

Al 合金溶湯鍛造材AC4CH-T6 の中高温下における 疲労き裂伝ば特性

皮籠石紀雄・仮屋 孝二

第一工業大学 機械システム工学科

Growth Properties of a Fatigue Crack of Squeeze Cast Al Alloy AC4CH-T6 at Elevated Temperatures

Norio KAWAGOISHI, Kohji KARIYA

Rotating bending fatigue tests were carried out using plain specimens of a squeeze cast Al alloy AC4CH-T6 at room temperature, 150 °C and 250 °C, to investigate the effect of elevated temperature on fatigue properties, especially the growth of a small crack at high stress levels. Fatigue strength at 150 °C was nearly the same as the one at room temperature and higher than that at 250 °C, though their static strengths were decreased with increasing in the test temperatures. The alloy was hardened at 150 °C and softened at 250 °C due to aging at the fatigue process. At 250 °C, many slip bands and cracks were initiated, and these cracks coalesced each other at the fatigue process. Most of fatigue life was occupied by the growth life of a small crack within 1~2 mm at all temperatures tested. The growth rate of a small crack was determined by the small crack growth law, $da/dN=C_1\sigma_a^n$ (n, C_1 : constant). Fatigue life at each temperature was roughly predicted by the modified growth law using yield stress and Young's modulus, though the deviation of the predicted fatigue life from the experimental one was larger at 150 °C than at room temperature and 250 °C due to age-hardening.

Key Words: Fatigue, Squeeze cast Al alloy, Elevated temperature, Rotating bending, Crack initiation, Crack propagation, Aging

1 緒 言

鋳造品は製造コストの削減に有効であり、目的に応じて各種鋳造法で製造される。高圧、低速で鋳造する溶湯鍛造法^{1)~3)}は、鋳物特有の鋳巣やポロシティー等の鋳造欠陥が少なく組織が微細化できることから、本法による鋳造材は静強度や疲労特性だけでなく強度信頼性にも優れ、展伸材のそれらと遜色ないため各種機器の材料として広く使用されている。このような背景から、その鋳造材の静的な機械的性質や疲労特性に関する研究は多数行われてきた。^{4)~10)} また鋳造品は、自動車のエンジン用部品にも使用されことから中高温下での疲労特性についても把握する必要があり、これまでも多くの研究が行われている。^{11)~13)} しかし溶湯鍛造した Al 合金鋳物については、必ずしも多くはない。¹⁴⁾

そこで本研究では、溶湯鍛造法で鋳造した Al 合金鋳物 AC4CH-T6 の中高温下における疲労特性を検討するため、150°C と 250°C 下で、回転曲げ疲労試験を行った。本研究では、特に小規模降伏条件が満たされず、しかも微小き裂の伝ばが疲労寿命の多くを占める平滑材におけるき裂の伝ば特性に及ぼす中高温の影響を調べ、室温の結果との比較の基に検討した。

2 材料、試験片および実験方法

用いた材料は Al 合金鋳物 AC4CH である。化学成分 (wt. %) は、7.02Si、0.08Fe、0.37Mg、0.12Ti、Bal.

Al である。素材を、溶湯温度 700°C、鋳造圧力 930MPa の条件下で溶湯鍛造法により鋳造後、530°C、1h の溶体化処理、そして 180°C、2h の時効処理を行った。

Table 1 に、疲労試験を行った室温、150°C および 250°C での静的な機械的性質を示す。後述するように、本材料のように時効処理された材料の場合、高温での試験における機械的性質は、加熱温度だけでなく試験時間の影響も受ける。ここでは、所定の温度までの昇温速度を 10°C/min. とし、その温度に達してから約 0.5h 保持してから引張試験を行った。温度が高くなると引張強さは単調に低下し、絞りは増加する。

Fig.1 に試験片の形状と寸法を示す。試験片表面は、機械加工後 エメリーペーパーで研磨を行い、さらに電解研磨で約 20 μm 除去し最終仕上げとした。疲労試験は、高温用の小野式回転曲げ疲労試験機 (100N·m) を用い、室温、150°C および 250°C、大気中で行った。疲労過程にお

Table 1 Mechanical properties.

Temperature	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	ϕ (%)
R.T.	222	307	14.5
150°C	205	255	36.4
250°C	183	195	40.3

$\sigma_{0.2}$:0.2% proof stress, σ_B :Tensile strength, ϕ :Reduction of area

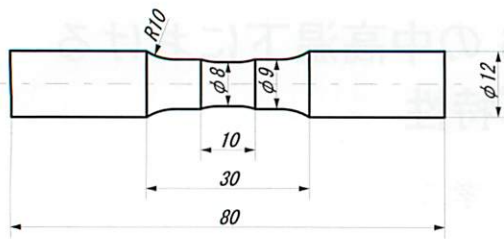


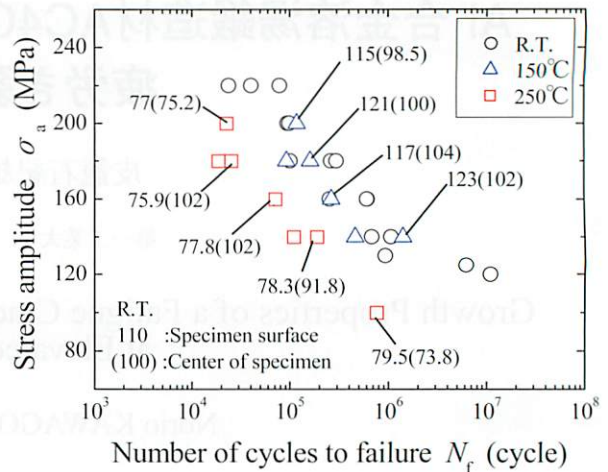
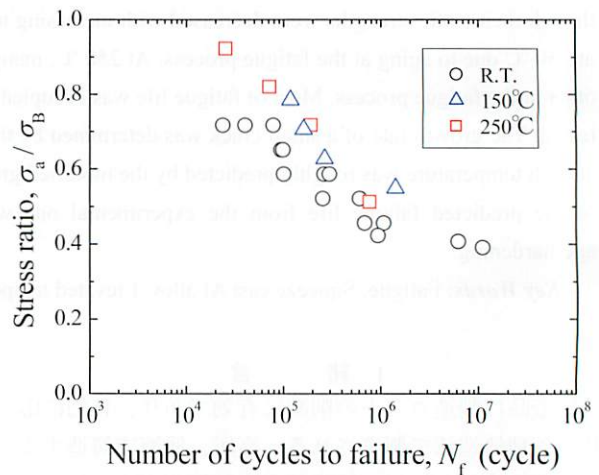
Fig. 1 Shape and dimensions of specimen.

ける試験片表面の連続観察およびき裂長さの測定はレプリカ法で行ったが、高温の場合、適当な応力繰返し毎に試験を中断し、試験片を冷却の後レプリカを採取した。試験を再開するまでの時間は、所定の温度に昇温後 0.5h とした。き裂長さ a は試験片表面に沿う円周方向長さとして定義した。また、硬さの測定はマイクロピッカース硬さ計 (荷重 0.5N) を、破面の観察は SEM を用いて行った。

3 実験結果および考察

3.1 $S-N$ 曲線

Fig.2 と Fig.3 に、各材の $S-N_f$ 曲線と負荷応力を試験温度下における引張強さで基準化した $\sigma_a/\sigma_B - N_f$ 曲線をそれぞれ示す。疲労強度は室温下と 150°C 下ではほぼ等しいが、250°C 下では低い。これらの結果は、従来報告されている結果と同一傾向である。^{1,3)} また、静強度差を考慮しても、150°C と 250°C 間で疲労強度はほぼ等しいが室温の場合低く、試験温度間の差異は存在する。これは主として、高温下での疲労過程で時効組織が変化することに起因しているものと考えられる。そこで、その影響を一部反映すると考えられる疲労試験後の試験片硬さを室温下で測定した。その結果を Fig.2 の $S-N_f$ 曲線中に示した。これらの数値は、破断後の試験片表面のピッカース硬さであり、括弧内の数字は繰返し応力の影響を無視でき、加熱時間の影響のみを受けた硬さ変化として、試験片断面の中央部における硬さを示している。なお、室温下の場合疲労寿命が異なっても硬さはほとんど変わらず、表面で $H110$ 前後、内部で約 $H100$ であった。高温での表面硬さは、150°C 下では増加し、250°C 下では軟化しており、その値は疲労寿命にほとんど関係なくほぼ一定である。しかし内部硬さは、高温の場合いずれの温度でも、疲労寿命すなわち加熱時間の増加に伴い、一旦硬化した後軟化する。そして 250°C 下の場合、早期から軟化が始まり、しかも軟化の程度は大きい。これは通常時効曲線として認められる現象に対応している。これらの結果からわかるように、高温下での疲労の場合、加熱温度と負荷時間だけでなく、応力の影響を受け、材料の硬さは繰返し過程で変化するため詳細の評価は難しいが、全体的には 150°C 下では硬化し、250°C 下では軟化するのは明らかである。これは加熱により、前者は時効硬化し、後者は過時効状態になったものと理解される。^{1,3)}

Fig. 2 $S-N_f$ curves (Number: Vickers hardness after fracture measured at room temperature).Fig. 3 $\sigma_a/\sigma_B - N_f$ curves.

3.2 き裂伝ば特性

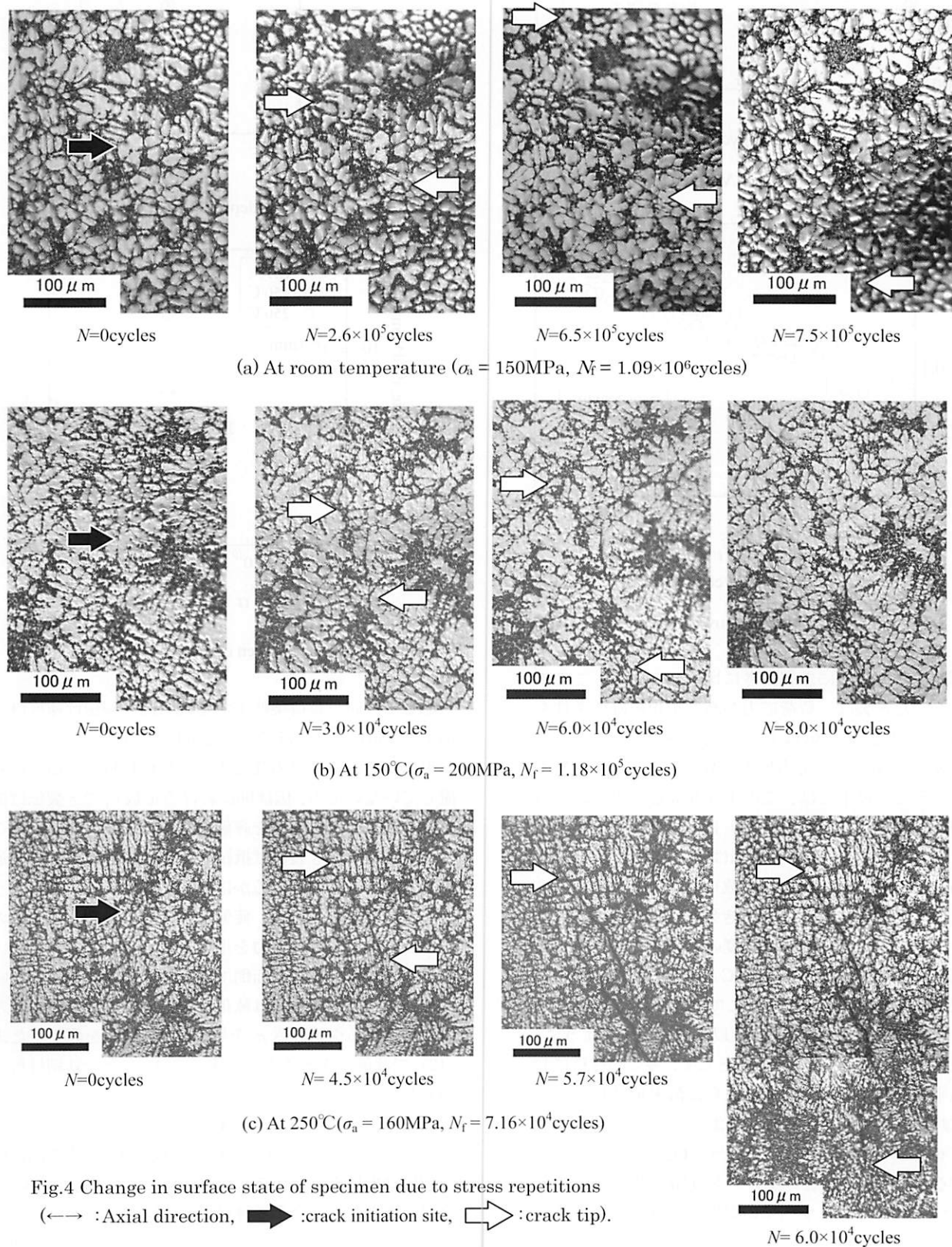
Fig.4 は、各温度下での応力繰返しに伴う試験片表面の疲労被害を示すレプリカ写真である。これまでの室温における結果と同様に、⁶⁾ 高温の場合も、き裂は共晶 Si あるいは α 相を起点に発生した。そしてき裂形態は、室温と 150°C 下の場合、時効材でよく認められるような、平面状すべりを反映して直線的である。また 250°C の場合も同様な特徴を有するものの、多くのすべり帯、さらにき裂発生が観察され、それらのき裂は合体した。その結果、き裂伝ば形態はジグザグ状を呈する。さらに 250°C 下の場合、室温、150°C 下に比べ、共晶 Si は球状化、分散化している。以上のような試験温度によるすべりやき裂の形態と発生数の違いは時効組織の差異を反映したもので、Fig.2 に示した各温度における硬さ変化に対応している。

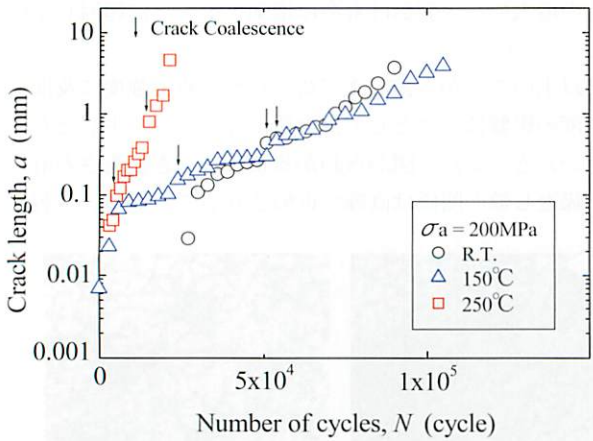
Fig.5 に各温度下でのき裂伝ば曲線を示す。同図には、破断寿命 N_f を基準とした図も示してある。すべての温度で、き裂発生は応力繰返しの早期であり、疲労寿命のほとんどが短いき裂 (特に 1~2mm 以下) の伝ば寿命で占め

られている。特に 150°C の場合、疲労寿命のほぼ 100% がき裂伝ば寿命である。これは前述のように、時効状態の変化に伴って材料は硬化するが、疲労初期ではその影響は小さいため、高温軟化による強度低下の影響の方が大きく、それがき裂発生を早めるに対し、き裂伝ば過程は時効の進行に伴い、時効硬化による伝ば抵

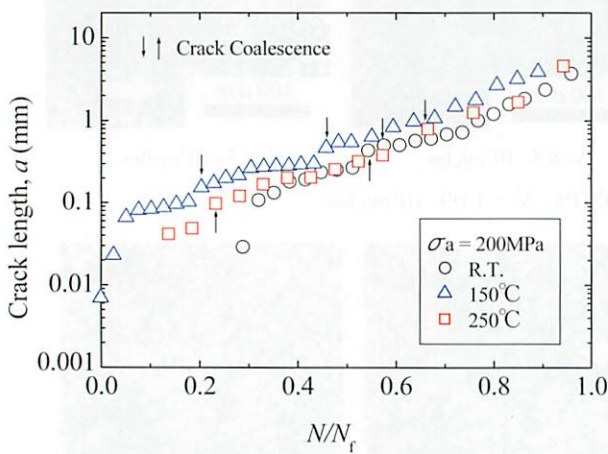
抗の増大で、き裂伝ば寿命は増加することに起因している。

以上のことから、Fig.2 で認められた疲労強度に及ぼす温度の影響は、主として、き裂伝ばにおいて生じたものといえる。また、図からわかるように、き裂長さの対数と繰返し数の関係は直線で近似されることから、き裂





(a) $a-N$ curves



(b) $a-N/N_f$ curves

Fig. 5 Crack growth curves.

伝ば速度は近似的にき裂長さに比例している。ここで対象としたき裂は、負荷応力が高く小規模降伏条件を逸脱した状態で伝ばしていると考えられるので $(\sigma_a/\sigma_{0.2} > 0.6)^{15)}$ 、応力拡大係数による評価は適当でない。そこで以下では、このような高応力下におけるき裂伝ばの評価に有効な式 (1) に示す微小き裂伝ば則¹⁶⁾で中高温下におけるき裂伝ば速度の整理を試みる。

$$da/dN = C_1 \sigma_a^n a \quad (n, C_1: \text{定数}) \quad (1)$$

Fig.6 は、各温度下におけるき裂伝ば速度と応力の関係を示している。き裂伝ば速度の応力依存性を示す n の値は、室温下では約 6、150°C と 250°C 下では約 4 と温度により異なる。しかしここでは、温度による n の大きさの差は小さいこと、また以下で検討するように、簡便さを重視するため、 n の値として、多くの材料における平均的な値であり、¹⁷⁾ さらに溶湯鍛造材の時効材における室温で得られたこれまでの結果^{5), 7)} も考慮して 6 をとり、以下の整理を行う。Fig.7 に各温度下におけるき裂伝ば速度とパラメータ $\sigma_a^6 a$ の関係を示す。ばらつきはあるが、すべての温度で、き裂伝ば速度は $\sigma_a^6 a$ で一義的に決まるとしていい。そして $S-N_f$ 曲線に

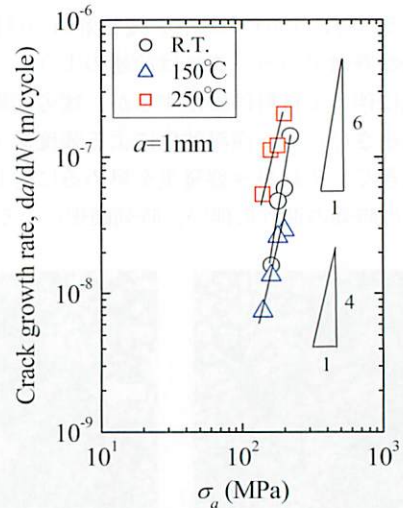


Fig. 6 Stress dependence of crack growth rate.

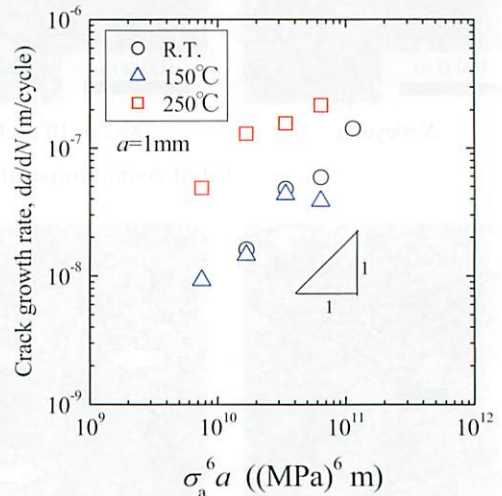


Fig. 7 Relation between crack growth rate and $\sigma_a^n a$.

対応して、同一負荷条件下で比較したき裂伝ば速度は室温下と 150°C 下ではほぼ等しく 250°C 下で速い。しかしこの結果は、各温度下での強度差を含む材料特性の相違を考慮していないため、伝ば則における定数 C_1 でき裂伝ば抵抗に及ぼす温度の影響を評価するには問題がある。そこで、温度によるき裂伝ば抵抗の変化が静強度の相違を通じてどれだけ評価できるかについて検討する。このような場合に対し著者らは、疲労における材料特性としての静強度は繰返し降伏応力を用いるのが合理的であるが、それを求めるのは多少面倒であるので、鉄鋼材料において、繰返し硬化あるいは軟化に拘わらず繰返し降伏応力と相関がある引張強さ σ_b を用いて、伝ば則を修正した式 (2) で評価できることを、多くの Al 合金や鉄鋼材料で示した。^{15), 18)}

$$da/dN = C_2 (\sigma_a/\sigma_b)^n a \quad (n, C_2: \text{定数}) \quad (2)$$

ここで、式 (2) における定数の逆数 $1/C_2$ は物理的にはき裂伝ば抵抗を意味する。¹⁵⁾ しかし、Fig.3 の結果は、高温の場合 σ_b のみによる評価は難しいことを示唆している。一方、このように温度が異なる場合のき裂伝ば速度

を比較する場合、静強度だけでなく変形特性の縦弾性係数 E の差を考慮する必要がある。^{13), 19)}

宮崎らは、式 (1) を任意の金属材料に適用するため、鉄鋼材料、Al 合金の展伸材および鋳物、そして Ti 合金のき裂伝ばに関するデータを整理することにより、静的な物性値である降伏応力 $\sigma_{0.2}$ と縦弾性係数 E を用いて式 (1) を変形した式 (3) を提案している。

$$da/dN = C_3 (\sigma_{0.2}/E) (\sigma_a/\sigma_{0.2})^n a \quad (C_3: \text{定数}) \quad (3)$$

そして式 (3) における C_3 と $\sigma_{0.2}$ に良好な相関があることを根拠に、簡便な疲労寿命予測法を示している。¹⁷⁾ そこで、今回のデータに対して、式 (3) による整理を行った。

Fig.8 は、 da/dN と $(\sigma_{0.2}/E)(\sigma_a/\sigma_{0.2})^n a$ の関係であり、Fig.9 は式 (3) における C_3 と $\sigma_{0.2}$ の関係である。Fig.9 には、宮崎らの結果 (図中、中実印) も比較として引用した。ここで高温における縦弾性係数は求めていないので、植松らの値を使用した。¹³⁾ C_3 の大きさの比較からわかるように、縦弾性係数の違いを考慮してもき裂伝ば速度は試験温度により異なる。しかし今回の結果も、宮崎らのばらつきの範囲内で整理されているので、実用的観点からは、温度が異なる場合も含め本供試材料の疲労寿命を式 (3) に基づき予測できそうである。

Fig.10 は、式 (3) を積分して求めた疲労寿命の予測結果であり、比較として実測値も示してある。ここで予測寿命は、疲労寿命に占めるき裂長さ 0.1mm から 2mm までのき裂伝ば寿命の割合を Fig.5 を基に求めた。具体的には、疲労寿命に占めるき裂伝ば寿命の割合には応力依存性があるが、それは小さく平均的には、室温で約 6 割、150°C で約 9 割、250°C で約 8 割とした。図からわかるように、それぞれの温度で疲労寿命はある程度の範囲内で予測可能である。このように、式 (3) は、広範囲の材料、さらに高温下で疲労寿命を予測するのに実用上有用性は高い。しかし温度毎の予測の程度をみると、室温と 250°C での予測はかなり良好であるが、150°C の場合予測値と実測値のずれが大きい。これは、式 (3) は簡便さを考慮し、疲労過程で生じる強度変化やき裂閉口 (植松らも指摘したように、高応力下であってもき裂の屈曲が大きい場合、その影響は無視できない) 等を考慮していないこと、特に本研究のような時効材における高温疲労を適用対象としていないことに起因している。すなわち、Fig.2 と Fig.4 の結果からわかるように、150°C の場合、高温軟化が起こる一方、式 (3) には含まれない高温での疲労過程で生じる時効硬化が大きく影響しているものと考えられる。また 250°C の場合も、150°C の場合とは逆に軟化すると共に、前述のように、多数のき裂の合体が生じる。植松らは 250°C の場合、縦弾性係数の差を考慮しても、室温下に比べき裂伝ば速度は高速側になること、その理由にき裂の合体による加速をあげている。¹³⁾ 今回の結

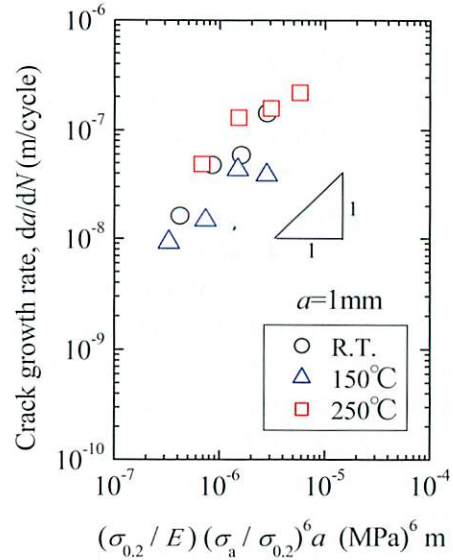


Fig. 8 Relation between crack growth rate and $(\sigma_{0.2}/E)(\sigma_a/\sigma_{0.2})^n a$.

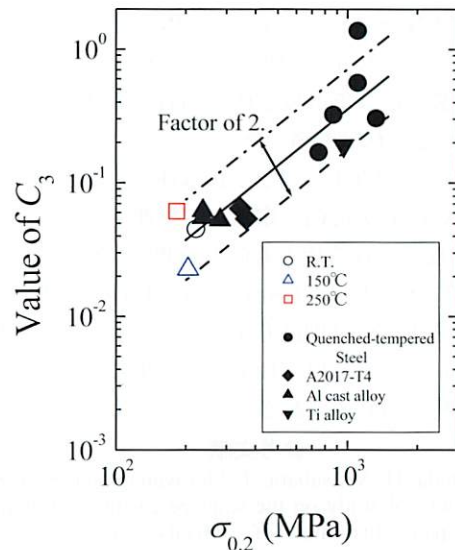


Fig. 9 Relation between C_3 and $\sigma_{0.2}$.

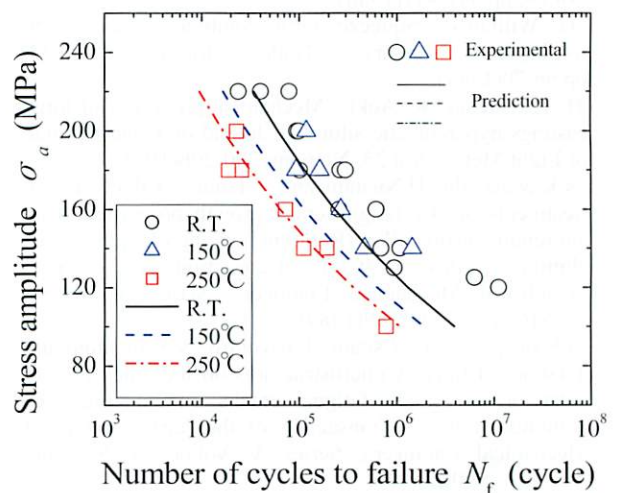


Fig. 10 Predicted fatigue life.

果でも同様なことが考えられるが、この影響とは逆に、250℃の場合、過時効によるすべりの分散が生じ、ひずみ集中の緩和がき裂伝ば速度を低下させる要因²⁰⁾、²¹⁾もあり、これらの相反する効果がそれらの影響を小さくしたものと推測される。これらのことについては、今後の検討課題である。

4 結言

溶湯鍛造した Al 合金鋳物 AC4CH-T6 の中高温疲労特性、とくに高応力下におけるき裂の伝ば特性に及ぼす中高温の影響について検討するため、150℃と250℃下で回転曲げ疲労試験を行い、室温の結果も含め検討した。主な結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 疲労強度は、室温下と150℃下でほぼ等しく、250℃下では低い。
- (2) 材料は高温下での疲労過程で、時効による硬化あるいは軟化が生じたが、平均的には150℃下では硬化し、250℃下では軟化した。
- (3) 250℃の場合、室温、150℃の場合に比べ、すべりやき裂が多数発生し、それらは合体した。
- (4) すべての温度下で、疲労寿命の多くは1~2mm以下の微小き裂の伝ばで占められた。特に150℃の場合、ほぼ100%がき裂伝ば寿命であった。
- (5) すべての温度下で、き裂伝ば速度は微小き裂伝ば則 ($da/dN=C_1\sigma_a^n$, n, C_1 : 定数) で整理できた。
- (6) 各温度における疲労寿命の予測に、宮崎らによる静強度(降伏応力)と縦弾性係数の相違を考慮して修正した微小き裂伝ば則は有用である。しかしより精度の高い予測を行うには、疲労過程で生じる時効組織の変化を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) Y. Nishida, H. Matsubara, T. Shirayanagi and S. Suzuki, "Fundamental study on the squeeze casting", Bulletin of the Japan Institute of Metals, Vol.19, No.12, pp.895-902(1980).
- 2) Y. Kaneko, H. Murakami, K. Kuroda and S. Nakazaki, "Squeeze casting of aluminum", Foundry Trade Journal, Vol.28, pp.397-411(1980).
- 3) G. Williams, "Squeeze form combines casting with forging", Foundry Trade Journal, Vol.32, pp.66-70(1984).
- 4) H. Tokisue and K. Aoki, "Mechanical properties of forge castings hypereutectic silumin", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.25, No.6, pp.200-206(1975).
- 5) N.Kawagoishi, H.Nisitani and T.Tsuno, "Effect of heat treatments on the fatigue crack growth properties of an aluminum casting alloy (Rotating bending of squeeze cast aluminum alloy AC4CH)", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.55, No.516, pp.1733-1739(1989).
- 6) N.Kawagoishi, H.Nisitani, T.Toyohiro, N.Yamamoto and T.Tsuno, "Effect of microstructures on the crack growth behavior of small fatigue cracks in squeeze cast aluminum alloys", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.60, No.570, pp.358-363(1990).
- 7) K.Shiozawa, S.Nishino, Y.Higashida and S.Sun, "Small fatigue crack growth behavior and fatigue strength of squeeze cast aluminum alloy", AC8A-T6 and AC4C-T6, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.60, No.51, pp.663-670(1994).
- 8) N. Kawagoishi, H. Nisitani and T. Tsuno, "Notch sensitivity of squeeze cast aluminum alloy in rotating bending fatigue", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.56, No.521, pp. 10-14 (1990).
- 9) M.Goto, S.Han, T.Yamamoto, H.Nisitani, N.Kawagoishi and T.Matsui, "Statistical characteristics on the microcrack growth behavior of a squeeze cast Al alloy", Journal of Society of Materials Science, Japan", Vol.51, No.9, pp.1023-1029(2002).
- 10) N.Kawagoishi, N.Yamamoto, H.Hirose, H.Nisitani, M.Goto and E.Kondo, "Influence of shot peening on fatigue strength of squeeze cast aluminum alloy", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.67, No.656, pp.726-731 (2001).
- 11) S. Hukai, K. Takeuchi and E. Tanaka, "On the elevated-temperature strengths of some aluminum cast alloys for piston", Journal of Society of Materials Science, Japan", Vol.13, No.126, pp.190-196(1964).
- 12) N. Hasegawa, T. Miyabe and T. Yamada, "Fatigue properties of Al-Si-Cu-Ni-Mg casting alloys at elevated temperatures", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.41, No.5, pp.311-317(1991).
- 13) Y. Uematsu, K. Tokaji and N. Hasegawa, "Effect of test temperature on fatigue behaviour in AC4CH cast aluminum alloy", Journal of Society of Materials Science, Japan", Vol.55, No.2, pp.199-204(2006).
- 14) H. Egashira, I. Hirota, T. Kobayashi and S. Sakai, "Fracture toughness and fatigue strength at room temperature and 423K in melt-forged aluminum casting alloys", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.39, No.12, pp.886-892(1989).
- 15) H. Nisitani, N. Kawagoishi and M. Goto, "Growth behavior of small fatigue cracks and relating problems", Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures (Edited by A. Carpinteri), pp.773-778(1994).
- 16) H. Nisitani, "Unifying treatment of fatigue crack growth laws in small, large and non-propagating cracks", Mechanics of Fatigue, ASME AMD (Edited by T. Mura), Vol.47, pp.151-166(1981).
- 17) T. Miyazaki, H. Noguchi, H. Kang and K. Ogi "Examination of fatigue characteristics of aluminum alloy from meso-scale characteristics (First report, prediction of high cycle fatigue life reliability of a metal with cracks under R=-1)", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.69, No.686, pp. 1456-1464 (2003).
- 18) N. Kawagoishi, H. Nisitani, M. Goto, Y. Oda and H. Tanaka, "Fatigue crack growth resistance of Al alloy", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.60, No.571, pp. 658-662 (1994).
- 19) N. Kawagoishi, K. Yamane, M. Goto, E. Kondo and K. Morino, "Influence of grain size on fatigue crack growth resistance of Alloy 718 at elevated temperature", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.75, No.758, pp. 1387-1394 (2009).
- 20) A. H. Rosenberger, E. Andrieu and H. Ghonem, "Influence of high temperature elastic-plastic small crack growth behavior in a nickel-base superalloy on the life prediction of structural components," Super alloys, The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 737-746 (1992).
- 21) N. Kawagoishi, K. Kariya, S. Yoshimi, Y. Nakamura and K. Morino, "Effect of aging on crack initiation and propagation of Ni-base super Alloy 718", Journal of Society of Materials Science, Japan", Vol.58, No.12, pp.1003-1008(2009).