説 解

アルミニウム合金溶接継手の疲労 に関する最近の趨勢*

竹内 勝治**

Recent tendency for fatigue of aluminum weld joints*

Katsuzi TAKEUCHI**

1. はじめに

最近、我が国では鉄道車両、小型船舶を始めとしてアルミニウム溶接構造物の実績が高く評価され、これと関係して溶接継手の疲労強度がますます重要視されるようになってきた。いつぼう、欧米諸国においては疲労関係も含めてアルミニウム溶接構造規格の再検討が行われており、かつ欧米間の規格の差を少しでも解消しようとする試みがある。また、公表された溶接継手の疲労データを統計的に処理して疲労設計規格作成および研究者の利用に便宜をはかろうとする国際的な委員会 (CAFDEE) も設立された。

著者は本年5月24日～26日にわたり西独 München 市で開催された第2回「アルミニウム溶接物国際会議」の概要について既に報告¹⁾したが、本報は同会議における疲労関係発表論文から最近の趨勢についてまとめたものであり、CAFDEE と S-N 曲線の評価方法、疲労設計規格の再検討、疲労強度の改善、および各種溶接継手の疲労強度等について述べる。

2. CAFDEE と S-N 曲線の評価方法

2.1 アルミニウム疲労データ交換・評価委員会 (CAFDEE) の活動状況

最近10年間にわたり、米国アルミニウム協会 (AA) の援助により溶接研究協議会 (WRC) のアルミニウム合金委員会が溶接継手の疲労データを広範囲に集め、その疲労データバンクが米国 Iowa 州立大学に設けられていた。これが発展して、昭和55年に国際的な委員会 Committee for Aluminium Fatigue Data Exchange and Evaluation (CAFDEE) が設立され、オーストリア、カナダ、英国、イタリア、日本、ノルウェー、スイス、西独、米国

の9か国が参加し、その目的と活動範囲について R. A. Kelsey らが報告²⁾している。我が国が CAFDEE に加入した経緯およびその活動状況については別に報告³⁾があり、軽金属溶接構造協会「アルミニウム接合部疲労データ調査委員会」が国内における疲労データの収集・整理を行っている。

CAFDEE の目的は、「アルミニウム構造物および部材の疲労負荷について設計規格を作成する組織や、この分野で活動する研究者が使用し得る継手の疲労データを収集・解析する」ことで、必要に応じて適切な設計規格の開発に要する試験を規格作成組織に勧告することである。現在までに、およそ12,000個の実験点からなる1,100以上のS-N曲線が収集されており、Table 1 に示す²⁾。これらのデータはミグおよびティグ溶接技術の普及が始まった昭和29年以降に刊行された250編余の論文と報告書から収集したもので、Table 2 に論文の出所と時期的分布を示した。

各試験結果に対して疲労データバンクに入れてある情報は次のようであり、コンピュータ化されている。

疲労データの出典

アルミニウム合金の種類*

Table 1 Aluminum Alloys Represented in CAFDEE Data Bank.²⁾

Series	No. of Test Programs	No. of Data Points
2000	57	480
3000	3	36
5000	720	7315
6000	160	1415
7000	165	2570
(Total)	(1105)	(11816)

* 昭和57年8月30日軽金属学会関西センターにて発表。

** 住友軽金属工業株式会社技術研究所。

Table 2 Sources of Data in the CAFDEE Data Bank.²⁾

a) Published Reports

Country				Period	
Austria	5	Italy	6	1954~1959	4
Belgium	1	Japan	18	1960~1964	26
Canada	1	Norway	3	1965~1969	25
C.S.S.R.	1	U.S.S.R.	22	1970~1974	47
France	5	Sweden	5	1975~1979	70
F. R. Germany	40	Switzerland	1	1980~1982	22
Great Britain	18	U.S.A.	52		
Hungary	5	(Total)	(184)	(Total)	(184)

b) Unpublished Reports (U.S.A.)

Private Labs	47	} (Total 75)
Government Labs	13	
Government Contracts	15

Fig. 1 Plotted data for 6351-T6 butt welds.²⁾

耐力および引張強さ*

試験片の形状と寸法*

継手の形式*

溶接条件*

特殊処理および試験環境*

厚さ*

疲労試験結果 (最大応力, 最小応力, 応力範囲,
破壊に至る繰返し数)

上記において, *印のついたもの (変数) のいかなる組合せもバンクから抽出可能であり, 出典も含めて試験シリーズ変数に関するすべての情報と, 制限のない場合は個々の試験データを提供できる。すべてのデータは解析されており, 応力と破壊に至る繰返し数から直線回帰

最小二乗線を求め, その線の方程式, 推定標準誤差, 相関係数を, 破壊に至る繰返し数 (対数) および下記をもとにして提供する。

(a) 最大応力 (直線的)

(b) 応力範囲 (")

(c) 最大応力 (対数)

(d) 応力範囲 (")

さらに, 要求のある場合は両対数表示で **Fig. 1** のようにデータを図示し, 最小二乗線および95%信頼限界線も表示する。

以上が CAFDEE の活動状況であり, 今後も溶接継手の疲労データの収集・解析を継続するが, さらにボルト継手, 接着剤継手, 疲労き裂進展データも収集の予定で

Fig. 2 Typical set of fatigue data.⁴⁾

ある。

なお、CAFDEE の問題点の一つは統計的解析と S-N 曲線のモデル化の手法であり、これに関しては2.2項で述べる。他の問題点は、収集した疲労データの殆んどが小規模な研究室的試験片によるものであつて、実際の溶接構造物継手に利用し得るものがごく僅かなことである。研究室的試験片は継手の前処理、溶接手順、局部溶接処理、環境および負荷履歴等の溶接特性が疲労強度に及ぼす影響を評価するのに適するが、これらのデータが溶接残留応力を持ち、また二次的な曲げ応力を受ける実際の溶接構造物の挙動をいかによく表すかについては余り明確でない。データバンクにはトラスおよび橋梁部材について限られたデータがあるが、さらに実物大継手に関するデータが要求されている。

2.2 S-N 曲線の評価方法

CAFDEE の問題点の一つは前述したように収集した疲労データの統計的解析と S-N 曲線のモデル化の手法であり、W. W. Sanders, Jr., S. J. Maddox, D. Kostas が小委員会を組織して CAFDEE データバンクに使用する手法を検討した。それと関係して米国における疲労データの評価原則、英国における評価の経験および西独における S-N 曲線の評価方法等が発表⁴⁾されている。

1) 米国における疲労データの評価原則

米国では ASTM E468 “金属材料一定応力振幅疲労試験結果表示方法推奨規格(1976)”，同 E 739 “応力-寿命 (S-N)，ひずみ-寿命 (ϵ -N) 疲労データの直線的表示による統計的解析方法(1980)” および陸軍規格 MIL-HDB K-5 C “航空宇宙機体構造用金属材料と部材(1976)” の

3 規格が疲労データの評価方法として用いられている。

E 468 は定応力疲労試験で、アルミニウム合金溶接継手の疲労の基礎として用いられているが、疲労データの解析は実験者の提供する情報、例えば母材の材質と規格、強度、表面状況、溶接条件と余盛形状、試験条件等に影響を受ける。E 739は統計的手法によつて S-N 曲線を解析するもので、応力 S を一定とした場合、破壊までの繰返し数 N は対数正規分布と仮定する。これによつて破壊確率 S-N 曲線が得られたとしても、その S-N 曲線は最小二乗法による線に平行でなく、かつ信頼限界は95%までといえる。Weibull 分布が疲労データに適用でき、かつ突出したデータや保留する実験結果があるとすれば、Maximum Likelihood Method による解析が必要と述べている。MIL-HDBK-5C は荷重または変位調節試験装置を用いて $N=10^3 \sim 10^7$ の間で破壊する疲労データから解析しようとするもので、アルミニウム合金溶接継手に適用する場合は基準となる S-N 曲線が重要となる。

2) 英国における設計用疲労データ評価に関する経験

英国における疲労データの統計的解析方法としては BS 2846 “データの統計的処理(1976)”および E. S. D. U. Data Sheet Numbers 68,014~68,017(1968)”がある。これらは設計規格の基礎を得るために出典の異なるデータを解析するというよりも、充分に限定かつ調節された条件下における特殊な設計のためのものといえる。IIW の第18委員会のワーキング・グループ1は下記の3条件について疲労データの統計的解析を検討しており、まだ最終結論に至っていないが、これらの処理に当つて単純な統計的手法を見出していない⁵⁾。特に最大の問題とな

Fig. 3 Situation requiring correction of slope of S-N curve fitted to all data.⁴⁾

Fig. 4 Normalized S-N curve.⁴⁾

っているのは下記の(c)の場合であり、設計規格の作成においてその評価を欠くことができないからである。

(a) 同じ試験片で、同じ研究所で試験された多くの結果

(b) 同様の試験片で応力集中が(a)より大きく、主として一研究所で長年にわたり得られた多くの結果

(c) 同様な試験片で長年にわたり多くの異なつた研究者によつて得られた結果

疲労データ解析における基礎は両対数表示で S-N 曲線を直線、N は対数正規分布として最適の回帰直線を検討するわけであるが、Fig. 2 に示すように耐力を越える部分と疲労限度に近いところが直線にならないという問題がある。

次は出典の異なる疲労データを解析する場合、各標本が同一母集団に属するとみなして差支えないか、という問題がある。鋼溶接継手で同じ形状、同じ負荷条件から得た数種のデータを解析すると、Fig. 3 に示すように個々の標本の S-N 曲線の傾斜と同一母集団とみなした場合のそれとが異なつた例がある⁶⁾。アルミニウム溶接物は平均応力、溶接で生じた残留応力の影響および平均応力がある場合のき裂進展速度感受性が大きいという報告⁷⁾があるため、鋼溶接物の場合より前述したような例が表れやすいと考え、これらの影響について S-N 曲線の傾斜との関係において解説している。また同じ集団のデータで注意を要するのは板厚の相違、溶接線の配列と目違い、試験環境である。

3) 西独における S-N 曲線の評価方法

疲労試験の計画や解析に関し規定された勧告や規格はなく、また疲労試験は高度の経験と経費を必要とするので数少ない研究所で伝統的に実施されている。最近、注目をあびているのは E. Haibach⁸⁾ による“標準化 S-N 曲線”であり、主として鋼溶接継手の疲労データの評価に用いられ、Fig. 4 に示す。この評価方法はドイツ鉄鋼委員会 (DAST) の疲労分科会で数年前から原案を検討している。

アルミニウム合金溶接継手の疲労データが合金の相違、溶接手法その他によつて比較的大きな散らばりをも

Table 3 Alloys covered by CP 118.¹⁰⁾

CP 118	Alloy Aluminum Association	Covered by Fatigue Rules ?
H30	6351	Yes
N8	5083	Yes
H20	6061	Yes
H15	2014	Only unwelded members.
H17	7020	Yes
N4	5052	Yes
N5	5154	Yes
N6	5056	Yes
H9	6063	Only welded members.

つことは 1960 年代の実験において既知であり⁹⁾、当時の ASTM 推奨方法を一部だけ参考にして統計的因子の検討、回帰分析、P-S-N 線図等も求められた。現在、統計的回帰分析手法はコンピュータ・プログラムにまとめてあり、P-S-N 線図とともに解析データをプロットするようになっていいる。なお、Max. Likelihood Method も含めて最近の統計的解析の動向について触れているが、省略する。

3. 疲労設計規格の再検討

3.1 英国における疲労設計規格の問題点

英国ではアルミニウム溶接構造に関して 3 規格 (BS CP 118: アルミニウムの構造物への使用, BS 5500: 火なし溶融溶接圧力容器, BS PD 6493: 溶融溶接継手の欠陥受入れ水準の誘導に対する指針) があり、現在、改正を検討中という。S. J. Maddox¹⁰⁾ は各規格の特色と改正される動向を鋼構造規格との関連において述べている。

1) BS CP 118 アルミニウムの構造物への使用

CP 118 は照明柱、圧力容器を除く各種構造物へのアルミニウム合金の使用を規定したもので、1969 年に公表、1973 年に改正されている。Table 3 は合金の種類と疲労設計応力の規定の有無を示す。

CP 118 は一般の疲労設計規格と同様、溶接継手に対して級別システム区分を採用しており、類似の疲労強度をもつ溶接継手類はある級に集め、疲労強度が低下する順に 1 ~ 9 級としており、1 級は母材である。この級別システムを広範囲のデータから詳しく解析されている鋼溶接継手の設計規格^{11), 12)} のように改正すべしというのが Maddox の提案である。その理由は鋼とアルミニウムの相対的疲労強度が同じと仮定できるからであるが、現実には鋼溶接継手の級別システムを与えている BS 5400 と Table 4 に示すように異なつていいる¹¹⁾。これらに関しては 3.2 項で述べるが、CP 118 を改正する場合には鋼溶接継手に用いられている級別線に沿つて詳しい提示が必要

Table 4 Comparison of Classification Systems in Aluminium and Steel Rules.¹⁰⁾

Description of detail	Class	
	CP 118	BS 5400 ¹²⁾
Plain material, finished edges.	1	A/B
Longitudinal butt welds, ground flush.	2	B
Transverse butt welds, ground flush.	2	C
Continuous longitudinal butt welds without stop/start.	3	C
Transverse butt welds, good overfill shape (height limited to 3 mm in CP 118; good shape achieved by choice of welding procedure in BS 5400).	3	D
Continuous longitudinal fillet welds without stop/start.	4	C
Transverse butt welds without overfill height/shape limitation.	4	E
Transverse butt welds made from one side.	5	No included
Transverse butt welds made on permanent backing strips attached with full-length fillet welds.	5	F
Transverse non-load-carrying fillet welds.	5	F
Cover plate on beam flange.	5	G
Transverse butt welds made on permanent backing strips not attached with fillet welds.	6	F
Transverse load-carrying full penetration weld in cruciform joint.	6	F
Transverse load-carrying partial penetration or fillet weld in cruciform or lap joint (weld toe considered).	6	F2
Transverse load-carrying full penetration weld in T-joint.	7	F
Transverse load-carrying partial penetration or fillet weld in T-joint (weld toe in stem considered).	7	F2
Continuous longitudinal fillet welds with stop/start.	7	D
Discontinuous longitudinal non-load-carrying fillet or butt welds.	8	E
Web to flange weld at cope-hole.	8	F
Fillet welded web stiffeners.	8	E
Longitudinal non-load-carrying fillet welds.	8	F or F2 if attachment more than 150 mm long.
Attachment to edge of stressed member.	8	G
Transverse load-carrying partial penetration or fillet welds (weld throat considered).	8	W
Longitudinal load-carrying weld.	9	G

で、溶接継手に発生するき裂の位置は **Fig. 5** に示すようにそれぞれあつて、その使用設計 S-N 曲線が異なることによる。

疲労設計応力は $N=10^5 \sim 10^8$ にわたって最大応力 $\sigma_{\max}$ と応力比 $R(=\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ で示されているが、 $R=(\sigma_m - \sigma_a)/(\sigma_m + \sigma_a)$ と定義すべきであると主張している。 $\sigma_{\min}$ は最小応力、 σ_m は平均応力、 σ_a は応力振幅である。CP 118 における R の影響は級別と繰返し数によつて異なっている。例えば、 $N=2 \times 10^6$ の σ_a は $R=0$ から 0.5 まで約 20% 低下し、 $R=0$ から -1 まで 40% 以上増加し

ている。しかし、鋼構造規格が再検討したように、アルミニウム合金溶接継手の疲労強度に及ぼす R の影響は見直す必要があると述べており、現行規格作成の基礎となつた疲労試験片が実際の溶接構造物で予測される引張残留応力とくらべて余りにも小さすぎる値をもつものであつたことに誤解の原因がある。

CP 118 における疲労設計応力を S-N 曲線で表示したのが **Fig. 6** である (図中の級別は Table 4 参照)。規格は $N=10^8$ における値より低い負荷応力を無視できるとしているが、実際の変動荷重下ではその応力が重複され

Stress	Possible sites for fatigue cracking	Class
σ_z	Weld toe in plate A	7
σ_y	Weld toe in plate B	7
	Weld throat	8
σ_z	Weld ripples in continuous automatic weld	4
	Stop/start in continuous weld	7
	Weld end if discontinuous weld	8
	Weld end if short weld	8

Fig. 5 Example of welded joint classification in BS CP118 (1969).¹⁰⁾

て損傷を与えるから、鋼構造規格¹²⁾が採用しているように S-N 曲線の外挿 ($N=10^7$ で S-N 曲線の傾きを変え)を考慮する必要がある。また、 $N=10^5$ 以下への外挿をひずみによる低サイクル疲労き裂発生観点から認めていないが、これも不必要な制限であつて静的設計応力限界 (静的許容応力) が保証してくれよう。仮に応力集中により局部的な塑性ひずみが発生したとしても、降伏現象は周囲の弾性材料によって制限を受ける^{13),14)}ので、S-N 曲線を適用できる。なお、累積損傷比に関しては鋼と同様 $\sum n/N \leq 1$ を用い、特に変更する理由もないが今後の研究が必要であると述べている。

2) BS 5500 火なし溶融溶接压力容器

BS 5500 では、1981年からアルミニウム製压力容器の疲労設計が付録 C に記されており、以前は鋼製容器のみであつた。しかし、全体の付録事項について見直し中であり、将来変更されて鋼構造規格¹²⁾と同じようになる可能性がある。

疲労設計規格の考え方は ASTM 規格と同じであり、材料の S-N 曲線は応力集中 (溶接継手も含めた構造的不連続) と関連して用いる。突合せおよび隅肉溶接の余盛端の応力集中率は少なくとも 2.5 と仮定し、仕上げた場合はそれより小さくする。設計 S-N 曲線は鋼のそれを縦弾性係数の比 3 で除して得ており、100°C 以下の使用に限定している。

Fig. 6 Set of design S-N curves for $R=0$ from BS CP 118 (1969).¹⁰⁾

3) BS PD 6493 溶融溶接継手の欠陥受入れ水準の誘導に対する指針

構造物の疲労強度は溶接欠陥の存在によつてもつとも影響を受けるが、アルミニウムに関するものも含めて多くの研究結果は突合せ継手における気孔とか介在物の存在が溶接止端の影響にくらべると小さくて無意味なことを示している。このような現状から、溶接欠陥受入れ水準は構造物の性能に及ぼす欠陥の影響に基礎をおき、目的に適合するアプローチが要求される。PD 6493 はフェライトおよびオーステナイト鋼、アルミニウム合金の溶接物に適用され、き裂状 (平面的) 欠陥と非平面状欠陥の両者について疲労と不安定破壊の観点からの評価が可能である。

隅肉溶接その他多くの溶接をもつ構造物の疲労強度に関して欠陥の影響を評価することは、溶接継手の一般設計規格 BS 5400¹²⁾と関係する。この規格には溶接継手の級別 S-N 曲線が示されており、PD 6493 を用いると各級別に相当する欠陥サイズの見当をつけることが可能で、これを品質範疇という。アルミニウム合金溶接継手を検討する場合、鋼の疲労設計応力を 3 で除すればよいが、得られた S-N 曲線は現行 CP 118 と異なっている (Table 4 参照、CP 118 は改正されて同じ級別表示となろう)。アルミニウムの場合の非平面状欠陥水準と相当する疲労強度の関係を Table 5 に示す。平面状欠陥の影響は単純に表示できないが、中央位置欠陥の例を Fig. 7 に示す。

Maddox は以上の検討結果から、各規格間に考え方と設計応力に相違がなく、かつ鋼とアルミニウムの規格が相似であることが必要と述べている。

3.2 疲労設計規格の再検討と提案

鋼構造疲労設計規格が最近改正されたこと^{12),15)}と関連して ECCS (欧州鉄鋼構造製品代表者会議), IIW, BSI 等もアルミニウム合金溶接構造規格の制定もしくは改正を考慮中であり、3.1 項と関連して S. J. Maddox は鋼構造疲労設計規格がアルミニウム合金に利用できないかという提案をしている¹⁶⁾。その理由として、アルミニウ

Table 5 Acceptance Levels for Non-planar Welding Defects from BS PD 6493.¹⁰⁾

Quality Category	Equivalent Class (see Table 4)	Constant in S-N Curve ⁽¹⁾	Maximum length of slag inclusion ⁽²⁾ , mm	Maximum buried porosity levels	
				% of area of radiograph ⁽³⁾	Individual pore diameter, mm.
Q0	above D	$> 5.65 \times 10^{10}$	1.5	0	0
Q1	D	5.65×10^{10}	2.5	3	Lesser of 6 mm or thickness/4
Q2	E	3.84×10^{10}	4	3	"
Q3	F	2.35×10^{10}	10	5	"
Q4	F2	1.60×10^{10}	35	5	"
Q5	G	0.91×10^{10}	No maximum	5	"
Q6	W	0.56×10^{10}	"	5	"
Q7	<W	0.37×10^{10}	"	5	"
Q8	"	0.23×10^{10}	"	5	"
Q9	"	0.14×10^{10}	"	5	"
Q10	"	0.09×10^{10}	"	5	"

(1) Equation has form (stress range in N/mm²)³N=constant.

(2) Tungsten inclusions do not affect fatigue strength and need not be considered.

(3) 5% is set as the minimum acceptable level to ensure that more important defects are not masked by porosity during inspection.

Fig. 7 Curves relating planar defect size and fatigue strength for defect at mid-thickness from BS PD 6493 (1980).¹⁰⁾

ム合金溶接継手の疲労寿命は疲労き裂の進展に支配され^{7),17)}, 結果的にみて溶接されたアルミニウム合金と鋼の疲労挙動に影響する因子は全く同じであるから, 両者

のき裂進展速度の相違に従って設計応力を調整すれば鋼構造疲労設計規格をアルミニウム合金溶接継手に適用できる可能性がある。両者の疲労き裂進展データは $\Delta K/E$ において関係がある^{18),19)} から, 鋼の疲労設計応力を 3 で除すればよいこととなり, この置換に Maddox は次の仮定を設けている。

仮定 1 : アルミニウム合金溶接継手の疲労強度は鋼の同じ継手に対する値の 1/3 である。

仮定 2 : 溶接継手の相対的疲労強度は鋼とアルミニウム合金と同じである。

仮定 3 : アルミニウム合金構造物の溶接継手は, 負荷応力と組合せた場合に疲労強度が平均応力に無関係となしめるような効果をもつ高引張残留応力をもっている。

仮定 4 : アルミニウム合金溶接継手の疲労限度は同じ形状の鋼溶接継手の値の 1/3 である。

仮定 5 : アルミニウム合金と鋼の同一形状溶接継手の疲労データのばらつきは同じである。

仮定 6 : 最大負荷応力が静的最大設計応力に等しくなるまで, 引張強さに関係なく, すべての合金に対して同じ設計 S-N 曲線を用いる。

以上の各仮定について文献その他からその妥当性を述べている。仮定 1 は, 大部分の場合, 溶接継手の疲労寿命は疲労き裂の発生面が問題となるよりもき裂の進展からなりたっており, 疲労き裂進展速度 da/dN は鋼とアルミニウム合金と同じで $\Delta K/E$ (ただし, ΔK は応力拡大係数範囲, E は縦弾性係数) と関係がある。Fig. 8 に示す^{7),20)}

ように類似の引張強さをもつ材料のそれは同じであり、したがって、仮定1が成立する。

問題は仮定3であり、溶接したままの鋼継手は降伏点の大きさに近い高引張残留応力が存在している。これに繰返し荷重を重複することは、応力振幅は同じであるが高引張平均応力下における負荷となる。鋼のき裂進展速度は引張負荷では平均応力と無関係であるから、最近の疲労設計規格は応力振幅に基礎をおいている^{12), 15)}。アルミニウム合金の場合は、溶接による母材の引張強さの

Fig. 8 Comparison of fatigue crack propagation data for Al-Zn-Mg alloy and structural steel obtained under a range of stress ratios ($R = -2$ to 0.5), plotted in terms of stress intensity factor based on tensile part of cycle divided by the elastic modulus, $\Delta K_I/E$.¹⁶⁾

低下と耐力程度までの残留応力の発生、き裂進展速度が鋼の場合よりも平均応力に敏感である²¹⁾という2点から、鋼溶接継手のように単純ではない。

残留応力の測定例は比較的少ないが、Al-Mg^{22), 23)}およびAl-Zn-Mg合金の溶接継手で 150 N/mm^2 程度の引張残留応力があるとみなされ、この程度の大きさであれば部分片振りか片振り以上で、疲労強度は負荷平均応力に関係がない^{22), 24)}といえる。

次に、残留応力の大きさに影響するのは拘束条件であり、溶接継手の幾何学的形状と寸法が重要となる。一般に用いられている溶接継手疲労試験片は小さすぎて、実際の溶接構造物におけるような高引張残留応力をもつておらず、平均応力の影響についても誤解を与え勝ちで、実際の構造物継手の疲労寿命を過大評価する。**Fig. 9**～**10**は5083合金の横方向または長手方向突合せ溶接継手の例を示す。**Fig. 9**の場合、負荷方向における残留応力の大きさは試験片の厚さと密接な関係があり、**Fig. 10**においては試験片の幅が影響する。 R の影響は**Fig. 9**においては試験片の厚さの増加と共に減少し、**Fig. 10**の場合は殆んどない。**Fig. 9**における疲労強度の差は幾何学的板厚効果ともみられるが、横方向突合せ継手でその効果が大きくなるとは考え難いので、残留応力の大きさに及ぼす試験片寸法の影響とみなされる。溶接構造物は様々な形態をもち、実際に発生している残留応力を測定することは不可能である。したがって、高引張残留応力が常に存在すると仮定するのが現実的で、かつ安全である。疲労設計応力は高引張残留応力をもつのに十分な大きさの試験片による疲労データ、もしくは引張片振り、好ましくは高平均応力をもつ場合のそれに基礎をおくべきである。

鋼溶接継手に対する疲労設計規格¹²⁾は前述したように級別システムを用い、類似の疲労強度をもつ溶接継手は同じある等級で同一設計S-N曲線をもつとみなす。仮定2から同じ級別システム合金をアルミニウムに対しても

Fig. 9 Fatigue test results for transverse butt welds in 5083 alloy illustrating effect of stress ratio and thickness.¹⁶⁾

Fig. 10 Fatigue test results for longitudinal butt welds illustrating effect of stress ratio and thickness.¹⁶⁾

Fig. 11 Proposed design S-N curves for welded aluminium alloys.¹⁶⁾

Fig. 12 Fatigue test data for transverse butt welds.¹⁶⁾

適用し、これは仮定 1 に従って 3 で除した応力値であり、試験片からのデータと実際の構造物によって代表されるものの条件によって設計 S-N 曲線で比較検討する必要がある。提案している設計 S-N 曲線は BS 5400¹²⁾ の鋼溶接継手のそれを単純に 3 で除したもので、Fig. 11 に示し、これを CP 118 に適用 (Table 4 参照) しようとするものである。Fig. 12~15 は提案 S-N 曲線と現行 CP118

のそれとの比較例で、文献データと併せて表示してある。

3.3 突合せ溶接継手の欠陥と規格

突合せ溶接継手の欠陥 (溶接部における外面および内部における幾何学的不連続、例えば前者は余盛の形状、過度の目違い等、後者はき裂、気孔、引け巣等の内部欠陥をさす) は疲労強度に重要な影響を及ぼすわけである

Fig. 13 Fatigue test data for beams with fillet welded stiffeners or surface attachments.¹⁶⁾

Fig. 14 Fatigue test data for plates with transverse non-load-carrying fillet welded attachments.¹⁶⁾

Fig. 15 Fatigue test results for transverse load carrying welds failing across weld throat.¹⁶⁾

が、現行規格はその許容範囲が量的にいかにか影響するかを表示していない。板厚 2 mm の場合における欠陥の許容範囲を DIN 29595, Part 2 (航空宇宙機器用溶融溶接金属部材, 技術基準—許容欠陥), DIN 8570, Part 4 (溶接構造一般公差, アルミニウム構造の突合せおよび隅肉溶接), および DVS 1611 (鉄道車両構造の X 線判定—アルミニウム合金溶融溶接) から要約すると Table 6 に示す²⁵⁾

ようである (Fig. 16 参照)。U. Krüger ら²⁵⁾ は輸送関係に用いられるアルミニウム溶接構造材として厚さ 2 mm の AlZn 4.5 Mg 1 F 35, AlMgSiCu (6061-T6) 合金を対象とし、溶加材は S-AlMg 4.5 Mn, ティグ突合せ溶接で各 20 種類の試験片シリーズを製作して、これらの点を検討している。なお、実験内容の詳細は別に報告されており²⁶⁾、その内容は“非直線的”統計解析と“標準化

Table 6 Permissible Discontinuities of Welds on 2 mm Aluminium.²⁵⁾

Discontinuity	DIN 29595 part 2	DIN 8570 part 4	Merkblatt DVS 1611
Reinforcement $\Delta a'_1$	Max. 2.2 mm	Max. 2.45 mm ($b_1=9$ mm)	—*
Excessive Penetration $\Delta a'_3$	Max. 2.2 mm	Max. 3.15 mm ($b_2=6.5$ mm)	—
Weld Width b_1	Min. 4.0 mm	—	—
Misalignment e	Max. 0.45 mm for plain sheets max. 0.70 mm for curved sheets	Max. 0.20 mm	—
Angular Contraction β	—	—	—
Root Concavity $\Delta a'_4$	Inadmissible	Inadmissible	—
Pores	Max. 0.6 mm dia. (single)	—	Max. 0.6 mm dia. (single)
Cracks	inadmissible	—	Inadmissible
Tungsten Inclusions	Max. 1.0 mm dia.	—	Max. 0.6 mm dia.

* Not defined

Fig. 16 Sketch for measuring of fatigue specimens.²⁵⁾ **Fig. 17** S-N diagram of butt welded AlZn4.5Mg1 F35 alloy.²⁵⁾

S-N 曲線”の組合せも検討してあるという。疲労試験片は AlZn 4.5 Mg 1 合金の場合、溶接後 7 日以上 常温放置後 125°C × 24 hr の時効 (Fig. 17 以下の図中表示例: 7 dRT + 24 h 125°C) を施しており、AlMgSiCu 合金は溶接のままである。

疲労試験結果は代表例として AlZn 4.5 Mg 1 合金の

Fig. 18 S-N diagram of butt welded AlZn4.5 Mg1F35 alloy (Porosity 15%).²⁵⁾ **Fig. 19** S-N diagram of butt welded AlZn4.5Mg1 F35 alloy (Crater cracks).²⁵⁾

場合を **Fig. 17~19** に示し、各図中に溶接入熱、欠陥の状況、試験条件が記入してある。また、**Table 7** は目違いの影響をまとめたものである。

結論として、小型試験片の疲労強度に影響を及ぼす因

Table 7 Effect of Edge Misalignment.²⁵⁾

Alloy	Edge Misalignment, mm	Fatigue Strength at 5×10^4 Cycles%	Fatigue Strength at 2×10^6 Cycles%	A	B
AlZn4.5Mg1	0.0, Machined	100	100	100	
	0.0	79	64	52	
	0.2	88	72	73	
	0.4	59	48	47	
	0.8	45	36	42	
	0.8, Machined	52	42	59	
AlMgSiCu	0.0	100	100	100	
	0.1	88	83	87	
	0.2	85	83	75	
	0.8	65	65	60

Fig. 20 S-N curves of 5086-H116 base metal and unpeened GMAW weldments.²⁷⁾

子を適切に評価する手段はないが、溶接部形状が疲労強度に重要な影響を及ぼしており、余盛付根角度、目違い等で、現行規格の許容範囲では疲労強度の減少が40%に達する。内部欠陥の場合、容積比30%までの気孔は疲労強度を20%まで減少させ、タングステン巻込み等の影響は無視して差支えない。試験片中央にあるクレーク割れは疲労強度をおよそ10%減少させる。余盛の削除は疲労き裂の開始点となる気孔が表面に現れるので推奨しない、と述べている。

4. 疲労強度の改善

5086合金溶接継手について R. R. Hardy Jr. ら²⁷⁾ と I. J. Polmear²⁸⁾ は疲労強度に及ぼすピーニング加工の影響を検討している。すなわち、前者は船殻材料 5086-H116 板突合せ溶接継手の疲労強度が Fig. 20 に示すよう

Fig. 21 Flat plate tee fillet-welded specimen (GMAW).²⁷⁾ **Fig. 22** Effect of brush shot peening on fatigue performance of 5086-H116 GMAW butt weldments.²⁷⁾

に母材よりかなり低いのでその向上を、後者は 5086-H321 板隅肉溶接継手の余盛端における応力集中軽減を狙ったものであり、それぞれ 100 ton 級の Surface Effect Ship のき裂発生部の補修または溶接構造鉄道無蓋貨車に適用して効果をあげたという。

Hardy Jr. ら²⁷⁾ の供試材の板厚は 1/4", 5/8" および 1" の 3 種類で、溶加材 5356 を用いた MIG 溶接 (GMAW) と電子ビーム溶接 (EBW) を行っている。疲労試験は共振型平面曲げ (5/8" 厚突合せ余盛削除、および 1/4" 厚 T 型隅肉) Fig. 21 参照、試験速度 1,800 cpm) と片持ち回転曲げ (1" 厚、旋削仕上げ、1,400 rpm) を行い、鋳鋼ショットブラシとタングステン・カーバイド・ショットブラシを用いてピーニング加工を施している。実験結果の 1 例は Fig. 22 に示す。余盛削除した GMAW 突合せ継手の疲労強度は母材の値 (15 ksi, $N=10^7$) まで回復し、T 型隅肉継手では 5 ksi が 10 ksi に向上した。EBW 突合せ継手の回転曲げ疲労強度は母材と同程度であるが、平面曲げの場合は微小気孔があるため GMAW 継手の値と大

Fig. 23 S-N curves for specimens containing transverse fillet welds. (All specimens preloaded to a stress of +13.8 MPa).²⁸⁾

Fig. 24 Profiles of (a) untreated and (b) dressed fillet welds.²⁸⁾

差なかった。なお、実地への適用は9/16"×1"タングステンカーバイト・フラップブラシを用い、アルメンゲージのアークハイト0.0035~0.0080の条件で行っている。

Polmear²⁸⁾ は溶加材5356を用いてミグ溶接した突合せ継手 (板厚8.8 mm) と長手方向隅肉継手 (板厚6.3mm) について Janson Needle Gun を用いてピーニング加工 (50 mm溶接長を約10 sec で処理) を施し、疲労寿命に及ぼす影響を検討した。疲労試験は $R=0.5$ および 1.4 とし、余盛端のピーニングは予荷重を負荷する前または後で施している。疲労試験結果は Fig. 23 に示すように、いずれの場合もピーニングは効果的であったが、特に予荷重を負荷後の効果が著しい。さらに、ティグ・ドレッシングの効果も検討しており、余盛端の切欠効果の減少 (Fig. 24 参照) のため、突合せ継手の場合が $1.9 \sim 3.3$ 倍、隅肉継手で $3 \sim 5.1$ 倍、それぞれ平均疲労寿命が向上し、S-N 曲線を Fig. 25 に示す。ティグ・ドレッシングは実地に適用していないが、ピーニング加工より効果的であるかも知れないと述べている。

Fig. 25 S-N curves for untreated and TIG dressed transverse fillet-welded specimens (Prestress +13 MPa).²⁸⁾

Fig. 26 S-N curves of unpeened and shot peened (glass $\phi 0.84$ mm, $2 \times 98\%$) welded joints of AlZn4.5Mg2 alloy.²⁹⁾

なお、W. Köhler²⁹⁾ は AlZn 4.5 Mg 2 合金について溶接部の耐応力腐食割れ性を改善するためショットピーニングの影響を検討しており、その実験の一部として軸方向疲労試験 ($R=0.1$, 30 Hz) を行っている。Fig. 26 に示すように疲労強度が著るしく改善され、またショットピーニング後 ($\phi 0.84$ mm ガラスビーズ, A2, 0.16) の圧縮残留応力は熱影響部において -280 N/mm² に達し、表面より深さ 0.08 mm に最大値がある。

5. 各種溶接継手の疲労強度

5.1 船殻構造用継手の疲労強度

J. E. Beachらは船殻構造に用いる実物大の溶接継手について疲労挙動を検討しており³⁰⁾、船底縦桁の連続または不連続組立継手構造を評価するのが主目的である。供試継手は Fig. 27 に示す8種類で、5086-H 116合金 (厚さ $1/4$ " が標準) と溶加材5356を用いて造船所で溶接したものであり、隔壁と縦桁のフランジ溶接部において長手方向が13 ksi の引張残留応力、溶接線方向が11 ksi 程度

Fig. 27 Structural detail configurations examined in test program.⁸⁰⁾

の圧縮残留応力をそれぞれもっている。

一定振幅軸方向疲労は $R=0.1$ とし、公称最大応力 8, 12, 及び 16 ksi の 3 段階とし、Fig. 28 に結果を示す。変動荷重疲労は船体中央部（縦桁の曲げ）と船首近傍（衝撃波浪）の 25 年間にわたる荷重頻度曲線を検討してそれぞれ曲げ荷重疲労および軸荷重疲労を行い、結果の一部を Table 8 に示す。

各継手の疲労寿命を比較すると、高応力では差が余らないが、低応力の場合は負荷を連続して伝達する構造のものが不連続なものの 2 倍以上の寿命をもち、継手構造としては Fig. 27 における No. 7 と 8 が望ましい。

5.2 管材溶接継手の疲労強度

F. Mangra³¹⁾ は管材溶接継手の疲労試験 ($R=0.1$) を実施している。供試材は AlZn 4.5 Mg 1 F36 と AlMgSi 0.5 F22 合金角管で、溶接材 S-AlMg 4.5 Mn または S-AlSi 5 を用いたミグ溶接継手である。

疲労試験は Fig. 29~31 に示す隔壁板をもつ突合せ継手と十字継手について行い、前者の場合は隔壁部の弾性が疲労強度に影響を及ぼし、かつ偏心率等の問題を指摘

している。後者は構造材の幅の比 b/B が大きくなるにつれて疲労強度が向上するが、 $b/B = 1$ の場合は実験中である。K 型継手では Fig. 31 に示すようにブレースの間隙比 g/b の影響を検討しており、50% オーバーラップが最高の疲労強度をもつ。この場合、き裂の発生位置はオーバーラップの程度と関係し、 g があるとブレースの付根である。肉厚比 T/t (ただし、 T : 桁材の肉厚、 t : ブレースの肉厚) が大きく、 g がある場合はオーバーラップより疲労強度が高くなるが、さらに実験継続中とのことである。

なお、鋼材 S_t 37 を用いた継手との比較が行われており、アルミニウム合金は縦弾性係数が低い結果として継手の変形が大きいから、疲労挙動が鋼と異なると述べている。

5.3 構造材の疲労寿命の予測

J. Jaccard は直線的破壊機構モデルから 6005A-T6 および 295-T6 合金（鋳物）の S-N 曲線をシミュレートしており³²⁾、き裂進展現象にもとづいて、き裂進展速度、欠陥の幾何学的形状および応力範囲を疲労寿命の予測に

Fig. 28 Constant amplitude tension test data compared to original S-N curves.³⁰⁾

Table 8 Results of Variable Amplitude Bending Tests.³⁰⁾

Specimen Type	Approximate No. Years to Crack Initiation	No. Years to Failure
B-1-1	23	(26.6)*
B-1-2	30+	(28.4)*
B-2-1	13	(32.0)*
B-2-2	8	85.8
B-4-1	20	60.3
B-4-2	10	54.3
B-6-1	12	125.0
B-6-2	18	101.8
B-7-1	80	125.0
B-7-2	25	68.4

*These specimens were not tested to failure.

Numbers shown indicate when test was stopped.

** Lifetime midship bending stress spectrum (primary hull girder bending).

用いている。すなわち、 da/dN は ΔK と関係し、 ΔK それ自体は欠陥 (a , Y) および応力 ($\Delta\sigma$, R) の結果として表され (1)式参照), き裂の幾何学的函数である Y は直線の破壊機構モデル³³⁾で定義される。

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot \sqrt{a} \cdot Y \quad (1)$$

$$da/dN = C[\Delta K]^n$$

Fig. 29 S-N curves for butt joint with diaphragm plate and cross joint (AlMgSi0.5 F22, $R=0.1$).³¹⁾

Fig. 30 S-N curves for cross joints (AlZn4.5Mg1 F36, $R=0.1$).³¹⁾

Fig. 31 S-N curves for K-joints (AlZn4.5Mg1 F36, $R=0.1$).³¹⁾

$$\Delta N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{C[\Delta K]^n} \quad (2)$$

疲労寿命は(2)式で表されるから、初期き裂サイズ a_1 が a_2 に進展するまでの繰返し数を検討すればよい。き裂進展については6005A-T6 押出材を用い、 $R=0.1$ で $\Delta\sigma$ が6条件 ($a_1 = 0.03 \sim 1.51$ mm) の結果を述べている。き裂発生部の観察や、結晶粒組織の違いが ΔK に及ぼす影響を検討した結果から、S-N 曲線シミュレーション (コンピュータ・プログラム FAGRO³⁴⁾による) には正常結晶粒組織のき裂進展速度とシングルエッジ・クラックモデルを用いている。

シミュレートされた S-N 曲線を各種アルミニウム合金押出ビームの実験点と比較したのが Fig. 32, 溶接ビ

ームに適用したのが **Fig. 33** である。後者の場合は押出ビームと同じ試験 ($R=0.1$) であるが、シミュレート S-N 曲線はそれと一致しない。溶接残留応力を無視したのが原因で、解析された残留応力 80 N/mm^2 を最大、最小応力に加えてシミュレートしたのが **Fig. 34** であり、これは $R=0.7$ の場合に相当する。

その他の場合も含めてまとめると、6005A-T6 押出ビームのエッジクラック・モデルに用いた a_1 は平均 0.3 mm 、鋳物の場合はその 3 倍であり、シミュレートされた S-N 曲線は各実験点のばらつきの下限に位置する。

5.4 その他の継手の疲労強度

(1) 圧接溶接継手 Al-Mg-Si 合金押出型材を長手方向に熱間圧接してトレーラーや海上コンテナのパネルを製造するアルフォージ法を用いて、船舶用パネルを製造する場合の問題点が W. A. Palko³⁵⁾ によって検討されている。供試材は5456-H111 合金で、応力腐食割れを防止するため、圧接部に $399^\circ\text{C} \times 30 \text{ sec}$ の局部加熱を施している。 $R=0.01$ における疲労強度は母材より低い値を示すが、ミグ溶接継手より高く、また、圧接のまま $246^\circ\text{C} \times 24 \text{ hr}$ 焼なまし材との間に差が見受けられない。

(2) 構造用トランジション継手 構造用トランジション継手に関する軽金属溶接構造協会 STJ 委員会の報告である³⁶⁾。供試材はタイプ A (A5083-A1100P-SM 41) と B (A3003P-TP 28-SM41) の 2 種類で、継手の接合部中央に半円型または U 型切欠をつけた場合の片振り疲労試験を行っている。疲労破壊はアルミニウム側 (ウェブプレート、または隅内部) に発生し、爆着による接合部は異常なかつた。両タイプの継手間に疲労強度の差や、切欠による相違もない。

(3) クリンチ継手 J. Henning らは Homax 社のクリンチングを用い、Anticorodal-120 (AlMg0.4Si1.2) 合金 1.25 mm 板についてクロスクリンチ 3 点打ち (重ね代 40 mm 、幅 70 mm に 3 点並列打ち) の疲労強度 ($R=0.1$) を検討し³⁷⁾、同条件のスポット溶接継手と比較してその優位性を述べている。

(4) 熱影響部の低サイクル疲労 アルミニウム合金熱処理材または加工材の溶接部近傍は強度低下がおきており、長手方向溶接線をもつ部材の場合は熱影響部による強度低下を断面数値の減少または細長比の増加として処理している。また、静的サービス荷重内の負荷でも熱影響部は塑性ひずみによる疲労き裂が発生しやすい。D. Kostas³⁸⁾ は長手方向に溶接線をもつ AlMgSi1F32 (6082) 合金 I および T 型材について軸力または曲げを受ける場合の塑性疲労を検討している。非溶接部、熱影響部の応力-ひずみ線図を DIN 4113 および塑性理論に従って求め、これをベースとして Manson-Coffin, Morrow らの塑性疲労実験式を比較検討し、熱影響部の塑性疲労

Fig. 32 SN-simulation extruded beams, base metal, $R=0.1$, $H=220 \text{ mm}$.³²⁾

★: (Cal.: $N=1,084,000$ Cycles, $sR=102 \text{ N/mm}^2$, $a=0.2898 \text{ mm}$, $C=10.0 \text{ mm}$)

Fig. 33 SN-simulation butt-welded beams, $R=0.1$. No residual stresses.³²⁾

○ (Calibrat.: $3,458,000$ Cycles, $sR=36 \text{ N/mm}^2$, $a=2.129 \text{ mm}$, $C=10.0 \text{ mm}$)

Fig. 34 SN-simulation butt-welded beams, residual stresses included, $R=0.7$.³²⁾

★ (Calibrat.: $3,458,000$ Cycles, $sR=36 \text{ N/mm}^2$, $a=0.4162 \text{ mm}$, $C=10.0 \text{ mm}$)

寿命を算出している。

6. おわりに

第2回アルミニウム溶接物国際会議で発表された論文の中から疲労に関係するものを要約した。趨勢として次のことがいえる。

(1) 欧米、特に欧州においてはアルミニウム構造規格の改正もしくは制定が進行中であり、鋼とアルミニウム合金の相対的疲労強度が同じということから、疲労設計規格は鋼構造規格のそれに準じるものになる。また、CAFDEEにより統計的処理された疲労データがこれらに活用されよう。

(2) 軸方向疲労試験で片振りまたはそれ以上の平均応力をもつ場合の疲労データが多く、これは溶接部の引張残留応力を考慮しているためである。なお、P-S-N線図表示が多い。

以上において、興味深いのは S. J. Maddox の提案である。「鋼構造設計 S-N 曲線を縦弾性係数の比 3 で除すればアルミニウム合金に適用できる」ということで、大局的には実験データからみて問題がないようであるが、個々の実験では材質による差が現れている。また引張残留応力が溶接部に存在することも既知であるが、実際の構造物溶接継手では測定が難しい。いずれにしても充分管理された研究室的規模のものと現場との相違が問題であり、実物大溶接継手の疲労試験が重要視されることになる。

我が国でも溶接継手の疲労試験は軸方向片振り、もしくはそれ以上の平均応力をもつ場合の疲労強度を求めることに重点をおき、それに破壊確率を表示することが必要であり、残留応力を考慮して耐久限度線図の片振りより右側を検討せねばなるまい。

参 考 文 献

- 1) 竹内勝治, 田中孝一: 第2回アルミニウム溶接物国際会議調査団報告書, 3, 軽金属溶接構造協会, (Aug. 1982).
- 2) R. A. Kelsey, H. Nielsen: *Aims and Scope of CAFEE*, 2nd Inter. Conf. on Al. Weldments, May 1982 (München).
- 3) 竹内勝治: 軽金属溶接, **20** (1982), 323.
- 4) W. W. Sanders, Jr., S. J. Maddox, D. Kosteas: *Aluminium Fatigue Data-Description and Principles for Evaluation*, 2nd Inter. Conf. on Al. Weldments, May 1982 (München).
- 5) F. Bastenaire: *Comparative Report on Statistical Analysis of Three Sets of Fatigue Data*, IIW Doc. XIII-1029-81, (1981).
- 6) T. R. Gurney, S. J. Maddox: *A Re-analysis of Fatigue Data for Welded Joints in Steel*, Weld. Res. International, 3 (4), 1-54, (1973).
- 7) S. J. Maddox, D. Webber: *Fatigue Testing of Weldments*, ASTM STP 648, 159 (1978).
- 8) E. Haibach: *Grundlagen und Weiterentwicklung des Betriebsfestigkeitsnachweiss für Schweißverbindungen im Internationalen Regelwerk*, DVS Berichte Nr. 57, 98 (1979).
- 9) D. Kosteas: *Zur Systematik der Auswertung von Schwingfestigkeitsuntersuchungen bei Aluminiumlegierungen*. Dissertation Univ. Karlsruhe, (1970).
- 10) S. J. Maddox: *British Fatigue Design Rules for Welded Aluminium*, 2nd Inter. Conf. on Al. Weldments, May 1982 (München).
- 11) T. R. Gurney: *Welding Inst. Res. Bull.* 115 (May 1976).
- 12) BS 5400, Steel, Concrete and Composite Bridge, Part 10 Fatigue (1980).
- 13) N. E. Frost, K. J. March, L. P. Pook: *Metal Fatigue*, Clarendon Press, 1974.
- 14) J. D. Harrison: *Proc. Conf. Fatigue of Welded Structure*, The Welding Inst. 194 (1971).
- 15) AWS Structural Welding Code, Steel, Design of New Bridge, (1979).
- 16) S. J. Maddox: *Fatigue Design of Welded Aluminium Alloy Structures*, 2nd Inter. Conf. on Al. Weldments, May 1982 (München).
- 17) S. J. Maddox, D. Webber: *Detection and Measurement of cracks*, Weld. Inst. Chap. 4 (1976).
- 18) S. Pearson: *Nature* **211** (1966), 1077.
- 19) J. D. Harrison: *2nd Inter. Conf. on Fracture*, (1969), (Brighton).
- 20) S. J. Maddox, T. R. Gurney, A. M. Mummary, G. S. Booth: *An Investigation of the Influence of Applied Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation in Structural Steels*, Weld. Inst. Rep. 72/1979/E, (1978).
- 21) S. J. Maddox: *International Journal of Fracture*, 11 (3), (1975).
- 22) W. W. Sanders Jr., S. M. Gannon: *WRC Bulletin*, No. 199 (1974).
- 23) V. I. Trufiyakov: *Auto. Weld.*, No. 5, 37, (1976).
- 24) S. J. Maddox: *Proc. Conf. on Fatigue Testing and Design*, Soc. of Environmental Eng., (1976).
- 25) U. Krüger, U. Priensnitz: *The Effects of Discontinuities of The Fatigue Behaviour of Aluminium Welds*, 2nd Inter. Conf. on Al. Weldments, May 1982, (München).
- 26) U. Krüger: *Fatigue Strength of Defective TIG-welded Joint of Thin-walled Aluminium Alloys*, Colloquium on Al. and Its Alloys in Welded Constructions, Sept. 1981, (Proto).
- 27) R. R. Hardy Jr., M. E. Wells: *The Effect of Fabrication Methods on The Fatigue Performance of Welded 5086-H116 Aluminum Alloy*, 2nd Inter. Conf. on Al. Weldments, May 1982 (München).

- 28) I. J. Polmear: *Post-welded Treatments to Improve Fatigue Performance of Aluminium Alloy Weldments*, Ditto.
- 29) W. Köhler: *Improvement of Stress Corrosion Resistance of Aluminium Weldments by Shot Peening*, Ditto.
- 30) J. E. Beach, R. E. Johnson, F. S. Koehler: *Fatigue of 5086 Aluminum Weldments*, Ditto.
- 31) F. Mang, O. Bucak: *Carrying-over of Design Principles in Steel to Statically and Dynamically Loaded Aluminum Structures in Hollow Sections*, Ditto.
- 32) R. Jaccard: *Fatigue Life Prediction of Aluminum Structures Based on SN-Curve Simulation*, Ditto.
- 33) R. Jaccard: *Fatigue of Aluminium Structure*, IABSE Conf. Proc. (1982).
- 34) R. Jaccard: "FAGRO a Computer Program to Evaluate Fatigue Crack Growth" developed by Alluswiss, Language FORTRAN IV, Hardware: VAX 11/780.
- 35) W. A. Palko: *Evaluation of an Advanced Pressure Welding Method for Fabrication of Marine-Service Aluminium Alloys*, 2nd Inter. Conf. on Al. Weldments, May 1982 (München).
- 36) K. Terasawa, I. Kurino, A. Kubota: *Studies on the Properties of Aluminium Alloy-Steel Transition Pieces for Structural Transition Joint (STJ) of Ship Structure*, Part II, Ditto.
- 37) J. Hennings, J. Maier: (A) *Improvement of Spot Welding of Aluminum Sheet by Surface Treatments*, (B) *Comparison of Spot Welding and Mechanical Joining Processes*, Ditto.
- 38) D. Kostears: *Low-cycle Fatigue Damage Probability in the HAZ of Aluminium Weldments*, Ditto.