

時効硬化Al合金の超音波疲労における せん断形き裂の発現機構

仮屋 孝二・皮籠石 紀雄

第一工業大学 機械システム工学科 〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2

E-mail k-kariya@daiichi-koudai.ac.jp

Growth Mechanism of a Shear Mode Crack of Age-hardened Al Alloy in Ultrasonic Fatigue

Kohji KARIYA and Norio KAWAGOISHI

Department of Mechanical systems Engineering, Daiichi Institute of Technology, Kirishima 899-4395, Japan

E-mail k-kariya@daiichi-koudai.ac.jp

Abstract: In order to investigate the effect of humidity on the growth behavior of a fatigue crack and clarify the growth mechanism of a macroscopic shear mode crack in age-hardened Al alloys under ultrasonic loading, fatigue tests were carried out for two kinds of age-hardened Al alloys of an extruded bar and a drawn one of 2017-T4 under ultrasonic frequency, 20kHz, in relative humidity of 25% and 85%. Crack growth was accelerated by high humidity in the early stage of fatigue process, while the effect of humidity was hardly observed in the growth process of a longer crack. A macroscopic crack morphology in the drawn alloy was a tensile mode only irrespective of humidity which is ordinary observed in many metals. On the other hand, a crack in the extruded alloy propagated in a tensile mode and then changed to a shear one in low humidity, and the most of crack propagation was occupied by the shear mode. However, in both alloys, most of fracture surfaces were covered with slip planes in both humidity, though striations were observed in the early propagation in low humidity. These results were explained from the view points of the effect of environment at the crack tip and the microstructure.

Key words: Fatigue, Age-hardened Al alloy, Ultrasonic loading, Humidity, Crack growth

1. 緒 言

近年、機械・構造物の老朽化に起因した損傷や事故が増加し、社会問題化している。一方、環境負荷低減を考慮した場合、それらの機器や設備を長期使用することは重要である。このような高齢化機器の安全性を保証するには、長期使用した場合の損傷評価が必須となる。ところが、例えば、機械・構造物の破壊のほとんどを占める疲労破壊においても、超長寿命域の疲労特性が精力的に研究されているものの、未解決の問題は多い。しかもその場合、超長寿命域での疲労試験は多大の時間と労力を要することが大きな障害となっている。超音波疲労試験はこの問題に対する解決法の一つとして期待される。^{1) ~}

³⁾ しかしこの試験では、疲労特性に対する繰返し速度の影響が必ずしも明らかではなく、材料や試験条件等により影響があるとする結果や、逆に影響しないとする結果があり、不明な点が多い。^{4), 5)} 特に腐食を伴う疲労の場合、時間の影響が有り、注意を要すると考えられる。著者らもAl合金やNi基超合金における超音波疲労試験を行い、通常の繰返し速度である回転曲げ疲労試験の結果と比較した。その結果、これらの材料では疲労特性に繰返し速度の影響が確認された。特に時効硬化Al合金の場合、回転曲げ疲労では一般的に認められるストライエーション支配の引張形破壊となるのに対し、超音波疲労の場合、巨視的にもせん断形き裂の伝ばが生じ、その

破面にはすべり面が観察され、両材間で明確な相違が確認された。しかし、せん断形伝ぱに集合組織の関与が指摘されたもののその発現機構の詳細については明らかにできなかった。

そこで本研究では、時効硬化 Al 合金 2017-T4 の押出し材と引抜き材を対象に超音波疲労試験を行い、通常の試験速度である回転曲げ疲労特性⁶⁾と比較し、せん断形き裂の伝ぱの形成理由について検討した。

2. 材料, 試験片および実験方法

用いた材料は、市販の時効硬化 Al 合金 2017-T4 の押出し材と引抜き材である。供試材の化学成分と機械的性質を Table 1 と Table 2 にそれぞれ示す。これらの表からわかるように、両材で化学成分、機械的性質共に大きな差はないが、両材を用いたのは、Fig.1 の組織を示す EBSD 写真からわかるように、押出し材はその横断面の多くが(111)面となる顕著な集合組織を有するのに対し、引抜き材の場合特定の方位を持たないので、組織の影響をみる事ができるからである。なお丸棒断面で測定した平均結晶粒径は、押出材で 13 μm, 引抜き材で 18 μm であり、さらに押出材には 5 μm 程度の亜結晶粒が含まれていた。

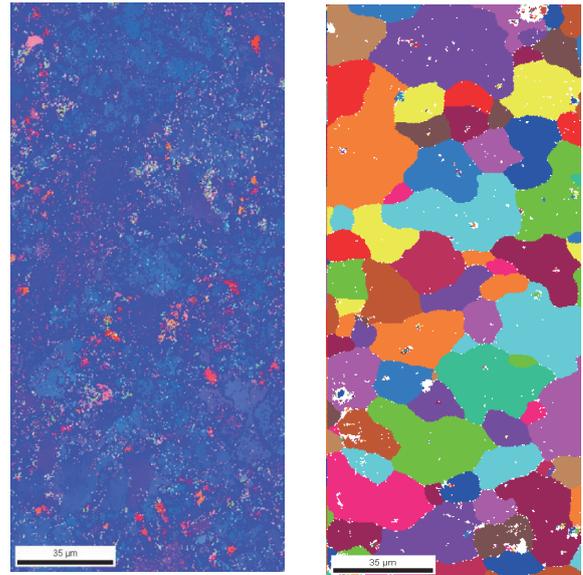
Fig.2 に試験片の形状、寸法を示す。機械加工した試験片表面は、ペーパー研磨後電解研磨で約 20 μm 除去してから試験に供した。試験は超音波疲労試験機(引張圧縮荷重, 繰返し速度 20kHz)を用い、応力比-1 の下、相対湿度 25%および 85%中で実施した、なお高速負荷すれば試験片は発熱する。本試験では、それによる温度上昇を 3℃以下に抑制するように間欠負荷した。表面のき裂長さ l はレプリカ法で測定し、き裂が引張形で伝ぱした場合だけでなく、巨視的にもせん断方向に伝ぱした場合も試験片表面に沿う円周方向長さとして定義した。破面観察には走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた。

Table 1 Chemical Composition (mass %).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Al2017-E	0.42	0.30	4.06	0.73	0.58	0.05	0.02	0.05
Al2017-D	0.41	0.32	3.87	0.70	0.62	0.04	0.03	0.04

Table 2 Mechanical properties.

	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_B MPa	σ_T MPa	Ψ %
Al2017-E	350	471	638	32.4
Al2017-D	303	464	718	43.7



(a) Extruded alloy (b) Drawn alloy

Fig.1 Microstructure.

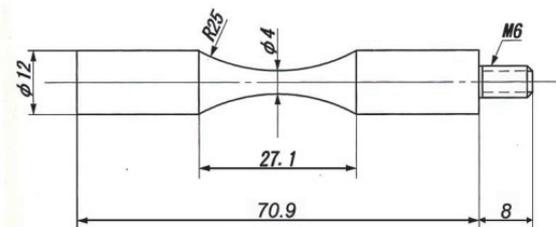
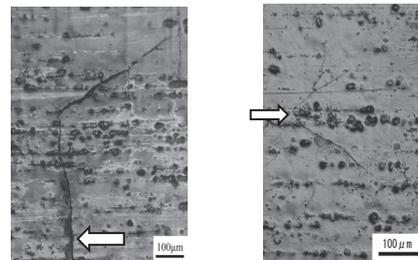
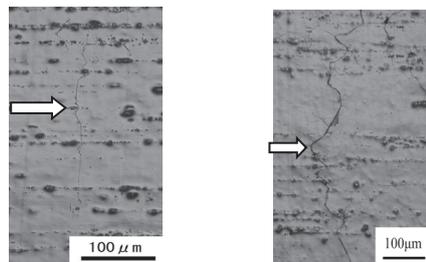


Fig.2 Shape and dimensions of specimen.



(a-1) RH25% (a-2) RH85%

(a) Extruded alloy



(b-1) RH25% (b-2) RH85%

(b) Drawn alloy

Fig.3 Crack morphologies of extruded and drawn Al alloys (Arrow indicates crack initiation site, \longleftrightarrow :axial direction).

3. 実験結果および考察

Fig.3は、両材の巨視的き裂伝ば形態を示すレプリカ写真である。押し出し材の場合、低湿度で引張形伝ばの後せん断形に変化しているが、高湿度ではすべてせん断形伝ばである。これに対し引抜き材の場合、両湿度共に引張形伝ばである。このような押し出し材におけるせん断形き裂の伝ばは、回転曲げ疲労でも高湿度中、高応力下で観察されたが、低湿度中では完全な引張形伝ばであった。⁶⁾

Fig.4に両材の破面写真を示す。いずれの材料、湿度でもき裂発生部にはすべり面が観察され、材料、繰返し速度、湿度による差異は認められない。すなわち、き裂発生の初期は通常の繰返し速度と同様のstage Iの伝ばである。そしてその後のき裂伝ばは、押し出し材の低湿度で引張形伝ばした領域ではストライエーションが観察された(詳細図：略)が、せん断形伝ばした領域では両湿度共にすべり面が観察される。これに対し引抜き材の場合、低湿度中の初期伝ばではストライエーションが観察されたが、その後は破面の多くで結晶粒単位の平坦なファセットで占められ、高湿度中でも同様である。このファセットはエッチピット法により観察した結果、Fig.5に示すように、すべり面であることが確認された。従って表面上は引張形で伝ばし、繰返し速度及び湿度によるき裂形態上の差異は確認できないが、破面は押し出し材と同じすべり面破壊であり、繰返し速度及び湿度による影響が確認できる。このように超音波疲労における破面は、両材で形態的な相違はあるものの、通常の繰返し速度の場合における低湿度ではストライエーション支配、高湿度ではそれに粒界割れやぜい性ストライエーションのようなぜい性的な特徴を有する破面が混在するという破面とは明確に異なる(現段階では、ぜい性破壊か否かは明らかでなくそれを明確にするにはより詳細な観察を要する)。

Figs.6&7は、き裂の伝ば機構と伝ば速度の関係をみるために示した両材の超音波疲労と回転曲げ疲労におけるき裂伝ば曲線である。超音波疲労の低湿度中の場合、両材共に1mm付近の短いき裂において伝ばの停滞現象がみられるが、その後の伝ばは加速している。これに対して高湿度中の場合、両材共にき裂が発生したほぼ直後からき裂伝ば速度は加速されており、低湿度でみられた1mm付近でのき裂伝ばの停滞は消失している。そして、その時のき裂伝ば曲線の傾きは、両材それぞれにおいて低湿度中におけるき裂停滞後の傾きとほぼ等しく、1mm付近以上になると湿度の影響はほとんど認められない。このような低湿度におけるき裂伝ばの停滞は、前述した引張形からせん断形への伝ば形態の遷移時に対応

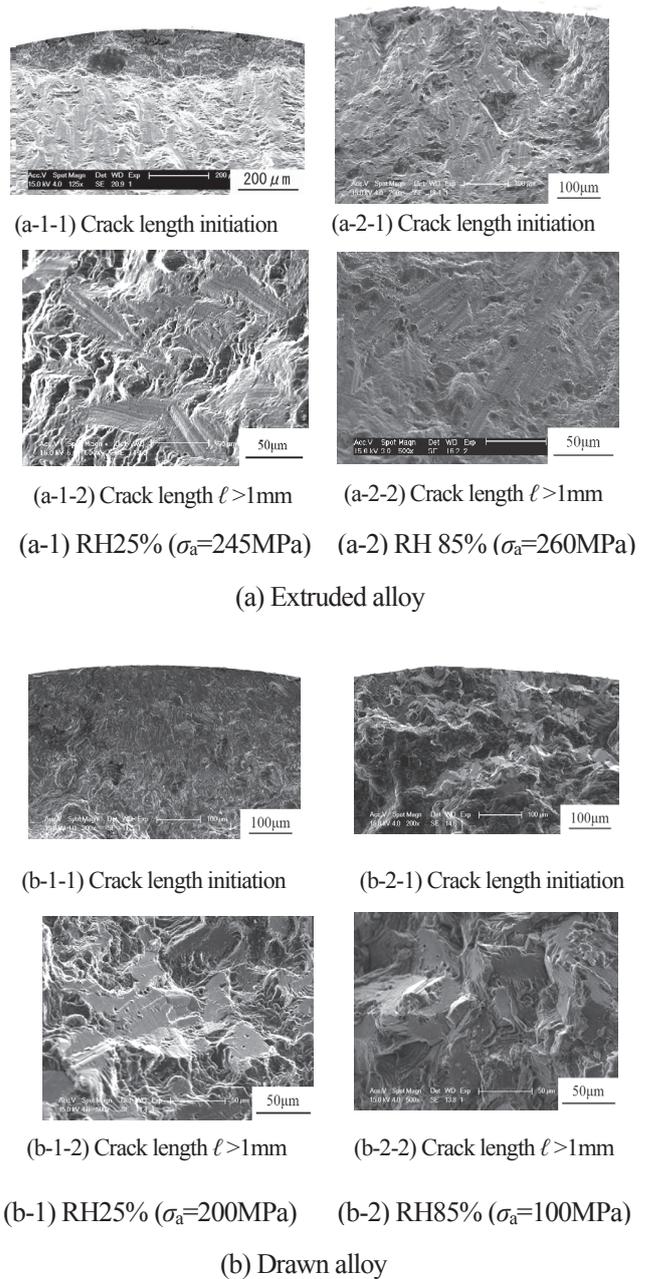


Fig.4 Fracture surfaces ($\sigma_a=230\text{MPa}$).

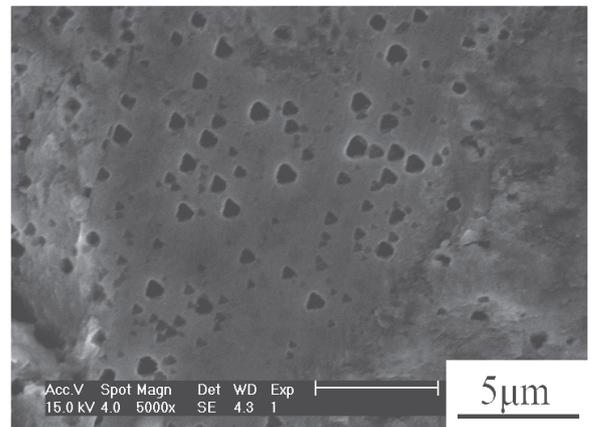


Fig.5 Etch pit pattern on flat facet of drawn alloy.

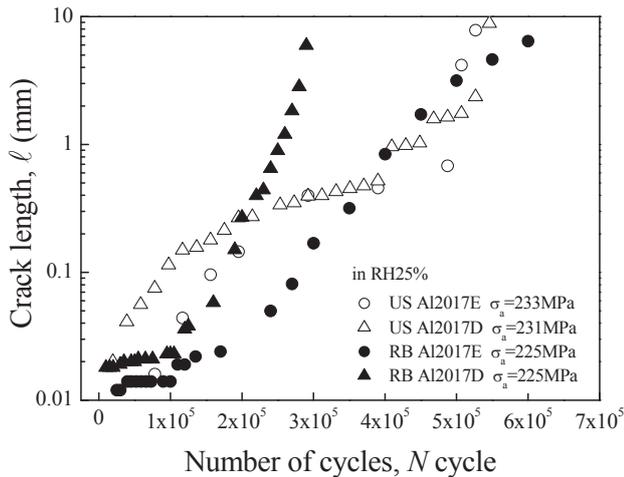


Fig.6 Crack growth curves in RH25%.

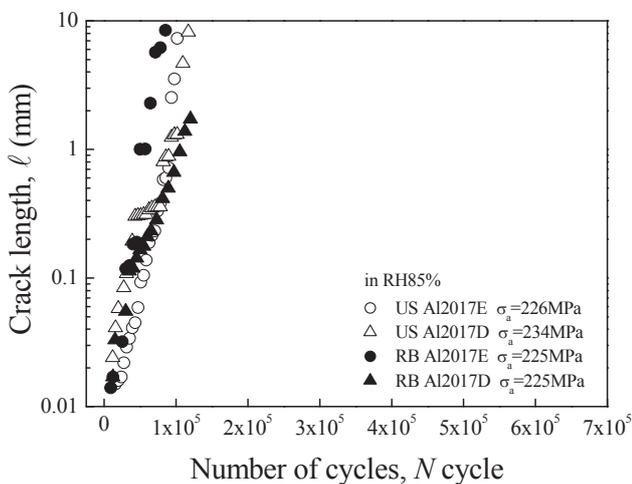


Fig.7 Crack growth curves in RH85%.

していることが確認され、停滞のない高湿度ではき裂の発生初期からせん断形であることと関係している。なお上述した1 mm付近で生じるき裂伝ばの停滞は、通常の繰返し速度である回転曲げ疲労の場合認められない(数十 μm 前後に認められる伝ば停滞は、通常生じる結晶粒界に起因した伝ばの阻止効果によるものである)ことから、これは超音波という高速の応力繰返しに起因した現象であることを示唆している。

以上述べたように、き裂が短い範囲では高湿度によりき裂伝ばは加速され、その場合の破面は低湿度におけるストライエーション破面とは異なりすべり破面になる。一方、き裂が長くなるとき裂伝ば速度に湿度の影響はなく、破面は両湿度共にすべり破面となる。このように、き裂伝ば速度とき裂伝ば形態および破面には関係があることが確認される。き裂が長くなった領域でき裂の伝ば速度と伝ば機構に湿

度の影響がないことは、き裂伝ば速度の増大により大気中の水分や酸素の輸送が追従できなくなり⁷⁾、き裂先端の環境が真空状態に近くなったことから説明される。また前述した1 mm付近で生じるき裂伝ばの停滞も、伝ば機構の変化と同様に大気環境から真空環境への変化に起因した現象としてとらえることができる。一方、押出し材と引抜き材間でみられた巨視的き裂伝ば形態の相違は集合組織の有無に起因した現象である。^{4), 5)} これに対してき裂が短い領域における高湿度によるき裂伝ばの加速と破面の変化には、大気中の水分の影響、具体的にはAlと水の間に生じるアノード反応に伴い発生した水素の影響が推測される。しかし高速繰返しである超音波疲労において、水素の拡散が小さいfcc金属でも水素が影響するのかを検討する必要がある。ここで、Al中における水素の拡散係数としてAl-Zn-Mg合金の $D_H=10^{-14}\sim 2\times 10^{-13}\text{m}^2/\text{s}$ ⁸⁾を用いると、無負荷状態での水素の拡散速度は概略 $V_H\approx 0.1\sim 0.5\mu\text{m}/\text{s}$ となる。

一方、き裂が短い時の伝ば速度として、例えば下限界近傍の $db/dN=10^{-11}\sim 10^{-10}\text{m}/\text{c}>\Delta K_{th}$ (b :き裂深さ, ΔK_{th} :下限界応力拡大係数幅)を考えると $db/dN\approx 0.2\sim 2\mu\text{m}/\text{s}$ となり、応力繰返し下での転位による水素輸送も考慮すると、き裂伝ばに対し水素の影響は十分考えることができる。そしてこの場合のき裂伝ば速度に及ぼす水素の影響は、延性き裂の伝ばであることから水素助長塑性変形(HELP)機構⁹⁾が考えられる。なお、前述のき裂伝ば速度に湿度の影響がなく、真空環境に近づくとしたときのき裂伝ば速度は実測値から $db/dN\approx 10^{-9}\text{m}/\text{c}=20\mu\text{m}/\text{s}$ が得られた。この値は V_H より大きく、このことから水素の影響はないことが確認できる。ちなみに高湿度中の $\sigma_a=230\text{MPa}$ においてき裂伝ば速度が上述の $10^{-9}\text{m}/\text{c}$ 以上になるときのき裂深さは約 $30\mu\text{m}$ であり、1~2結晶粒程度である。従ってき裂伝ばの早い段階で、湿度すなわち水素の影響はなくなったことになり、その後は真空中に近い状態での伝ばということになる。

Fig.8は、上記の考察に基づき、き裂伝ば速度とき裂形態に及ぼす湿度の影響を模式的に示したものである。

以上述べたように、高湿度ではき裂長さの広い範囲ですべり面破壊であり、SEMレベルでは区別が困難であるが、き裂伝ば機構としてはき裂伝ば速度が小さい領域では水素が関与したものであり、またそれが大きい領域では真空環境によるもので、き裂伝ば速度により異なる伝ば機構であることに注意すべきである。

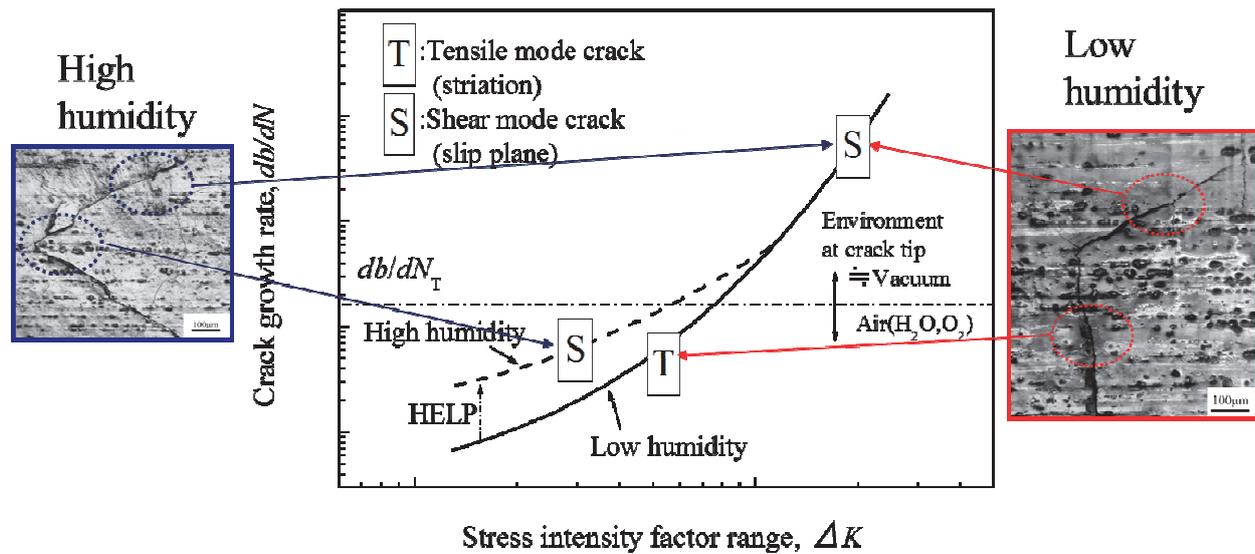


Fig.8 Schematic illustration showing the growth mechanism of a crack and effect of humidity under ultrasonic loading (Ex. Extruded).

4. 結 言

時効硬化Al合金2017-T4の押出し材と引抜き材を用いて、相対湿度25%と85%で超音波疲労試験を行い、せん断形き裂の伝ばの形成理由について検討した。主な結論は以下の通りである。

1. き裂伝ば速度は、初期伝ば過程では高湿度により加速されたが、長いき裂の伝ば過程では湿度の影響は非常に小さい。

2. 巨視的なき裂伝ば形態は、低湿度では押出し材の場合引張り形からせん断形に遷移したが、引抜き材の場合全過程で引張り形であった。一方、高湿度では押出し材の場合せん断形、引抜き材の場合引張り形であった。

3. 破面は、低湿度では押出し材、引抜き材共にストライエーションからすべり面に遷移したが、高湿度では押出し材、引抜き材共にすべり面のみであった。

4. 高湿度中におけるき裂伝ば機構として、初期伝ば過程では水素助長塑性変形(HELP)機構で、長いき裂の伝ば過程では真空環境中での伝ばで説明できる。

謝辞 本論文をまとめるに当たり、貴重な討論を頂いた熊本大学陳強教授と鹿児島大学中村祐三准教授に謝意を表します。

文 献

1) Wang, QY. et al., Effect of Inclusion on Subsurface Crack Initiation and Gigacycle Fatigue Strength, *International Journal of Fatigue*, Vol.24(2002), pp.1269-1274.

2) Bathias, C., There is no Infinite Fatigue Life in Metallic Materials, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol.22(1999), pp.559-565.

3) Marines, I. et al., Ultrasonic Fatigue Tests on Bearing Steel AISI-SAE 52100 at Frequency of 20 and 30 kHz, *International Journal of Fatigue*, Vol.25(2003), pp.1037-1046.

4) Kawagoishi, N., et al., Ultrasonic Fatigue Properties of a High Strength Extruded Al Alloy, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.69, No.688(2003), pp.1672-1677.

5) Kawagoishi, N., et al., Ultrasonic fatigue properties of an age-hardened Al alloy 6061-T6, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.70, No.696(2004), pp.1139-1145.

6) Kawagoishi, N., et al., Effect of microstructure on fatigue properties of Al alloy 2017-T4 in high humidity, *Journal of the Society of Materials and Science*, Vol.61, No.6, pp.556-563(2013).

7) Stanzl, SE. et al., The influence of air humidity on near-threshold FCG of 2024-T3 aluminum alloy, *Materials Science & Engineering*, A147, pp.45-54(1991)

8) Kamoutsi, H., et al., corrosion-induced hydrogen embrittlement in aluminum alloy 2024, *Corrosion Science*, Vol. 48, pp.1209-1224 (2006).

9) Ferreira, P.J., et al., Hydrogen effects on the interaction between dislocations, *Acta Materialia*, Vol.46, pp.1749-1757(1998).