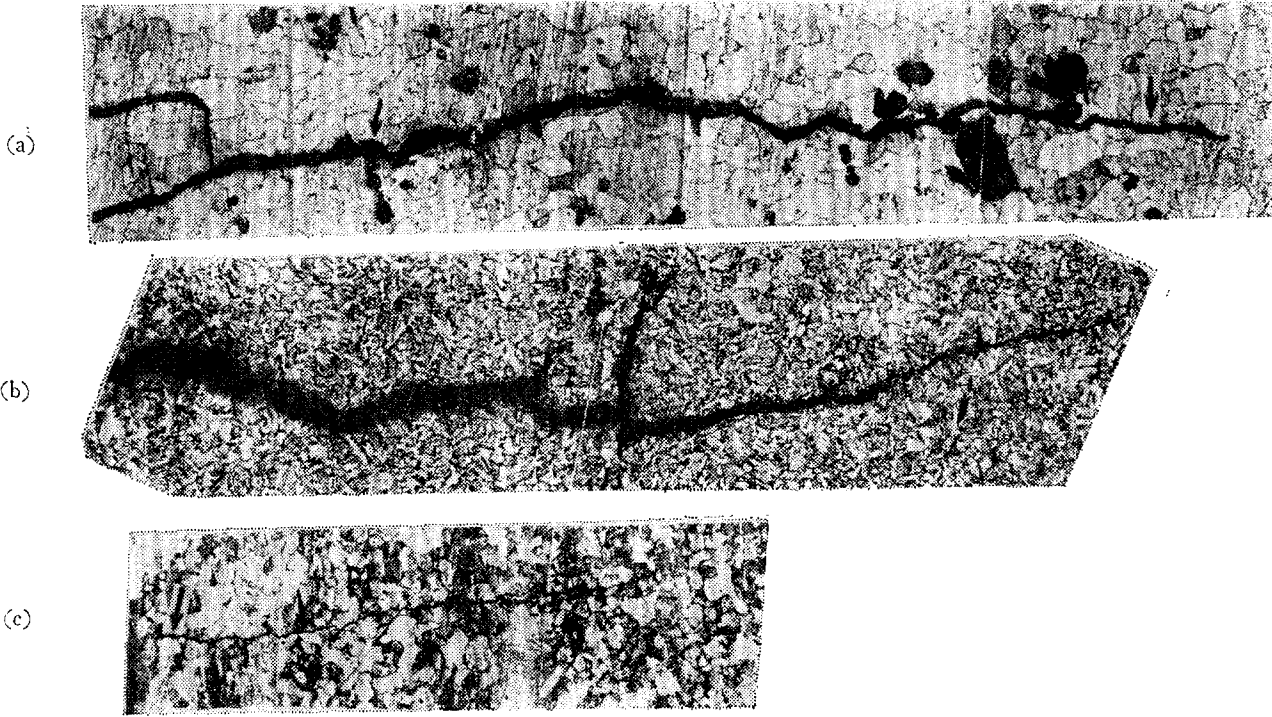


Photo. 6 Microphoto of fatigue crack at 30% higher stress than fatigue limit.

Arrows show grain boundary cracks. (100×2)

(a) FC ($N=4 \times 10^4$) (b) OQ ($N=7 \times 10^4$) (c) TA ($N=2 \times 10^4$)

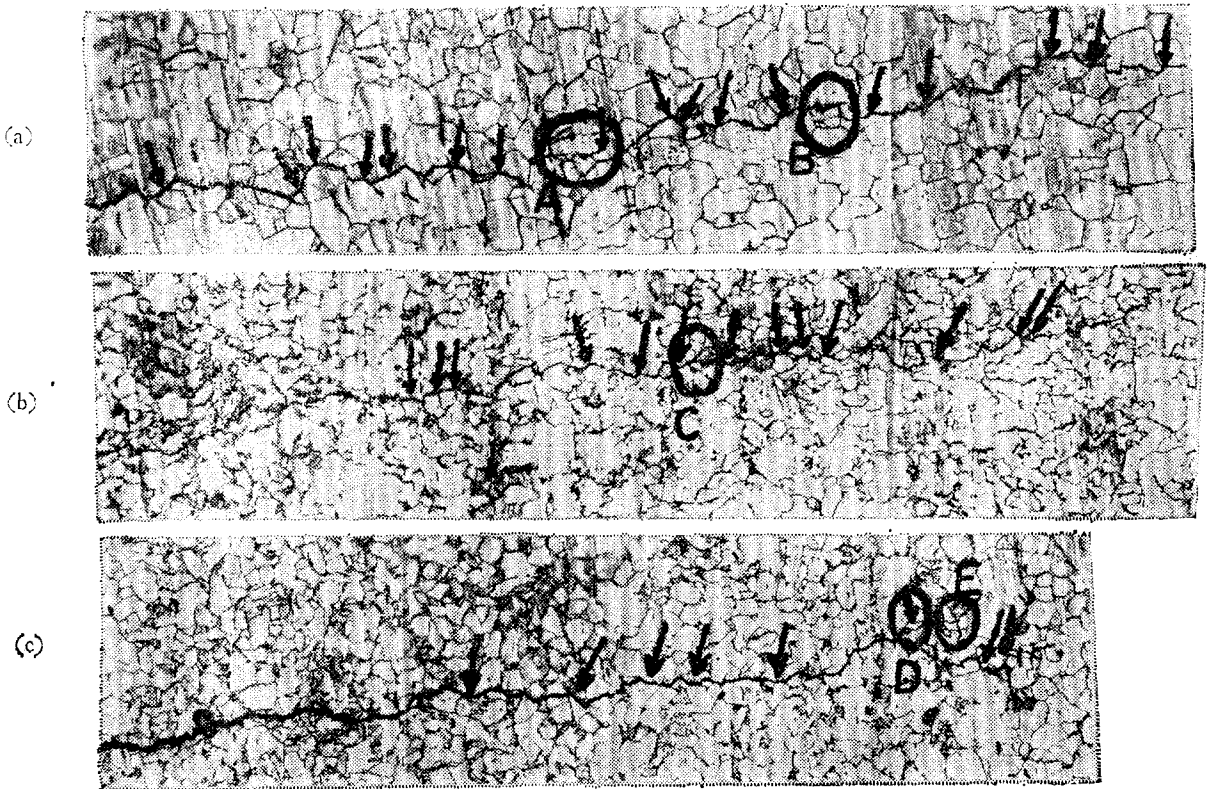
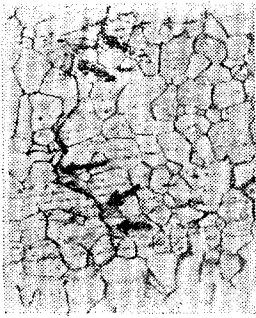


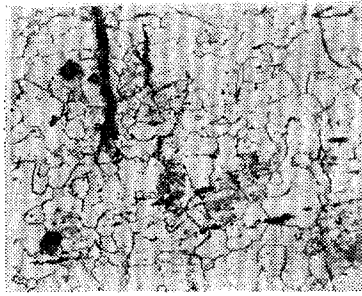
Photo. 7 Microphoto of fatigue crack at 12% higher stress than fatigue limit,

Arrows show grain boundary cracks. (100×2)

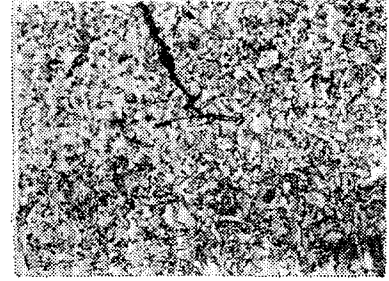
A. B. C. D. E. indicate stopped cracks in grain boundary.



(a)



(b)



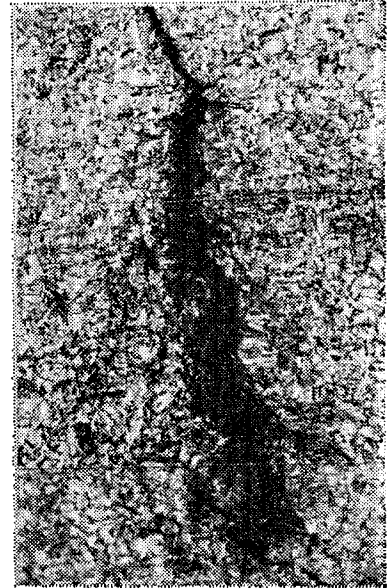
(c)



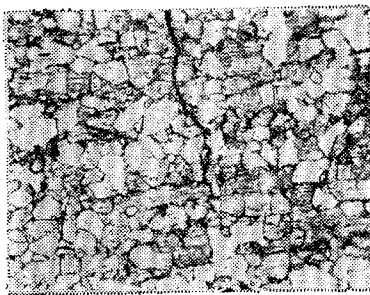
(a-1)



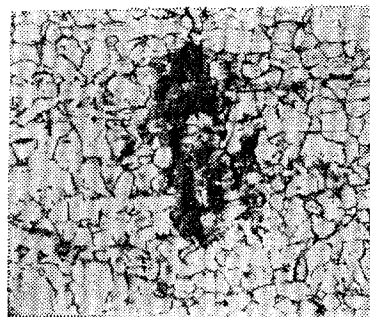
(b-1)



(c-1)



(d)



(d-1)

Photo. 8 Microphoto of formed slip bands and cracks. (100×2)

(a) Crack on FC-surface.

(a-1) After fatigued $N=5\times 10^3$ more at 12%
higher stress from (a) crack.

Arrows show grain boundary cracks.

(b) Crack on FC-surface.

(b-1) After fatigued $N=0.5\times 10^3$ more at 30%
higher stress from (b) crack.

(c) Crack on OQ-surface.

(c-1) After fatigued $N=0.5\times 10^3$ more at 30%
higher stress from (c) crack.

(d) Crack on TA-surface.

(d-1) After fatigued $N=5\times 10^3$ more at 12%
higher stress from (d) crack.

는 結晶境界까지 成長하였다. 그리고 slip band의 길이와 成長에 따라 幅의 增加도 크며 이 變化 曲線은 Fig. 3-a 및 d에 圖示되어 있다.

3-2-2 OQ材 表面上的 slip band Photo. 2는 OQ材에 疲勞應力振幅이 疲勞限度보다 12% 큰 27.5 kg/mm²로 加했을 때 (總想破斷壽命: $N_F=5.5 \times 10^6$) 그 表面組織의 同一結晶粒자에 對한 slip band의 形狀과 成長過程의 一例로서 反復數 N에 따라 나타내었고 疲勞反復數 N의 增加에 따라 slip band의 길이와 幅이 成長하고 있으나 그 增加量이 FC材(Photo. 1) 或은 TA材(Photo. 3)보다 매우 적으며 일단 slip band가 한 結晶粒에서 發生하면 他結晶粒에서 發生하기 어려운 局部的인 效果를 나타내고 있다. 이러한 效果는 結晶粒이 FC材나 TA材보다 매우 작고 quenching에 依한 組織이 硬化되어 細粒化될 것과 關聯성이 있는것 같다.

3-2-3 TA材 表面上的 slip band Photo. 3은 TA材의 表面組織에 생긴 slip band의 一例이다. 이는 疲勞應力振幅이 疲勞限度보다 12% 큰 26.6 kg/mm²에서 ($N_F=4.9 \times 10^6$) 疲勞現象이 생길때 同一結晶粒에 對한 slip bands의 形狀과 傳播過程을 反復數 N에 따라 比較하여 나타낸 것이다.

反復數에 따라 slip band의 數 길이 및 幅이 增加하며 TA材의 結晶粒界內에 發生한 slip band의 數는 FC材나 OQ材보다 훨씬 많았다. 그리고 slip band는 結晶粒 全域에서 發生하였고 主로 結晶境界面에서 發生하여 傳播하며 그 變化量도 컸었다. 이러한 事實은 tempering 하는 溫度와 時間의 長短에 따라 各各 다르겠지만 油類에 quenching 될 試片이 다시 400°C에서 tempering 되었으므로 結晶粒들이 再結晶化되어 軟化되었기 때문인 것 같다.

上記와 같이 同一性分の 한 試片을 가지고 熱處理方法을 달리 했을때 생기게 될 組織이 서로 다른 경우 各試片의 反復應力을 疲勞限度보다 12% 可量 增加시켜 疲勞시킬 때 疲勞反復數의 增加에 따라 slip가 結晶粒內에 形成되고 反復數의 增加에 따라 이 slip는 微視的인 見解에서 많은 가느다란 糸線들이 서로 응켜 붙어 있는 band들로 形成되었다. 이 slip band는 T.H. Alden의 電子顯微鏡 觀察에 依據하면 screw dislocation에 依한 cross slip로 생겨 組織內에 最初의 表面보다 높거나 낮게되는 幾何學的인 轉位特性으로 "extrusion"이나 "intrusion"이 생긴다[7].

그리고 Photo. 1, 2, 3에서 볼 수 있는 slip band의 密度는 疲勞反復荷重과 反復數를 增減함에 따라 그 密度도 增減하였다. 이 slip band의 最初의 길이 幅 두께는 작았다가 反復數를 增加하면 길어지고 커지고 또

"extrusion"이나 "intrusion"에 依하여 길어지거나 높아질 것이다.

疲勞過程의 應力振幅과 疲勞反復數의 增加와 더불어 slip band들의 次元은 커지고 이 slip band가 轉位에 依한 塑性變形의 累積으로 微視的인 龜裂을 形成시켰다. 이 形成되어 成長하는 龜裂이 서로 이웃하고 있는 結晶粒자의 slip band와 連結되어서 傳播를 開始하는 것으로 最終破斷을 形成시킬 巨視的인 龜裂로 成長 可能하게 되었다. 이는 slip band와 crack와의 關聯性으로 檢討된다.

3-2-4 slip band의 變化

Fig. 3의 (a)(b)(c)의 새가지 圖表들은 Photo. 1, 2, 3에 나타낸 slip band들을 包含한 같은 試片上的 여러 結晶粒에서 發生한 slip band들의 進展速度를 測定하고 平均하여 反復數 $N=1 \times 10^4$ 마다 圖示한 것이며 (d)는 Fig. (a)(b)(c)上的 A, B, C slip band들이 反復數에 따라 그 길이가 增加할 때 커지는 slip band들의 幅의 變化量을 試片別로 平均하여 圖示한 것이다.

Fig. 3은 結晶粒面으로 보아서 FC材와 TA材組織은 結晶粒이 작은 OQ材組織보다 slip band가 쉽게 發生 傳播할 수 있다는 것을 나타내는 반면 結晶粒이 작은 OQ材는 여러 組織中에 制限된 少數 結晶粒에 塑性變形이 생기는 局部的인 效果와 成長되는 slip band들의 크기가 작았다는 것을 나타내고 있다. 이러한 slip band들의 形狀과 傳播에 미치는 영향으로 結晶粒의 크기를 고려할 수 있으며 結晶粒 크기가 작은 試片쪽이 疲勞限度 및 疲勞壽命이 上昇했다. 즉 Fig. 2의 S-N 曲線에서 annealing하여 quenching하므로 結晶粒의 크기가 작게된 OQ材는 annealing한 후 爐冷하므로 結晶粒이 크게된 FC材보다 疲勞限度가 14% 增加했고 OQ材를 tempering시킨 TA材보다 3%가 增加했다.

또한 熱處理溫度에 依하여 結晶粒이 成長하면 同時에 結晶粒界 및 粒內의 強度가 低下되고 結晶粒內를 通過하는 slip band들에 依한 龜裂이 적은 energy로 傳播 可能하게 되었다. 또한 結晶粒이 微細한 組織에서 進展하는 龜裂은 많은 結晶粒의 抵抗을 받음으로써 이에 對한 energy 消耗가 크므로 疲勞限度가 增加하였던 것이다.

그리고 反復數의 增加에 따라 疲勞現象이 생길때 여러 結晶粒들은 各各의 彈性限度가 같지 않으므로 어떤 結晶粒은 다른 結晶粒이 彈性限界 應力에 到達하기 前에 彈性限界를 超過한 塑性域에 到達하여 slip band에 依한 塑性變形이 結晶粒에 累積되고 이로 因하여 微少 龜裂을 形成시켰다. 이러한 微少 龜裂은 反復數의 增加에 依하여 더욱 成長하여 巨視的인 龜裂로 成長하였다.

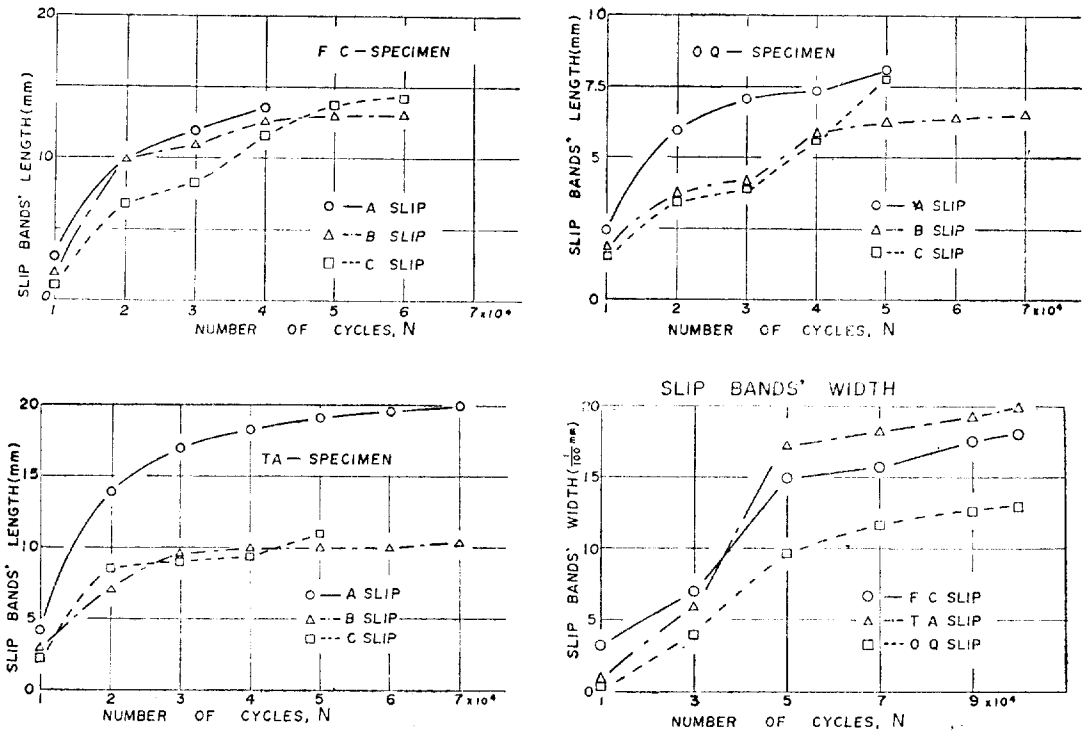


Fig. 3. Diagrams on the propagation ratio of slip band's length and width to the repeated cycles N under the same condition of Photo. 1, 2, 3.

이러한 slip band 와 龜裂의 聯關性은 3-4-3의 slip band 와 龜裂形成에서 다시 考察하기로 한다.

Slip band의 길이 및 幅의 增加速度는 Fig. 3처럼 4×10^4 域까지 크게 成長하였다. 이는 大略 4×10^4 域까지는 疲勞現象이 急激하게 增加하는 疲勞의 初期인 第1段階 變化이고 이以後는 徐徐히 增加變化하는 疲勞의 第2段階 變化라 생각된다. 이러한 疲勞의 第2段階 變化現象은 反復數에 따른 試片의 硬度變化와도 密接한 關係가 있었다.

3-3. FC材 破斷面 및 表面上的 龜裂現象

疲勞破壞된 試片中에 結晶粒의 크기가 가장 큰 FC材를 選擇하여 그 破斷面의 龜裂現象과 表面과 表面層에서 微少두께 만큼 研磨 腐蝕시켰을 때의 龜裂의 現象을 金屬顯微鏡으로 400×2.5 倍 擴大하여 觀察하였다.

3-3-1 破斷面上的 龜裂現象

疲勞限度보다 21% 큰 26 kg/mm^2 의 應力振幅을 加했을 때 破斷反復數 $N_B = 8 \times 10^4$ 에서 疲勞破斷된 FC材의 斷面을 研磨腐蝕했을 때 이곳에 생긴 龜裂의 一例가 Photo. 4와 같았다.

Photo. 4에서는 表面層에서 생긴 龜裂들이 内部方向

(radial direction)으로 複雜하게 展開되는 것을 觀察한 것이다.

이러한 現象은 試片이 回轉굽힘應力을 받을때 表面에 最大彎曲應力이 생기고 内部에 最少應力이 생기므로 反復數의 增加에 따라 彈性限界를 超過한 不均一한 塑性變形이 表面에서부터 累積되어진다. 이 回復 不可能한 微少 strain이 結晶境界에서 slip band와 化學的인 不純物(B)의 不規則的인 面이나 幾何學的인 결함이 局部的으로 制限된다. 이 累積된 strain에 依한 塑性變形은 漸次的으로 增加되고 이로 因하여 硬化된 範圍에서는 延性이 漸次的으로 減少됨에 따라 試片表面에서 submicroscopic 龜裂들이 形成되었다. 이 龜裂이 半徑方向으로 反復數 增加와 더불어 herringbone(A)처럼 展開되어 Photo. 4처럼 疲勞 破壞되었다.

3-3-2 表面層의 龜裂形狀

疲勞限度에 比하여 11% 큰 應力振幅 24 kg/mm^2 을 加한 FC材의 表面層에 發生한 龜裂은 Photo. 5-a와 같이 "planar"型 龜裂을 취했고 表面層에 形成된 結晶粒과 内部結晶粒에서 形成된 龜裂의 樣相을 比較하기 위하여 表面層을 微少두께만큼 研磨 腐蝕했을 때 Photo.

5-b와 같이 구분구분하고 部分的으로 結晶粒內와 結晶粒界를 通過하는 “wavy”형 龜裂을 취했다. 이러한 龜裂의 特殊性은 D.V. Wilson과 J.K. Tromans이 說明하는 龜裂의 形態와 一致하는 形態를 取하였다.[8]

3-4 疲勞龜裂의 顯微鏡觀察

疲勞龜裂 進展形狀에 關한 顯微鏡觀察은 各試片에 各各의 疲勞限度보다 約 30%와 12% 높은 應力振幅을 負荷했을 때 試片의 表面組織에서 形成된 龜裂의 形狀과 進展過程 및 slip band와 龜裂의 聯關性을 金屬顯微鏡으로 100×2倍 擴大하여 觀察하였다.

3-4-1 30% 높은 應力下의 疲勞龜裂

Photo. 6은 各試片의 疲勞限度보다 約 30% 높은 應力下에 進展된 疲勞龜裂의 一例로서 表示하였다. Photo. 6-a는 FC材에 進展된 龜裂으로서 結晶粒內를 通하는 龜裂의 形態를 取하고 Photo. 6-b는 OQ材中에 結晶粒이 微細化된 troostite組織에서 進展된 龜裂을 나타낸다. 그리고 Photo. 6-c는 TA材에 形成된 龜裂로서 FC材와 같이 結晶粒內龜裂을 主로 取했으며 또한 OQ材에 進展된 龜裂은 熱處理에 依하여 組織에 脆性이 增加되고 延性이 減少되므로 龜裂의 進展길이에 比하여 그 幅은 커서 젖어지는 形을 取하였다.

위 條件아래 發生한 龜裂은 세가지 試片의 組織의 인 特殊性으로는 別다른 것을 觀察할 수 없었지만 疲勞限度보다 아주 높은 應力振幅을 隨伴했으므로 龜裂의 形態가 結晶粒內를 通過하는 率이 大端히 높고 龜裂의 進展路가 最少應力과 直角方向에서 屈曲이 적고 大概 直線의 形態를 取하려 하였다. 또한 金屬의 疲勞壽命을 龜裂이 進展하는 距離에 따라 決定한다면 같은 距離를 直線의 으로 破壞하는 境遇 疲勞壽命은 屈曲이 많은 경우보다 짧은 것이다.

3-4-2 12% 높은 應力下의 疲勞龜裂

Photo. 7은 各試片에서 疲勞限度보다 12% 높은 應力下에 進展된 疲勞龜裂의 一例로 表示했다. Photo. 7-a는 FC材에 形成된 龜裂을 나타내고 Photo. 7-b는 OQ材組織中에 結晶粒의 크기가 細粒化된 troostite組織보다 조금 더 큰 sorbite組織에서 形成되었던 龜裂의 一例이다. 또한 Photo. 7-c는 TA材 結晶粒에 形成된 龜裂의 一例이다. Photo. 7의 龜裂들은 Photo. 6의 龜裂들에 比해서 進展하는 동안 거의 結晶粒마다 龜裂의 進行方向을 바꾸면서 進展하고 있었으며 結晶粒內 뿐만 아니라 結晶粒界 破壞의 率도 相當히 높았다. 또한 結晶粒內를 通過하려면 龜裂들이 停止하고 結晶粒界 破壞의 形式을 取하였다. 이와 같은 停止된 龜裂들을 Photo. 7의 A, B, C, D, E 등에서 觀察할 수 있다. 이는 組織中에 ferrite部는 化學的인 결합이 많은 cementite

보다 strain hardening에 依하여 相當한 抵抗을 주는 것이라 생각된다. 그리고 龜裂의 進展路가 屈曲이 甚하였다. 이와같이 龜裂이 屈曲하면서 進展할 때 直線의 인 傾向으로 進展하는 龜裂보다 疲勞의 破壞壽命이 길어진다. 또 龜裂이 進展하는데 같은 距離만큼 進展하는 경우에 消耗되는 energy亦是 크다고 생각되며 熱處理에 依하여 結晶粒子가 細粒化된 OQ材 및 TA材組織은 FC材組織에 比하여 龜裂이 傳播하는데 미치는 抵抗이 크다.

W.A. Wood와 같은 研究者는 높은 反復應力을 수반하는 경우에는 結晶粒界 自身이 疲勞破壞의 發生源이 되고 낮은 反復應力을 수반하는 경우에는 結晶粒內 破壞 形式을 取한다고 規定하는데[9] 反하여 本實驗에서는 아주 높은 應力을 수반하는 경우에는 龜裂이 直線의 인 傾向을 取하면서 結晶粒內의 破壞를 取하는 率이 大端히 높았고 조금 높은 應力下에서는 龜裂의 屈曲이 甚하게 되면서 結晶粒內와 結晶粒界 破壞를 同時에 取하는 傾向을 觀察하였다. 이러한 結果는 疲勞破壞에 對한 結晶粒界의 役割이 大端히 複雜한 것으로 보아서 보다 많은 研究가 要求된다.

3-4-3 Slip band와 龜裂形成

Fig. 2의 S-N 曲線에서 取해진 疲勞限度보다 높은 應力을 가하는 경우 結晶組織內에 彈性限界를 超過한 微小 strain이 생겨 累積되고 이에 依하여 slip가 생기고 反復數의 增加와 더불어 微視的인 많은 slip線들이 서로 엉켜 slip band를 形成시켰다. 그리고 점차 적으로 反復數增加와 더불어 slip band의 길이, 幅 및 깊이가 增加하게 되었다. 이 slip band들의 次元들이 增加하면 塑性變形이 結晶粒에 생겨서 密度가 增加하게 되었고 이로 因하여 Photo. 8처럼 密集된 slip band와 小龜裂들이 서로 이웃하고 있는 微小龜裂과 連結되므로 互視的인 疲勞龜裂로 形成하여 進展하게 되었다.

Photo. 8(a)는 FC材組織中에 생긴 龜裂에 疲勞限度보다 12%의 높은應力을 $N=5 \times 10^3$ 만큼 反復시킬 때 Photo. 8 (a-1)과 같은 slip band와 龜裂이 形成되었다. Photo. 8(b)는 疲勞限度보다 30%의 아주 높은 應力下에 $N=0.5 \times 10^3$ 만큼 疲勞시킬 때 龜裂의 끝부분에 應力이 集中되어 Photo. 8 (b-1)과 같은 slip band와 龜裂이 形成된 것이다. 그리고 OQ材上의 Photo. 8(c)에서 疲勞限度보다 30%의 아주 높은 應力下에 $N=0.5 \times 10^3$ 만큼 疲勞시킬 때 形成된 slip band와 龜裂은 Photo. 8 (c-1)과 같고 TA材上의 Photo. 8 (d)에서 12%의 높은 應力下에 疲勞되었을 때 形成된 slip band와 龜裂은 Photo. 8 (d-1)과 같았다.

위의 Photo. 8(a)에서는 疲勞應力振幅이 Photo. 8(b)

보다 적었으므로 slip band 들이 結晶粒界에 集中되어 龜裂의 進展方向이 結晶粒界 破壞의 形態를 많이 取하는 것을 觀察할 수 있었다. 反面 Photo. 8(b-1)은 應力 振幅이 아주 높으므로 slip band 들이 結晶粒內 破壞에 密集되어 結晶粒內 破壞의 形式을 取하였다. 이렇게 커다란 龜裂의 周圍에 많이 形成된 微小龜裂들은 龜裂의 幅, 길이 및 깊이가 작으므로 大體로 研磨하여 腐蝕시킬 때 없어지고 應力集中이 最大로 形成되었던 큰 龜裂만이 Photo. 6, 7 처럼 나타나게 되었다.

4. 結 言

同一試料인 軟鋼(C-20%)을 熱處理條件을 달리하여 組織을 變化시켜서 回轉굽힘疲勞試境을 할 때 疲勞過程의 應力反復數에 따른 組織內의 變化를 金屬顯微鏡으로 觀察한 結果 다음과 같은 結果를 얻었다.

1) 熱處理 條件에 따라 組織의 크기를 變化시킬 때 結晶粒子의 크기가 작은 試片쪽이 큰 쪽보다 疲勞限度 및 疲勞壽命이 上昇한다.

2) 油冷된 組織은 tempering 된 組織이나 爐冷된 組織보다 slip band 가 局部的으로 制限되어 發生하며 slip band 의 成長率이 다른 組織에 比하여 적다.

3) 表面層에 形成된 龜裂은 “planar” 形態를 取하고 表面層을 微小 두께만큼 研磨시킨 層에는 龜裂이 구불구불하게 傳播하는 “wavy” 形態를 取한다.

4) 아주 높은 應力을 隨伴하는 경우에는 龜裂이 最大 應力과 直角方向으로 대략 直線的으로 進展하면서 粒內破壞를 取하는 率이 大端히 높고 조금 높은 應力을 隨伴하는 경우에 생기는 龜裂은 掘曲이 甚하게 進展되

면서 粒界破壞와 粒內破壞를 同時に 取한다.

後 記

本研究는 1972 年度 文敎部 學術研究助成費의 도움으로 이루어졌다. 本機會에 文敎部當局과 本研究의 進行過程에서 有益한 討論과 助言을 해 주신 白南柱教授와 嚴東錫教授에게 謝意를 表하는 바이다.

參 考 文 獻

- [1] G.E. Dieter, Jr.: “Mechanical Metallurgy” 296, 1961.
- [2] R.D. Stout, A.W. Pense: “Trans. ASME,” Vol. 87, 269, 1959.
- [3] L.F. Coffin, Jr: “Trans. JSME,” Vol. 87, 351, 1959.
- [4] 佐佐木茂美: “Trans. JSME,” Vol. 34, 1627, 1968.
- [5] 佐佐木茂美: “Trans. JSME,” Vol. 29, 1515, 1963.
- [6] 邊榮一, et al: “Trans, JSME,” Vol. 34, 1009, 1968.
- [7] T.H. Alden: “Journal of Metals,” Vol. 11, 828, 1962.
- [8] D.V. Wilson, J.K. Tromans: “ACTA Met.,” Vol. 18, 197, 1970.
- [9] W.A. Wood: “Proc. Fatigue in aircraft structures,” New York, Vol. 1, 1956.