を單に大小を表はす目安と考へた方が適當であると思ふ。
本試料は前述の如く塑性的弱性によつて疲勞破斷する

Fig. 6 X-ray test of tempered Al-Si alloy, Cu-anti-cathode.

ものであることは次の如き X-線的研究によつて確められる。

Fig. 6 は、疲勞試験に用いた各試験片に就き Cu-對陰極より出る α_1 及び α_2 を投射して高角反射法によつて

Debye 線を撮影した結果である。

これによつて見るに、Al-Si 固溶體を 200°まで熱して焼戻すれば Debye 線が著しく幅廣くなつて来る。これは Si 原子が粒子として析出せんとして内部的移動をしつゝある状態に於て留められた組織であつて、前研究によれば 200°に於てブリネル硬度数の最大を示すことと良く一致し、原因が内部歪に在ることを指し示す。200~300°の間で粒子の析出を完了し、300°に於ては Al 地は純度を高め再結晶を爲す。故に塑性が急増して疲勞に最

も弱い状態となる。X-線試験によれば 300°に於ては内部歪を消失すると共に結晶粒が肥大したことを示す。これより温度を高めれば再び Si は Al 中に溶解し始め、結晶粒は細かくなると同時に又内部歪も少しづつ増加して来る。580°に於て長時間焼鈍した結果は△にて示してあるが、これと同温度に於ける焼戻した結果○とを比較して見るに、後者の方の幅は多少廣くなつて居る。前者は Al と Si との二相なるに反し、後者は Al-Si 固溶體であるから兩者に於ける Debye 線の幅の違ひは Al 結晶粒の大きさの違ひに起因してゐる筈である。そうすれば 450°と 580°との兩温度に於ける焼戻に於て後者の方が線の幅が狭くなつてゐるのは内部歪が減少した爲と考へるのが至當であらう。依つて Fig. 6 の變化は主に内部歪の増減に因るものと考へて差支へなからう。而して疲勞に最も弱い組織は最も塑性の多い 300°焼戻のものであることが確められたわけである。

本研究に於ける内部摩擦の實驗の一部は元旅順工科大學助手山本彌一郎氏を煩はし、又 X-線實驗は井町助手が擔當されたことに對し、爰に感謝の意を表す。尙本研究は昭和 14 年度に於て日本學術振興會より「金屬の疲勞と内部摩擦の研究」として補助された研究の一部分なることを記して重ねて深謝する次第である。

アルミニウム合金の疲勞と減衰能に就て(第 1, 2 報)*

篠田 軍治** 天野 嘉次**

Gunji Shinoda and Yoshitsugu Amano: On the Fatigue of Aluminium Alloy and the Damping Capacity (Part I and II). Three series of specimen of 25S plates, quenched from 515° and aged at room temperature, tempered for 1hr. and 10 hr. at 150°, were used, and the changes of damping capacities and internal structures due to repeated bending stresses were investigated. The damping capacity of quenched specimen increases at first with the amplitude, but after repeated stress of about $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$ was applied for 2 or 3×10^7 times, the damping capacity becomes independent of the amplitude. Also, those of tempered specimen are independent of the amplitude. Generally, the damping capacities decrease after repeated stresses are applied.

When repeated stress of about 10 kg/mm^2 is applied damping capacity decreases at first and becomes constant and this continues till the final stage, then increases quite rapidly and break occurs. At the final stage, the damping capacity depends upon the amplitude, and increases quite rapidly with it.

X-ray diffraction patterns taken by back reflection method, did not change by repeated stress of about 2 kg/mm^2 , but sizes and shapes of diffraction spots slightly changed after stresses of about $\pm 10 \text{ kg/mm}^2$ were applied for more than 5×10^6 times. As to the effect of pin-holes upon the damping capacity and the fatigue characteristic, we cannot find any significant results.

(Received July 10, 1941)

** 大阪帝國大學工學部精密工學教室

* この研究は昭和 15 年 10 月本會第 8 回京都大會及び昭和 16 年 4 月本會第 9 回東京大會での講演を纏めたものである。

I. 緒 言

材料が繰返し曲げ應力のやうなものを受けると、材料の表面は絶えず伸縮するので、断熱的變化による温度の上昇及び下降を伴ふ筈である。従て強力輕合金のやうに時効硬化するものでは多少とも焼戻の効果を生ずる筈であり、そのため疲労現象は軟鋼などの場合と異つて、相當複雑なものになることは想像に難くない。又繰返應力が以上のやうな性質のものである以上、應力振幅は小でも繰返數が多ければ長時間の低温焼戻をやつたのと同じ結果になつて、材質に何等かの變化を與へることもあり得る譯である。

然るに一方又繰返應力によつて疲労破壊が起るのは何等かの形で材料にエネルギーが吸収されるのであるから、當然弾性限内の非弾性的性質に關係する筈である。弾性限内の非弾性的性質は減衰能が代表的なものであるから、筆者等は先づ小さな繰返應力によつて輕合金の減衰能が如何に變化するかを研究し、同時にこれと X 線分析とを併用して内部組織の變化をしらべ、次に次第に繰返應力を大にして終に疲労破壊を起すやうな状態にまで至らしめて試験を行ふことにした。

用ひた材料は Al, Cu, Mn, Si 合金 25S で、25S の疲労現象に關する X 線的研究は Kies 及び Quick⁽¹⁾ によつてなされてゐるが、同氏等は透過法を用ひた爲め全く變化を認めることが出来なかつたやうである。

II. 實 驗 方 法

實驗方法は Fig. 1 の如くで、25S の試料は鍛造材を 515° から焼入し常溫時効させたもの、150° で 1hr 及び 10hr 焼戻させたものの 3 種で、特に材料の缺陷と疲労及び内部組織との關係を明かにするため、ピンホール

Fig. 1

い材料と少い材料とから試験片を切りとつた。試験片は疲労試験、減衰能の測定及び X 線寫眞撮影を同時にやる必要上、厚さ 1~2mm、長さ及び幅それぞれ 80mm 及び 5~10mm の板でこれを圖のやうに一端固定した。そして小さな繰返應力を與へる時には試験片の一端に軟鐵片を置き、その近くに電磁石を持つて來て、これに唸周波發振器から發生する脈動電流を流して電磁氣的に試験片を振動させた。而して電流の周波數は試験片の固有振動數と略々一致させたのである。斯かる方法によつて 300 サ

イクル以上の周波數を用ひたので、比較的短時間で 10⁸ 程度の繰返應力を與へることが出来た。振幅を測るには試験片の先に小さな針を付け、その尖端を下から光で照し、その動きをマイクロメーター・マイクロスコープで讀む方法を探り、振幅から應力の計算を行つた。又振幅を一定にするには發振器の出力その他を加減した。

減衰能を測るには共振曲線を利用し、先づ試料の固有振動數よりも少し小さい周波數をもつた電流で強制振動を起させ、その振幅を測り、次に次第に周波數を上げて同様な測定を繰返し、得られた共振曲線から山の高さの半分處で曲線の幅を測つて、それから對數減衰率を計算し、その値をもつて減衰能を現はすことにした。

繰返應力を大にするには唸周波發振器よりの電流を増幅してもよい譯であるが、簡單のために交流の 60 サイクルを利用し、これをスライダックで落して電磁石に接続し試片を振動させた。この時試験片は幅、厚さ、長さを適當に選んで略々 60 サイクルに共振するやうにしたのである。又この方法では周波數が前の場合に比して小であるが、猶普通の疲労試験機よりは餘程大である。振幅を一定にするには電壓を加減し、減衰能を測るには電源を唸周波發振器の方へ切り換へた。

X 線寫眞は繰返應力を與へる前及び適當な數の繰返應力を與へて後、試験片を支持器に固定した儘で Cu K_α 示性 X 線を當て、高角度反射法で撮影した。取枠は矩形のものを用ひ、これに (511) 面からの反射線が全圓となつて現はれるやうにした。試験片をカメラに固定した儘で、疲労試験、減衰能の測定及び X 線寫眞の撮影の三者をやり得るやうにしたので、X 線は常に試験片の同一ヶ所に同一方向から當るやうになつてゐた譯である。

以上の様な方法で實驗を行つて次のやうな結果を得た。

III. 繰返應力の小なる場合

試料には鑄造の際のピンホールが多くて十分鍛造出来なかつたものと、鍛造のよく出来たピンホールの少いものの 2 種類を使つた。試験片は一端固定された 2×10×80mm の板で、繰返應力としては表面に約 ±2kg/mm² がかかるやうにし、サイクルは 320 附近で略々試験片の固有振動數と一致するものである。結果は減衰能の方ではピンホールの少ないものでも、多いものでも大差なく、常溫時効させただけのものでは最初 Fig. 2 及び Fig. 3 (A) のやうに、振幅によつて減衰能は變化し、振幅が大になると減衰能は増大する傾向が認められ、この傾向は繰返數 2×10⁷ 回程度までは續くが、それよりも繰返數が多くなると Fig. 2 及び 3 (C) の如く減衰能の値は振幅に無關係になる。又同一振幅の時の減衰能の値は Fig. 4 及び 5 (A) の如く、振幅の小さい時は下の方の曲線のやうに稍

(1) N. A. C. A. Report, No. 659 (1939).

不規則であるが、振幅の大きい時には繰返数と共に減少することが認められた。

こと乍ら全く認めることが出来なかつた。150°で10hr焼戻した場合には Table 1 に示すやうに、薄くではある

Fig. 2 Without pin holes, quenched from 515°.

Fig. 3 Full of pin holes, quenched from 515°.

Fig. 4 Without pin holes.

Fig. 5 Full of pin holes.

に對しては、繰返應力は焼戻と似た効果を與へるものと見て差支ない。次に以上の結果を繰返数と減衰能との關係に直すと Fig. 4 及び 5 (B), (C) の曲線のやうになつて、大體に於て繰返数が増すと共に減衰能は小になることを知つた。

X 線寫眞は連續した環が得られず、斑點の集まりであつたが、ピンホールの多いものと少いものとを比較すると、大體に於て前者の方が斑點の数が多かつた。格子常數は Table 1 及び 2 の如くで、常溫時効させただけでは固溶體の格子のみであつたが、150°で1hr焼戻するとそれよりも格子常數が純 Al (4.0408 Å) に近いものが環の外側に現はれ始め、10hr 焼戻するとこれが増加するが、未だ内側のものに比して薄い。又この程度の繰返應力では繰返應力による格子常數變化は Fig. 6 の如く、當然の

これ等の試料を 150°で1hr又は10hr 焼戻硬化させると、今度は減衰能は初めから振幅に無關係になつて、いづれの場合にも Fig. 2 及び 3 (C) と同じやうな曲線が得られた。從て減衰能に関する限り、常溫で時効させた儘のもの

Table 1 Lattice constants, $\bar{A}$, after repeated stress applied, about 2 kg/mm².

			without pin holes	full of pin holes
quenched from 515°		initial 10 ⁸	4.0313 4.0311	4.0324 4.0326
515° quench, 150° 1 hr temper.	inner ring	initial 10 ⁸	4.0313 4.0316	4.0328 4.0324
	outer ring	initial 10 ⁸	4.0375 4.0377	4.0406 4.0413
515° quench, 150° 10 hr temper.	inner ring	initial 10 ⁸	4.0315 4.0316	4.0336 4.0339
	outer ring	initial 10 ⁸	4.0407 4.0408	4.0404 4.0408
	intermediate phase	initial 10 ⁸	79°45' 79°45'	— —

Table 2 Without pin holes. Lattice constants, $\bar{A}$, after repeated stress, 10 kg/mm², applied.

quenched from 515°		initial 5 × 10 ⁶ fracture	4.0301 4.0305 4.0303
515° quench, 150° 1 hr.	inner ring	initial 5 × 10 ⁶ fracture	4.0308 4.0310 4.0314
515° quench, 150° 10 hr.	inner ring	initial 8 × 10 ⁶ fracture	4.0311 4.0314 4.0327
	outer ring	initial 8 × 10 ⁶	4.0408 4.0415

が中間相によると思はれる斑點も多少現はれた。斑點の形等も繰返應力によつて殆ど變化しないが、只 Fig. 2 の

Fig. 6 Without pin holes, quenched from 515° tempered 10 hr at 150°.

IV. 繰返應力が比較的大なる場合

試料としては $1 \times 5 \times 80$ mm のもので、熱処理は前の場合と全く同様である。この試験片は前述の如く一端固定した時略々 60 サイクルの固有振動をもつてゐるので、商用の交流で振動させて、表面に $\pm 10 \text{ kg/mm}^2$ 程度の繰返應力を与へた。そして先づ繰返應力によつて減衰能が如何に變化するかを測つた。その結果の一部は Fig. 7

Fig. 7

の如くで、減衰能は始め小さく且つこの場合は焼戻したものよりも、焼入した儘のものでも最初から振幅に無関係で、圖の最も下の曲線のやうになつたが、繰返數を多くして既に龜裂のやうなものが入つて破斷に近づく、圖の上の曲線のやうに振幅によつて大に異なるやうになり、破壊直前になると益々この曲線の傾斜は急になる。従て繰返數と減衰能との關係を描くには破壊に近づいた附近では、應力振幅が一定の處をとる必要がある、便宜上振幅 0.4 mm の處をとつてこれと繰返數との關係を描いたものは Fig. 8 及び 9 の如くである。圖から明かなやうに減衰能は初め少しく減少し、次に略々一定の期間が相當長く続き、破壊直前になると急激に増加する。そしてこの時には既に龜裂を生じてゐるのである。これを木谷氏⁽²⁾の軟鋼の振りの場合と比較すると定常状態の附近が少し異なるが大體に於て似た傾向を示すものである。筆者等の場合は減衰能の値が少し大き過ぎるやうであるが、これは主として空氣抵抗によるものであらう。尤も繰返應力が小さい時には試験片が厚かつたので空氣抵抗の影響は比較的少なかつたであらうが、繰返應力が大き

い時には薄い試験片を用ひたので、空氣抵抗の影響が相當に現はれる爲に、焼入した儘のものでも最初から減

Fig. 8 Without pin holes.

Fig. 9 Full of pin holes.

變化したがあまり著しいものではなかつた。そしてその程度は筆者等⁽³⁾の嘗て行つた超デュラルミンの場合に比しても著しくない。又折れ口では斑點の數が少く、著しく擴散してゐるが、それから 2 mm 程度離れると遠い所と大差ない寫眞が得られた。格子常數は Table 2 及び Table 3 の如く繰返應力によつて多少増加する傾向が

Table 3 Full of pin holes. Lattice constants, Å, after repeated stress, 10 kg/mm², applied.

quenched from 515°		initial 1.3×10^7 fracture	4.0302 4.0303 4.0298
515° quench, 150° 1 hr	inner	initial 1.5×10^7 fracture	4.0315 4.0319 4.0322
	ring	initial 1.1×10^6 fracture	4.0313* 4.0311* 4.0315*
515° quench, 150° 10 hr	inner ring	initial 1.1×10^7 fracture	4.0295 4.0297 4.0302
	outer ring	initial 1.1×10^7 fracture	4.0408 4.0402 4.0404

* repeated stress 13.2 kg/mm².

(2) 日本機械學會論文集, 5 (1939), 104.

(3) 田中, 篠田, 高林, 日本機械學會論文集, 6 (1940), 1~37.

あり、折れ口附近では他の部分よりも多少大きいやうであるが、十分確かではない。

V. 總 括

(1) 25Sの減衰能は焼入後常温時効させたものでは振幅と共に大になる。

(2) これに僅かな繰返し荷重を 2×10^7 程度かけると振幅に無関係になる。又 150° で焼戻したものでは初めから振幅に無関係である。

(3) 減衰能はこの程度の小さな繰返應力の作用で次第に減少する傾向がある。

(4) 繰返荷重が大になつて疲労破壊を起すやうな場合には破壊直前に至ると減衰能は振幅と共に急激に増大するやうになる。

(5) 破壊を起すやうな繰返應力下では、減衰能は初め減少し、次に安定な状態が相當長く続き、破壊に近づくとき急激に増加する。

(6) X線写真は小さな繰返荷重下では殆んど変化なく、破壊を起すやうな荷重下でもあまり著しい変化はないが、 5×10^6 回程経た後には多少斑點の形、大いさ等が變化する。格子常数の方は繰返數の多くなつた時及び破断面に近い所では多少大になるらしい。

(7) 疲労及び減衰能に關する限りピンホールの多いものと少いものとの間には何等本質的な差は認められなかつた。

以上の實驗は日本學術振興會及び文部省科學研究費の補助によつてなされたものである。茲に厚く謝意を表す。

アルミニウム合金分光定量分析 に使用するスペクトル線の研究*

門 川 勳** 長 田 欽 也** 青 木 外 茂 三**

Isao Kadokawa, Kinya Nagata, and Tomozo Aoki: An Investigation of the Quantitative Spectrographic Analysis of Al-alloys. The present study has been made for the spectrum lines, most fitted for quantitative spectrographic analysis of Si, Mn, Cu, Ni, Mg, and Fe in the Al-alloy series.

The most suitable line-pairs found are as follows.

Si		Mn	
Si	2435.2/Al 2652.5	Mn	2949.2/Al 2652.5
Si	2519.2/Al 2568.0	Cu	
Ni		Cu	3274.0/Al 3082.2
Ni	3101.6/Al 2652.5	Cu	3247.5/Al 3082.2
Fe		Mg	
Fe	2607.1/Al 2652.5	Mg	2790.8/Al 2660.4
Fe	2598.4/Al 2652.5	Mg	2852.1/Al 2660.4. etc.

(Received August 11, 1941)

I. 緒 言

著者等は嘗つて、鐵鋼に關する分光定量法の實驗⁽¹⁾を報告したが、この度は輕合金の方面に就ての研究結果を報告する。

この度の研究はアルミニウム合金の分光定量分析に際して、如何なる線組を使用すれば良いか、即ち Al を基底元素とするところの Si, Mn, Cu, Ni, Mg, Fe 等の合金に

就て使用可能ならんと考へらるる凡ゆるスペクトル線に就ての組合はせを採つてその定量上の諸要素に關する偏差を求めて、その中使用可能と考へらるる線組を得て、その較正曲線を探つて見たのでその結果を報告する。定量理論、定量操作、その他基礎的問題は既に發表⁽¹⁾したものと略々同様である故にここでは省略することとする。

本研究に於て調査した組成範圍は次の通りである。

Si 7.5~13%, Mn 0.20~1.00%, Cu 0.55~4%

Ni .2~4%, Mg 0.14~2.3%, Fe 0.30~1.50%

即ち標準試料として用ひたアルミニウム合金の組成は Table 1 の如きものである。

** 川崎重工業株式會社製鋼工場

* この研究は昭和 16 年 4 月本學會第 9 回東京大會で講演した。

(1) 門川, 長田; 鐵と鋼, 25 (1939), 1943.