表面効果および切欠効果について*

アルミニウム合金溶接材の疲労について (第1報)

石川 裕** 吉田 晋***

Studies on surface effect and notch effect
on the fatigue of welded aluminum alloys (1st report)
UDC 621.791.01:669:715:620.178.3

ISHIKAWA Yutaka** · YOSHIDA Susumu***

This paper reports the fatigue strength of welded aluminum alloys, mainly based on Al-Zn-Mg systems.

The experiments were conducted on (1) The relation between the method of butt welding and the fatigue strength of parent alloys; (2) The comparison of stress concentration factors between the welds and parent alloys and the study on notch effect; (3) The relation between the cause of large deviations in fatigue strength of welds and surface effect; and others.

The results obtained were as follows.

(1) The fatigue strength of welds with bead was about 50~60% of that of parent alloys (55~65% in case of one side welds and 50~55% in case of both side welds). However, when the bead was removed, the fatigue strength was about 70~75% of that of parent alloys.

(2) The welds can be considered to be notched parent alloys in a broad sense and the reduction factor of fatigue strength of the welds was compared with that of notched parent alloys. Welds without beads corresponded to the notched parent alloy having stress concentration factor of $\alpha_k = 1.68$. Welds with beads corresponded to the notched parent alloy having $\alpha_k = 2.10$ in case of one side welds or $\alpha_k = 3.10$ in case of both side welds.

(3) The deviations in fatigue strength of welds had a close relation with the surface roughness of specimens as well as that of parent alloys. When the bead zone or surface of specimen was polished to the smoothness of within 1.0μ , the range of the said deviations markedly decreased accompanied with the increase of fatigue strength.

(Received Nov. 12, 1966)

1. 緒 言

アルミニウム合金が構造用機として広く利用されているが、特に従来の Al-Mg 系および Al-Mg-Si 系の構造用合金に加えて Al-Zn-Mg 系合金が開発されるにおよんでその傾向は増々盛んになりつつある。これら構造用材のうち、Al-Mg 系および Al-Mg-Si 系合金は開発の歴史も古く、実際の使用例も多い関係上、構造用機としての必要なデータたとえば溶接材の性質、種々の環境下での耐蝕性あるいは疲労強さ、特に溶接材の疲労強さなどが数多く集積されている。これに対して Al-Zn-Mg 系合金は開発の歴史も新しく実際の使用例も少い関係から構造用材として必要とされるデータがごく少い。われわれは今までに、Al-Zn-Mg 系合金の諸特性を調べ^{1,2)}、さらに溶接材の諸性質に関する実験も行ない、その結果の一部はすでに報告した^{3,6)}。今回は構造用材として特に意味の大きい Al-Zn-Mg 系合金の疲労性について、溶接材の疲労強さを中心として報告する。一般

に溶接材の疲労におよぼす因子は、母材の場合に比べて非常に多く、たとえば、J. E. Tomlinson らによるとこれら因子は大別して治金的因子、幾何学的因子および力学的因子の三つに分類され、さらに細分すると治金的因子としては母材の組成と調質、溶加材の組成および熱影響部、幾何学的因子としては継手形状、余盛形状、表面状態および内部欠陥、さらに力学的因子としては荷重の形式、平均応力および残留応力または内部応力などが重要であると言われている。これら数多くの複雑な因子が実際の場合、単独または重複して作用するため余盛のある場合はもちろん、余盛を削除した場合でも溶接材の疲労強さは、いくら機械的性質の優れた母材を用いても、またいくら溶接条件や溶加材をぎん味しても、一定値に飽和しそれ以上の疲労強さの向上は期待出来ないことは前に報告した⁶⁾。また、実験値のバラッキの幅が大きいことは疲労試験に特徴的なことであるが、母材に比べて溶接材の場合にこの傾向がより著しいことはよく知られていることである。これらの事より第1報として突合

* 本研究は軽金属研究会第29回秋期大会講演会にて一部発表

** 古河アルミニウム工業株式会社日光工場 Furukawa Aluminum Co., Ltd., Nikko Works.

*** 古河アルミニウム工業株式会社 Furukawa Aluminum Co., Ltd.

せ溶接方法と疲労強さの関係について調べ、切欠効果の問題と関連させてここで報告する。さらに、われわれは先に Al-Zn-Mg 系合金の疲労強さのバラッキが試験片の表面あらさに大きく影響されること、すなわち表面効果と密接な関係があることについて述べた⁹⁾が、溶接材の疲労における大きなバラッキの原因を表面効果と関連させてじゃっかんの検討を行なったのでその点もあわせて報告する。

2. 実験方法

供試材は、Al-4.5%Zn-1.25%Mg合金（以下試料Aと記す）、Al-4.2%Zn-2.5%Mg合金（試料B）およびAl-4.5%Mg合金（試料C）の3種類で、その化学成分をTable 1に示した。

使用したAl地金は99.7%純度のものを、ZnおよびMgは高純度地金を用い鑄造直前に添加し、その他の添

加元素は母合金を用いて添加した。溶解鑄造は通常行なわれている方法で行ない、半連続水冷鑄造で70×200×700mmの鑄塊を作製した。鑄塊は試料A、B、Cとも450°Cで12hrの均質化処理をほどこし、面削後450°Cに加熱し熱間圧延によって10mm厚板とした。さらにその後冷間圧延を行ない、5mm厚板を作製し、試料A、Bで

Fig. 1 Size of Fatigue test piece.

Table 1 Chemical composition of specimen

Elements	Chemical composition wt%							
	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Al
Specimen A	4.50	1.28	0.004	0.10	0.14	0.14	0.08	Bal
Specimen B	4.21	2.33	0.009	0.10	0.21	0.20	0.08	"
Specimen C	—	4.50	0.019	0.08	0.64	0.21	0.08	"

Table 2 Chemical composition of filler wire.

Elements	Chemical Composition wt %								
	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Al
Filler wire A	2.13	4.01	0.01	0.01	0.50	0.18	0.08	0.12	Bal
Filler wire B	0.013	5.36	0.021	0.12	0.11	0.19	0.062	0.08	"

Table 3 Tensile properties of welds.

Parent Alloy	Temper	Filler wire	Post weld treatment	Tensile properties											
				Bead on						Bead off					
				one side weld			both side weld			one side weld			both side weld		
				T.S. kg/ mm ²	Y.S. kg/ mm ²	Elo- ng, %	T.S. kg/ mm ²	T.S. kg/ mm ²	Elo- ng, %	T.S. kg/ mm ²	Y.S. kg/ mm ²	Elo- ng, %	T.S. kg/ mm ²	T.S. kg/ mm ²	Elo- ng, %
Specimen A	T6	Filler wire A	none	—	—	—	30.3	19.0	14.3	—	—	—	23.8	18.9	6.6
Specimen A	T6	Filler wire A	Nat. Age 30 days	31.4	19.4	6.4	35.5	24.5	10.0	28.9	19.9	9.8	31.9	21.8	6.2
Specimen A	T6	Filler wire A	Nat. Age 90 days	—	—	—	37.5	26.2	11.6	—	—	—	34.8	24.2	9.8
Specimen A	T6	Filler wire A	Art. Age to-T 6	—	—	—	40.3	36.3	6.3	—	—	—	35.9	34.3	3.4
Specimen A	T4	Filler wire A	Nat. Age 30 days	33.0	20.3	8.8	36.3	23.6	12.4	29.4	18.7	8.8	28.2	18.6	6.2
Specimen B	T6	Filler wire A	none	—	—	—	33.1	22.3	13.4	—	—	—	24.1	18.6	8.8
Specimen B	T6	Filler wire A	Nat. Age 30 days	30.3	21.5	12.0	37.0	23.4	12.4	29.1	18.7	8.4	29.6	20.1	8.4
Specimen B	T4	Filler wire A	Nat. Age 30 days	33.9	22.8	9.2	36.1	22.5	12.2	32.0	20.2	9.4	28.0	20.5	5.4
Specimen C	F	Filler wire B	none	—	—	—	31.5	18.0	16.6	—	—	—	29.9	15.5	12.0

は460℃で1hr溶体化処理を行なった後常温30日以上放置あるいは、常温に7日以上放置後120°×48hrの焼戻しを行ない、試料Cでは冷間圧延のままの状態それぞれ溶接用試料とした。

溶接は板を5×100×300mmに切断後開先施工をし、全自動ミグ溶接法で突合せ溶接を行なったが、溶接は片面二層盛および両面一層盛である。溶接条件は、溶接電流240Amp、溶接電圧24 volt、アルゴン流量28l/min、溶接速度70cm/minである。溶接に際しての溶加材はA,Bに対しては、Al-4.0%Mg-2.0%Zn合金(以下溶加材Aと記す)、C試料に対しては、Al-5.0%Mg-0.1%を合金(溶加材B)を使用した。これら溶加材の化学成分はTable 2に示す通りである。

溶接材は溶接後X線透過試験を行ない、JISでB級以上に合格するもののみ静的試験および疲労試験用として採用した。

こうして用意された溶接材は片面溶接、両面溶接材とも余盛あり、なしの状態での疲労試験を行なった。疲労試験片は、J. L. Woodにより推奨されている溶接材用試験片⁹⁾で形状をFig. 1に示す。疲労試験はシエンク式疲労試験機を用いたが、あらかじめストレングージで荷働応力を求め曲げモーメントとの補正を行なつて応力を算定した。

Fig. 2 S-N curves for specimen A-T4 Welded with the Filler wire A.

Fig. 3 S-N Curves for Specimen A-T6 Welded with the Filler wire A.

3. 実験結果

Table 3は試料A,Bを溶加材Aで、試料Cを溶加材Bで溶接した場合の余盛付および余盛削除の状態での機械的性質をまとめて示したものである。

Fig. 2~Fig. 6は、各試料のそれぞれの溶接継手の場合の疲労強さをS-N曲線にまとめて示したものである。片面溶接、両面溶接材を問わず、余盛を削除した場合は母材の70~75%、余盛そのままの時は、片面溶接材で母材の55~65%、両面溶接材では母材の50~55%の疲労強さに減少することがわかる。

Photo. 1はこれら疲労試験における試験片の破断の

Fig. 4 S-N Curves for Specimen B-T4 Welded with the Filler Wire A.

Fig. 5 S-N Curves for specimen B-T6 Welded with the filler wire A.

Fig. 6 S-N Curves for specimen C Welded with the Filler B.

様相を示したものである。**Photo. 1**のうち (a), (b), (e) は試料 A, B すなわち Al-Zn-Mg 系合金溶接材の典型的な破断の様相であり、余盛削除した場合は溶着金属部から、余盛のある場合は母材と余盛の境界部から破断が起っている。特に、負荷応力が高い場合はこの形式による破断が大部分である。ただし負荷応力が低くなると、**Photo. 1** の (d), (e) に示すような位置、すなわち溶着金属部から 10~20mm 離れた熱影響部、または (f) に示すように余盛端と熱影響部の両方から亀裂が入る場合もじやつかんみられた。これは、**Fig. 7** に示す溶接材の硬度分布と関係あると思われる。すなわち、溶着金属部から 10~20mm の位置にかなり大きな熱影響部がみられ、負荷応力が低い場合には、ここが破断の位置になると考えられる。

これら Al-Zn-Mg 系合金の破断の様相に対して 試料

Photo. 1 Typical appearances of fatigue fractures.

Fig. 7 Distribution in hardness of welds.

C すなわち Al-Mg 合金の場合はじやつかん異なってくる。余盛削除した場合は Al-Zn-Mg 合金と同様**Photo. 1**において (a) 示す破断をていするが、余盛ある場合は (c) に示すような破断を示さず、大部分が (e), (f) に示すような熱影響部破断とする。Al-Mg 系合金の破断の位置は負荷応力の大小によって変化しない。

溶接材の場合、余盛のある時は母材と余盛の境界部が大きな応力集中源になることは周知であるが、余盛を削除した場合でも、母材と溶着金属部との組成または組織の相違によるいわゆる冶金の因子による応力集中が考えられる。そういう意味から溶接材にある応力集中係数をもつた一つの切欠材とみなすことが出来るが、こう考えた場合どの程度の応力集中が起るかを推定する意味で、繰返し数 10^7 回の点での母材の疲労強さに対する溶接材の疲労強さの比 K_f を考え、同時にわれわれが以前に報告した⁸⁾ 母材の切欠材についての K_f をまとめて **Table 4** に示した。溶接材と母材切欠材の K_f を比較する際、力学的因子はほぼ同一と考えられるので、冶金の因子が同じであると仮定し、幾何学的因子という点に重点をおいて溶接材と母材切欠材とで K_f を比較すると、余盛削除材では試料 C を除いて形状係数 $\alpha k=1.68$ の切欠材とほぼ等しい K_f の値を、両面溶接余盛付材が $\alpha k=3.10$ の切欠材とほぼ等しい K_f の値ともつことが判り。片面溶接余盛付材の場合は、試料 C では $\alpha k=1.68$ 程度、試料 A, B ではこれより大きく、 $\alpha k=2.10$ 程度の応力集中が

Table 4 Comparison of strength reduction factor of welds with un welded notched specimen.

Specimen	Temper	Welded specimen			Notched parent specimen	
					$\alpha K=1.68$	$\alpha K=3.10$
Specimen A	T 4	0.78	0.66	0.58	0.83	0.56
Specimen A	T 6	0.77	0.58	0.53	0.73	0.48
Specimen B	T 4	0.68	0.58	0.51	0.70	0.53
Specimen B	T 6	0.67	0.52	0.47	0.63	0.40
Specimen C	F	0.71	0.66	0.55	0.67	0.54

Fig. 8 Relation between surface roughness and fatigue strength.

考えられる。溶接材の疲労強さを支配する大きな因子としては、ここで言う応力集中源の存在と溶接時の入熱による熱影響部の存在が挙げられるが、本実験の場合、とくに試料 A, B の場合の疲労破断の位置が、**Photo. 1** に示したように大部分が母材と溶着金属との境界部または溶着金属部であり、母材の熱影響部が関与していない点を考え、試料 A, B すなわち Al-Zn-Mg 合金に限って言えば、余盛削除材の場合、 $\alpha_k=1.68$ 、片面溶接余盛付材の場合、 $\alpha_k=2.10$ 、両面溶接余盛付材の場合では $\alpha_k=3.10$ 程度の応力集中があるとみてよいと考えられる。試料 C については大部分が熱影響部破断であり試料 A, B のように境界部破断を示す試験片と同一に応力集中係数を求めることは問題があると思われるが、J. E. Tomlinson などのいう⁷⁾ 熱影響部も含めた広義の応力集中源という観点から応力集中係数を評価してみた。母材と溶接材との応力集中の比較において、母材では小野式疲労試験機による結果、溶接材ではシエンク式疲労試験機による結果を基にしているが、比較の基準が母材に対する溶接材の疲労強さの比 K_f であることから問題はないと考えられ

る。

われわれは先に、Al-Zn-Mg 合金の疲労強さのパラツキが試験片の表面あらさに大きく影響されることすなわち表面効果と密接な関係があり、試験片表面を 1μ 以上の平滑さに仕上げるとパラツキの幅が少なくなるばかりでなく、**Fig. 8** に示すように疲労強さにもよい影響をもつことを報告した⁸⁾。この表面効果の実験値のパラツキや疲労強さに与える影響は溶接材の場合もかなり大きいと考えられる。**Fig. 9~Fig. 11** は試料 A, B および C について片面溶接余盛付試験片の場合の表面効果を示したもので、いずれの場合も母材と溶着金属の境界部をバフ研磨によって 0.2μ 程度の平滑さに仕上げてある。結果は材質によって程度の差はあるが、いずれの場合も境界部を平滑に研磨することによって疲労強さは上昇し、上昇する度合は切欠感受性の異なるもののほどすなわち試料 C よりも試料 A や B の方が大きな上昇率を示すようである。この場合研磨によつて余盛形状がじゃっかん変り、この影響を考慮する必要があるが本実験では、余盛形状の疲

Fig. 9 S-N Curves for specimen A-T6 Welded with Filler wire A. (Bead on)

Fig. 10 S-N curves for specimen B-T6 welded with filler wire A. (Bead on)

Fig. 11 S-N Curves for specimen C welded with filler wire B. (Bead on)

Fig. 12 S-N Curves for specimen A, B in the condition of as-welded or buffed.

疲労強さにおよぼす影響は無視出来る範囲内で行なっている。この点についての詳しい考察については第2報でのべる。つぎに、実験値のパラツキの巾をみると、疲労破断と密接な関係にある余盛端部を平滑にすることによって、明らかにパラツキの巾は狭くなり一様な結晶を示すことがわかる。

Fig. 12 は試料 A, B を両面溶接した場合の余盛付試験片について、上と同様の結果を示したものである。両面溶接材の場合、母材と溶着金属の境界部を 0.2μ 程度の平滑さに仕上げて、繰返し数 10^7 回またはそれ以上の疲労強さはほとんど上昇しないが、注目すべきことは $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$ 回のいわゆる中程度の繰返し数の範囲で著るしく疲労強さが上昇することである。この傾向は **Fig. 9** ~ **Fig. 11** に示した片面余盛付溶接材の場合にもじゅっかん認められるが、両面溶接材の場合にはは非常に著るしい。また境界部を研磨することによって実験結果のパラツキの巾が少くなることは片面溶接の場合と同様

Fig. 13 S-N curves for specimen A welded with Filler wire A. (Bead off)

Fig. 14 S-N curves for specimen C welded with filler wire B. (Bead off)

Table 5 Notch sensitivity of specimen.

Specimen	Temper	Tensile Strength kg/mm ²	Notch sensitivity	
			$\alpha_k = 1.68$	$\alpha_k = 3.10$
Specimen A	T 6	39.1	0.60	0.75
Specimen B	T 6	49.7	0.68	0.76
Specimen C	F	30.6	0.56	0.62

である。

つぎに、余盛を削除した場合の同様の結果を試料 A と C について示したのが、**Fig. 13** ~ **Fig. 14** である。余盛を削除した場合は両面余盛付溶接材の場合と比較して傾向はむしろ逆で、繰返し数 $10^4 \sim 10^5$ 回程度の低繰返し数の範囲では、研磨したことの効果は少いが繰返し数が大になるにつれてその効果が明確になり、 10^7 回の点では $1 \sim 1.5 \text{ kg/mm}^2$ の疲労強さの上昇がみられる。この場合も境界部を平滑に仕上げることによって実験値のパラツキの巾が小さくなることは前二者と同様である。

以上の結果が示すように、余盛付材または余盛削除材を問わず、溶接材においても母材の場合と同様疲労強さのパラツキが表面効果と密接な関係があること、すなわち試験片表面を 1.0μ 以上の平滑さに仕上げるとパラツキの巾は著るしく少くなることがわかったが、このようにすれば溶接材の疲労強さを上昇させることも可能である。

4. 考 察

余盛付溶接材において、母材と溶着金属の境界部が大きな応力集中源となり、疲労強さの低下をもたらすことは周知の事実であるが、この部分にどの程度の応力集中が起るかについては、片面溶接材で主に Al-Mg 系合金で J. Koziarski¹⁰⁾, G. Jacoby¹¹⁾, J. L. Wood⁹⁾ などの実験があり、光弾性実験による J. Kozidrski の結果では 1.33, ラツカー塗装法で測定した G. Jacoby の結果では 1.25 であり、実際に NP5/6 (試料 C 相当合金) について繰返し曲げ荷重下で求めた J. L. Wood の結果では 1.53 であったと報告している。本実験で Wood の方法と同じく片面溶接余盛付材について、繰返し曲げ荷重下で求めた応力集中係数は、試料 A, B の Al-Zn-Mg 合金では $\alpha_k = 2.10$ 程度で従来の結果よりかなり高い。これは主として材質のちがいによるものと考えられる。すなわち、**Table 5** にみるように引張強さの高いものほど切欠に対する感度が高い。換言すれば応力集中に対して敏感であり、Al-Mg 合金より機械的性質の優れている Al-Zn-Mg 合金で大きな応力集中が起る結果に基くものと考えられる。

つぎに疲労試験において、母材でも溶接材でも試験片表面を平滑に仕上げると、実験値のパラツキの巾が少く

なると共に疲労強さが上昇することが判ったが、これは主として仕上げ痕による切欠効果が減少すること、研磨に伴って生ずる残留応力が疲労により影響をもつことの2つにより、溶接材の場合は余盛端部を平滑にして境界部の応力集中を少くする効果なども考えられる。表面を平滑にすると疲労強さにより影響を示すことは **Fig.8** から判る通りであるがこの表面効果と共に研磨することによって試験片の表面に生ずる残留応力がかなり効果があると考えられる。H. R. Lenter などの実験¹²⁾では、機械研磨やバフ研磨では、試験片の表面層の 0.01~0.05 mm の深さに相当大きい圧縮残留応力が生ずると言われ、この圧縮残留応力が疲労により影響をもつことは広く認められており、現にショットピーニング¹³⁾や溶接部にあらかじめ引張応力を加え¹⁴⁾て人工的に残留応力を生ぜしめて溶接材の疲労強さを向上させる手段もとられているほどである。

5. 結 論

(a) 溶接材においても疲労強さのバラツキは表面効果と密接な関係があり、母材と溶着金属の境界部または試験片表面を 1.0μ 以上の平滑さに研磨するとバラツキの幅は著しく少くなる。また、これに伴って溶接材の疲労強さも上昇する。

(b) Al-Zn-Mg 合金溶接材のような疲労破断が余盛または溶着金属と直接関係する場合、溶接材を1つの切欠

材とみなすことが出来るが、こう考えた場合の応力集中は、余盛削除した場合で $\alpha_k=1.68$ 、片面溶接余盛付材で $\alpha_k=2.10$ 、両面溶接余盛付材で $\alpha_k=3.10$ の応力集中係数をもつ切欠材と同程度であると考えられる。

最後に、疲労試験に当り種々ご協力下さった飯島 克己、館野弘、沖田富晴の三君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷, 石川 : 軽金属 **14** (1964) 5
- 2) 谷, 石川 : 軽金属 **15** (1965) 11
- 3) 谷, 石川 : 軽金属 **15** (1965) 140
- 4) 石川 : 古河電工時報 **36** (1965) 1
- 5) 谷, 石川 : 軽金属 **15** (1965) 92
- 6) 谷, 石川, 吉田など : 古河電工時報 **39** (1965) 47
- 7) J. E. Tomlinson et al: Brit. welding Jr. **7** (1960) 250.
- 8) 石川, 吉田 : 古河電工時報 **40** (1965) 31
- 9) J. L. Wood: Brit. welding Jr. **7** (1960) 365.
- 10) J. Koziarski: Welding Jr. **34** (1955) 446.
- 11) G. Jacoby: Aluminium **38** (1962) 309.
- 12) H. R. Lenter et al: Proc. ASTM **57** (1957) 61.
- 13) G. E. Nordmark: Metal Progress **83** (1963) 101.
- 14) A. Matting et al: Schiff und Hafen **4** (1965) 17.