Al 合金 5052 材の疲労強度に及ぼす予ひずみの影響*

皮籠石 紀雄^{*1}, 西谷 弘信^{*2}
王 習 術^{*1}, 田中 秀穂^{*1}

Effect of Pre-Strain on Fatigue Strength of Aluminum Alloy 5052

Norio KAWAGOISHI, Hironobu NISITANI,
Xishu WANG and Hideho TANAKA

Rotating bending fatigue tests were carried out on plain specimens and specimens with a circumferential notch of a 5052 aluminum alloy in order to investigate the effect of tensile pre-strain on the fatigue strength. The initiation sites of slips or cracks tended to localize in grains due to the cyclic softening phenomenon by the pre-strain, though the initiation lives of both annealed and pre-strained materials were nearly equal to each other. The crack growth rates in the pre-strained material were slightly higher than those in the annealed material. Regardless of pre-strain, the crack growth rates were expressed by the small-crack growth law ($dl/dN = Co\sigma_a^m$) in these materials.

Key Words: Fatigue, Pre-strain, Rotating Bending, 5052 Al Alloy, Crack Initiation, Crack Propagation, Small-Crack Growth Law, Notch

1. 緒 言

疲労強度に及ぼす予ひずみの影響についてはこれまでも数多くの研究があり、予ひずみの程度^{(1)~(3)}、材料^{(4)~(6)}等によりその影響は複雑に異なることが報告されている。

一般に、予ひずみを受けた材料は繰返し軟化する⁽⁷⁾が、Al 合金 5052 材は顕著な時効能を有する⁽⁸⁾ため予ひずみ材でも応力繰返し過程で繰返し硬化が生じることが考えられる。幅中らはこのことに注目して、本材料の繰返し変形挙動、低サイクルおよび高サイクル疲労挙動に及ぼす冷間引抜きによる予加工の影響を詳細に検討している⁽⁹⁾。しかしながら、き裂発生および伝ば挙動の詳細は明らかにされていない。

予ひずみの影響は、巨視的き裂より微小き裂の伝ば過程で顕著に認められること⁽²⁾、また繰返しひずみ時効も微小き裂の伝ばに大きく影響すること⁽³⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を考慮すると疲労強度に及ぼす予ひずみの影響を明らかにするには微小き裂の伝ば挙動に及ぼす予ひずみの影響を検討することが必要であると考えられる。

そこで本研究では、以上の点を考慮して、Al 合金 5052 材の回転曲げ疲労試験を行い、試験片表面の連続観察を通じて、き裂発生および微小き裂の伝ば挙動に及ぼす引張予ひずみの影響を調べた。

2. 材料、試験片および実験方法

素材は、直径 20 mm の 5052 Al 合金引抜き材である。表 1 にその化学成分を示す。実験は、素材に 380°C、90 分の焼なまし処理を行った焼なまし材とそれに 5% 引張予ひずみを与えた予ひずみ材、さらに一般的には納入材をそのまま使用するので実用的見地から納入材を加えた合計 3 種類の材料について行った(納入材の加工ひずみは定量的には明らかでないが、後述の機械的性質から判断すると 5% より大きい予ひずみ材として評価される)。予ひずみ材は、素材に前述の焼なまし処理を行った後、直径 14 mm、平行部長さ 240 mm の引張試験片を作成してから 5% の予ひずみを与えたものである。表 2 に各材の機械的性質を示す。

表 1 化学成分

								%
Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
001	010	014	003	249	001	021	002	Re.

* 原稿受付 1994 年 9 月 28 日。

^{*1} 正員、鹿児島大学工学部 (☎890 鹿児島市郡元 1-21-40)。^{*2} 正員、九州大学工学部 (☎812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

図1に試験片の形状、寸法を示す。試験片は、き裂の観察を容易にするため平行部中央に浅い部分切欠きを有した部分切欠材(切欠係数は約1.1と小さいので以下では平滑材と呼ぶ)と環状切欠きを有する切欠材を用いた。試験片は機械加工の後、すべて電解研磨により表面を約20 μm 除去してから実験に供した。平滑材における応力繰返しに伴う表面状態の変化の観察およびき裂長さの測定にはレプリカ法を用いた。ここでき裂長さとは試験片表面に沿う円周方向長さを意味する。なお、本研究における疲労限度は、 10^7 回を基準とし、応力レベルのきざみを5 MPa として求めた。

用いた試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機(容量15 N・m, 回転数約50 Hz)である。

3. 実験結果および考察

3.1 S-N 曲線に及ぼす予ひずみの影響 図2に各材の平滑材における S-N 曲線を示す。図中 N_f は破断寿命, $N_{0.05}$ はき裂長さが0.05 mm になったときの繰返し数を意味している。疲労強度は焼なまし材が

表2 機械的性質

Material	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_B MPa	σ_T MPa	ψ %
Annealed	172	244	488	71.0
Prestrained	224	254	515	69.5
As received	233	270	553	68.8

$\sigma_{0.2}$: 0.2% Proof stress, σ_B : Tensile strength
 σ_T : True breaking stress, ψ : Reduction of area

(a) 平滑試験片

(b) 切欠きの詳細

(c) 切欠材

図1 試験片の形状・寸法 [mm]

最も高く、予ひずみ材と納入材はほぼ等しい。また、表3に示すように、予ひずみにより σ_w はわずかに低下する。すなわち、本材料では予ひずみによる静強度の上昇は疲労強度に反映されていない。これは、予ひずみによる疲労強度の低下は小さく疲労強度に及ぼす予ひずみの影響はほとんどないことを報告した幡中らの結果⁽⁹⁾と同じ傾向を示すものである。

3.2 き裂発生および初期伝ば過程に及ぼす予ひずみの影響

図3に、各材の応力繰返しに伴う表面状態の変化を示す。いずれの材料でも、繰返しの初期に多くのすべり帯が発生し、き裂へと変化しているが、すべり帯の密度は予ひずみにより多少減少し、しかもき裂形態も直線的になる。

本材料と同じ wavy なすべり特性を有する炭素鋼の結果によると、予ひずみを付加することによりすべりは局所化し、くしの刃状を呈する。そして、これは予ひずみによる繰返し軟化に起因するとされている⁽¹⁾⁽¹²⁾。このことから、本材料における予ひずみによるすべり形態の差も繰返し軟化現象を反映したものと考えられる。

図4は、このことを検討するため、各材の応力繰返しに伴う試験片表面のビッカース硬さの変化を示したものである。縦軸は、 $N=0$ における硬さ H_{v0} で無次元化してある。

焼なまし材は繰返しに伴い単調に硬化しているのに対し、予ひずみ材は繰返しの初期に多少硬化するがその後軟化傾向がみられ、焼なまし材の挙動とは明らかに異なっている。納入材の場合も予ひずみ材と類似の

表3 疲労試験結果

Material	Hv	σ_B MPa	σ_w MPa	σ_w/σ_B
Annealed	67	244	120	0.49
Pre-strained	75	254	110	0.43
As received	84	270	105	0.39

Hv: Vickers hardness (9.8N), σ_B : Tensile strength
 σ_w : Fatigue limit (10^7)

図2 平滑材の S-N 曲線

挙動を示している。

図2に示すように、き裂長さが0.05 mmに達するときの繰返し数($N_{0.05}$)は多少ばらつくもののすべての材料に対しほぼ1本の曲線で表され、材料間の差異はほとんど認められない。すなわち、予ひずみにより巨視的流動応力はかなり変化するが、き裂発生強度はあまり変化しない。同様な結果は、炭素鋼焼なまし材⁽¹⁾や焼入れ焼戻し材⁽⁴⁾でも観察されている。以上のように、すべり帯およびき裂発生寿命に対する予ひずみの影響は非常に小さいので、予ひずみによる疲労強度の差はき裂伝ば過程における相違に起因しているといえる。

3.3 微小き裂の伝ば過程に及ぼす予ひずみの影響

図5, 6に各材のき裂伝ば曲線を、図7にき裂伝ば速度

とき裂長さの関係を示す。わずかではあるが予ひずみによるき裂伝ば速度の増加が認められる。またいずれの材料でも、全寿命のほぼ100%がき裂伝ば寿命であること、き裂伝ば過程の広い範囲でき裂伝ば速度はき裂長さに比例する($dl/dN \propto l$)ことがわかる。

図8は各材において、き裂長さが0.5 mmになったときのき裂伝ば速度の応力依存性を示したものである。いずれの材料でも $dl/dN \propto \sigma_a^n$ で表わされ、 n の値は、焼なまし材で約9、予ひずみ材、納入材で約7である。この各材間の n の値は、図2に示した $S-N$ 曲線の傾きの差として認められる。

図7, 8の結果は各材のき裂伝ば速度が微小き裂伝ば則($dl/dN \propto \sigma_a^n l$)⁽¹³⁾で表されることを意味している。実際、図9に示すようにき裂伝ば速度は $\sigma_a l$ で一

図3 応力繰返しに伴う表面状態の変化($\sigma_a = 160 \text{ MPa}$)

義的に決まる。

図 10 は、上述したき裂伝ば速度の応力依存性と $S-N$ 曲線の応力依存性の関係および微小き裂伝ば則の有効性を示したものである。すなわち、き裂長さが l_1 から l_2 までの伝ば寿命 $N_{l_1-l_2}$ は微小き裂伝ば則を積分することにより次式のように与えられる。

$$N_{l_1-l_2} = \frac{1}{C\sigma_a^n} \ln \frac{l_2}{l_1} \quad (1)$$

さらに、直径 5 mm の試験片を用いた回転曲げ荷重

下における疲労寿命 N_f は、次式で与えられることが多くの材料で確認されている⁽¹⁴⁾。

$$N_f = \frac{6}{C\sigma_a^n} \quad (2)$$

図 10 は、焼なまし材と予ひずみ材の結果を例示しており、実測値は記号で、予測値は破線で示した。予測値と実測値はよく一致しているのがわかる。

ところで、納入材がどのような加工ひずみを持つかは明らかでないが、静的な機械的性質から判断すると、今回の予ひずみ材より大きな変形を受けた状態と考えられる。しかしながら、上述のように、疲労強度に対する予ひずみの影響は小さいので納入材の加工の程度が多少異なっても、その疲労強度は焼なまし材の結

図 4 繰返しに伴う硬さ変化

図 5 き裂伝ば曲線

図 6 $l-N/N_f$

図 7 $dl/dN-l$

図 8 $dl/dN-\sigma_a$

図 9 $dl/dN-\sigma_a^n l$

図 10 疲労寿命の予測値と実測値
(焼なまし材と予ひずみ材)

図 11 各材の切欠材の $S-N$ 曲線

果をもとに、微小き裂伝ば則を通じて予測しても大きな差異は生じないものと考えられる。

3・4 切欠材の疲労強度に及ぼす予ひずみの影響

図 11 は切欠材の $S-N$ 曲線である。 10^7 回を基準とした疲労限度では、切欠底全周にわたる停留き裂が認められた。したがって同図にはき裂伝ば限界に対する疲労限度 σ_{w2} に加えて、き裂発生限界に対する疲労限度 σ_{w1} (ここでは、すべりやき裂の発生しない限界応力として定義する) も示してある。

図 12 は各材の停留き裂を切欠底表面で観察したものである。平滑材における特徴は切欠材でもほぼそのまま認められる。このように時間強度、疲労限度 σ_{w1} , σ_{w2} いずれに対しても予ひずみの影響は小さい。したがって、先に述べたように平滑材の疲労限度が予ひずみの影響をほとんど受けないことを考慮すれば、本実験で行った程度の予ひずみ量であれば、切欠感度に及ぼす予ひずみの影響も小さいといえる。

以上のように、予ひずみによりき裂伝ば速度は大きく、また疲労限度は低下することが明らかにされたが、そのメカニズムについては、比較的マクロな立場での検討である本研究の範囲では明らかでない。さらに微視的な検討が必要であり、今後の検討課題である。

4. 結 論

Al 合金 5052 材の平滑材および切欠材の回転曲げ疲労試験を行い、疲労強度に及ぼす予ひずみの影響を、微小き裂の発生および伝ば過程を通じて検討した。

得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 平滑材の疲労強度は予ひずみによりわずかに低下する。
- (2) き裂発生寿命に及ぼす予ひずみの影響は非常に小さい。
- (3) 予ひずみ付加により、すべり帯の発生は局所

(a) 焼なまし材 (b) 予ひずみ材 (c) 納入材

図 12 各材の切欠き材の停留き裂

化される。これは予ひずみによる繰返し軟化現象を反映したものである。

(4) 予ひずみの有無に関係なく、本材料においても微小き裂伝ば則が成立する。

(5) 切欠感度に及ぼす予ひずみの影響は小さい。

文 献

- (1) 西谷・西田, 機論, **39**-319(1973), 798.
- (2) 小林・ほか 5 名, 機論, **43**-366(1977), 416.
- (3) 長瀬・泉沢, 機論, **54**-504, A(1988), 1474.
- (4) 後藤・ほか 3 名, 機論, **57**-539, A(1991), 1475.
- (5) Kang, T. S. and Liu, H. W., *Eng. Fract. Mech.*, **6**(1974), 631.
- (6) 小切間・ほか 2 名, 金属誌, **7**-34(1970), 717.
- (7) 例えば, Ham, R. K. and Broom, T., *Phil. Mag.*, **7**(1962), 95.
- (8) Thomas, A. T., *Acta Met.*, **14**(1966), 1363.
- (9) 幡中・山田, 材料, **30**-329(1981), 166.
- (10) 加藤・ほか 2 名, 機論, **50**-456, A(1984), 1461.
- (11) 真武・ほか 2 名, 材料, **34**-384(1985), 1070.
- (12) 西谷・野村, 機論, **41**-350(1975), 2761.
- (13) Nisitani, H. (Mura, T. 編), *Mechanics of Fatigue-AMD*, **47**(1981), 151, ASME.
- (14) Nisitani, H., ほか 2 名, *Eng. Fract. Mech.*, **41**(1992), 499.