

JAERI - M
91-189

ハステロイ X R 系合金用溶加材の開発研究
— 厚肉構造物用溶加材の開発 —

1991年11月

渡辺 勝利・中島 甫・佐平 健彰^{*1}
丸七 香樹^{*1}・竹入 俊樹^{*1}・斉藤貞一郎^{*2}
高津 玉男^{*2}・仲西 恒雄^{*3}・小池上 一^{*4}
樋口 洵^{*4}

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 印刷 いばらき印刷機

ハステロイXR系合金用溶加材の開発研究

— 厚肉構造物用溶加材の開発 —

日本原子力研究所東海研究所燃料・材料工学部

渡辺 勝利 ・中島 甫 ・佐平 健彰*¹・丸七 香樹*¹

竹入 俊樹*¹・斉藤貞一郎*²・高津 玉男*²・仲西 恒雄*³

小池上 一*⁴・樋口 洵*⁴

(1991年10月14日受理)

ハステロイXR系合金の厚肉構造物用溶加材の開発を目指して、重回帰分析により合金設計を行った溶加材を用いてハステロイXR系合金の溶接性およびTIG溶接部の高温強度特性を検討した。即ち、溶接性に関しては溶着金属の化学分析、曲げ試験、フィスコ割れ試験、金属組織観察および硬さ測定、高温強度特性に関しては引張試験およびクリープ試験を行った。得られた結果は高温強度特性を損なうことなく、溶接部の割れ感受性を低減できたことから本溶加材が厚肉構造物用として優れた適性を有していることが分かった。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

*1 三菱マテリアル(株)

*2 日本ウェルディング・ロッド(株)

*3 富士電機総合研究所

*4 石川島播磨重工業(株)

Filler Metal Development for Hastelloy Alloy XR
- Filler Metal for Hastelloy Alloy XR Structure with Thick Wall -

Katsutoshi WATANABE, Hajime NAKAJIMA, Kensho SAHIRA^{*1}
Kouki MARUSHICHI^{*1}, Toshiki TAKEIRI^{*1}, Teichiro SAITOH^{*2}
Tamao TAKATSU^{*2}, Tsuneo NAKANISHI^{*3}, Hajime KOIKEGAMI^{*4}
and Makoto HIGUCHI^{*4}

Department of Fuels and Materials Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 14, 1991)

In order to develop the filler metal for Hastelloy alloy XR structure with thick wall, the weldability and high temperature strength properties of Hastelloy alloy XR weldment were investigated using the filler metals, which were alloy-designed on the basis of multiple regression analysis. The former was examined through the chemical analysis in the deposited metal, bend test, FISCO cracking test, optical microscopy and hardness measurement. The latter was investigated by means of tensile and creep test. It was found from these results that the crack susceptibility in the weldment was apparent to be lowered without degrading the high temperature strength properties. Therefore, it is concluded that these filler metals possess excellent performance as the filler metal for Hastelloy alloy XR structure with thick wall.

Keywords: Hastelloy Alloy XR, Filler Metal, Alloy Design, Multiple Regression Analysis, High Temperature Strength Properties, Structure with Thick Wall and Weldment

*1 Mitsubishi Materials Corporation

*2 Nippon Welding Rod Corporation

*3 Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.

*4 Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

目 次

1. 序 論	1
2. 溶加材の合金設計	2
3. 供試材料及び溶接継手製作	3
4. 評価結果	6
4.1 溶接性	6
4.2 引張性質	9
4.3 クリープ性質	10
5. 総合評価	13
6. 総括と展望	15
謝 辞	16
参考文献	16

Contents

1. Introduction	1
2. Alloy Design for Filler Metal	2
3. Materials and Welded Joints	3
4. Results	6
4.1 Weldability	6
4.2 Tensile Properties	9
4.3 Creep Properties	10
5. Evaluation	13
6. Concluding Remarks	15
Acknowledgements	16
References	16

1. 序 論

高温工学試験研究炉（HTTR）用の高温部構造材である Hastelloy X R のための溶加材の開発を目指して一連の研究を進め薄肉構造物を対象として、優れた溶接性ならびに溶接部が母材と同等以上の高温強度特性を有する TIG 溶接用の溶加材の開発に成功したことを前報までに報告してきた^{1)・2)}。

溶接施工性も含めて見た場合、開発した溶加材を用いて Hastelloy X R 母材について自動 TIG 溶接により施工した結果では、熔融金属の流動性、ビード形状、クレータ割れを含む高温割れ特性などの溶接時の外見的施工性に関しては、他の一般的ニッケル基耐熱合金（例えばインコネル 600 等）と同程度のものではあった。但し、シールド効果が不十分な場合には強固なスラグが付着し次のパスを溶接する際に、スラグ巻き込み等の欠陥がみられた。

しかしながら、厚板溶接の場合には、側曲げ試験で微細な欠陥が発生しやすく、欠陥が連続すると大きな割れとなり、曲げ試験において良好な結果が得られないことがある。この場合でも、外見的施工性に関しては特に問題はなく、また表曲げ、裏曲げ及び自由曲げ等では欠陥は検出されにくい。この欠陥はビード直下の再熱溶接金属部に発生する数 100 μ m 程度の長さの微細ないわゆる再熱割れ（高温割れの一種）と推定される。

側曲げ試験では、厚板の溶接部の方が薄板のそれよりも厳しい試験となる傾向がある。厚板と薄板の側曲げ試験を比較すると以下のような相違がある。

- ① 厚板では積層数が多いため、溶接による塑性ひずみの累積で、溶接部の加工硬化による強度上昇が著しい。
- ② 厚板では溶接金属の幅が広いため、曲げ部に占める母材（溶接金属より耐力が低く、延性が高いので曲げの際に優先的に伸びる）の割合が小さく、溶接金属部の伸びが薄板の場合より実質的に大きくなる傾向がある。
- ③ 厚板では側曲げ試験の試験片幅が大きいため、曲げ部では 2 次元拘束が大きい。

これらのことはいずれも、厚板の曲げ試験の際、微小欠陥部に加わる応力を高め、き裂の拡大をもたらす。このような影響の重畳によって、厚板の側曲げ試験の方が薄板のそれよりも特性が低下することがあると考えられている。

この割れは施工条件の工夫と十分な施工管理によってある程度防止することができるが、実機施工における変動要因等も考慮すると、より欠陥のにくい施工条件の検討とともに、溶加材の面からも耐溶接割れ性の改良が必要といえる。

本報告は、このような現状を考慮して、薄肉構造物用としてはすでに適性が確認された開発溶加材を、さらに厚肉構造物用としての特性改良を行うことを目的として、一連の研究を実施し、得られた成果を述べるものである。

2. 溶加材の合金設計

本研究では、ハステロイ X R 厚板の溶接継手の曲げ試験においても安定して良好な曲げ性能が得られると考えられる合金成分の検討を行った。そこで従来の試験データ^{1), 3)} による溶加材中の化学成分と溶接割れとの重回帰分析結果並びに厚さ60mmのハステロイ X R 溶接継手断面の EPMA による化学成分の線分析結果に基づき合金設計を行った。また、クリープ特性についても既報¹⁾ における重回帰分析の結果からその特性を損なわない様に考慮して合金設計を行った。

Table 2.1 にハステロイ X 及びハステロイ X R 系溶加材中の化学組成と溶接継手の曲げ試験における割れ感受性との関係についての重回帰分析結果を示す。同様に Table 2.2 にフィスコ割れ試験における高温割れ感受性との関係についての重回帰分析結果を示す。いずれも (+) は溶接割れを助長し、(-) は割れを抑制すると考えられる元素である。ここで、標準偏回帰係数 (Standard partial regression coefficient) とは、各変数の単位がそろそろように全ての変数について平均を零、標準偏差が1となるような規準化を行ってから回帰係数を求めたものであり、各元素の溶接割れへの影響力の大小を評価することができる。また、偏相関係数 (Partial correlation coefficient) とは他の元素の影響を一定と考えた上で目的とするところの特定の元素と溶接割れとの真の相関を表わすものである。一方、Fig. 2.1 に示すように厚さ60mmのハステロイ X R 溶接継手断面の上層部と下層部において、EPMA による線分析を行った。試験結果を Fig. 2.2 に示す。

以下にこれらの結果に基づく溶加材の合金設計について述べる。B については Table 2.1 に示すように標準偏回帰係数や相関係数が最も高く、曲げ試験における割れ感受性を高めていることが推定できる。また、一般に B はその含有量が多くなるに従い、粒界液化現象に起因するところの高温割れの発生が顕著になることが報告されている¹⁾。そのため既報^{1), 2)} では B は 50ppm 程度を適正含有量としたが、さらに良好な溶接性が要求される厚板ではより低減させることを試みる。Mo については Table 2.1 に示すように各係数が比較的高く、かつ線分析の結果でも Mo の濃度変化は他の元素に比べ著しかった。上層部においては、硫化物によるものと考えられる Mo 及び S の濃化が同一箇所において認められた。また、Savage らは、MoS₂ などの硫化物が高温割れをいちじるしく助長するということを報告している⁴⁾。従って、Mo は規格の範囲内で下限まで低減させ、S は極力低減させてみる。また S については Table 2.2 に示すようにフィスコ割れ試験における高温割れ感受性を最も高める元素と推定される。C については Table 2.1 に示すように偏回帰係数 (partial regression coefficient) が最も高く、曲げ試験における割れ感受性を高める元素と考えられる。線分析の結果では、炭化物によるものと考えられる C、Mo 及び Cr などの濃化が同一箇所において認められた。また、Savage らは硫化物程ではないが、炭化物もまた比較的高温割れを助長するということを報告しており⁴⁾、C については、従来の 0.08% 程度から 0.05% 程度に低減することを試みる。N については、クリープ強度を高めるといふ報告があり⁵⁾、また、溶接性についてはほとんど影響はないものと考えられる。そこ

で、B量の減少によりクリープ特性が低下することも考えられることからその低下を補う目的でNを増量させたものを試みる。Mgは、Table 2.1 に示すように各係数が(－)であり、曲げ試験における溶接割れを抑制する元素と考えられる。また他の固溶強化型Ni基合金においてもMgの微量添加は、その脱酸及び脱硫効果により溶接割れを減少させるという報告⁶⁾があることから、Mgを増量したものを試みる。Mnは、溶接性についてはほとんど影響はないと考えられることから、クリープ特性をより良好¹⁾にするため、Mn量を規格の範囲内で下限まで低減させてみる。その他の元素については、既報²⁾におけるD案相当溶加材のとおりとする。以上のような考え方に基づきF案、G案、H案、I案、J案、K案及びL案の7種の溶加材を溶製した。各溶加材の化学成分目標範囲及び目標値をTable 2.3 に示す。その特徴をまとめると次のとおりである。

- (1) K案溶加材を除くその他の全ての溶加材についてP, S, O及びN量を極力低減させ、Mo, Mnについては、ハステロイXRの規格の範囲内で下限値を目標とする。
- (2) F案、H案、I案溶加材は、B量を単独で20, 35及び50ppmと3水準変化させる。なお、C量の水準は0.08%で一定とする。
- (3) F案とG案溶加材はC量を単独で0.05%及び0.08%と2水準変化させた。I案とJ案溶加材もそれと同様のものであるが、F案及びG案溶加材はB量が50ppmと高い水準にあり、I案及びJ案溶加材はBが20ppmと低い水準にある。
- (4) K案溶加材はJ案溶加材(B:20ppm, C:0.05%)の化学組成を基本とし、Nを0.04%まで増量した。
- (5) L案溶加材はF案溶加材(B:50ppm, C:0.08%)の化学組成を基本とし、Mgを0.06%まで増量した。

3. 供試材料及び溶接継手製作

(1) ハステロイXR母材

厚肉構造物用溶加材の開発試験用として、厚さ60mmのハステロイXR合金の厚板を工業規模で製造した。製造方法は、既報^{1) 2)}と同じであり、真空高周波誘導溶解(VI)+エレクトロスラグ再溶解(ESR)の二重溶解で2tonインゴットを溶製し、熱間鍛造・熱間圧延により厚さ60mmの厚板に整え、最終熱処理を施した後試験に供した。また、同一溶解のインゴットより厚さ15mmの板を同様な方法で製造し、比較材としての試験に供した。

Table 3.1 に供試材の化学成分分析結果を示す。同表には、ハステロイXの規格ASTM B435⁽⁷⁾、AMS5536⁽⁸⁾を基にSi及びMnをより狭い範囲に、また、Co, Al及びTiの上限値を低く設定した目標値⁹⁾を掲げているが、その目標を十分満足する結果が得られた。B量については、本報では溶加材とのバランスで、母材の目標値を0.0005～0.0020%としたが、インゴットのトップ部で0.0013%、ボトム部で0.0015%であり目標を十分満足している。

で、B量の減少によりクリープ特性が低下することも考えられることからその低下を補う目的でNを増量させたものを試みる。Mgは、Table 2.1 に示すように各係数が(-)であり、曲げ試験における溶接割れを抑制する元素と考えられる。また他の固溶強化型Ni基合金においてもMgの微量添加は、その脱酸及び脱硫効果により溶接割れを減少させるという報告⁶⁾があることから、Mgを増量したものを試みる。Mnは、溶接性についてはほとんど影響はないと考えられることから、クリープ特性をより良好¹⁾にするため、Mn量を規格の範囲内で下限まで低減させてみる。その他の元素については、既報²⁾におけるD案相当溶加材のとおりとする。以上のような考え方に基づきF案、G案、H案、I案、J案、K案及びL案の7種の溶加材を溶製した。各溶加材の化学成分目標範囲及び目標値をTable 2.3 に示す。その特徴をまとめると次のとおりである。

- (1) K案溶加材を除くその他の全ての溶加材についてP, S, O及びN量を極力低減させ、Mo, Mnについては、ハステロイXRの規格の範囲内で下限値を目標とする。
- (2) F案、H案、I案溶加材は、B量を単独で20, 35及び50ppmと3水準変化させる。なお、C量の水準は0.08%で一定とする。
- (3) F案とG案溶加材はC量を単独で0.05%及び0.08%と2水準変化させた。I案とJ案溶加材もそれと同様のものであるが、F案及びG案溶加材はB量が50ppmと高い水準にあり、I案及びJ案溶加材はBが20ppmと低い水準にある。
- (4) K案溶加材はJ案溶加材(B:20ppm, C:0.05%)の化学組成を基本とし、Nを0.04%まで増量した。
- (5) L案溶加材はF案溶加材(B:50ppm, C:0.08%)の化学組成を基本とし、Mgを0.06%まで増量した。

3. 供試材料及び溶接継手製作

(1) ハステロイXR母材

厚肉構造物用溶加材の開発試験用として、厚さ60mmのハステロイXR合金の厚板を工業規模で製造した。製造方法は、既報^{1) 2)}と同じであり、真空高周波誘導溶解(VI)+エレクトロスラグ再溶解(ESR)の二重溶解で2tonインゴットを溶製し、熱間鍛造・熱間圧延により厚さ60mmの厚板に整え、最終熱処理を施した後試験に供した。また、同一溶解のインゴットより厚さ15mmの板を同様な方法で製造し、比較材としての試験に供した。

Table 3.1 に供試材の化学成分分析結果を示す。同表には、ハステロイXの規格ASTM B435⁽⁷⁾、AMS5536⁽⁸⁾を基にSi及びMnをより狭い範囲に、また、Co, Al及びTiの上限値を低く設定した目標値⁹⁾を掲げているが、その目標を十分満足する結果が得られた。B量については、本報では溶加材とのバランスで、母材の目標値を0.0005~0.0020%としたが、インゴットのトップ部で0.0013%、ボトム部で0.0015%であり目標を十分満足している。

Table 3.2 に常温引張試験結果及び硬さ、結晶粒度測定結果を示す。常温引張特性は厚さ60mmと厚さ15mmの板でほとんど差異がなく、引張強さ、0.2%耐力、破断伸びとともにASTM B435規格を十分満足している。いずれの厚さの板でも、硬さは従来得られている値と同様であり、Fig 3.1 に示すように結晶粒度も目標のASTM粒度番号2~5を満足している。

Table 3.3 に大気中クリーブ破断試験結果を示す。815°C、105MPa及び900°C、49MPaのいずれの条件でも厚さ15mmの板の方が厚さ60mmの板より破断時間が長い、いずれの板も破断時間、破断伸びともにAMS5536規格あるいは製造者の社内規格を満足する結果が得られた。

Fig. 3.1 に最終熱処理後のマイクロ組織写真を示す。未固溶析出物が所々に観察されるが、特に異常な組織は見られない。

なお、外観検査、寸法検査及び超音波探傷検査の結果も良好であった。

(2) ハステロイXR系合金の厚肉構造物用溶加材

2章で述べた合金設計に基づき選定されたF~Lの7種の溶加材を製造した。これらの合金は、微量添加元素であるC, B, Mg及びNの溶接性及び機械的性質への影響を調べるため計画された。

Fig. 3.2 に溶加材の製造工程を示す。溶解方法はVI溶解とし、直径120mm、質量20kgの実験室規模のインゴットを溶製した。その後、熱間鍛造、熱間圧延、冷間圧延で直径5.5mmの丸棒を製造した後、焼鈍、冷間引抜きの繰返しにより最終直径1.2mmの溶加材とした。なお、加工中のBの減少防止については、実績のある前報^{1) 2)}の溶加材開発で設定した製造条件を踏襲した。L案合金を除き、最終形状の溶加材を加工することができた。L案合金は、熱間鍛造工程でFig. 3.3 に示すような顕著な割れが生じたためその後の加工を中止した。Mgが0.07%と高く、またBも0.008%と高いため相乗的に熱間加工割れを誘発したものと推定される。

Table 3.4 に溶加材の分析結果を示す。H案合金のC及びB量が目標値より高くなり、F案合金と同程度になったことを除き、試験目的に沿う溶加材が得られた。B量に関して約50ppmと約20ppmの2水準が、C量に関しては約0.075%と約0.06%の2水準が得られた。Mgはインゴット及び直径5.5mmの丸棒の段階でL案合金を除く6合金間に差異がなく目標通りに添加されている。N添加のK案合金ではN量は340ppmでありほぼ目標通りである。微量添加のAlも各合金とも目標を満足している。なお、Cr, Mo, W, Fe, Mn及びSiの主要元素は、合金間で差異がなく、また、P, S, O及びN等の元素も十分低いレベルである。

(3) 溶接継手製作及び試験片採取要領

厚さ60mm及び15mmのハステロイXR母材と6種類の厚肉構造物用溶加材を用いて、溶接試験板を製作した。供試溶加材には、直径1.2mmの自動溶接用ソリッドワイヤーを使用し、溶接は実機を想定して自動TIG溶接による片側溶接とした。

1) 厚さ60mmのハステロイXRの溶接

溶接施工条件は、予備試験の結果を反映して設定し、6種類の溶加材に対し、同一の溶接施工条件を適用した。Table 3.5 に溶接施工条件を示し、Fig. 3.4 に開先

形状を示す。開先は、インサートなしの2段V型開先とした。各試験板とも、溶接施工条件は、電流：約170 A、電圧：9～10 V程度であり、積層は、約40層、約140パスであった。

なお、Fig. 3.5 に各試験片の採取要領を示す。

2) 厚さ15mmの Hastelloy X R の溶接

溶接施工条件は、6種の溶加材に対し、同一の溶接施工条件を適用した。Table 3.6 に溶接施工条件を示す。装置の都合で、割れ感受性加速試験（フィスコ割れ試験）の溶接とその他の溶接で異なる2種類の溶接施工条件を使用した。また、フィスコ割れ試験の溶接を除いては、シールド効果をより良好にするため、トーチにトレーリングシールド用の治具を取り付け、トーチから流出するシールドガスから外れた溶接ビードもシールドするようにした。Fig. 3.6 に開先形状を示す。フィスコ割れ試験の溶接に使用した開先は、Y型開先であり、開先角度は 90° 、ルート間隔は2 mm、ルート面は板厚の $1/2$ とした。フィスコ割れ試験以外の溶接に使用した開先の開先角度は 60° であり、溶接金属試験片採取用及び溶接継手試験片採取用とで、ルート間隔は、各々、10 mm及び2 mmとし、積層は、各々、9層、23パス及び8層、14パス程度であった。

なお、Fig. 3.7 及び Fig. 3.8 に各試験片の採取要領を示す。

3) まとめ

溶接部の総合特性評価の一環として厚肉溶接部の評価試験用に工業規模で厚さ60 mmの Hastelloy X R 厚板及び実験室規模で6種の直径1.2 mmの厚肉構造物用溶加材を製造した。厚肉構造物用溶加材の候補合金のうち、Mg量及びB量が比較的多いL案合金は熱間鍛造時に割れが生じたためその後の試験は中止した。これらの母材、溶加材を用いて自動TIG溶接装置で継手を作製し、試験目的を満足する試料を供給できた。なお、母材として厚さ60 mmの板と同一溶解ロッドの厚さ15 mmの板を比較材として用いた。

4. 評価結果

4.1 溶接性

6種の厚肉構造物用溶加材を使用して溶接した溶接試験板を用いて、溶接金属の化学成分分析、曲げ試験（側曲げ試験または表曲げ試験）、フィスコ割れ試験、金属組織試験及び硬さ試験を行い、溶接性の検討を行った。

4.1.1 溶接金属の化学成分分析

(1) 目的

6種の厚肉構造物用溶加材の溶接金属の化学成分分析を行い、溶加材との化学成分の変化を調べ、TIG溶接施工の健全性評価に資する。

(2) 試験方法

溶接金属の化学成分分析用試料は厚さ60mmの Hastelloy XR母材を用いた溶接試験板の溶接金属から採取した。

なお、分析は、パラメータとして調整したB及びCならびに溶接によって変動することが予想されるMgについて実施した。

(3) 分析結果及び考察

Table 4.1 に6種の厚肉構造物用溶加材とその溶接金属の化学成分分析結果を示す。

溶加材とその溶接金属との化学成分を比較すると、BとCの含有量には大きな変化がないが、Mgは溶接によって1/3程度に減少した。B量が変化しないことは既報^{1)・2)}の場合と同様で厚板溶接においても再確認されたといえる。これは不活性ガスを用いたTIG溶接法では溶接時に酸化等により飛散するB量が少ないためと考えられる。

(4) まとめ

6種の厚肉構造物用溶加材の溶接金属の化学成分分析を行った結果、溶加材の化学成分と溶接金属の化学成分とでは、Mgを除きほとんど変化がないことが再確認された。Mgは溶接金属の高温特性に大きな影響を及ぼさないと考えられるので、これらの溶加材によるTIG溶接施工には特に問題がないと結論された。

4.1.2 曲げ試験

(1) 目的

6種の厚肉構造物用溶加材を用いた溶接継手の型曲げ試験を行い、溶接金属の耐割れ性を調べ、厚肉構造物用溶加材としての適性評価に資する。

(2) 試験方法

溶接継手の型曲げ試験は、厚さ60mm及び15mmの溶接試験板について実施した。厚さ60mmの場合は側曲げ試験とし、厚さ15mmの場合は表曲げ試験及び側曲げ試験

を行った。Fig. 4.1に厚さ60mmの場合の試験片の形状及び寸法を示し、Fig. 4.2に厚さ15mmの場合の試験片の形状及び寸法を示す。試験方法及び判定基準は総理府令第74号第13条別表第8によった。また、厚さ60mmの場合の側曲げ試験では、6種の溶加材の溶接試験板から、各々4本採取し、厚さ15mmの場合の表曲げ試験及び側曲げ試験では、各々2本ずつ採取した。

(3) 試験結果及び考察

Table 4.2 に厚さ60mmの場合の側曲げ試験結果を示し、Table 4.3 に厚さ15mmの場合の型曲げ試験結果をまとめて示す。厚さ15mmの場合は、Table 4.3 に示すように、1mm以下の小さな割れが1ないし2個生じているものもあるが、全て判定基準を満足するものであり、既報^{1)・2)}の場合と同様に良好な結果が得られた。一方、厚さ60mmの場合は、厚さ15mmの場合に比較して、割れ長さ及び割れ個数のいずれも増大する傾向にあり、溶加材の種類により異なる傾向を示し、判定基準を満足できないものも生じた。したがって、Table 4.2 には、各溶加材の割れ感受性を示す指標として、全割れ長さ（割れ長さ合計）及び全割れ個数（割れ個数合計）も記載している。

Table 4.2 に示すように、全割れ長さ及び全割れ個数の点で、B及びC量が低い方の水準にあるJ案及びK案合金が最も良い結果を示しており、C量が低い方の水準にあるG案合金がそれらについていた。この結果は、第2章で述べた合金設計において予測した結果と良い対応を示している。また、参考までに、溶加材のB及びCの含有量と割れ個数の関係をFig. 4.3に示す。

また、Fig. 4.4 に厚さ60mmの場合の試験後の試験片外観、Fig. 4.5及びFig. 4.6 に厚さ15mmの場合の試験片外観を示す。

(4) まとめ

6種の厚肉構造物用溶加材の溶接継手の型曲げ試験を行った結果、厚さ15mmの薄板の場合は、従来と同様に良好な結果が得られたが、厚さ60mmの厚板においては、溶加材の種類により異なる傾向を示すことがわかった。

したがって、6種の厚肉構造物用溶加材の中から、比較的良好な結果を示したG案、J案及びK案合金の3種の溶加材を選定し、更に引張及びクリープ等の特性を検討するための候補材とした。

4.1.3 フィスコ割れ試験

(1) 目的

6種の厚肉構造物用溶加材を用いて、フィスコ割れ試験を行い、耐溶接割れ感受性について検討する。

(2) 試験方法

フィスコ割れ試験は、厚さ15mmの Hastelloy X R 母材を用いた溶接試験板を用い、JIS Z 3155「C形ジグ拘束突合せ溶接割れ試験方法」に準拠して行った。

(3) 試験結果及び考察

Table 4.4 に試験結果を示す。発生した割れはいずれもクレータ割れにとどまり、ビード割れの発生は全く認められなかった。これは、通常のアステロイ X とほぼ同程度の溶接割れ感受性であり、既報¹⁾における A 案～D 案合金の溶加材の場合ともほぼ同等で、いずれの溶加材についても耐溶接割れ感受性に問題はなかった。

更に、本報の 6 種の厚肉構造物用溶加材は、厚板においても安定した良好な溶接性を得るための合金設計により、P、S 及び O 等の不純物を極力低減したことや B 量をやや低減したことなども、耐溶接割れ感受性が良好であったことに寄与していると考えられる。

また、クレータ割れの大小をみた場合、B 量が高い水準にある F 案及び G 案合金は、より低い水準のものに比較して、ごく僅かではあるがクレータ割れが増大する傾向が認められた。なお、C 及び N 量の相違による溶接割れ感受性への影響はほとんど認められなかった。

(4) まとめ

フィスコ割れ試験における溶接割れ感受性は、いずれの厚肉構造物用溶加材の場合も、通常のアステロイ X 等の場合と同等であり、実用上問題ないと判断された。

4.1.4 金属組織及び硬さ試験

(1) 目的

6 種類の厚肉構造物用溶加材を用いて製作した溶接継手について、金属組織観察及び硬さ試験を行い、溶接部の健全性評価に資する。

(2) 試験方法

厚さ 60mm のアステロイ X R 溶接継手については、マクロ組織観察を行い、厚さ 15mm のアステロイ X R 溶接継手については、ミクロ組織観察及び硬さ試験を行った。ミクロ組織観察は、10% シュウ酸の電解エッチを行い、観察位置は、溶接継手断面の板厚の 1/2 におけるボンド部と溶接金属中央部とした。硬さ試験は、マイクロピッカース硬度計を用い、荷重は 4.904N とした。測定位置は、溶接継手断面の板厚の 1/2 とし、測定間隔は 0.5mm とした。

(3) 試験結果及び考察

Fig. 4.7 に厚さ 60mm のアステロイ X R 溶接継手のマクロ組織を示す。マクロ組織は正常で溶接欠陥は認められなかった。

Fig. 4.8 に厚さ 15mm のアステロイ X R 溶接継手のミクロ組織を示す。いずれの溶加材の場合も、溶接金属及びボンド部にミクロ割れ等の溶接欠陥は認められなかった。なお、母材熱影響部においても、溶接入熱による結晶粒の粗大化は生じていなかった。また、溶加材の種類による溶接金属組織上の差異は認められなかった。

Fig. 4.9 に厚さ15mmの Hastelloy X R 溶接継手の硬さ分布を示す。いずれの溶加材の場合も、溶接金属では Hv230~260 程度であり、溶加材の種類の違いによる硬さ分布への影響は認められなかった。一方、母材では Hv200~230 程度であり、溶接金属と比較して、硬さはやや低下した。これは、溶接金属及び母材のマイクロ組織がいずれも正常であることから、溶接部における硬さの増大は、金属組織的なものよりもむしろ、溶接金属の積層による塑性ひずみの累積に起因しているものと推定される⁽¹⁰⁾。

(4) まとめ

Hastelloy X R 溶接継手の金属組織及び硬さ分布は、いずれの厚肉構造物用溶加材の場合も、正常なものであり健全であると判断された。

4.2 引張性質

(1) 目的

溶接性に関する検討結果から、厚板での特性が良好な G 案、J 案及び K 案合金の 3 種の溶加材を用いて TIG 溶接施工を行った溶接金属の引張性質を調べる。

(2) 実験方法

試験材には供試材料の項で述べた厚さ15mmの板材を用いた。

試験片の形状及び寸法を Fig. 4.10 に示す。引張試験は島津製作所製オートグラフ試験機を用い、試験は JIS Z2241 及び JIS G0567 に準拠して行った。試験温度は室温及び 900℃ とし、試験雰囲気は大気中とした。

(3) 結果

室温及び 900℃ における 0.2% 耐力及び引張強さの結果をそれぞれ Fig. 4.11 及び Fig. 4.12 に示す。室温における溶接金属の強度は母材のそれに比べて 0.2% 耐力及び引張強さとも著しい増加が見られたが、その程度は前者の方が大きかった。また合金間の強度に関する有意な差は認められなかった。これに対して、900℃ における溶接金属の強度は母材のそれと比べて 0.2% 耐力及び引張強さとも若干増加していたが、それらの差は小さく、また合金間の差は殆どなかった。

室温及び 900℃ における破断伸びと破断絞りの結果をそれぞれ Fig. 4.13 及び Fig. 4.14 に示す。室温における溶接金属の延性は母材のそれに比べて低下が見られたが、破断伸び及び破断絞りとも 30% 程度以上の値を有していた。この場合、合金間に有意な差は認められなかった。また、900℃ における溶接金属の延性は母材のそれに比べて室温における場合と同様に低下が見られた。しかしながらその低下の割合は比較的少なく破断伸び及び破断絞りとも平均的には 60% 程度以上の値を有していた。また、合金間に有意な差は認められなかった。

Fig. 4.15 に引張試験後の破断部の外観観察結果を示す。室温の結果に比べて 900℃ における結果はいずれの溶加材を用いた溶接金属でもこの場合における大きな破断伸びを有していることと関連して比較的大きな局所変形を生じていることが認められた。

なお、Table 4.5に本実験により得られた引張試験の結果を参考までに示す。

Fig. 4.16に室温及び900°Cにおける強度に対する従来のデータ^{11), 11), 12), 13)}との比較結果を示す。これより0.2%耐力及び引張強さとも従来の結果とほぼ同等程度であることが分かる。

室温及び900°Cにおける破断伸びと破断絞りに対する従来のデータ^{11), 11), 12), 13)}との比較結果をそれぞれFig. 4.17及びFig. 4.18に示す。室温における延性については破断伸び及び破断絞りともこれまでの試験で得られたデータバンドのほぼ中間に位置していた。一方、高温延性については破断絞りが従来のデータとほぼ同等の値を示すのに対して、破断伸びについては3種の溶加材とも著しい特性の向上が認められた。

(4) まとめ

3種の溶加材を用いてTIG溶接を施した溶接金属の引張性質を室温及び900°Cにおいて調べた。得られた結果は次の通りである。

- ① 溶接金属の強度はいずれの溶加材を用いた場合でも、母材のそれよりも高く、合金間に有意な差は認められなかった。
- ② 溶接金属の延性はいずれの溶加材を用いた場合でも、母材のそれに比べて低下した。しかしながら、例えば高温延性に関してはいずれの合金についても破断伸び及び破断絞りとも平均的には約60%程度以上の値を有していた。また、このことに関する合金間における有意な差は余り見られなかった。
- ③ これらの溶加材について得られた溶接金属の試験結果から判断していずれの溶加材も工学的な観点からの問題はないと思われる。

4.3 クリープ性質

(1) 目的

6種類の厚肉構造物用溶加材の中から、Table 4.2における割れ長さ合計及び割れ個数合計の点で、比較的良い結果を示したG案、J案及びK案合金の3種を選定し、溶接金属及び溶接継手の大気中クリープ及びクリープ破断試験を実施し、高温長時間強度を評価した。

(2) 試験方法

厚さ60mmの場合は、溶接金属のクリープ破断試験のみを実施した。なお、試験片は、採取の都合上、溶接ビードと直角方向に採取しており、十分なゲージ長さが確保できなかったため、伸びは測定していない。また、厚さ15mmの場合は、溶接金属のクリープ試験及び溶接継手のクリープ破断試験を実施し、溶接金属のクリープ試験においては、クリープ曲線を求めた。Fig. 4.19に厚さ60mm及び15mmの場合の試験片の形状及び寸法を示す。

試験雰囲気は大気中であり、試験温度は900°Cとした。なお、厚さ60mmの場合、応力は38.0MPa、45.0MPa、52.0MPa及び58.8MPaの4水準とし、最長試験時間は3000hを目標とした。一方、厚さ15mmの場合は、溶接金属及び溶接継手とも、応力

は52.0MPa及び45.0MPaの2水準のとした。

(3) 試験結果及び考案

1) 試験結果

Table 4.6 に厚さ60mmの場合の溶接金属のクリープ破断試験結果並びに厚さ15mmの場合の溶接金属のクリープ試験結果及び溶接継手のクリープ破断試験結果をまとめて示す。また、Fig. 4.20に応力とクリープ破断時間の関係を、Fig. 4.21及びFig. 4.22には、各々、破断伸びまたは破断絞りとクリープ破断時間の関係を示す。応力とクリープ破断時間の関係では、厚さ60mm及び15mmのいずれの場合も、溶接金属のクリープ破断時間は Hasteloy XR 母材のマスターカーブ⁹⁾よりも十分長いことがわかった。なお、厚さ60mmと15mmの場合の溶接金属のクリープ破断時間を比較すると、厚さ60mmの方が、厚さ15mmの場合よりも多少長時間側になる傾向が見られた。更に、破断位置がいずれも母材側であった厚さ15mmの溶接継手の場合も、マスターカーブを上回っていた。

また、クリープ及びクリープ破断試験を実施した溶加材（G案、J案及びK案合金）の種類によるクリープ破断強度及びクリープ破断延性の差異は、厚さ15mmの場合は明瞭に認められなかったものの、3000h程度まで試験を行った厚さ60mmの場合は、G案及びJ案合金とK案合金との間で、クリープ破断強度について差異が認められた。すなわち、K案合金では、G案及びJ案合金と比較して、1000h程度の比較的高応力・短時間側では、クリープ破断強度が向上するが、3000h程度の比較的低応力・長時間側になると、クリープ破断強度が低下する傾向にあることがわかった。なお、クリープ破断延性に関しては、厚さ60mmの場合も、厚さ15mmの場合と同様、溶加材（G案、J案及びK案合金）の種類による差異は認められなかった。

Fig. 4.23及びFig. 4.24に厚さ15mmの場合の溶接金属のクリープ曲線を示す。溶接金属においても、2次及び3次クリープ領域が明瞭に現れている。

Fig. 4.25 に厚さ60mm及び15mmの場合の試験後の試験片外観を示す。溶接金属試験片では、高応力・短時間側で、著しい絞りが認められるが、低応力・長時間側では、絞りがほとんど見られない。なお、溶接継手の場合は、全て母材破断であり、かなりの破断絞りを伴っている。

Fig. 4.26、Fig. 4.27、Fig. 4.28、Fig. 4.29、Fig. 4.30及びFig. 4.31 に厚さ60mm及び15mmの場合の破断部断面の顕微鏡組織写真を示す。組織写真は、主として柱状晶の粒界が剥離するような破断の様相を呈しており、溶加材間の破断状況には有意な差は認められなかった。なお、Fig. 4.26 は、G案合金の溶加材を用いた厚さ60mmの溶接金属の断面組織であるが、他のものと異なり、再結晶組織が見られたり、粒界にボイドが発生してそれらがつながったような破断の様相を呈している。これは、そのマクロ写真等から推定すると、組織観察のための断面の切断方向が柱状晶に直角方向になったためであり、破断状況は本質的に他の試験片と同じであると考えられる。

2) 従来のクリープデータとの比較

既報^{1), 2), 10)}において開発されたBを約50ppm含む溶加材によるクリープデータと比較した結果をFig. 4.32、Fig. 4.33及びFig. 4.34に示す。Fig. 4.32に示すように、既報のデータは溶接金属でクリープ破断強度が十分大きく、マスターカーブに対して時間で約10倍の裕度を有していたのに対し、厚肉構造物用溶加材では、多少、裕度は小さくなるが、それでも時間で約5倍の余裕があり、長時間側への外挿性でもハステロイXR母材と同様な傾向を示すことがわかった。厚肉構造物用溶加材で多少裕度が小さくなった原因は、クリープ特性の向上に有効なB及びC量を低めの水準に設定したからであると考えられる。

3) クリープ強度推定のための重回帰分析

本報では、従来のデータのほかに既報におけるA案～D案溶加材並びにG案、J案及びK案溶加材についてのクリープ強度のデータを加え、より多くのデータを用いて予測精度を高めることをねらって重回帰式を求めることを試みた。

なお、重回帰式は、900°C、44.0MPaにおけるクリープ破断時間、もしくはその条件下でのデータがないものについては、応力-破断時間のデータから外挿して求めた値を従属変数(Y)とし、溶加材中の各元素含有量を独立変数($X_1 \sim X_n$)として求めた。算出された重回帰式及びその適用範囲を以下に示す。ここで、(1)式における t_{r1} は溶接金属のクリープ破断時間(h)、(2)式における t_{r2} は溶接継手のクリープ破断時間(h)を表す。

$$t_{r1} = -6430(\text{Mn}\%) - (\text{Alppm}) - 23(\text{Sppm}) + 1776(\text{Mo}\%) + 7(\text{Bppm}) \\ + 3(\text{Zrppm}) - 2824(\text{Si}\%) - 7877 \quad (1)$$

$$t_{r2} = -1796(\text{Mn}\%) + 677(\text{Cr}\%) - 5(\text{Oppm}) - (\text{Yppm}) - 12326 \quad (2)$$

適用範囲	C : 0.064~0.13%	Mn: 0.49~0.94%	Fe: 17.71~19.10%
	Si: 0.31~0.61%	Co: 0.001~1.04%	Cr: 21.05~21.71%
	Mo: 8.5~9.2%	W : 0.42~0.56%	Y : 0~220ppm
	La, Ce: 0~260ppm,	B : 0~160ppm,	Mg: 50~230ppm
	Cu: 10~90ppm,	Zr: 0~180ppm,	Al: 20~1000ppm
	Ti: 50~90ppm,	P : 10~50ppm	S : 10~60ppm
	O : 4~129ppm,	N : 20~84ppm	

これらの重回帰式で溶接金属については既報の場合と同様に特にMnの回帰係数が(一)で、かつその絶対値が他の元素に比較して大きく、Mn量の増加は、溶接金属のクリープ強度を低下させることが推定できる。

Fig. 4.35及びFig. 4.36に溶接金属及び溶接継手におけるクリープ破断時間に対する実験値と重回帰式より求めた予測値との比較を示す。

溶接金属の場合は、重回帰式のあてはまりの精度を示す寄与率 (R^2) が0.7941と高く、実験値と比較的よく一致した重回帰式が得られた。B案、C案、D案、J案及びK案溶加材についての実験値と予測値とは、比較的よく一致していた。これに対してA案溶加材ではその差は比較的大きかった。

一方、溶接継手の場合でも、実験値と概ね一致する重回帰式が得られたが、寄与率 (R^2) が0.5553と溶接金属の場合に比較して低下しており、重回帰式のあてはまりの精度がやや低下する傾向を示した。これは、溶接継手では、母材で破断したデータが含まれることから溶加材中の各元素含有量のみを独立変数とした重回帰分析では溶接継手のクリープ強度との関係を充分には説明できないものと考えられる。

(4) まとめ

6種の厚肉構造物用溶加材の中から選定した3種(G案、J案及びK案合金)の溶加材について、溶接金属及び溶接継手の大気中クリープ及びクリープ破断試験を実施したところ、ハステロイXR母材のマスターカーブを十分上回ることがわかり、とりわけG案及びJ案合金が、K案合金に比較して良好な結果を示すことがわかった。また、従来のクリープデータとの比較においても、マスターカーブに対する裕度の点からは問題なく、十分なクリープ強度を有していると判断された。

更に、従来のデータに本報のクリープデータを加えて求めた重回帰式により、クリープ強度の予測を試みたところ、比較的よく実験値と一致した。

5. 総合評価

薄板溶接の場合には、溶加材の化学成分について、既報^{1), 2), 10)}で検討した範囲内では、曲げ試験等で大きな欠陥が生ずることもなく、十分安定した溶接施工のできる事が再確認された。しかしながら、これまでの研究で、厚板溶接に関しては、外見的施工性には特に問題はみられないものの、側曲げ試験では微細な欠陥が生じやすく、欠陥が連続すると大きな割れとなり、溶接施工条件の工夫と十分な施工管理を行わなければ、実機の製作時に側曲げ試験において良好な結果が得られない可能性のあることが明らかになった。

本報では、既報¹⁾により提案された合金設計を更に発展させ、厚板における溶接施工を安定させるために、割れに及ぼす影響が大きいと考えられる元素、例えば、B及びC量を最適化することにより、厚板における溶接施工性のみならず、基本的な性質も十分満足できる厚肉構造物用溶加材を開発することが可能と考え、7種の溶加材を製作し、その特性評価を行った。Table 5.1に各溶加材について、製造性、溶接性、引張特性及びクリープ特性の観点から比較検討した結果を示す。この表に示すように、7種の溶加材のうち、G案、J案及びK案合金の3種が比較的良い結果を示した。この中で、以下の点を考慮して、ハステロイXR厚肉構造物用溶加材として、J案合金を選定した。

溶接金属の場合は、重回帰式のあてはまりの精度を示す寄与率 (R^2) が0.7941と高く、実験値と比較的よく一致した重回帰式が得られた。B案、C案、D案、J案及びK案溶加材についての実験値と予測値とは、比較的よく一致していた。これに対してA案溶加材ではその差は比較的大きかった。

一方、溶接継手の場合でも、実験値と概ね一致する重回帰式が得られたが、寄与率 (R^2) が0.5553と溶接金属の場合に比較して低下しており、重回帰式のあてはまりの精度がやや低下する傾向を示した。これは、溶接継手では、母材で破断したデータが含まれることから溶加材中の各元素含有量のみを独立変数とした重回帰分析では溶接継手のクリープ強度との関係を充分には説明できないものと考えられる。

(4) まとめ

6種の厚肉構造物用溶加材の中から選定した3種(G案、J案及びK案合金)の溶加材について、溶接金属及び溶接継手の大気中クリープ及びクリープ破断試験を実施したところ、ハステロイXR母材のマスターカーブを十分上回ることがわかり、とりわけG案及びJ案合金が、K案合金に比較して良好な結果を示すことがわかった。また、従来のクリープデータとの比較においても、マスターカーブに対する裕度の点からは問題なく、十分なクリープ強度を有していると判断された。

更に、従来のデータに本報のクリープデータを加えて求めた重回帰式により、クリープ強度の予測を試みたところ、比較的よく実験値と一致した。

5. 総合評価

薄板溶接の場合には、溶加材の化学成分について、既報^{1), 2), 10)}で検討した範囲内では、曲げ試験等で大きな欠陥が生ずることもなく、十分安定した溶接施工のできる事が再確認された。しかしながら、これまでの研究で、厚板溶接に関しては、外見的施工性には特に問題はみられないものの、側曲げ試験では微細な欠陥が生じやすく、欠陥が連続すると大きな割れとなり、溶接施工条件の工夫と十分な施工管理を行わなければ、実機の製作時に側曲げ試験において良好な結果が得られない可能性のあることが明らかになった。

本報では、既報¹⁾により提案された合金設計を更に発展させ、厚板における溶接施工を安定させるために、割れに及ぼす影響が大きいと考えられる元素、例えば、B及びC量を最適化することにより、厚板における溶接施工性のみならず、基本的な性質も十分満足できる厚肉構造物用溶加材を開発することが可能と考え、7種の溶加材を製作し、その特性評価を行った。Table 5.1 に各溶加材について、製造性、溶接性、引張特性及びクリープ特性の観点から比較検討した結果を示す。この表に示すように、7種の溶加材のうち、G案、J案及びK案合金の3種が比較的良い結果を示した。この中で、以下の点を考慮して、ハステロイXR厚肉構造物用溶加材として、J案合金を選定した。

- ① G案合金は、厚板に対する耐割れ感受性が、J案及びK案合金よりもわずかに劣ること。
- ② K案合金は、クリープ破断強度が長時間側（低応力側）で低下する傾向が認められること。
- ③ K案合金は、N添加による長時間の組織安定性が明かでないこと。

このように、割れに及ぼす影響が大きいと考えられる元素、例えばB及びC量を最適化することにより、厚板においても、比較的安定した溶接施工の可能なことが分かった。すなわち、既報^{1), 2), 10)}ではB量の目標をソリッドワイヤで約50ppmとしているのに対して、J案及びK案合金では、多少低めの約30ppm前後として、同時にC量も低めに設定した。この場合、クリープ特性への影響（クリープ破断強度及びクリープ破断延性の低下）が懸念されたが、 Hastelloy XR母材のクリープマスターカーブ⁴⁾に対しては、十分な裕度をもっていることが分かった。更に、B量が約50ppmのG案合金と比較しても、同等のクリープ強度を有していた。

また、既報^{1), 2), 10)}において開発され特性評価がなされたBを約50ppm含む溶加材によるデータと比較したところ、既報のデータは溶接金属でクリープ破断強度が十分大きく、マスターカーブに対して時間で約10倍の裕度を有していたのに対し、G案、J案及びK案合金では、多少、裕度が小さくなるが、それでも時間で約5倍の余裕があり、長時間側への外挿性でも Hastelloy XR母材と同様な傾向を示すことが分かった。G案、J案及びK案合金で多少裕度が小さくなった原因は、クリープ特性の向上に有効なB及びC量を低めの水準に設定したからであると考えられる。また、K案合金は、クリープ破断強度を向上させるために、Nを約350ppm添加したが、本実験結果の範囲内では、他の溶加材（G案及びJ案合金）と比較して、Nを添加したことによる利点は認められなかった。

したがって、 Hastelloy XR厚肉構造物用溶加材としては、 Hastelloy XR母材の化学組成を基本として、耐溶接割れ感受性が最も優れている上に十分な引張強度、クリープ破断強度・延性等を有するJ案合金（約30ppmB, 約0.06% C）をもとに、既報^{1), 2)}の研究結果を反映したものとするのが妥当と考えられる。

6. 総括と展望

高温工学試験研究炉は高温試験運転時に原子炉出口温度が950°Cと極めて高くなるほか、冷却材としてヘリウムガスを使用するなど従来の原子炉システムにはない特徴を有しているため、高温部構造材料として使用が予定されているハステロイXRについても多くの課題のあることが指摘されていた。これらの課題のひとつである溶接技術についても、その重要性が当初より認識され、筆者らの研究グループにおいても広範にわたる研究を進め、薄肉構造物に対しては、溶接部が母材と同等以上の高温強度特性を有するTIG溶接用の溶加材の開発に成功した。

しかしながら、薄肉構造物用に開発した溶加材を用いて厚肉構造物を溶接した場合には、側曲げ試験において割れが認められる場合があった。すなわち、今後予定されている実機の厚肉構造物を製作するに際しては、施工の安定性という観点から、より欠陥の生じにくい溶加材を開発しておく必要があると判断した。

このような背景のもとに、ハステロイXR系合金厚肉構造物用の溶加材を開発することを目的として実施した一連の試験研究により得られた知見及び今後の検討課題を挙げると次の通りである。

(1) 得られた知見

- 1) 溶加材の合金元素成分及び製造工程を最適化することにより、薄肉構造物用として筆者らの研究グループがすでに開発した溶加材と比較して、高温強度特性をそこなうことなく、溶接部の割れ感受性を低減出来ることを見出した。
- 2) 最適化した溶加材（J案合金）は高温工学試験研究炉のヘリウム冷却系に用いられる薄肉構造物用としてはもちろんのこと、より施工の難しい厚肉構造物の溶接部に要求される諸性能に対しても、十分な裕度を持っているものと期待出来る。
- 3) 溶加材の合金元素含有量とクリープ破断時間との関係を重回帰分析することにより、新たに提案した合金設計法を用いて予測したクリープ破断時間と実験値がよく一致した。すなわち本合金設計法の妥当性が証明された。

(2) 今後の検討課題

高温工学試験研究炉の高温部構造材料として起用することが予定されているハステロイXRの薄肉及び厚肉構造物用溶加材として本研究において開発したJ案合金を実用化するために確認する必要がある今後の課題は以下の通りである。

- 1) 安定した品質の溶加材を実機製作時と同じ工業規模溶解で多量に供給することが可能であることを再確認すること。
- 2) 実機を近似した使用条件下での長期耐久性に関連した試験研究を実施し、ここで開発した溶接技術の基盤を強化すること。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、有益な助言及び激励を賜った日本原子力研究所、燃料・材料工学部 近藤達男部長に感謝致します。また、本研究を行う上で、三菱マテリアル(株)、日本ウェルディング・ロッド(株)、(株)富士電機総合研究所、石川島播磨重工業(株)及び日本原子力研究所の関係各位に多大の御協力を得ましたことを感謝致します。

参考文献

- (1) 渡辺、中島、佐平、倉内、斉藤、高津、仲西： JAERI-M 89-206 (1989)
- (2) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、斉藤、仲西、辻、塚田： JAERI-M 91-181 (1991)
- (3) 新、高津、斉藤、仲西、菊池：溶接学会論文集、Vol. 4, No. 2, (1986), 365
- (4) W. F. Savage, E. F. Nippes and B. M. Kranz: Welding Journal Vol. 50, No. 7, (1971) 292S-303S
- (5) 弘本、大黒、河野：“高温部材溶接方法”公開特許公報、公開番号 昭61-20668
- (6) W. F. Savage, E. F. Nippes and Goodwin: Welding Journal Vol. 56, No. 8 (1977) 245S-253S
- (7) American Society for Testing and Materials B435 (Nov. 1, 1987)
- (8) Aerospace Materials Specification, AMS5536K (Oct. 1, 1987)
- (9) 羽田、元木、馬場： JAERI-M 90-148 (1990)
- (10) 日本溶接協会 原子力研究委員会HWS小委員会：ハステロイXRの溶接継手に関する調査報告書 JWES-AE-9005 (1990)
- (11) 近藤、渡辺、斉藤、仲西、佐平、辻、倉田、塚田、小沢： JAERI-M 86-003 (1986)
- (12) 渡辺、仲西、高津、佐平、中島：高温学会誌、Vol. 16, No. 6, (1990) 368
- (13) K. Watanabe, H. Nakajima, K. Sahira, N. Kurauchi, T. Takeiri, T. Saitoh, T. Takatsu and T. Nakanishi: Journal of Nucl. Mater. Vol. 185, No. 1, (1991) 8

謝 辞

本研究を実施するにあたり、有益な助言及び激励を賜った日本原子力研究所、燃料・材料工学部 近藤達男部長に感謝致します。また、本研究を行う上で、三菱マテリアル(株)、日本ウェルディング・ロッド(株)、(株)富士電機総合研究所、石川島播磨重工業(株)及び日本原子力研究所の関係各位に多大の御協力を得ましたことを感謝致します。

参考文献

- (1) 渡辺、中島、佐平、倉内、斉藤、高津、仲西： JAERI-M 89-206 (1989)
- (2) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、斉藤、仲西、辻、塚田： JAERI-M 91-181 (1991)
- (3) 新、高津、斉藤、仲西、菊池：溶接学会論文集、Vol. 4, No. 2, (1986), 365
- (4) W. F. Savage, E. F. Nippes and B. M. Kranz: Welding Journal Vol. 50, No. 7, (1971) 292S-303S
- (5) 弘本、大黒、河野：“高温部材溶接方法”公開特許公報、公開番号 昭61-20668
- (6) W. F. Savage, E. F. Nippes and Goodwin: Welding Journal Vol. 56, No. 8 (1977) 245S-253S
- (7) American Society for Testing and Materials B435 (Nov. 1, 1987)
- (8) Aerospace Materials Specification, AMS5536K (Oct. 1, 1987)
- (9) 羽田、元木、馬場： JAERI-M 90-148 (1990)
- (10) 日本溶接協会 原子力研究委員会HWS小委員会： Hastelloy X Rの溶接継手に関する調査報告書 JWES-AE-9005 (1990)
- (11) 近藤、渡辺、斉藤、仲西、佐平、辻、倉田、塚田、小沢： JAERI-M 86-003 (1986)
- (12) 渡辺、仲西、高津、佐平、中島：高温学会誌、Vol. 16, No. 6, (1990) 368
- (13) K. Watanabe, H. Nakajima, K. Sahira, N. Kurauchi, T. Takeiri, T. Saitoh, T. Takatsu and T. Nakanishi: Journal of Nucl. Mater. Vol. 185, No. 1, (1991) 8

Table 2.1 Effect of alloying element on crack susceptibility by bend test

Element	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	partial correlation coefficient	correlation coefficient
B	+0.31	+0.68	+0.66	+0.57
※T.REM.	+0.04	+0.36	+0.42	+0.22
Zr	+0.09	+0.33	+0.42	+0.19
N	+0.29	+0.59	+0.33	-0.21
Mo	+36.3	+0.41	+0.32	+0.03
Ti	+0.23	+0.44	+0.24	+0.002
O	+0.1	+0.17	+0.19	-0.15
S	+0.19	+0.15	+0.15	+0.3
Cr	+9.31	+0.16	+0.14	+0.08
Mn	+8.48	+0.09	+0.13	+0.1
C	+147.7	+0.13	+0.1	+0.23
Co	+2.2	+0.06	+0.02	+0.29
Fe	-1.48	-0.03	-0.02	-0.11
Si	-10.9	-0.05	-0.03	+0.14
Al	-0.002	-0.05	-0.03	-0.36
P	-0.09	-0.15	-0.07	+0.08
W	-125.2	-0.44	-0.22	+0.02
Cu	-0.28	-0.62	-0.31	-0.35
Mg	-0.1	-0.37	-0.38	-0.12

Constant term=-471.5

Table 2.2 Effect of alloying element on crack susceptibility by FISCO cracking test

Element	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	partial correlation coefficient	correlation coefficient
S	+0.91	+2.32	+0.66	+0.17
Co	+308	+1.53	+0.56	+0.03
Si	+206.7	+1.62	+0.42	+0.12
Ti	+0.33	+1.16	+0.41	-0.2
Mn	+20.8	+0.21	+0.17	-0.13
Mg	+0.02	+0.21	+0.08	-0.36
Mo	+5.77	+0.09	+0.07	0.24
Zr	0	-0.003	-0.004	+0.16
※T.REM.	0	-0.09	-0.06	-0.07
W	-36.2	-0.31	-0.08	-0.18
Cu	-0.06	0	-0.1	-0.08
O	-0.11	-0.45	-0.28	-0.09
B	-0.06	-0.37	-0.31	+0.04
P	-0.54	-2.05	-0.32	+0.09
Cr	-22.4	-0.63	-0.43	+0.03
Al	-0.008	-0.46	-0.43	-0.4
C	-576.4	-1.05	-0.48	-0.03
Fe	-48.5	-1.95	-0.5	+0.01
N	-0.24	-1.38	-0.56	-0.31

Constant term=+945.1

※ Total rare earth metal

Table 2.3 Aim range and aim point for chemical composition of filler metals

(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Mg	Co	B	Ni	N	O	Note
F	Min.	0.07	0.20	0.75	-	20.5	18.0	8.0	0.20	-	-	-	0.01	-	0.004	-	-	-	
	Max.	0.09	0.50	0.85	0.003	21.5	19.0	8.5	0.60	0.50	0.05	0.03	0.04	0.1	0.006	-	0.003	0.002	B:50ppm C:0.08%
	Aim point	0.08	0.35	0.75	0.001	21.0	18.5	8.2	0.40	<0.01	0.04	<0.01	0.02	<0.02	0.005	REM.	0.002	0.001	
G	Min.	0.05	0.20	0.75	-	20.5	18.0	8.0	0.20	-	-	-	0.01	-	0.004	-	-	-	
	Max.	0.07	0.50	0.85	0.003	21.5	19.0	8.5	0.60	0.50	0.05	0.03	0.04	0.1	0.006	-	0.003	0.002	B:50ppm C:0.05%
	Aim point	0.05	0.35	0.75	0.001	21.0	18.5	8.2	0.40	<0.01	0.04	<0.01	0.02	<0.02	0.005	REM.	0.002	0.001	
H	Min.	0.07	0.20	0.75	-	20.5	18.0	8.0	0.20	-	-	-	0.01	-	0.0025	-	-	-	
	Max.	0.09	0.50	0.85	0.003	21.5	19.0	8.5	0.60	0.50	0.05	0.03	0.04	0.1	0.0045	-	0.003	0.002	B:35ppm C:0.08%
	Aim point	0.08	0.35	0.75	0.001	21.0	18.5	8.2	0.40	<0.01	0.04	<0.01	0.02	<0.02	0.0035	REM.	0.002	0.001	
I	Min.	0.07	0.20	0.75	-	20.5	18.0	8.0	0.20	-	-	-	0.01	-	0.001	-	-	-	
	Max.	0.09	0.50	0.85	0.003	21.5	19.0	8.5	0.60	0.50	0.05	0.03	0.04	0.1	0.003	-	0.003	0.002	B:20ppm C:0.08%
	Aim point	0.08	0.35	0.75	0.001	21.0	18.5	8.2	0.40	<0.01	0.04	<0.01	0.02	<0.02	0.002	REM.	0.002	0.001	
J	Min.	0.05	0.20	0.75	-	20.5	18.0	8.0	0.20	-	-	-	0.01	-	0.001	-	-	-	
	Max.	0.07	0.50	0.85	0.003	21.5	19.0	8.5	0.60	0.50	0.05	0.03	0.04	0.1	0.003	-	0.003	0.002	B:20ppm C:0.05%
	Aim point	0.05	0.35	0.75	0.001	21.0	18.5	8.2	0.40	<0.01	0.04	<0.01	0.02	<0.02	0.002	REM.	0.002	0.001	
K	Min.	0.05	0.20	0.75	-	20.5	18.0	8.0	0.20	-	-	-	0.01	-	0.001	-	-	-	
	Max.	0.07	0.50	0.85	0.003	21.5	19.0	8.5	0.60	0.50	0.05	0.03	0.04	0.1	0.003	-	0.035	0.002	B:20ppm C:0.05% N:0.04%
	Aim point	0.05	0.35	0.75	0.001	21.0	18.5	8.2	0.40	<0.01	0.04	<0.01	0.02	<0.02	0.002	REM.	0.040	0.001	
L	Min.	0.07	0.20	0.75	-	20.5	18.0	8.0	0.20	-	-	-	0.04	-	0.004	-	-	-	
	Max.	0.09	0.50	0.85	0.003	21.5	19.0	8.5	0.60	0.50	0.05	0.03	0.08	0.1	0.006	-	0.003	0.002	B:50ppm C:0.08% Mg:0.06%
	Aim point	0.08	0.35	0.75	0.001	21.0	18.5	8.2	0.40	<0.01	0.04	<0.01	0.06	<0.02	0.005	REM.	0.002	0.001	

Table 3.1 Specification and analysis results of chemical composition for Hastelloy Alloy XR-II plate

		C	Mn**	Si**	P	S	Cr	Co**	Mo	W	Fe	B	Ni	Al**	Ti**	Cu	N***
Spec. for Hastelloy Alloy XR-II		0.05	0.75	0.25	≤0.040	≤0.030	20.50	≤2.50	8.0	0.20	17.0	≤0.010	Rem.	≤0.05	≤0.03	≤0.50	—
		-0.15	-1.00	-0.50		-23.00			-10.0	-1.00	-20.0						
	Ladle	0.07	0.85	0.35	<0.001	0.002	21.72	0.02	9.19	0.49	18.07	0.0015	Rem.	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
(Ch. No. 0-644)	Check (T)	0.07	0.86	0.33	<0.001	<0.001	21.72	0.02	9.23	0.49	17.96	0.0013	Rem.	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Check (B)	0.07	0.85	0.35	<0.001	0.002	21.72	0.02	9.19	0.49	18.07	0.0015	Rem.	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Spec. for Hastelloy Alloy X ASTM B435 N06002 AMS 5536 N06002		0.05	≤1.00	≤1.00	≤0.04	≤0.03	20.5	0.5	8.0	0.2	17.0	—	Rem.	—	—	—	—
		-0.15				-23.0	-23.0	-2.5	-10.0	-1.0	-20.0						
		0.05	≤1.00	≤0.50	≤0.040	≤0.030	20.50	0.50	8.00	0.20	17.00	≤0.010	Rem.	≤0.50	≤0.15	≤0.50	—
	-0.15					-23.00	-2.50	-10.00	-1.00	-20.00							

* : after ref. 5) T : Top side of ingot Rem. : Remainder
 ** : special requirement B : Bottom side of ingot — : not specified or not analyzed

Table 3.2 Results of room temperature tensile test, hardness and grain size measurements for 60mm and 15mm thickness Hastelloy Alloy XR-II plates

	Ultimate Tensile Strength (MPa)	0.2% Offset Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)	Grain Size	
					T	L
*: ASTM 8435-87	≥ 655 *	≥ 240 *	≥ 35 *	Ref.	2~5	
Hastelloy Alloy XR-II plate 60mm thickness	686	341	56	80	2	2
	687	343	55	87	-	2

T : Transverse direction
 L : Longitudinal direction
 Ref. : Reference
 AGS No. : Average grain size number

Table 3.3 Results of creep rupture test at 815 and 900°C for 60mm and 15mm thickness Hastelloy Alloy XR plates

Condition	815°C, 105 MPa		900°C, 49 MPa	
	Rupture Time (h)	Fracture Elongation (%)	Rupture Time (h)	Fracture Elongation (%)
Spec.	≥ 24 *	Ref.	≥ 100 **	≥ 10 **
Hastelloy Alloy XR-II plate 60mm thickness	55	83	171	50
	88	48	242	49

* : AMS 5536
 ** : Spec. of producer
 Ref. : Reference

Table 3.4 Chemical compositions of experimental filler metals for Hastelloy Alloy XR

Alloy	C	Mn**	Si**	P	S	Cr	Co**	Nb	W	Fe	B**	Ni	Mo**	Al**	Ti**	Cu	N**	O**
Spec. for Hastelloy Alloy XR*	0.05 0.15	0.75 -1.00	0.25 -0.50	≤0.040	≤0.030	20.50 -23.00	≤2.50	8.0 -10.0	0.20 -1.00	17.0 -20.0	≤0.010	Rem.	-	≤0.05	≤0.03	≤0.50	-	-
Spec. for Hastelloy Alloy X JIS Z3334 YNiCrMo-2	0.05 -0.15	≤1.0	≤1.0	≤0.040	≤0.030	20.50 -23.00	0.50 -2.5	8.0 -10.0	0.20 -1.00	17.0 -20.0	-	Rem.	-	-	-	≤0.50	-	-
F Aim Point As Cast φ5.5 Bar Filler Metal Weld Metal	0.08 0.088 0.073 0.088	0.75 0.67	0.35 0.36	LAP <0.001	LAP <0.001	21.0 21.29	<0.02 0.03	8.2 8.34	0.4 0.42	18.5 18.59	0.0050 0.007 0.007 0.0047 0.0044	Rem. Rem.	0.02 0.03 0.024 0.007	0.04 0.04 0.054	<0.01 <0.01 0.002	<0.01 0.03	LAP 0.002	LAP <0.001
G Aim Point As Cast φ5.5 Bar Filler Metal Weld Metal	0.05 0.064 0.06 0.065	0.75 0.68	0.35 0.37	LAP <0.001	LAP 0.002	21.0 21.31	<0.02 0.03	8.2 8.30	0.4 0.42	18.5 18.61	0.0050 0.008 0.008 0.008 0.0054 0.0051	Rem. Rem.	0.02 0.02 0.018 0.005	0.04 0.04 0.048	<0.01 <0.01 0.002	<0.01 0.03	LAP 0.001	LAP <0.001
H Aim Point As Cast φ5.5 Bar Filler Metal Weld Metal	0.08 0.079 0.073 0.086	0.75 0.67	0.35 0.37	LAP <0.001	LAP 0.001	21.0 21.35	<0.02 0.03	8.2 8.27	0.4 0.42	18.5 18.61	0.0035 0.007 0.006 0.0046 0.0047	Rem. Rem.	0.02 0.02 0.018 0.007	0.04 0.04 0.051	<0.01 <0.01 0.002	<0.01 0.03	LAP 0.002	LAP <0.001
I Aim Point As Cast φ5.5 Bar Filler Metal Weld Metal	0.08 0.081 0.078 0.082	0.75 0.68	0.35 0.36	LAP <0.001	LAP 0.001	21.0 21.46	<0.02 0.03	8.2 8.22	0.4 0.42	18.5 18.52	0.0020 0.004 0.004 0.0033 0.0033	Rem. Rem.	0.02 0.02 0.020 0.006	0.04 0.04 0.05	<0.01 <0.01 0.002	<0.01 0.03	LAP 0.002	LAP 0.001
J Aim Point As Cast φ5.5 Bar Filler Metal Weld Metal	0.05 0.065 0.062 0.065	0.75 0.68	0.35 0.37	LAP <0.001	LAP 0.001	21.0 21.40	<0.02 0.03	8.2 8.31	0.4 0.43	18.5 18.39	0.0020 0.004 0.004 0.0029 0.0026	Rem. Rem.	0.02 0.03 0.020 0.008	0.04 0.04 0.051	<0.01 <0.01 0.002	<0.01 0.03	LAP 0.002	LAP 0.001
K Aim Point As Cast φ5.5 Bar Filler Metal Weld Metal	0.05 0.070 0.063 0.065	0.75 0.69	0.35 0.37	LAP <0.001	LAP 0.001	21.0 21.65	<0.02 0.03	8.2 8.33	0.4 0.42	18.5 18.50	0.0020 0.004 0.004 0.0025 0.0024	Rem. Rem.	0.02 0.02 0.019 0.012	0.04 0.04 0.051	<0.01 <0.01 0.002	<0.01 0.03	LAP 0.002	LAP 0.001
L Aim Point As Cast	0.08 0.077	0.75 0.84	0.35 0.34	LAP 0.001	LAP 0.002	21.0 21.06	<0.02 0.02	8.2 8.40	0.40 0.40	18.5 18.79	0.005 0.008	Rem. Rem.	0.06 0.07	0.04 0.03	<0.01 <0.01	<0.01 <0.01	LAP 0.001	LAP

* : after ref.5) Rem : Remainder LAP : Low as possible
 ** : special requirement - : not specified or not analyzed

Table 3.5 Welding conditions (thickness: 60mm plate)

Welding procedure	Diameter of filler (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Wire feed rate (mm/min)	Ar gas flow rate (l/min)
GTAW	1.2	170	9-10	80	700	20-30

Table 3.6 Welding conditions (thickness: 15mm plate)

*) Test item No.	Welding procedure	Diameter of filler (mm)	Welding current (A)		Arc voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Wire feed rate (mm/min)	Ar gas flow rate (l/min)
			Peak	Base				
1	GTAW	1.2	230		8-12	130	600	Torch : 15-20 Back shield : 15-20
2	GTAW	1.2	170	150	8-10	50-100	800	Torch : 15-20 Trailing shield : 15-20

*) 1 : FISCO cracking test
2 : The other tests

Table 4.1 Chemical compositions of filler metals and weld metals

(mass%)

Alloy		Elements		
		B	C	Mg
F	Bar (ϕ 5.5)	0.007	—	0.024
	Filler metal (ϕ 1.2)	0.0047	0.073	—
	Weld metal	0.0044	0.088	0.007
G	Bar (ϕ 5.5)	0.008	—	0.018
	Filler metal (ϕ 1.2)	0.0054	0.060	—
	Weld metal	0.0051	0.065	0.005
H	Bar (ϕ 5.5)	0.006	—	0.018
	Filler metal (ϕ 1.2)	0.0046	0.073	—
	Weld metal	0.0047	0.086	0.007
I	Bar (ϕ 5.5)	0.004	—	0.020
	Filler metal (ϕ 1.2)	0.0033	0.078	—
	Weld metal	0.0033	0.082	0.006
J	Bar (ϕ 5.5)	0.004	—	0.020
	Filler metal (ϕ 1.2)	0.0029	0.062	—
	Weld metal	0.0026	0.065	0.008
K	Bar (ϕ 5.5)	0.004	—	0.019
	Filler metal (ϕ 1.2)	0.0025	0.063	—
	Weld metal	0.0024	0.065	0.012

Table 4.2 Results of side bend tests (thickness: 60mm plate)

Filler metal	T.P. No.	Liquid penetrant test (number)	Results of side bend tests (Crack length X Number) (mm X number)	Judgment **)	Total length of cracks (mm)	Total number of cracks (number)	Remarks
F	FS-1	1	2.0x3, 1.0x15 (L.F. 1.5x1)	X	45.0	54	Mg:0.024% (ϕ 5.5), Mg:0.007% [W.M.] C:0.073% (ϕ 1.2) B:0.0047% (ϕ 1.2), B:0.0044% [W.M.]
	FS-2	2	3.5x1, 1.5x1, 0.5x7 (L.F. 1.5x2)	X			
	FS-3	No defect	0.5x13	X			
	FS-4	1	1.0x4, 0.5x10 (L.F. 3.5x1)	X			
G*)	GS-1	No defect	No defect	O	9.1	9	Mg:0.018% (ϕ 5.5), Mg:0.005% [W.M.] C:0.060% (ϕ 1.2) B:0.0054% (ϕ 1.2), B:0.0051% [W.M.]
	GS-2	No defect	2.8x1, 1.0x1, 0.5x3	O			
	GS-3	No defect	1.0x3	O			
	GS-4	No defect	0.8x1	O			
H	HS-1	No defect	0.5x5	O	10.0	18	Mg:0.018% (ϕ 5.5), Mg:0.007% [W.M.] C:0.073% (ϕ 1.2) B:0.0046% (ϕ 1.2), B:0.0047% [W.M.]
	HS-2	1	1.0x2, 0.3x1 (L.F. 1.5x1)	O			
	HS-3	No defect	0.3x5	O			
	HS-4	1	0.8x4, 0.5x1 (L.F. 2.0x1)	O			
I	IS-1	No defect	1.5x3, 1.0x1	O	25.5	42	Mg:0.020% (ϕ 5.5), Mg:0.006% [W.M.] C:0.073% (ϕ 1.2) B:0.0033% (ϕ 1.2), B:0.0033% [W.M.]
	IS-2	No defect	1.5x1, 0.5x15	X			
	IS-3	No defect	0.5x15	X			
	IS-4	No defect	0.5x7	O			
J*)	JS-1	No defect	0.8x2, 0.3x1	O	2.4	4	Mg:0.020% (ϕ 5.5), Mg:0.008% [W.M.] C:0.062% (ϕ 1.2) B:0.0029% (ϕ 1.2), B:0.0026% [W.M.]
	JS-2	No defect	No defect	O			
	JS-3	No defect	No defect	O			
	JS-4	No defect	0.5x1	O			
K*)	KS-1	No defect	1.0x1, 0.7x1	O	3.7	4	Mg:0.020% (ϕ 5.5), Mg:0.012% [W.M.] C:0.063% (ϕ 1.2) B:0.0025% (ϕ 1.2), B:0.0024% [W.M.] N:0.034% (ϕ 1.2)
	KS-2	No defect	No defect	O			
	KS-3	No defect	1.0x2	O			
	KS-4	No defect	No defect	O			

*) For creep rupture tests

**) Criteria: (Maximum crack length) \leq 3 (mm), (Total crack length) \leq 7 (mm), (Number of cracks) \leq 10

Table 4.3 Results of guide bend tests (thickness: 15mm plate)

(a) Face bend test

Filler metal	Specimen no.	Crack length (mm) X number	※ Judgement
F	1	No defect	Good
	2	No defect	Good
G	1	No defect	Good
	2	0.1X1	Good
H	1	No defect	Good
	2	0.1X1	Good
I	1	No defect	Good
	2	No defect	Good
J	1	0.1X1	Good
	2	No defect	Good
K	1	0.2X1	Good
	2	0.3X1	Good

(b) Side bend test

Filler metal	Specimen no.	Crack length (mm) X number	※ Judgement
F	1	No defect	Good
	2	No defect	Good
G	1	No defect	Good
	2	0.1X1 0.2X1	Good
H	1	1.0X1	Good
	2	0.7X1	Good
I	1	0.1X1	Good
	2	0.1X1	Good
J	1	No defect	Good
	2	No defect	Good
K	1	No defect	Good
	2	No defect	Good

※ Criteria: Maximum crack length $\leq 3\text{mm}$
 Total crack length $\leq 7\text{mm}$
 Number of cracks ≤ 10

Table 4.4 Results of FISCO cracking tests (thickness: 15mm plate)

Filler metal		Weld bead no.			Total length(mm)	Crack ratio(%)
		1	2	3		
F	Length of weld(mm)	48.1	51.45	45.75	145.3	25.74
	Length of crack(mm)	*	*	*		
G	Length of weld(mm)	50.85	52.65	55.25	158.75	21.73
	Length of crack(mm)	*	*	*		
H	Length of weld(mm)	61.7	56	52.5	170.2	19.48
	Length of crack(mm)	*	*	*		
I	Length of weld(mm)	52.9	56.3	48.5	157.7	14.65
	Length of crack(mm)	*	*	*		
J	Length of weld(mm)	53.5	54.45	49.15	157.1	16.2
	Length of crack(mm)	*	*	*		
K	Length of weld(mm)	51.55	54.7	54	160.25	18.35
	Length of crack(mm)	*	*	*		

* Crack in crater

Table 4.5 Tensile properties of Hastelloy alloy XR-II weldments at R.T. and 900°C

Alloy	Test temperature (°C)	0.2 % Proof stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Total elongation (%)	Reduction in area (%)	Fracture position
G	R.T.	539.4	774.2	28.2	43.7	A
	900	151.8	221.1	67.8	61.5	A
		159.1	227.2	61.5	66.8	A
J	RT	519.0	752.7	32.2	35.7	A
	900	154.6	224.5	58.0	59.3	A
		154.5	224.7	65.1	65.9	A
K	RT	496.6	732.3	33.2	35.4	A
	900	151.7	225.2	89.2	76.4	A
		147.4	220.3	50.2	60.2	A

Table 4.6 Creep rupture test and creep test results at 900°C in air

Thick-ness (mm)	Test specimen		Applied stress (MPa)	Rupture time (h)	Fracture elongation (%)	Reduction of area (%)	Fracture location	
	Filler metal	No.						
60	Weld Metal	G	GTC-2	58.8	277.6	26.0	47.8	B
		J	JTC-2		318.4	9.8	17.3	A
		K	KTC-2		282.3	7.9	15.6	A
		G	GTC-1	52.0	511.9	14.2	17.3	A
		J	JTC-1		458.9	13.7	16.8	A
		K	KTC-1		860.4	11.2	10.3	A
		G	GTC-3	45.0	1154.1	7.1	3.3	B
		J	JTC-3		970.8	9.0	10.3	A
		K	KTC-3		1355.5	9.0	17.6	B
		G	GTC-4	38.0	2389.4	6.9	9.7	B
		J	JTC-4		2542.3	7.5	3.0	B
		K	KTC-4		2164.4	5.6	15.4	A
15	Weld Metal	G	GD-1	52.0	423.3	13.39	15.18	A
		J	JD-1		463.2	11.35	19.25	B
		K	KD-1		432.8	13.80	33.73	B
	Welded Joint	G	GJ-1		246.7	11.32	30.14	Base metal
		J	JJ-1		227.6	11.59	32.78	Base metal
		K	KJ-1		344.5	15.86	43.27	Base metal
	Weld Metal	G	GD-2	45.0	696.3	10.04	5.84	B
		J	JD-2		890.0	12.49	19.17	A
		K	KD-2		1190.8	10.96	14.58	A
	Welded Joint	G	GJ-2		618.1	13.74	24.15	Base metal
		J	JJ-2		529.8	11.12	29.05	Base metal
		K	KJ-2		643.0	10.55	33.23	Base metal

Table 5.1 Evaluation of filler metals for thick plate

Alloy	Producing reliability of filler metal	Weldability		Tensile properties	Creep properties	Comprehensive evaluation	Remarks
		For thin plate	For thick plate				
F	◎	◎	△	-	-	△	Mg:0.024 % (φ5.5), Mg:0.007 % (W.M.) C :0.073 % (φ1.2) B :0.0047% (φ1.2), B :0.0044% (W.M.)
G	◎	◎	○	◎	◎	○	Mg:0.018 % (φ5.5), Mg:0.005 % (W.M.) C :0.060 % (φ1.2) B :0.0054% (φ1.2), B :0.0051% (W.M.)
H	◎	◎	△	-	-	△	Mg:0.018 % (φ5.5), Mg:0.007 % (W.M.) C :0.073 % (φ1.2) B :0.0046% (φ1.2), B :0.0047% (W.M.)
I	◎	◎	△	-	-	△	Mg:0.020 % (φ5.5), Mg:0.006 % (W.M.) C :0.073 % (φ1.2) B :0.0033% (φ1.2), B :0.0033% (W.M.)
J	◎	◎	◎	◎	◎	◎	Mg:0.020 % (φ5.5), Mg:0.008 % (W.M.) C :0.062 % (φ1.2) B :0.0029% (φ1.2), B :0.0026% (W.M.)
K	◎	◎	◎	◎	○	○	Mg:0.020 % (φ5.5), Mg:0.012 % (W.M.) C :0.063 % (φ1.2) B :0.0025% (φ1.2), B :0.0024% (W.M.) N :0.034 % (φ1.2)
L	X	-	-	-	-	X	Mg:0.07 % (Ladle)

(Symbol) ◎ : Excellent, ○ : Good, △ : Average, X : No good, - : Not tested

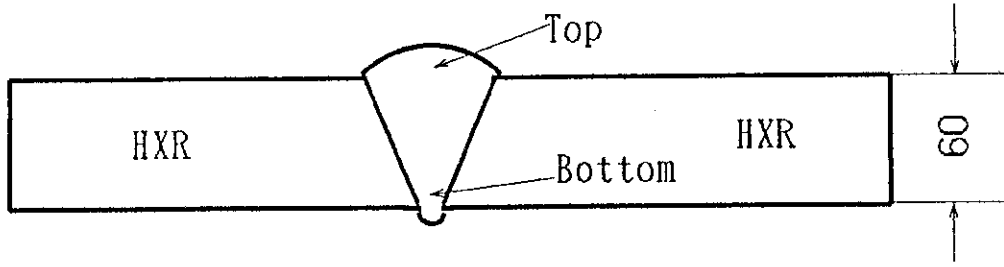


Fig. 2.1 Location of analysis

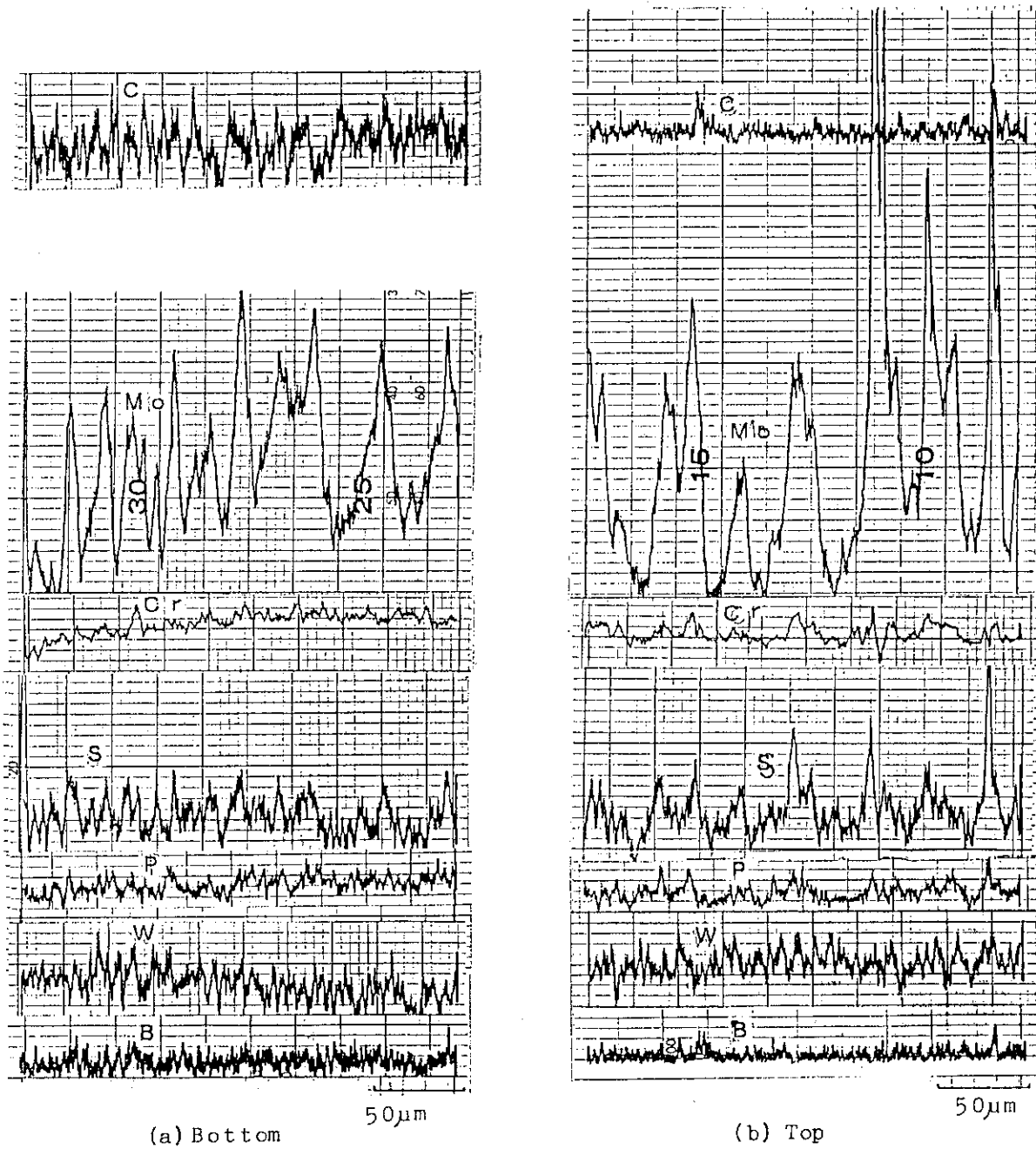


Fig. 2.2 Result of EPMA on cross section of welded joint

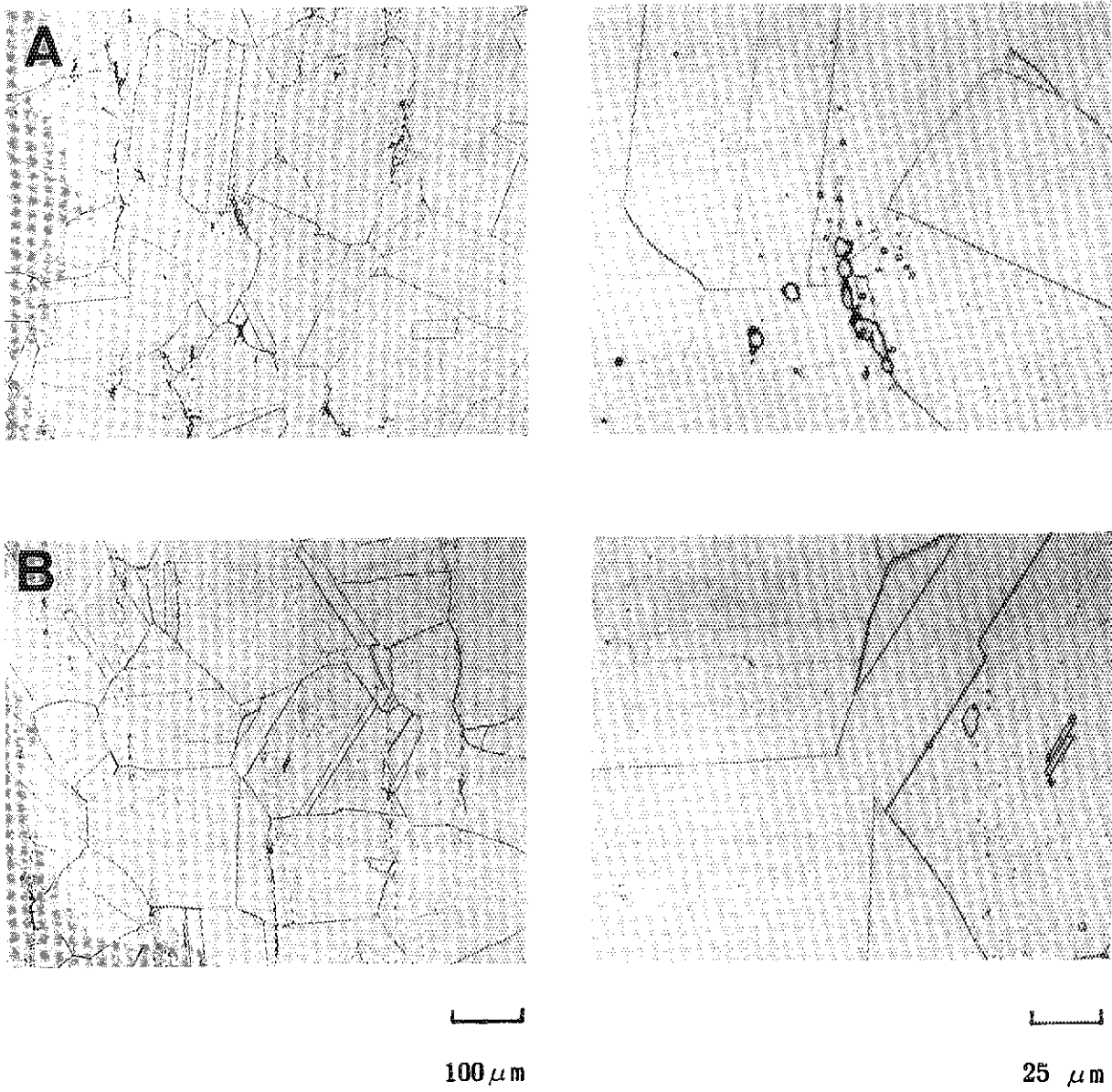
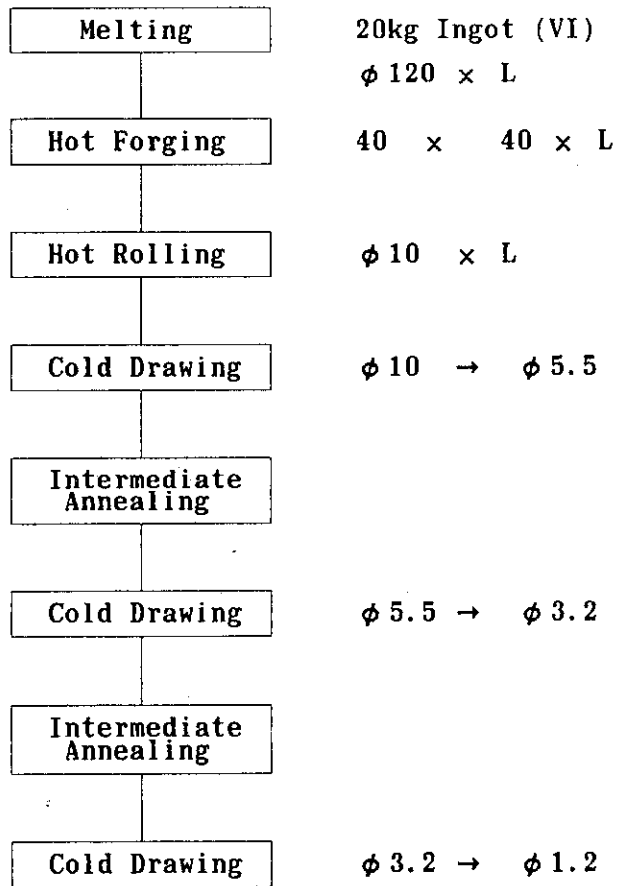


Fig. 3.1 Microstructure of Hastelloy Alloy XR-II plates
after solution heat treatment
A: 60mm thickness plate
B: 15mm thickness plate



Unit in Size : mm

Fig. 3.2 Production flow diagram of experimental filler metals for Hastelloy Alloy XR

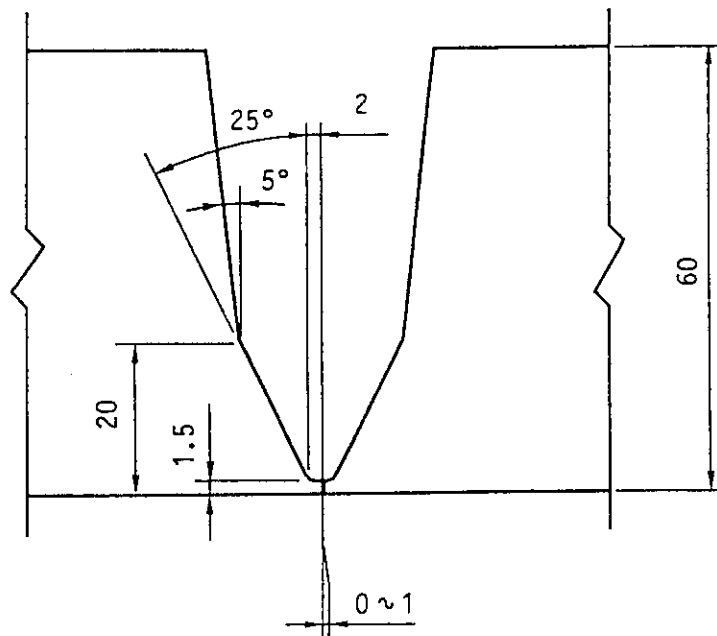


Fig. 3.4 Groove geometry (thickness: 60mm plate)

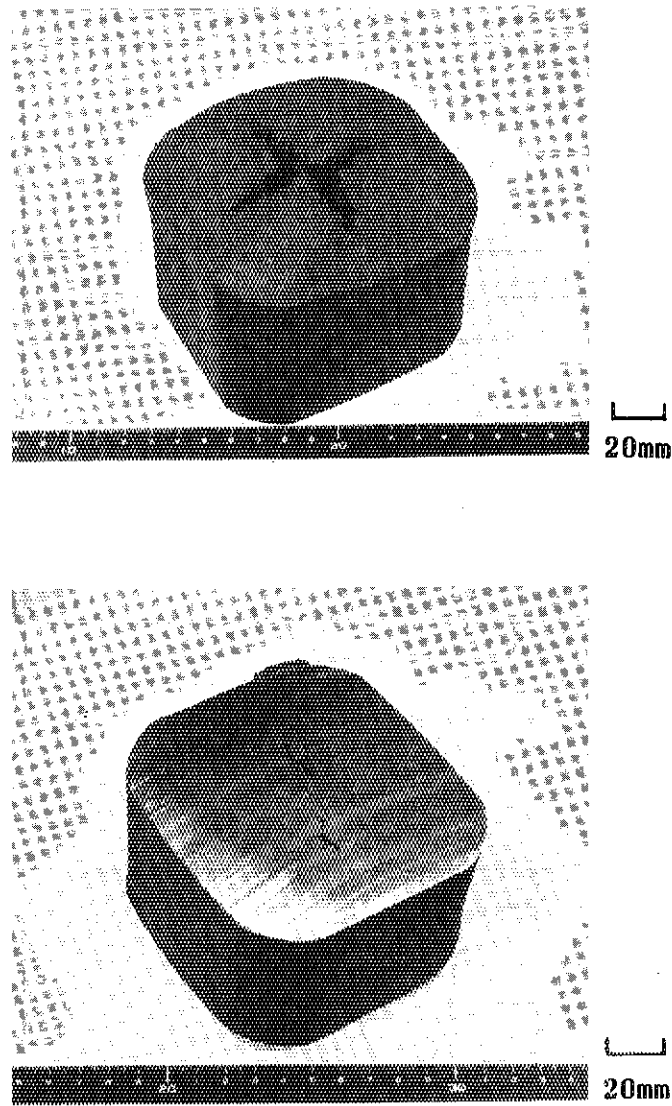
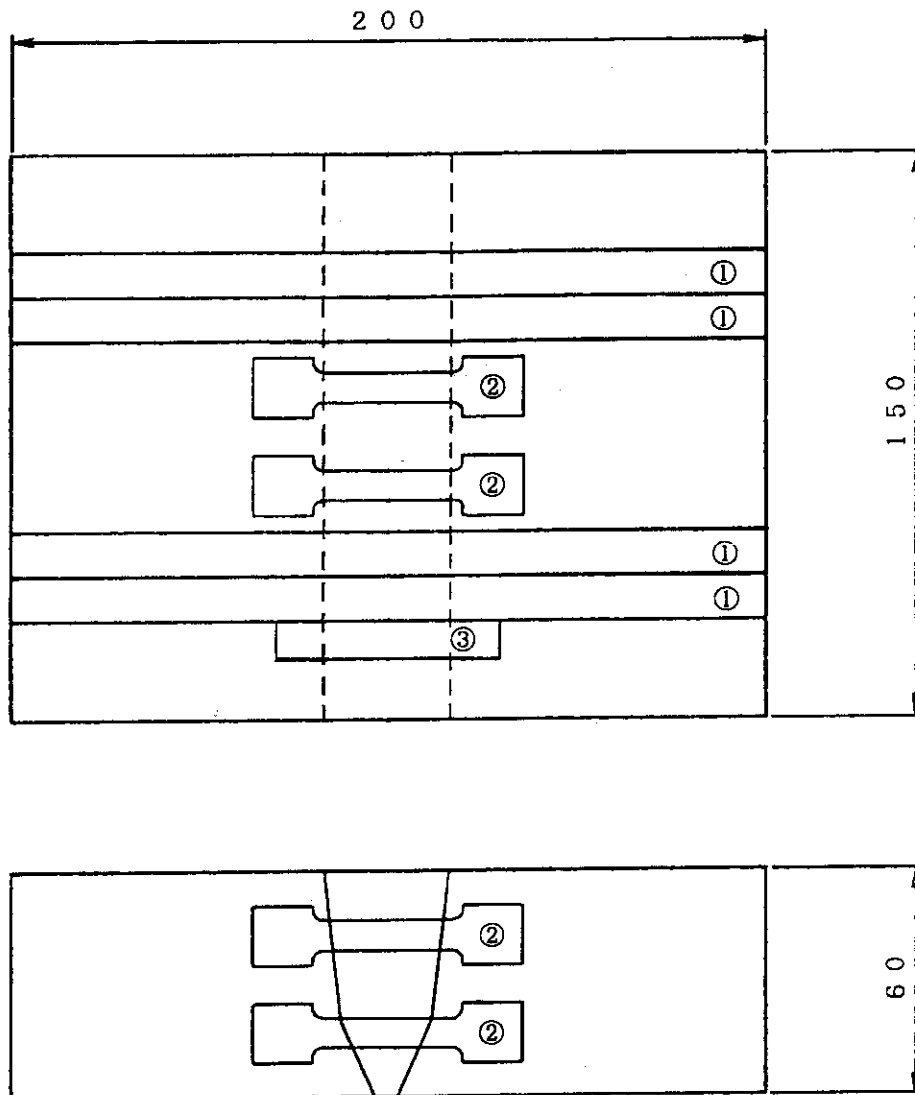
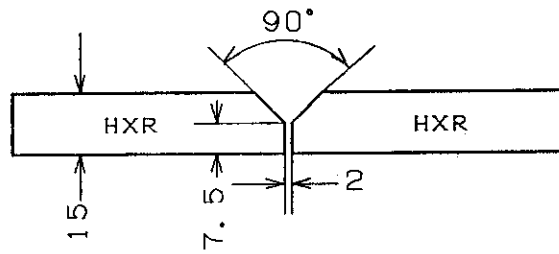


Fig. 3.3 Appearance of broken ingot in hot break-down forging process
for experimental filler metal, alloy L
Upper: Bottom of ingot
Lower: Middle of ingot

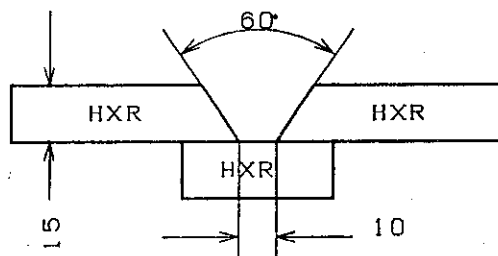


- ① Side bend test
- ② Creep rupture test (weld metal)
- ③ Macrostructure

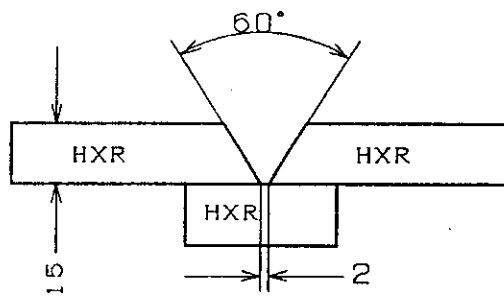
Fig. 3.5 Sampling location of test specimens
(thickness: 60mm plate)



(a) FISCO



(b) Weld metal



(c) Welded joint

Fig. 3.6 Groove geometry (thickness: 15mm plate)

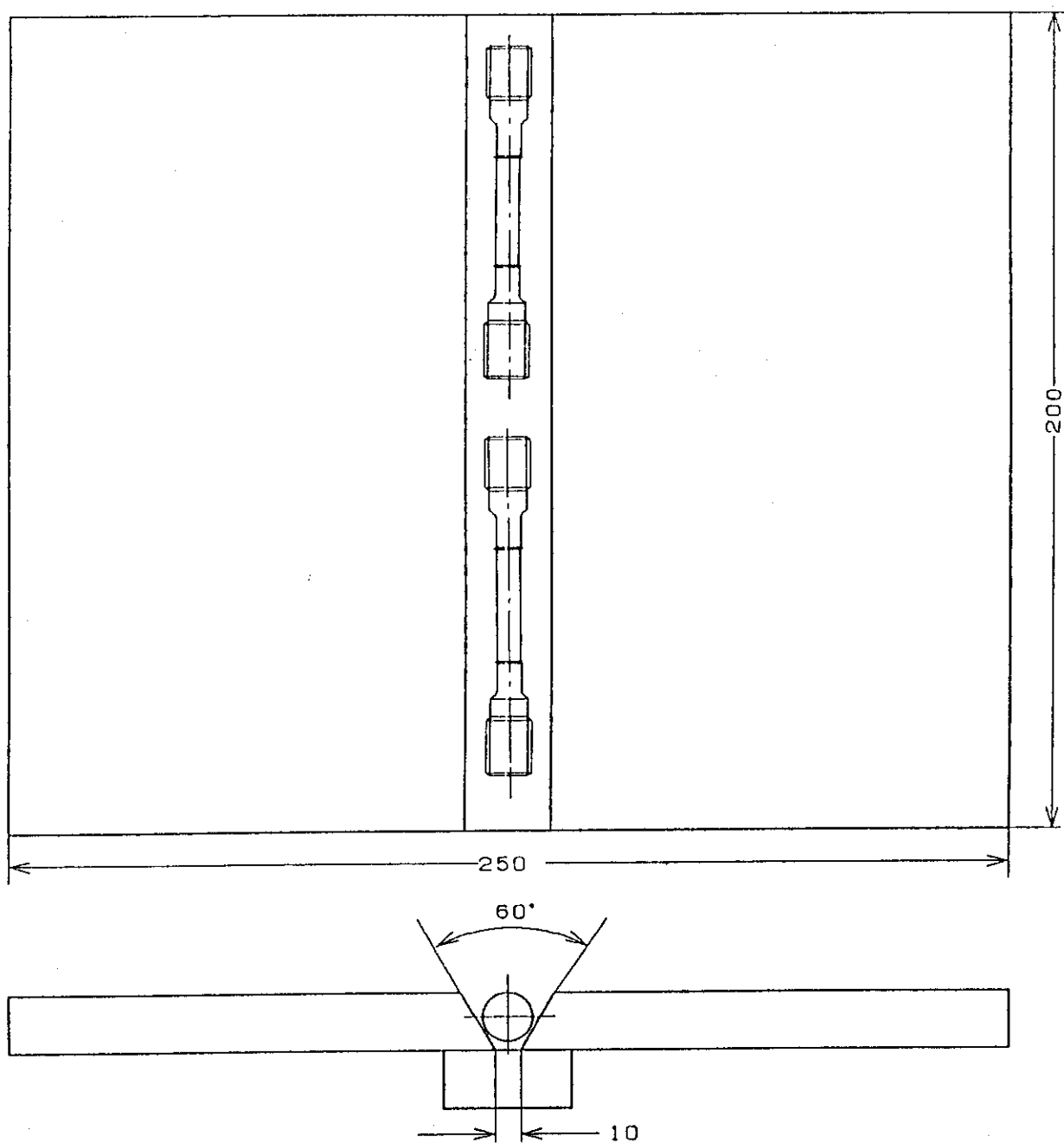


Fig. 3.7 Sampling location of weld metal specimens
(thickness: 15mm plate)

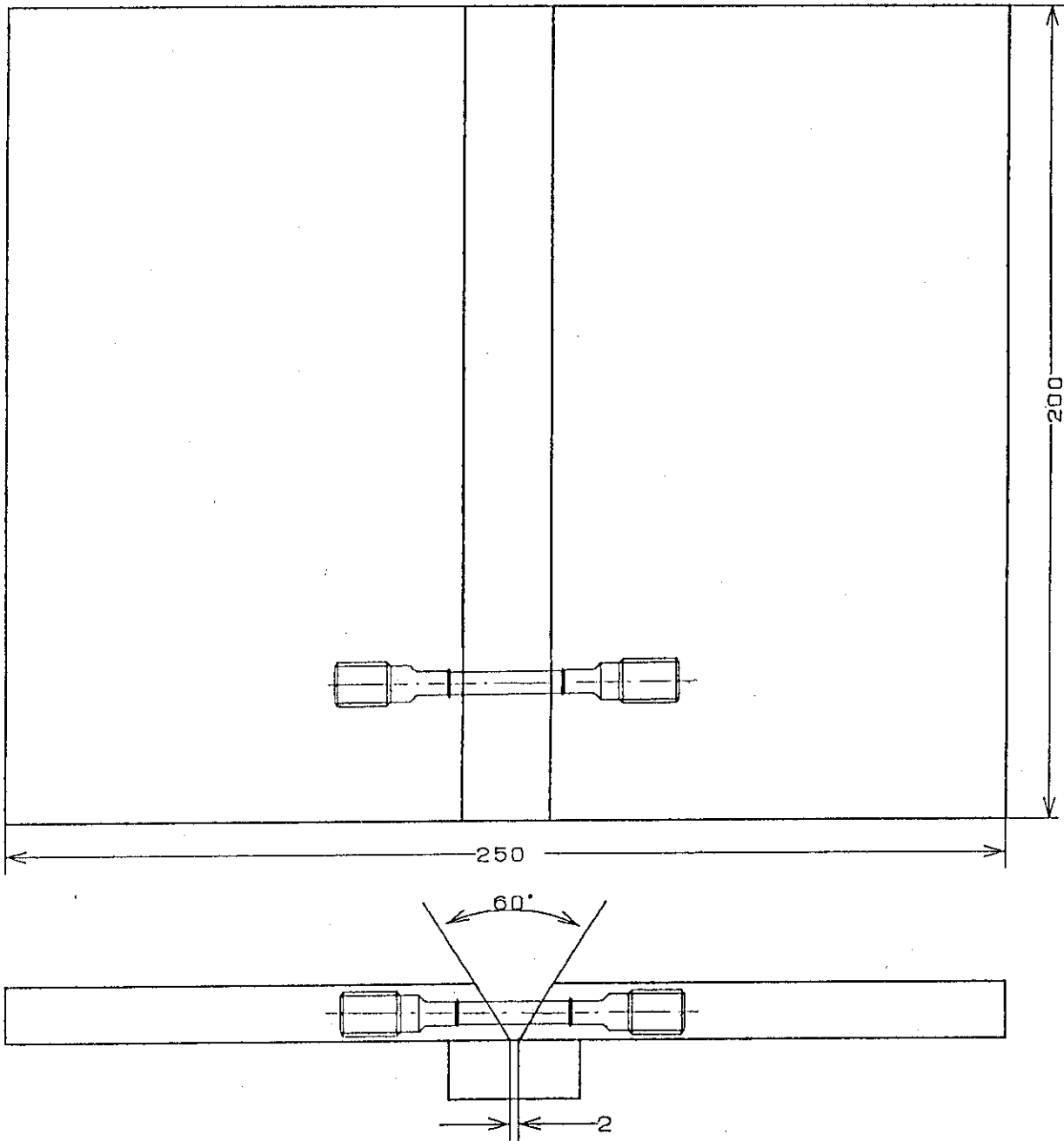


Fig. 3.8 Sampling location of welded joint specimens
(thickness: 15mm plate)

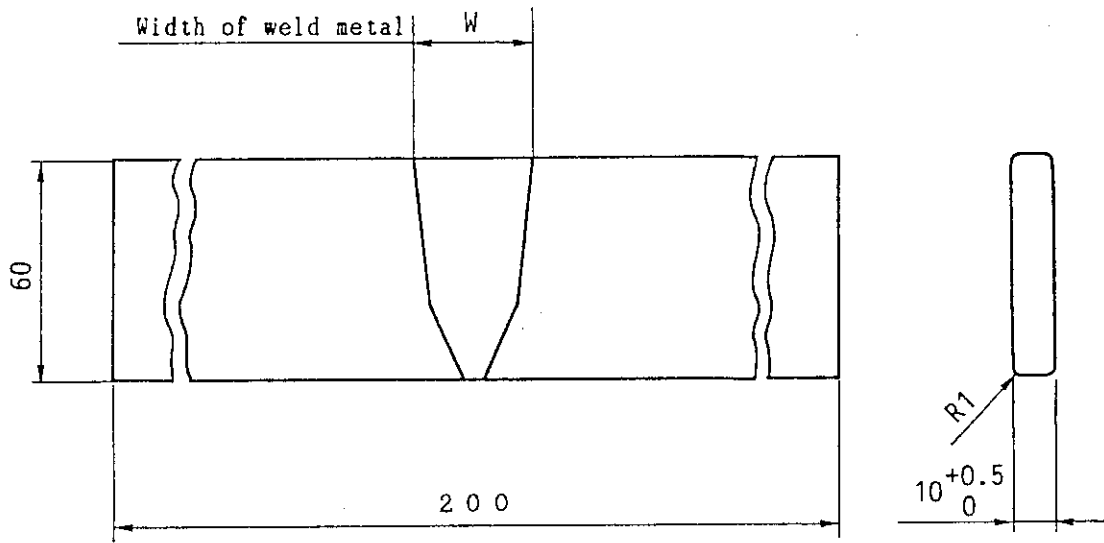


Fig. 4.1 Shape of side bend test specimen
(thickness: 60mm plate)

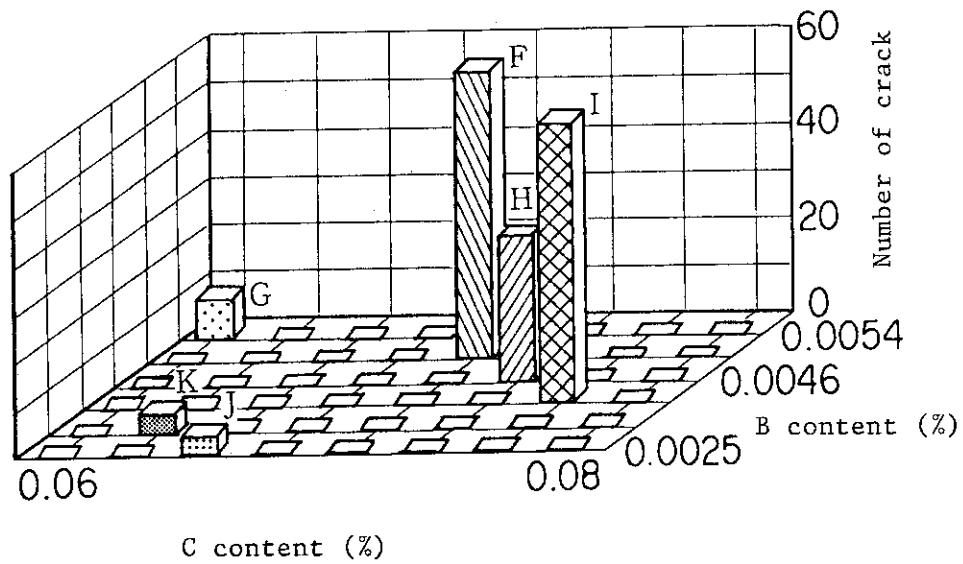


Fig. 4.3 C and B content of filler metal versus
number of crack (thickness: 60mm plate)

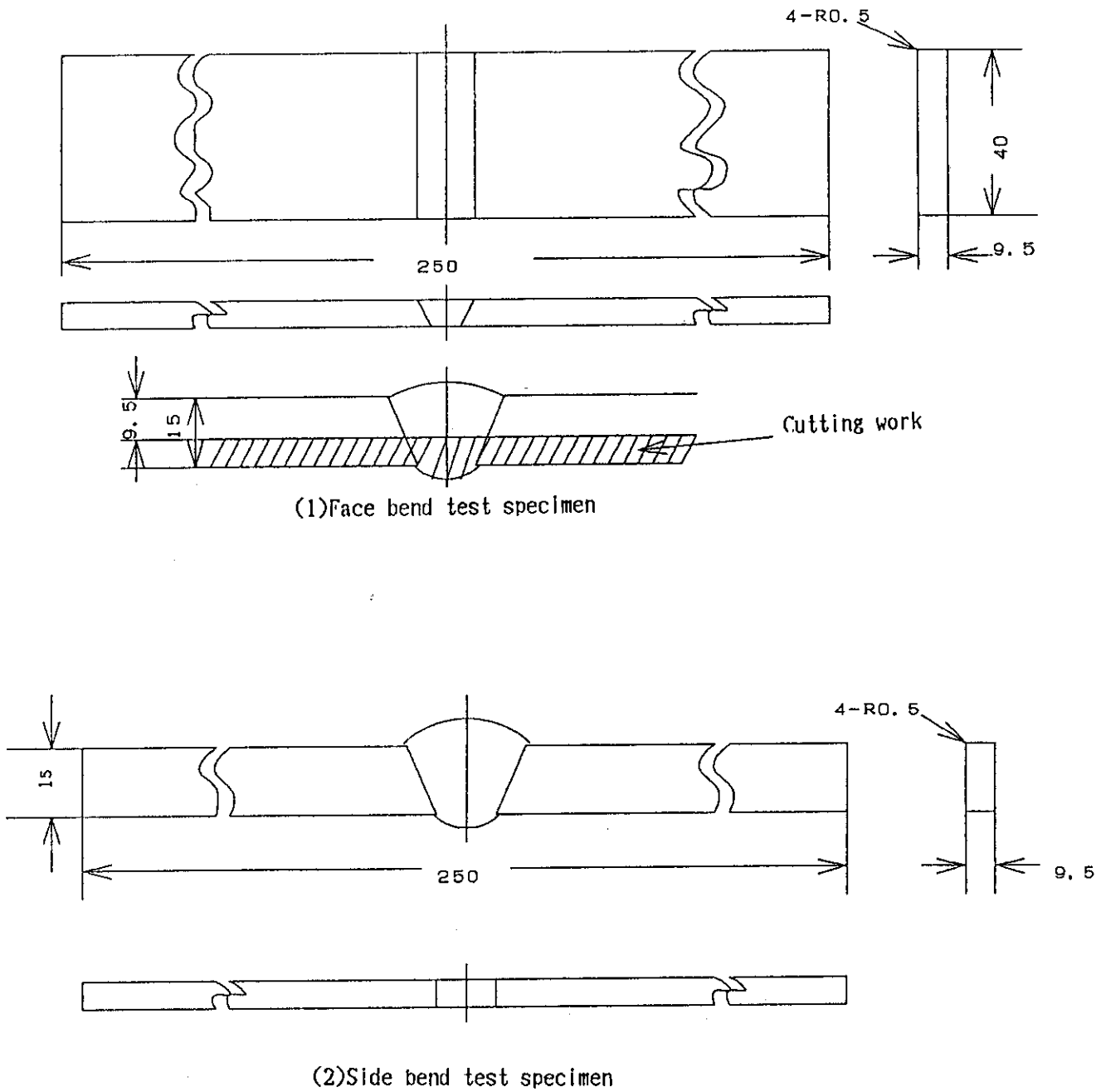


Fig. 4.2 Shape of guide bend test specimen (thickness: 15mm plate)

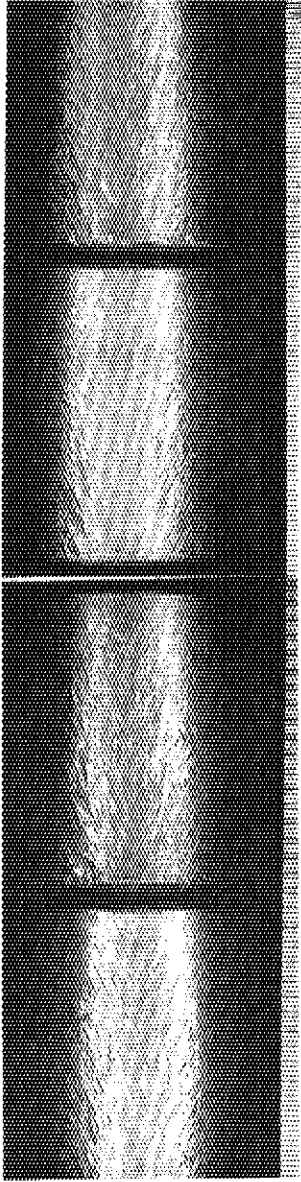
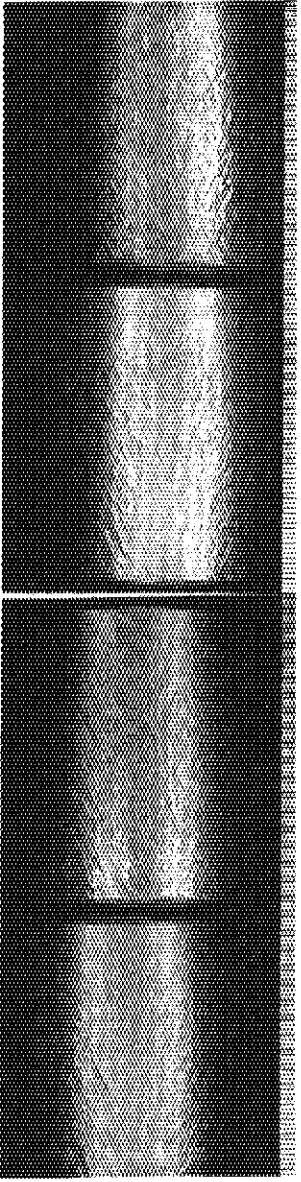
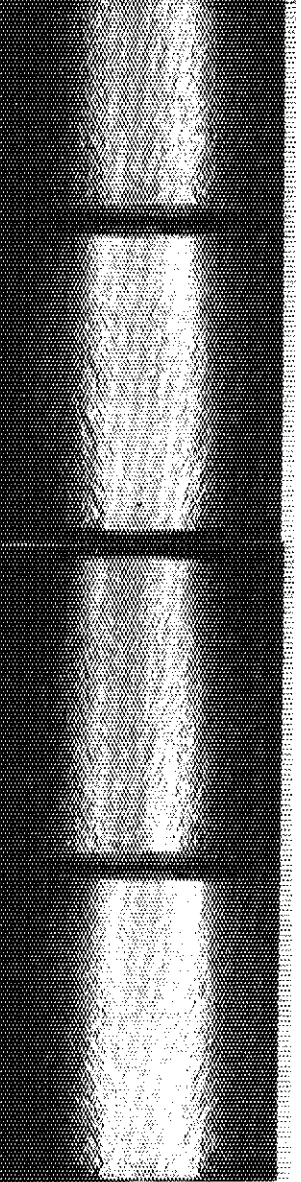
Filler metal	Appearance of side bend test specimens			
F	 <p style="text-align: center;">FS-1 FS-2 FS-3 FS-4</p>			
H	 <p style="text-align: center;">HS-1 HS-2 HS-3 HS-4</p>			
J	 <p style="text-align: center;">JS-1 JS-2 JS-3 JS-4</p>			

Fig. 4.4 Appearance of side bend test specimens (thickness: 60mm plate) (1/2)

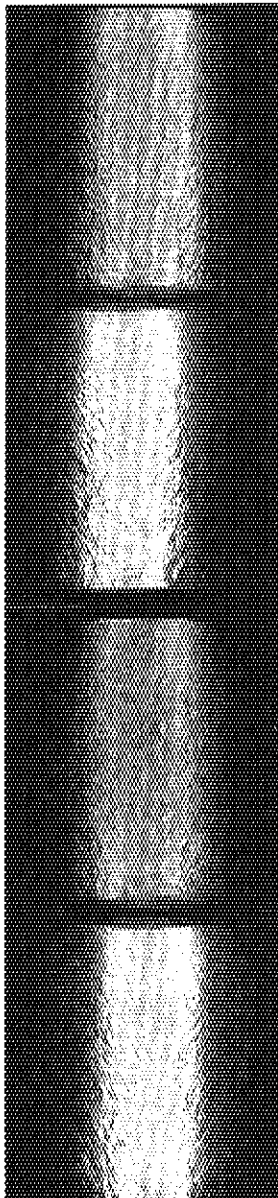











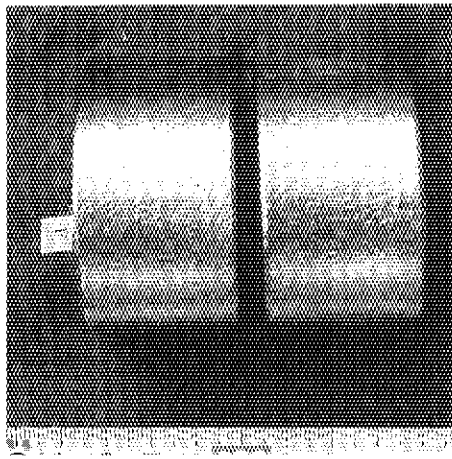
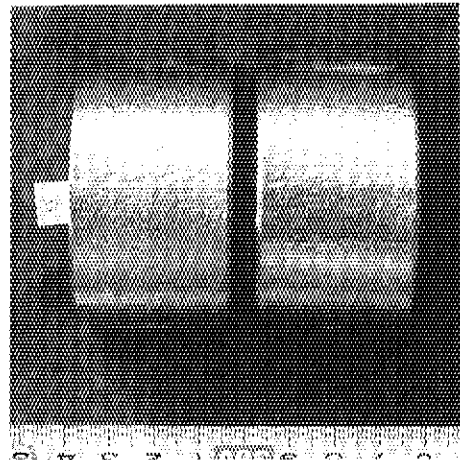
Filler metal	Appearance of side bend test specimens			
G				
I				
K				

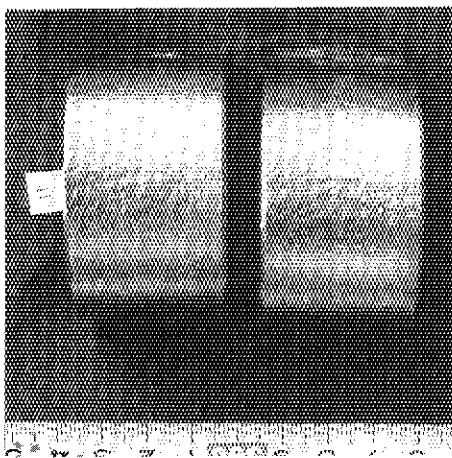
Fig. 4.4 (continued)



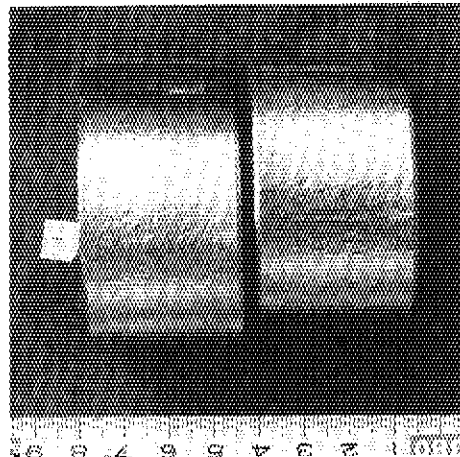
(a) Alloy F



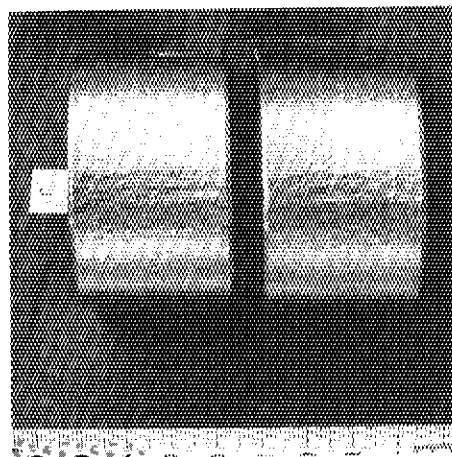
(b) Alloy G



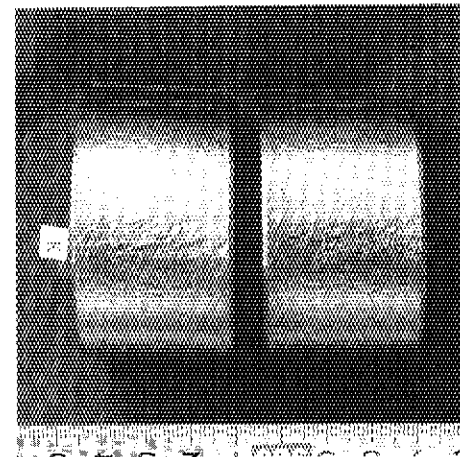
(c) Alloy H



(d) Alloy I

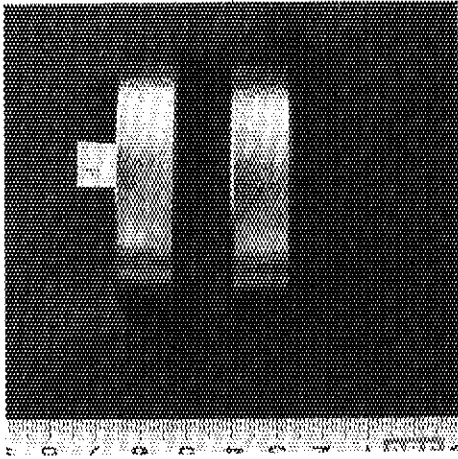


(e) Alloy J

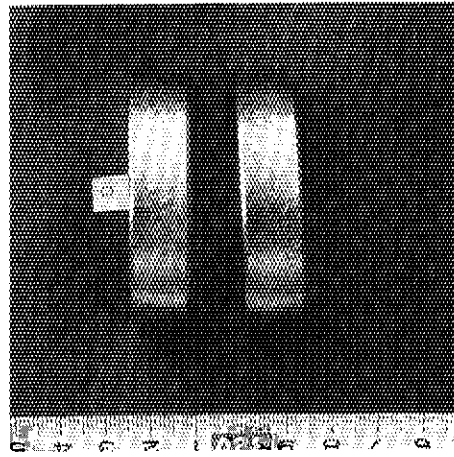


(f) Alloy K

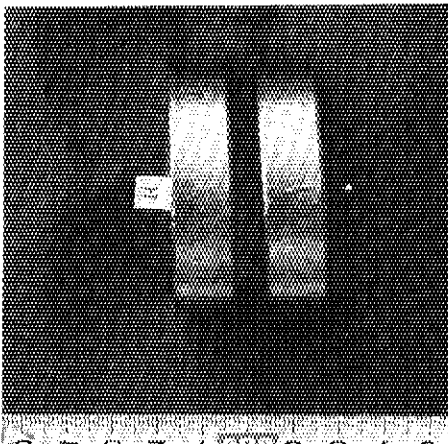
Fig. 4.5 Appearance of face bend test specimens (thickness: 15mm plate)



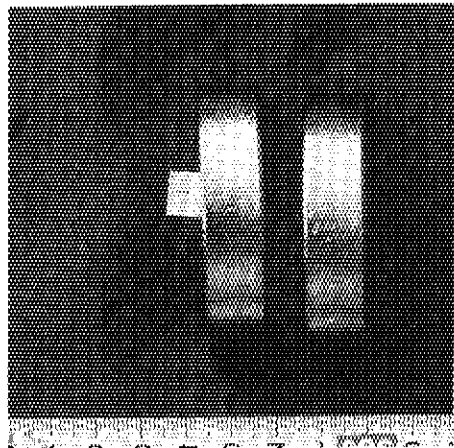
(a) Alloy F



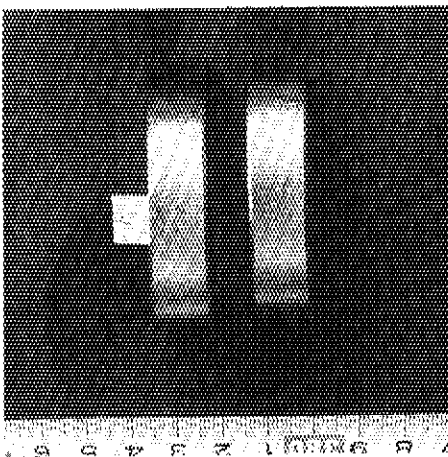
(b) Alloy G



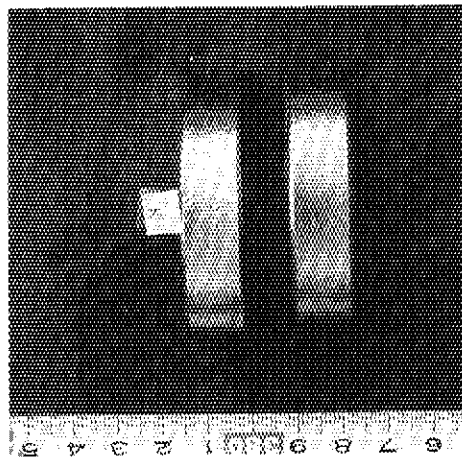
(c) Alloy H



(d) Alloy I



(e) Alloy J



(f) Alloy K

Fig. 4.6 Appearance of side bend test specimens (thickness: 15mm plate)

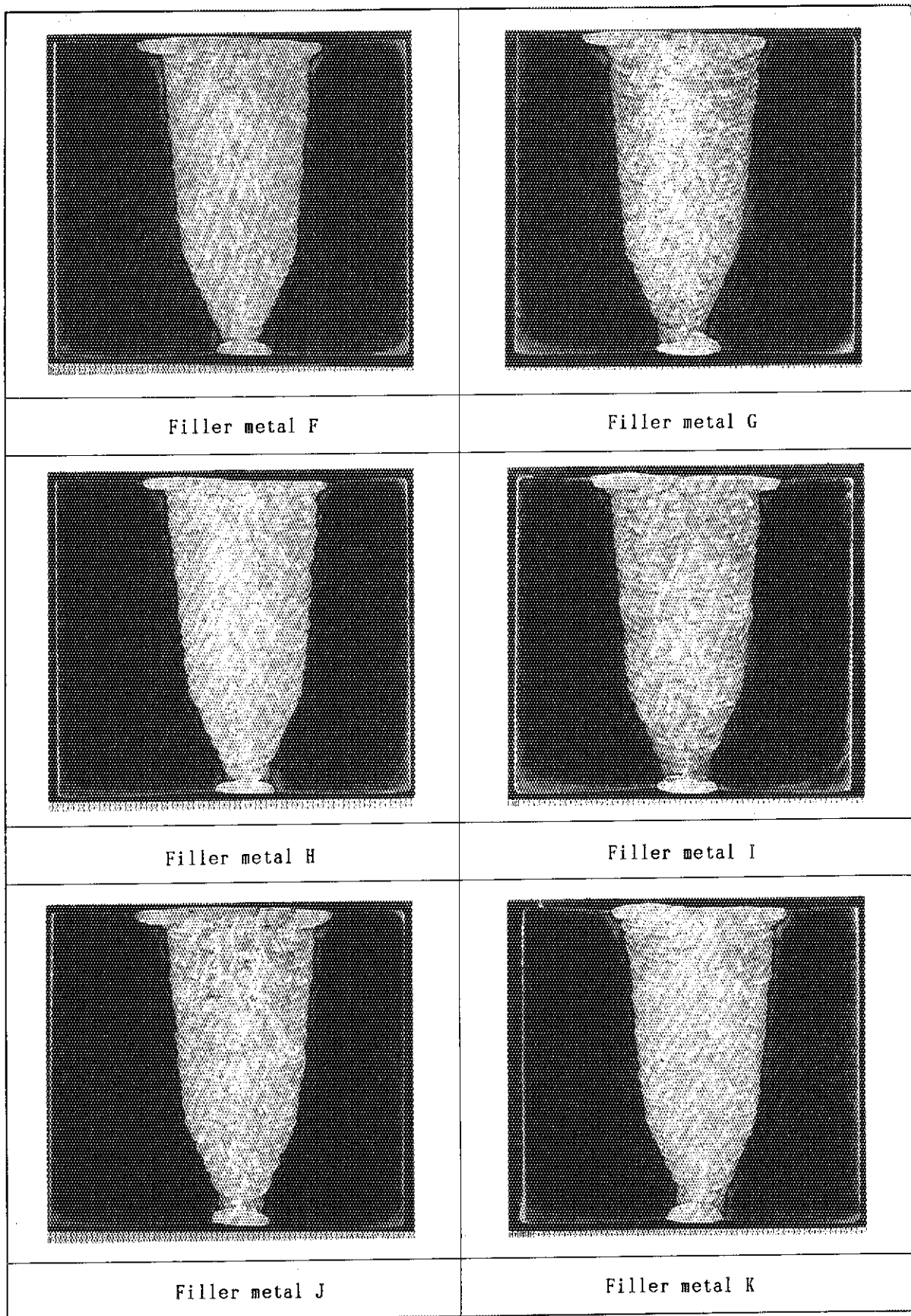
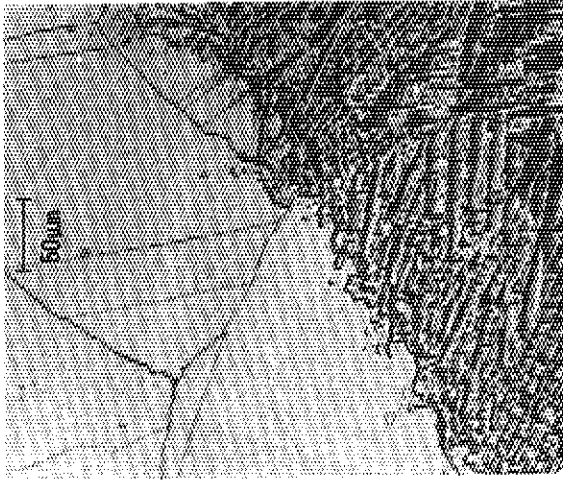
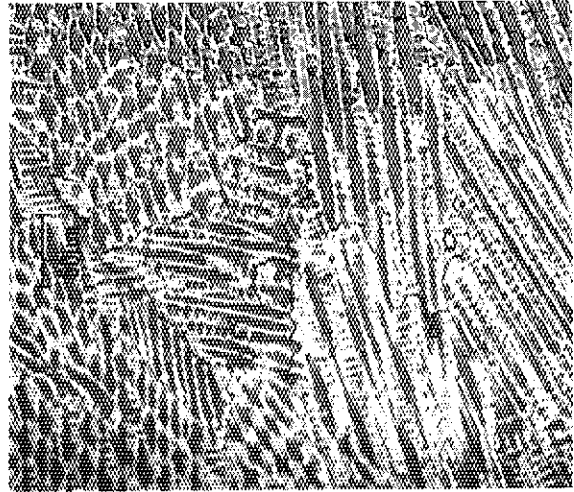


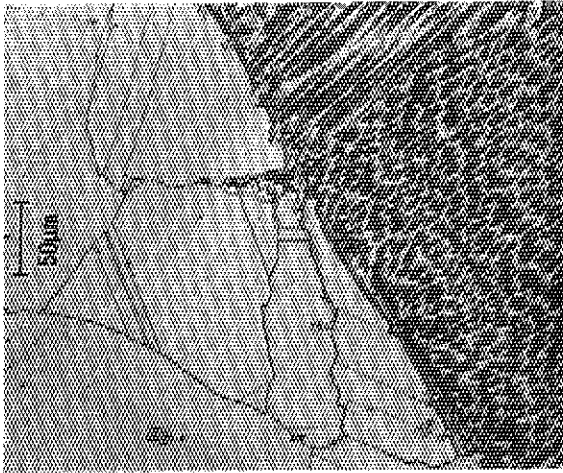
Fig. 4.7 Macrostructure of welded joint (thickness: 60mm plate)



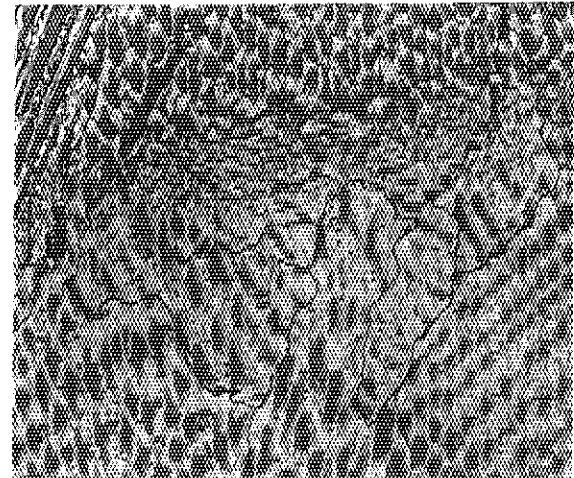
(a) Alloy F bond



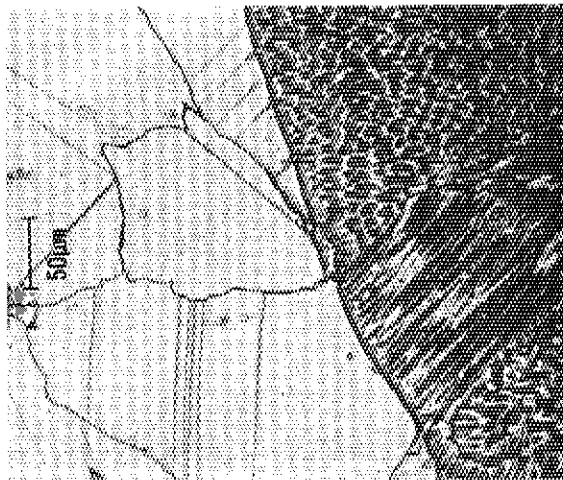
(b) Alloy F weld metal



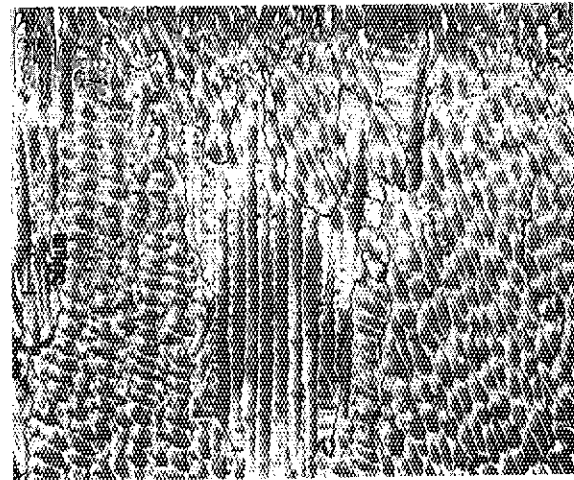
(c) Alloy G bond



(d) Alloy G weld metal

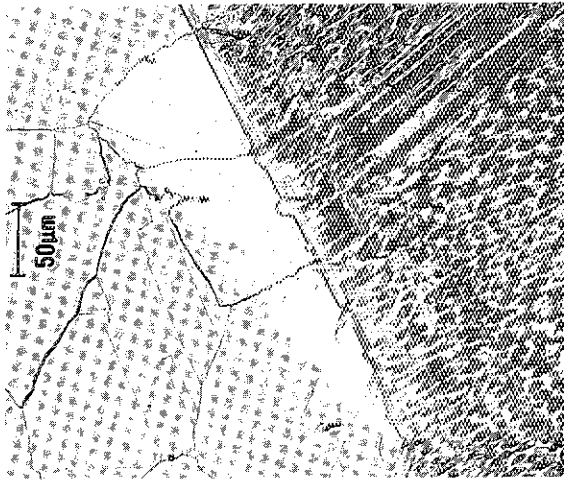


(e) Alloy H bond

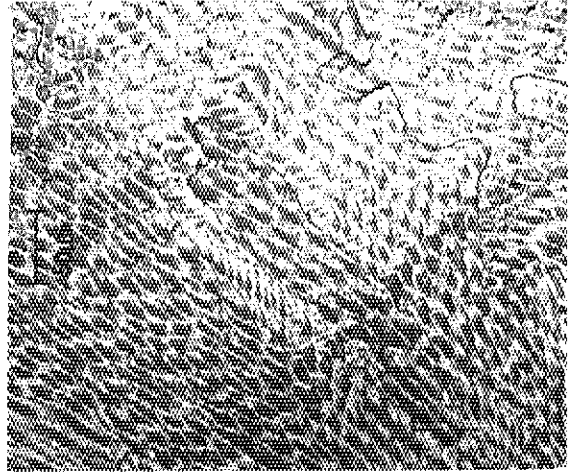


(f) Alloy H weld metal

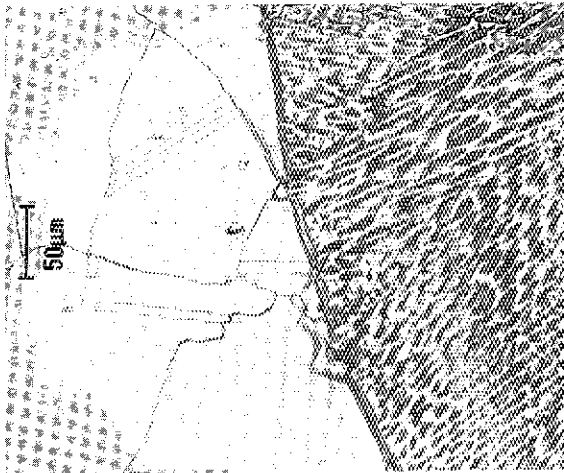
Fig. 4.8 Microstructure of welded joint (thickness: 15mm plate)



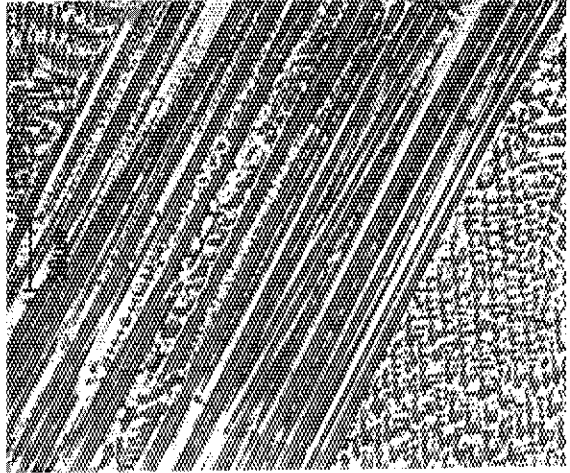
(g) Alloy I bond



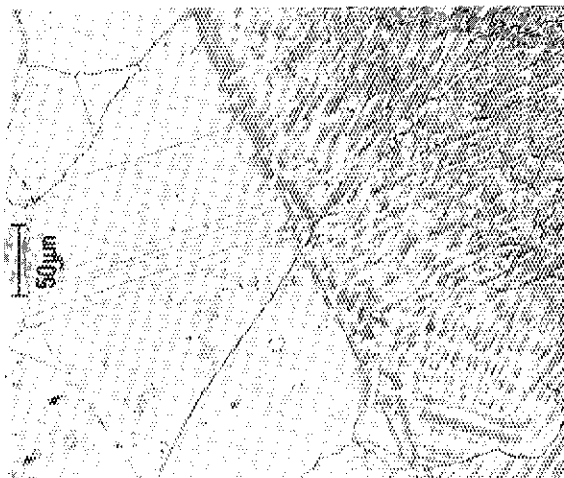
(h) Alloy I weld metal



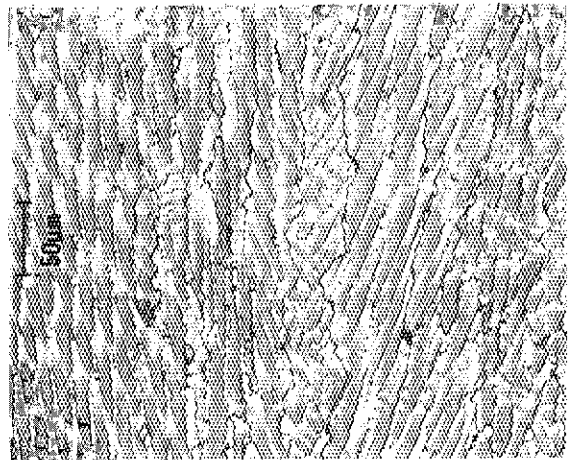
(i) Alloy J bond



(j) Alloy J weld metal



(k) Alloy K bond



(l) Alloy K weld metal

Fig. 4.8 (continued)

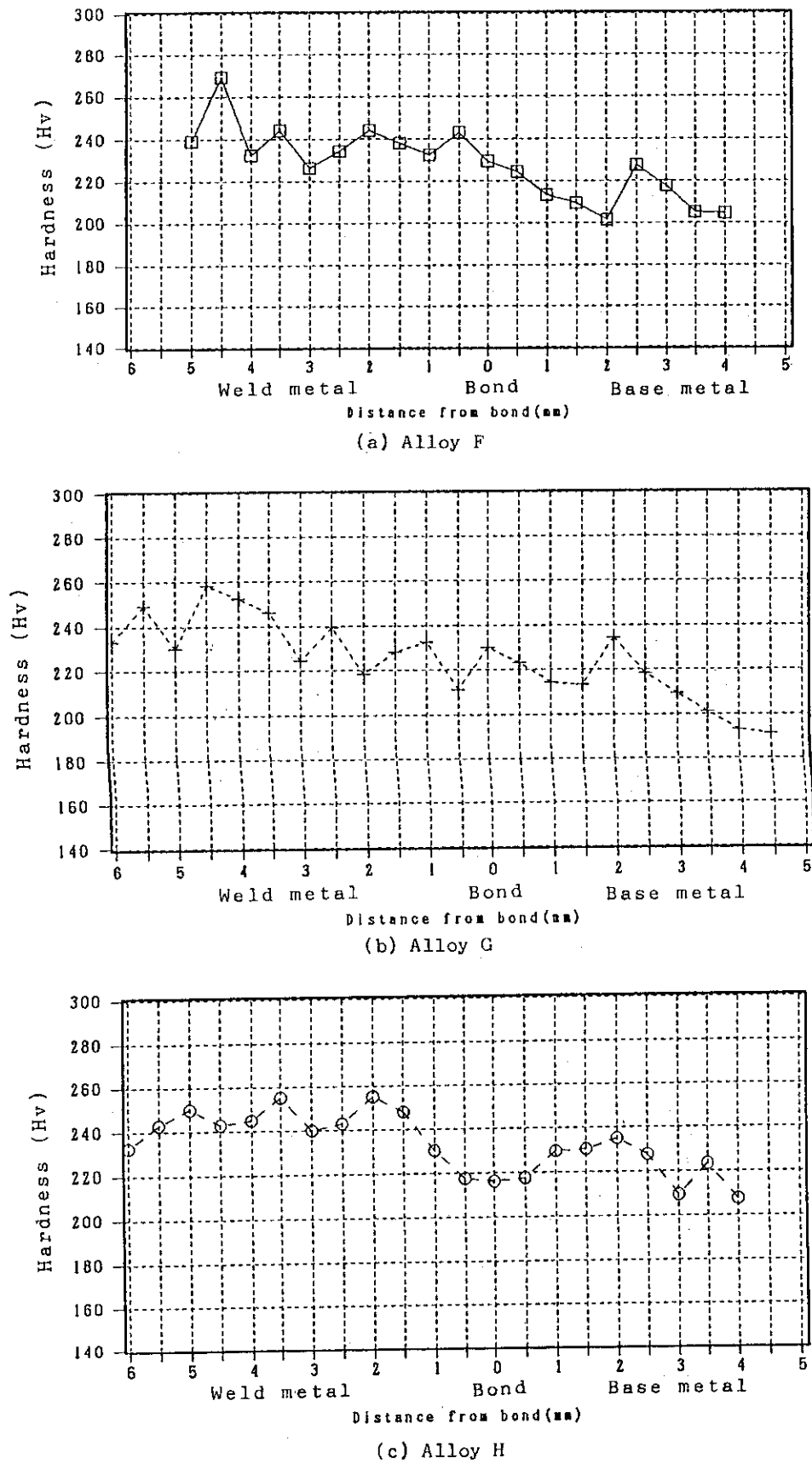
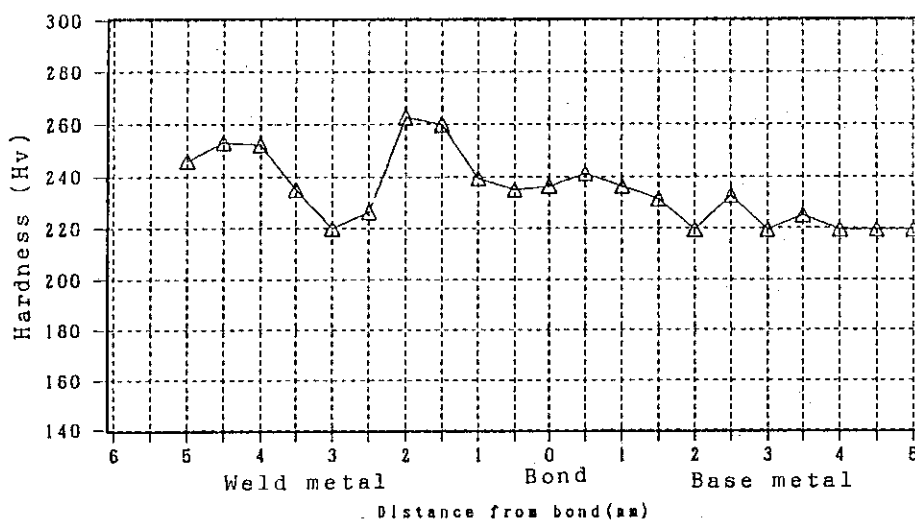
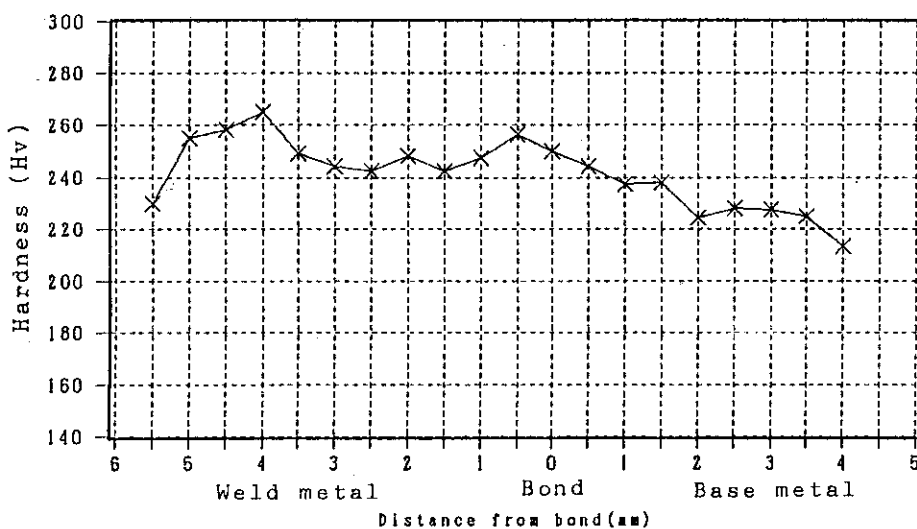


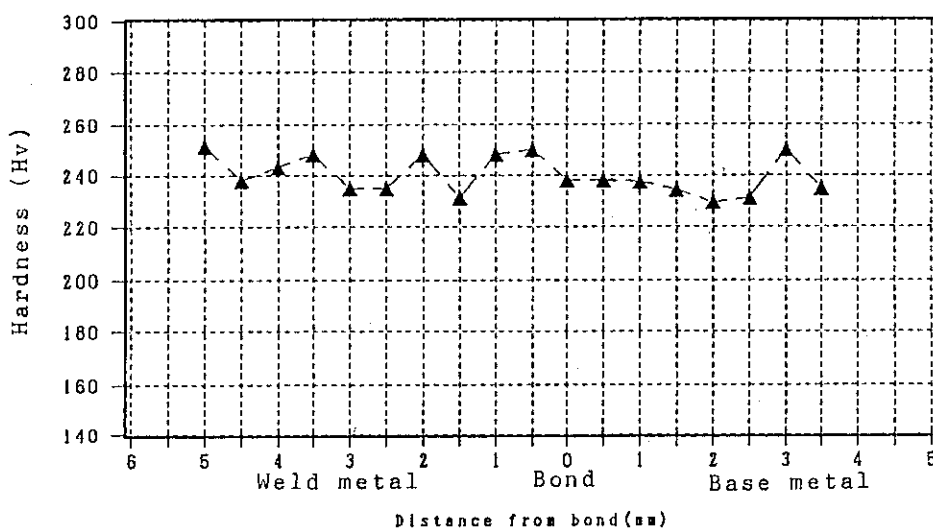
Fig. 4.9 Hardness distribution of welded joint (thickness: 15mm plate)



(d) Alloy I



(e) Alloy J



(f) Alloy K

Fig. 4.9 (continued)

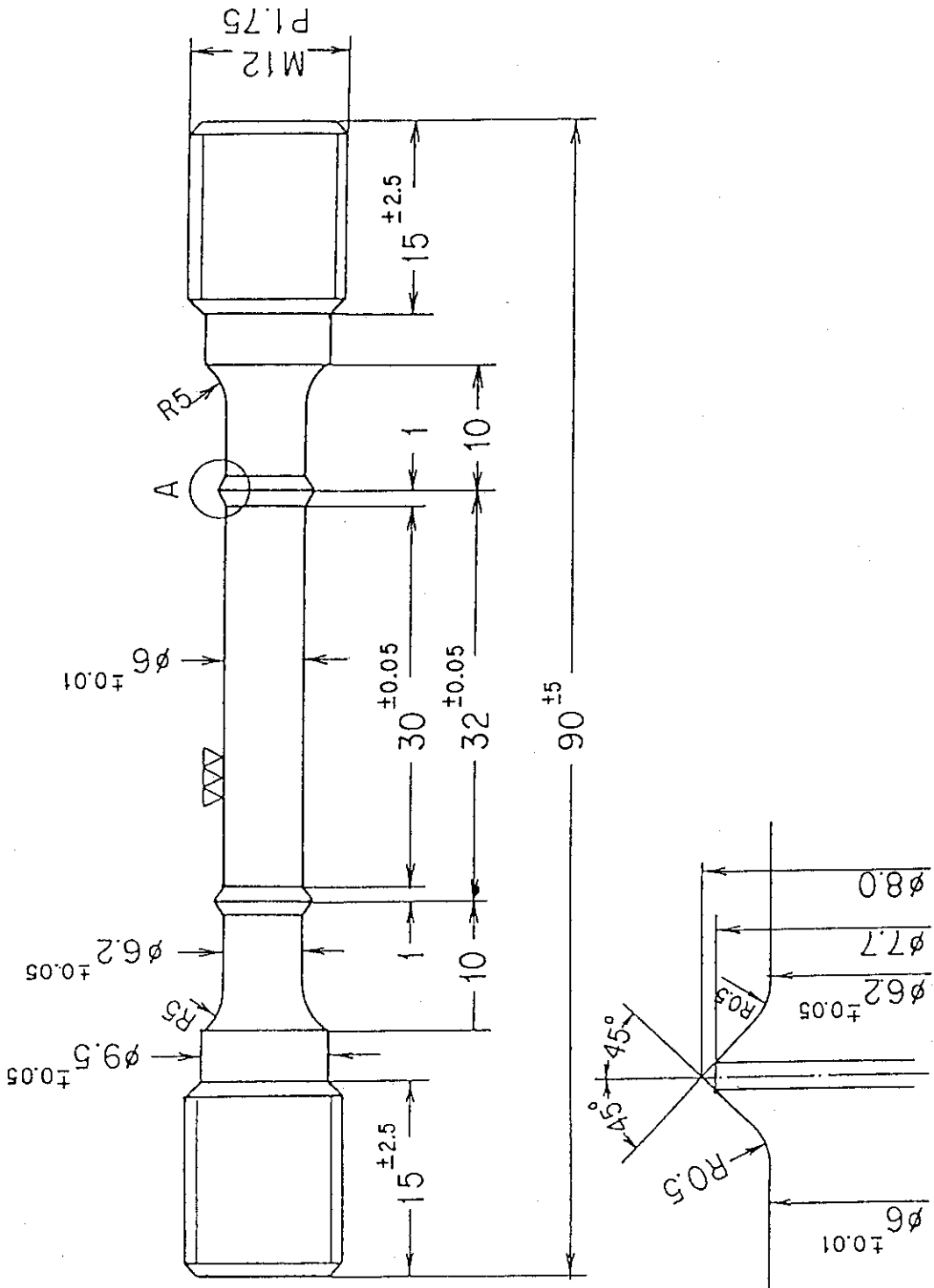


Fig. 4.10 Specimen geometry

Detail of A

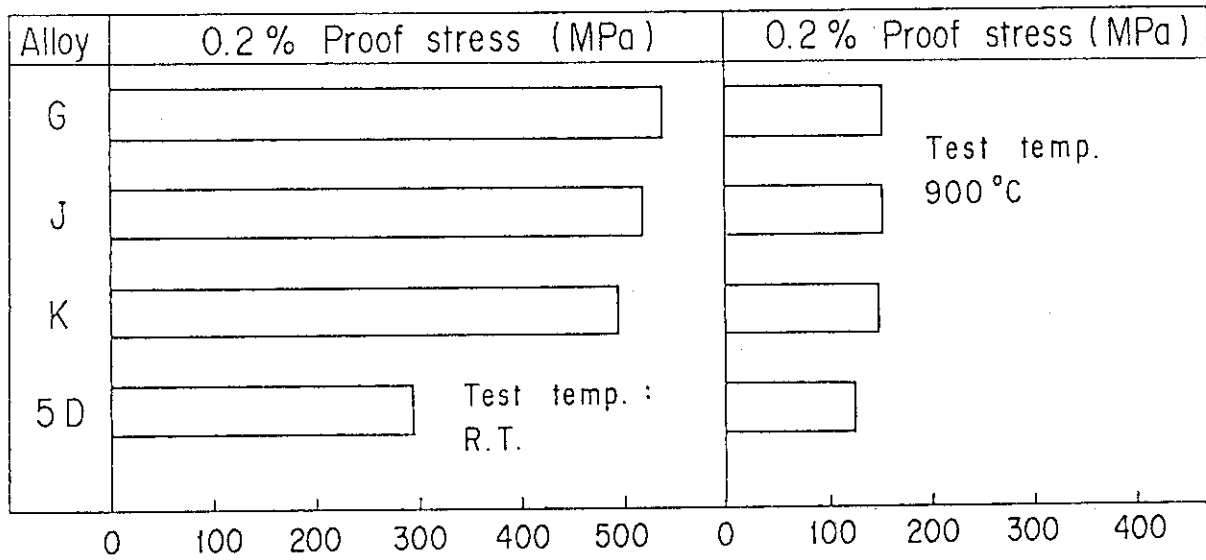


Fig. 4.11 0.2% proof stress at R.T. and 900°C

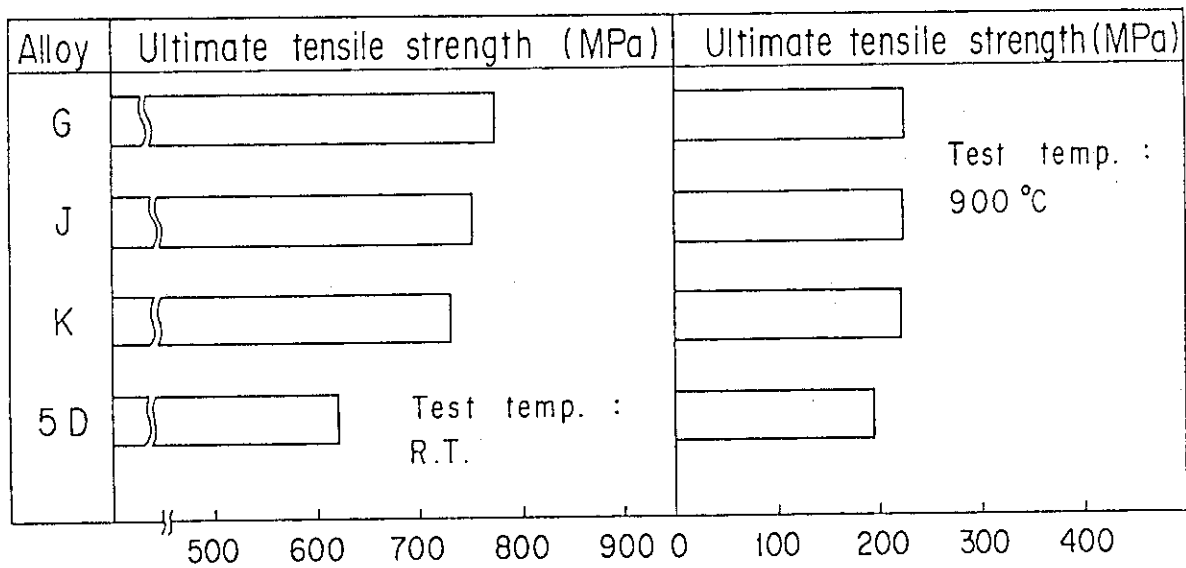


Fig. 4.12 Ultimate tensile strength at R.T. and 900°C

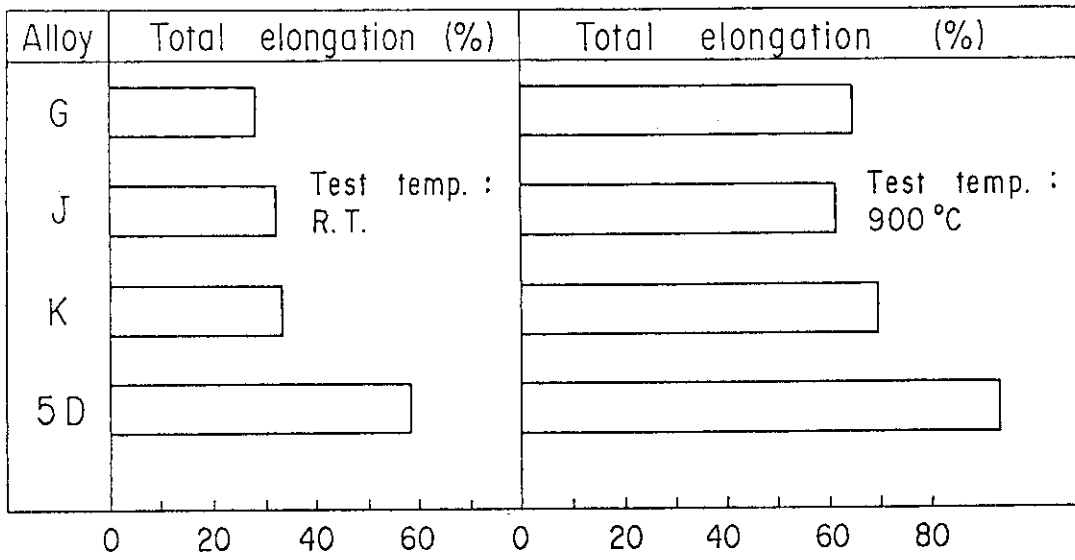


Fig. 4.13 Total elongation at R.T. and 900°C

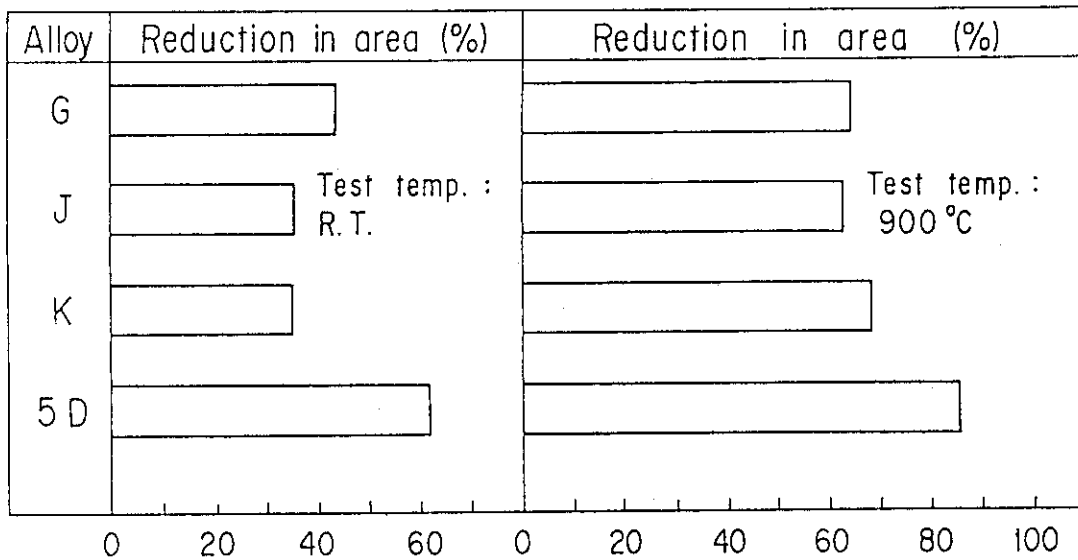


Fig. 4.14 Reduction in area at R.T. and 900°C

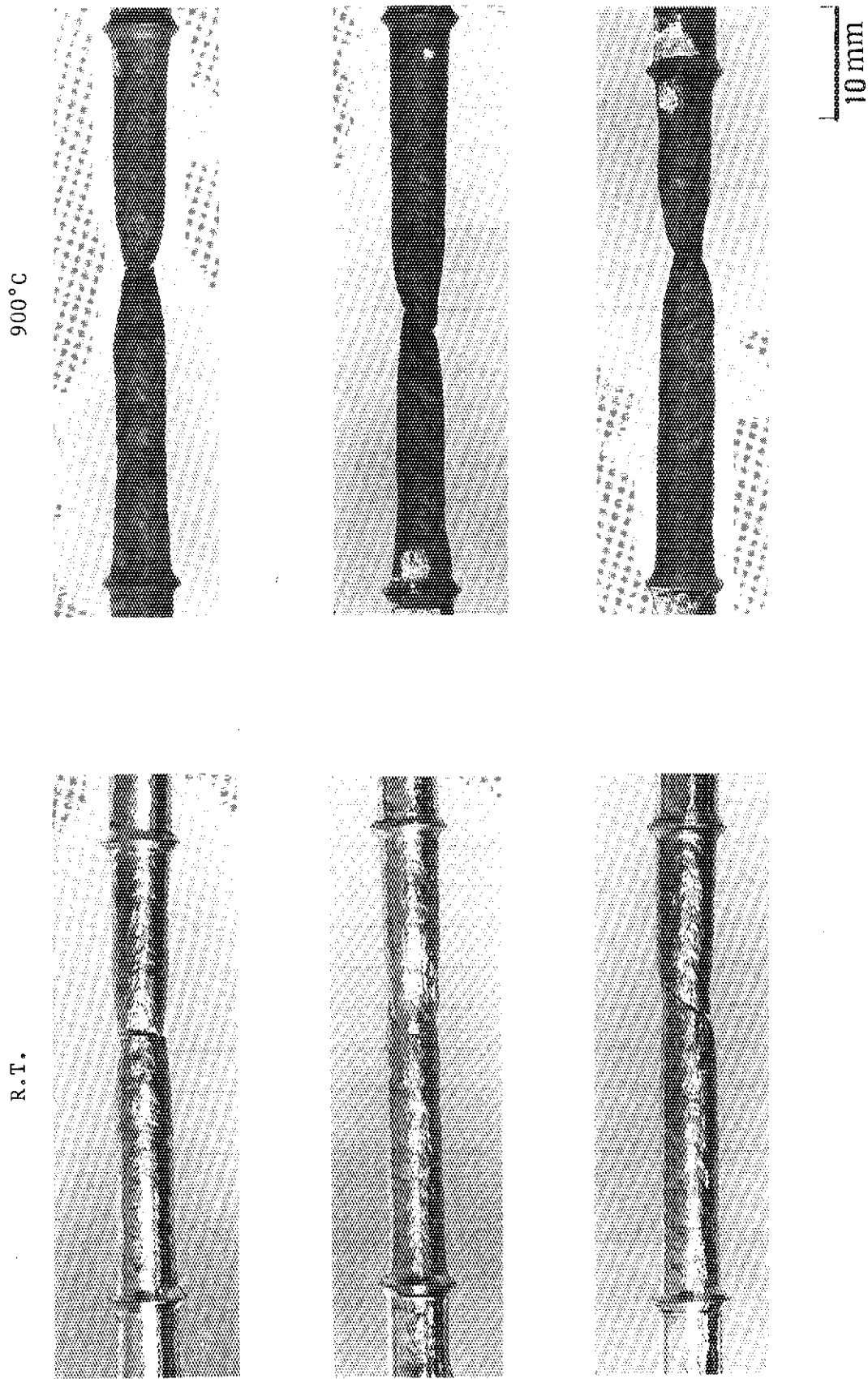


Fig. 4.15 Tensile specimens of weld metals after testing at R.T. and 900°C

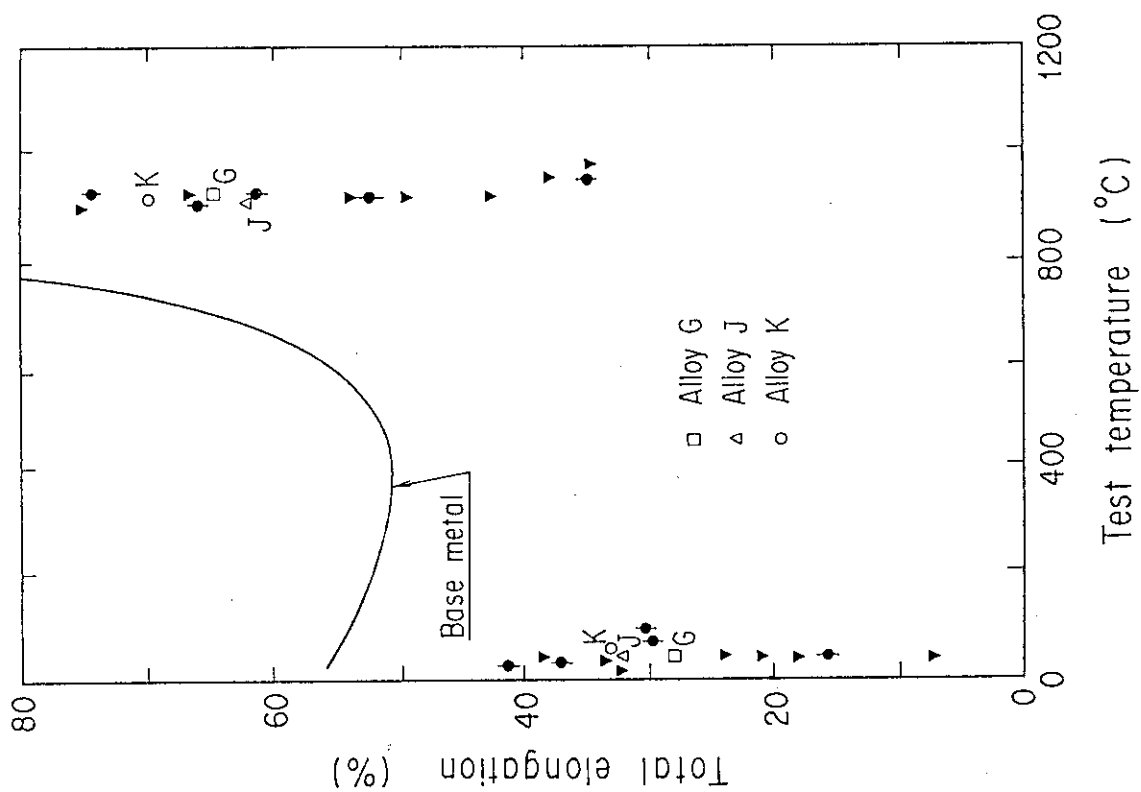


Fig. 4.17 Total elongation versus test temperature for weldments

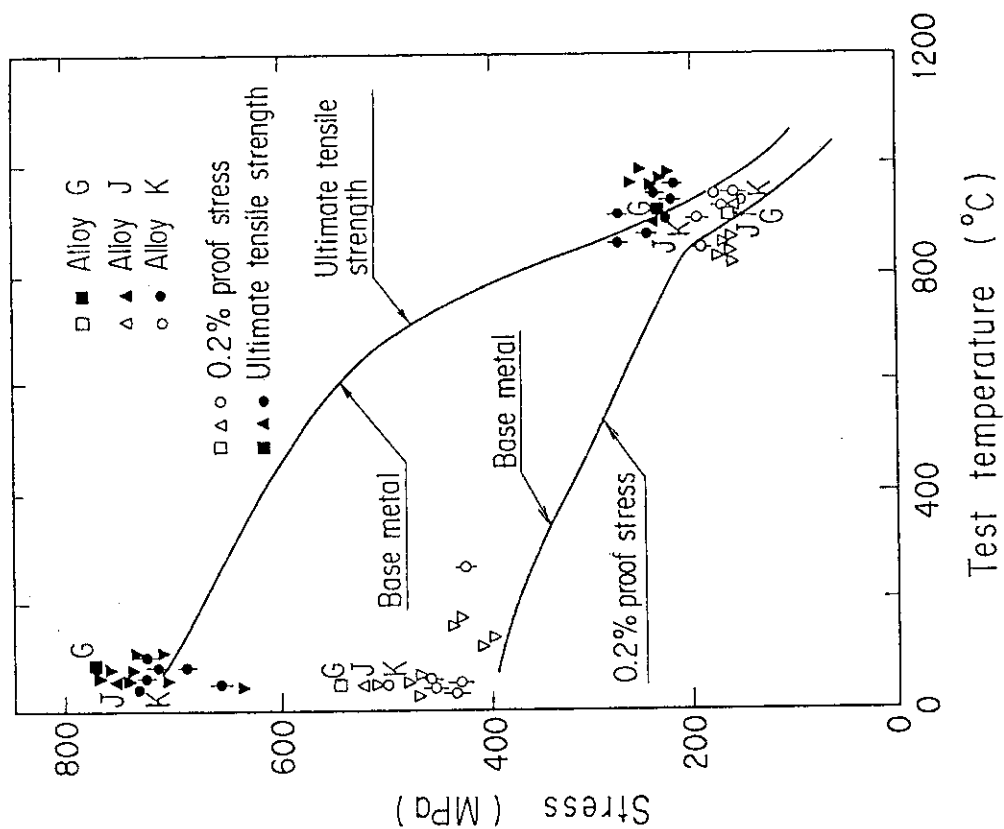


Fig. 4.16 Stress versus test temperature for weldments

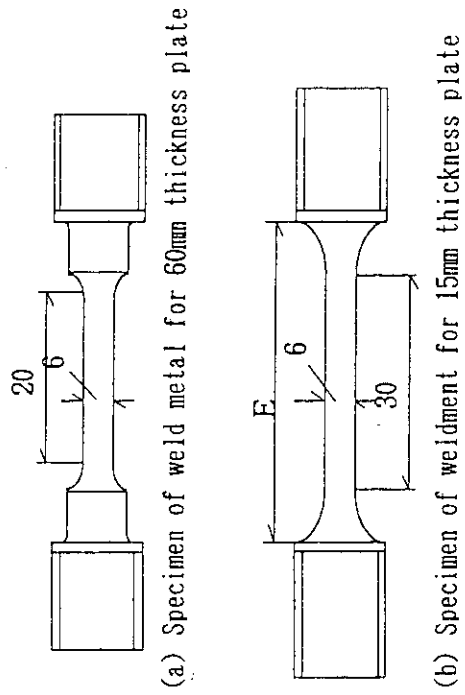


Fig. 4.19 Geometry of creep specimen

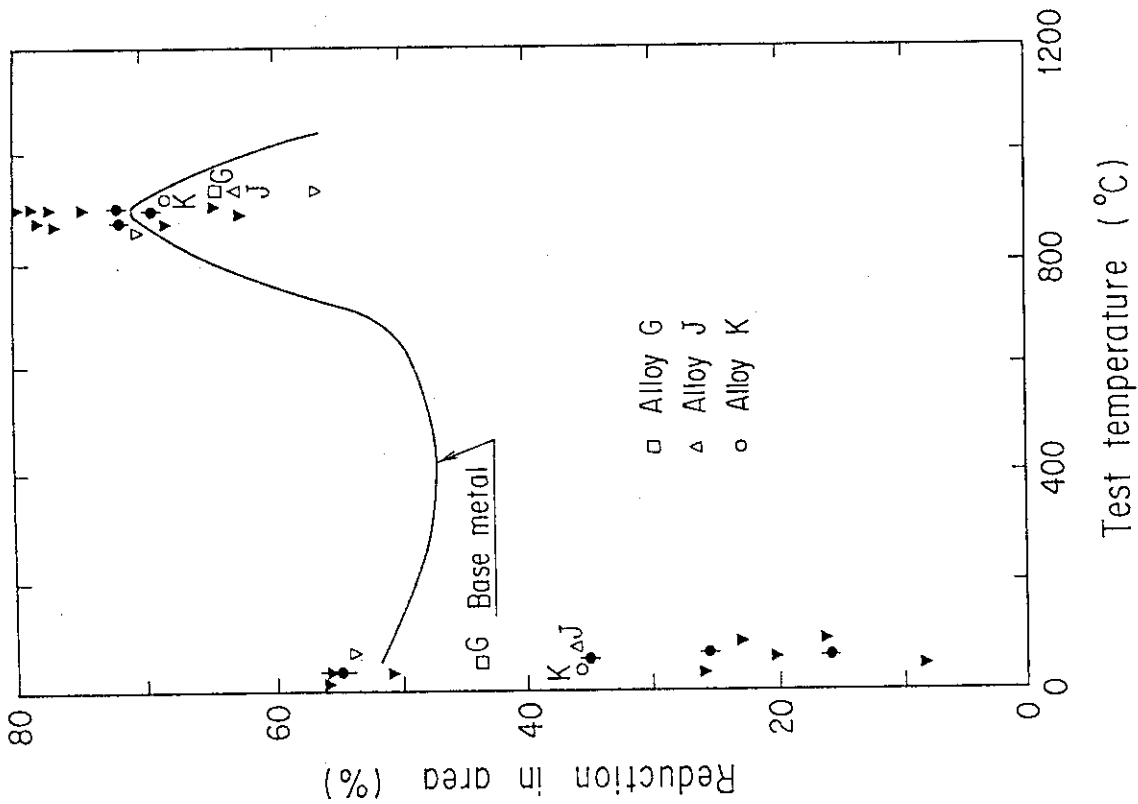


Fig. 4.18 Reduction in area versus test temperature for weldments

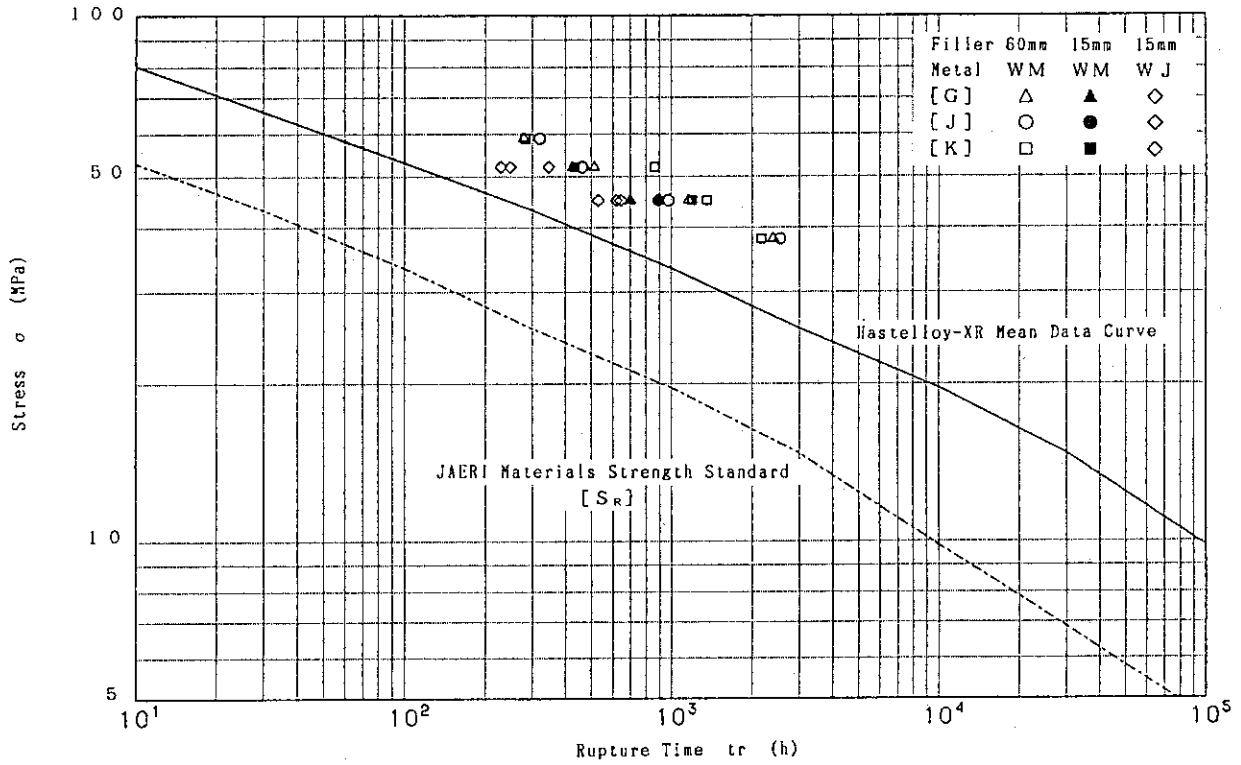


Fig. 4.20 Relation between applied stress and creep rupture time at 900°C in air

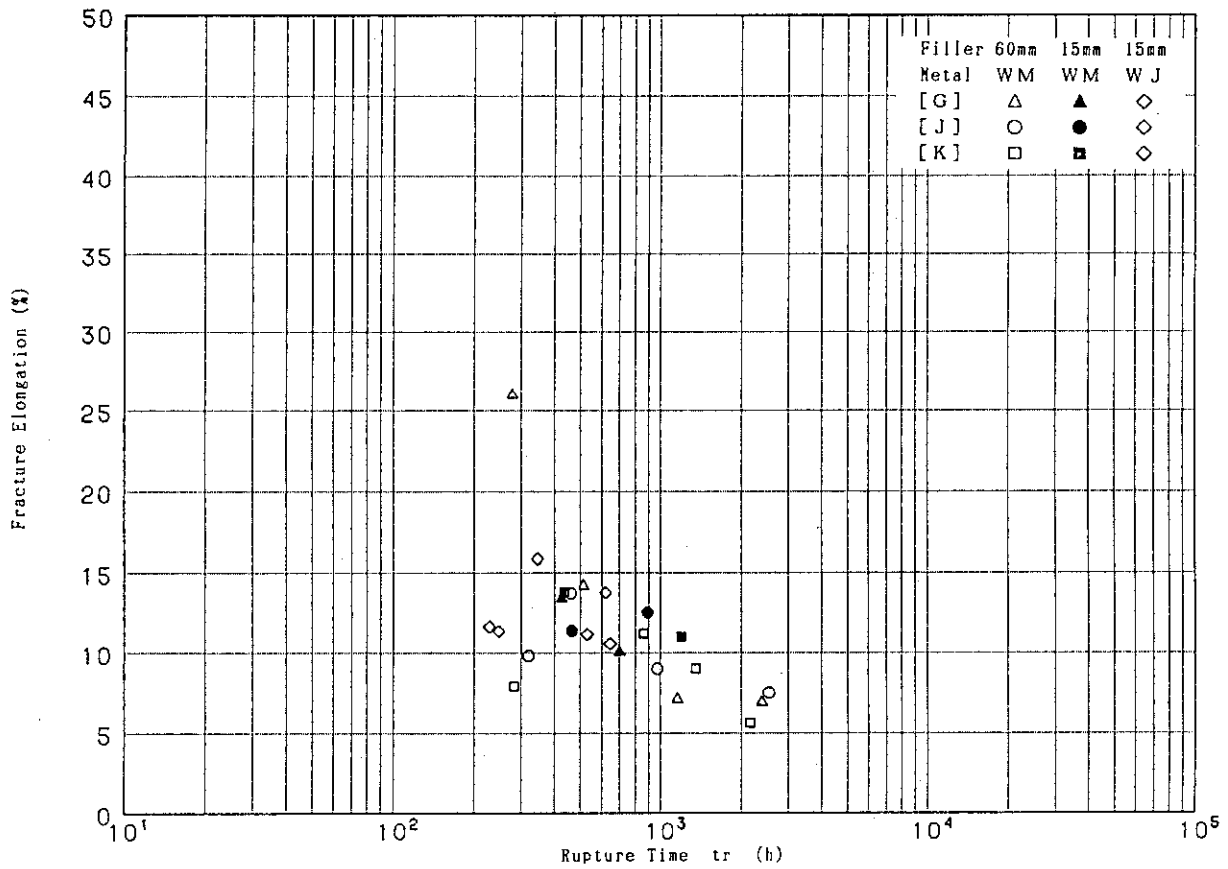


Fig. 4.21 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 900°C in air

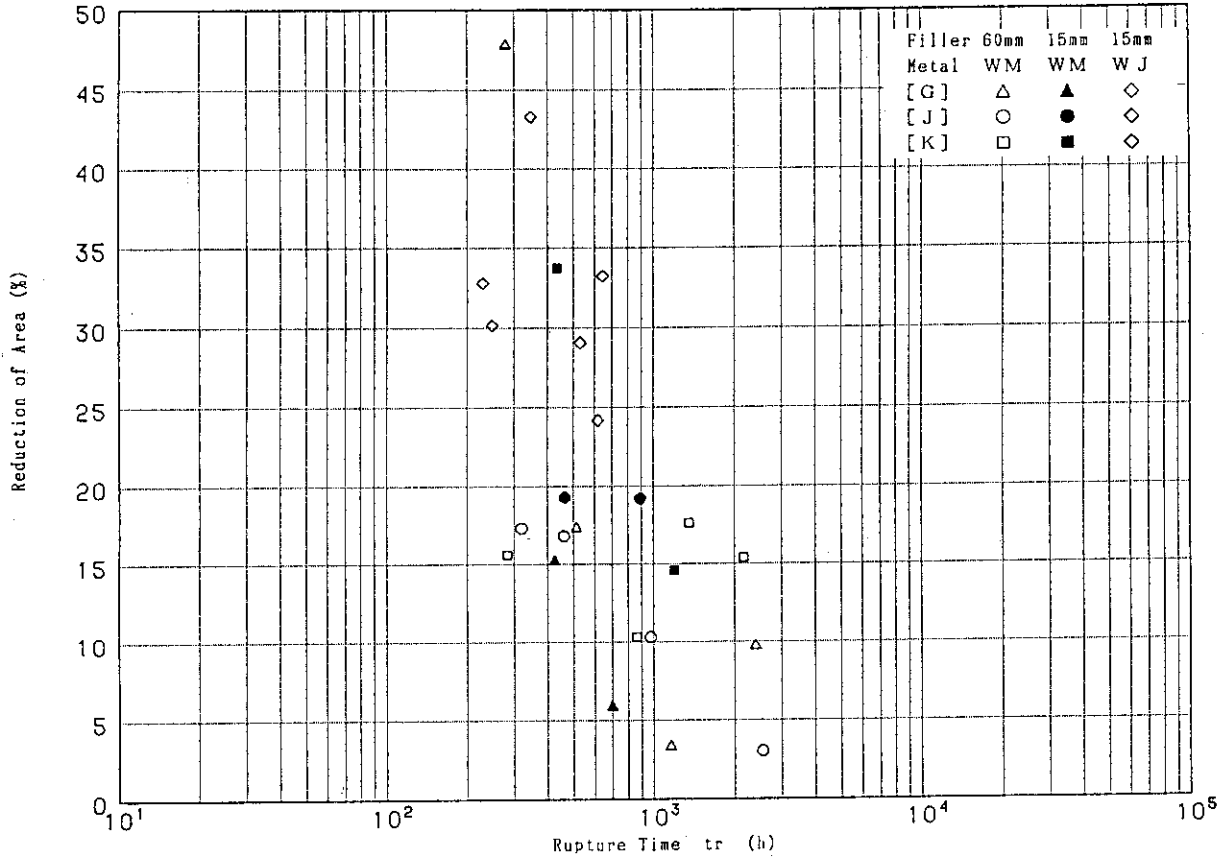


Fig. 4.22 Relation between reduction of area and creep rupture time at 900°C in air

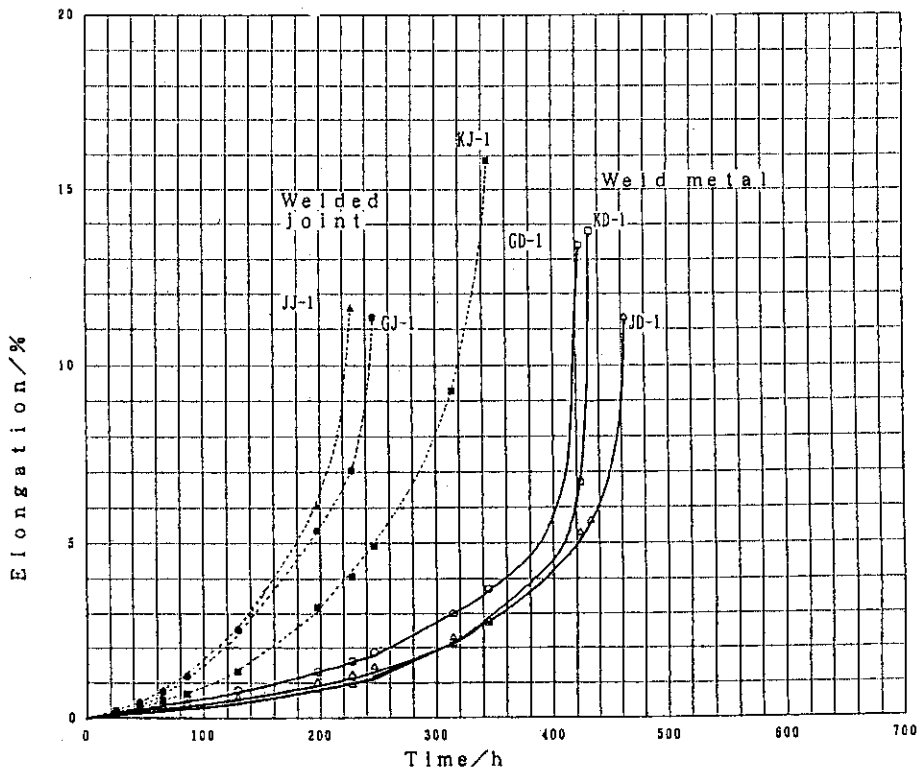


Fig. 4.23 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment for 15mm thickness plate at 900°C under stress of 52MPa

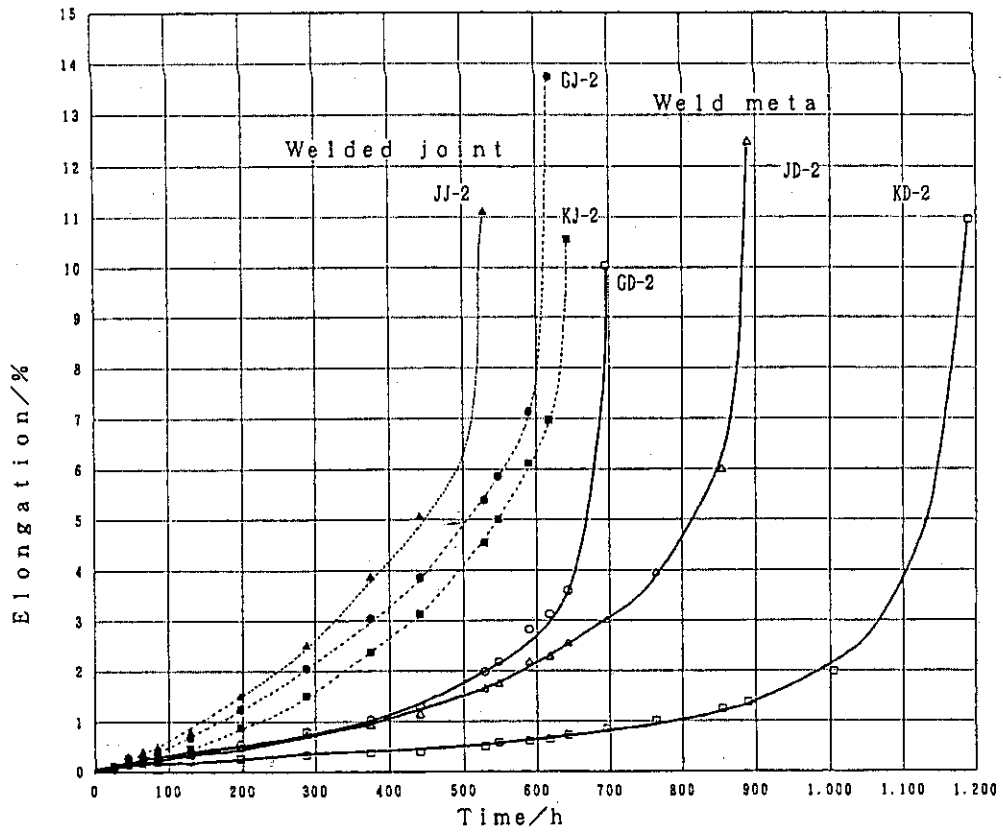


Fig. 4.24 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment for 15mm thickness plate at 900°C under stress of 45MPa

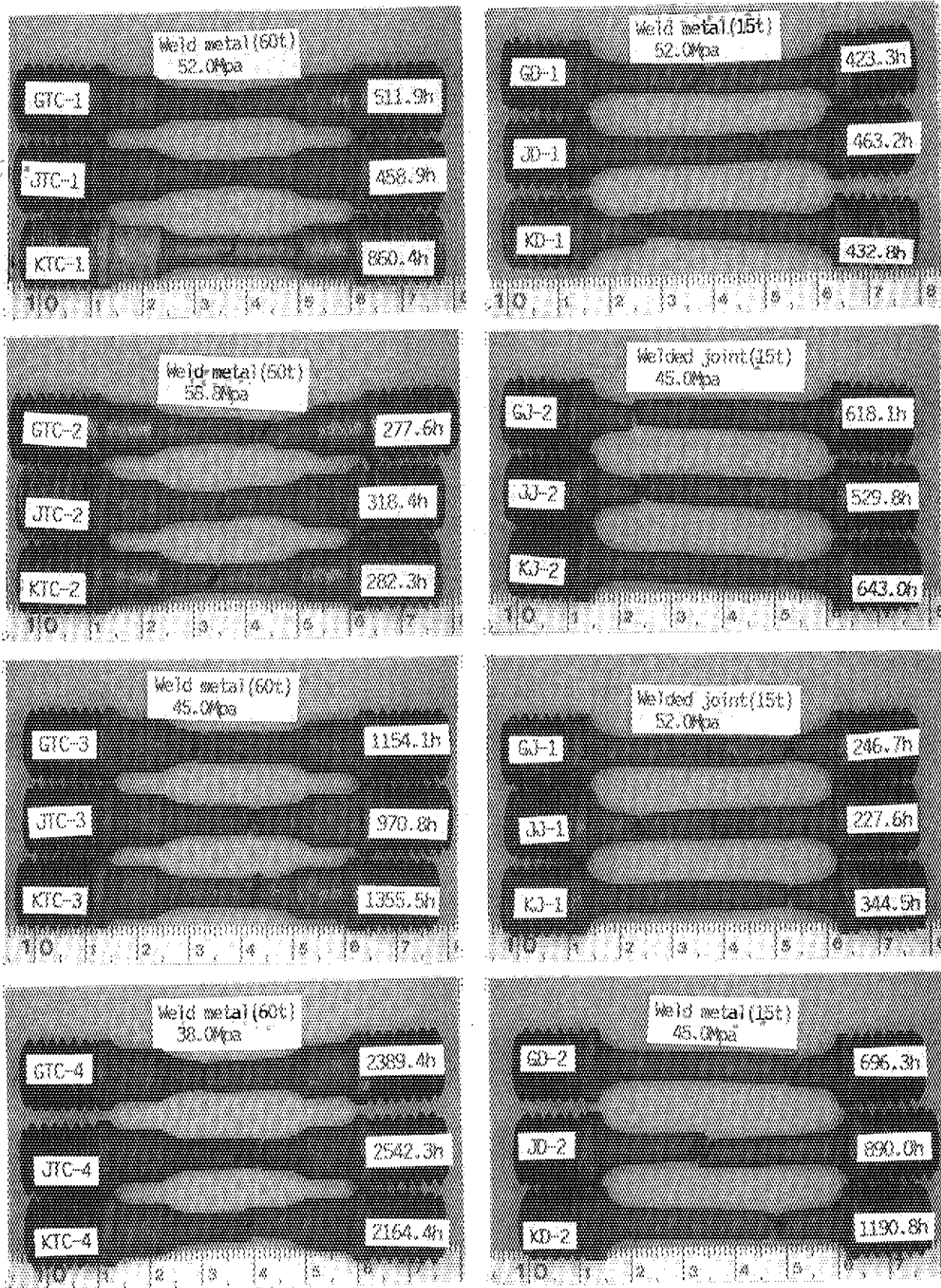


Fig. 4.25 Appearance of creep specimens after testing

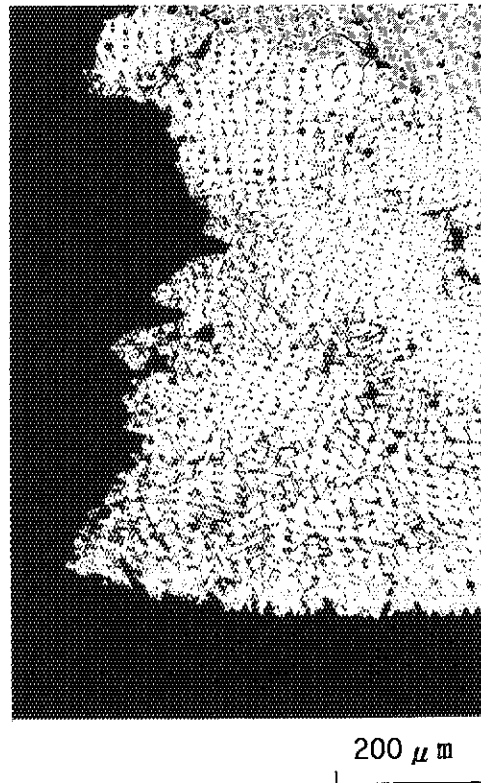
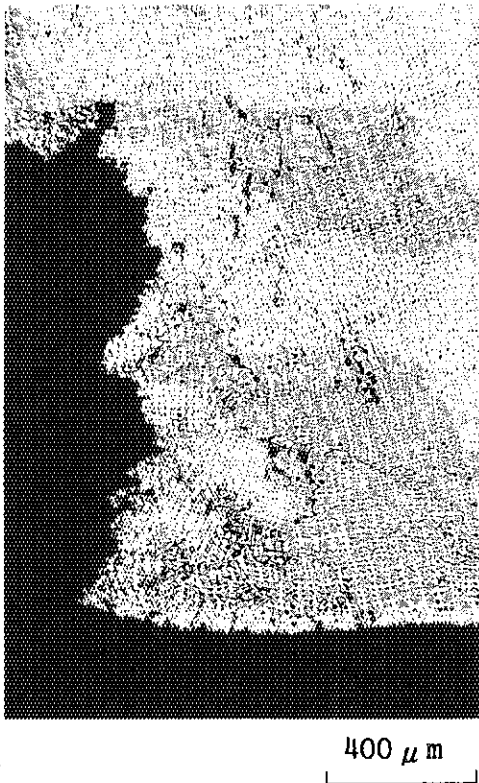
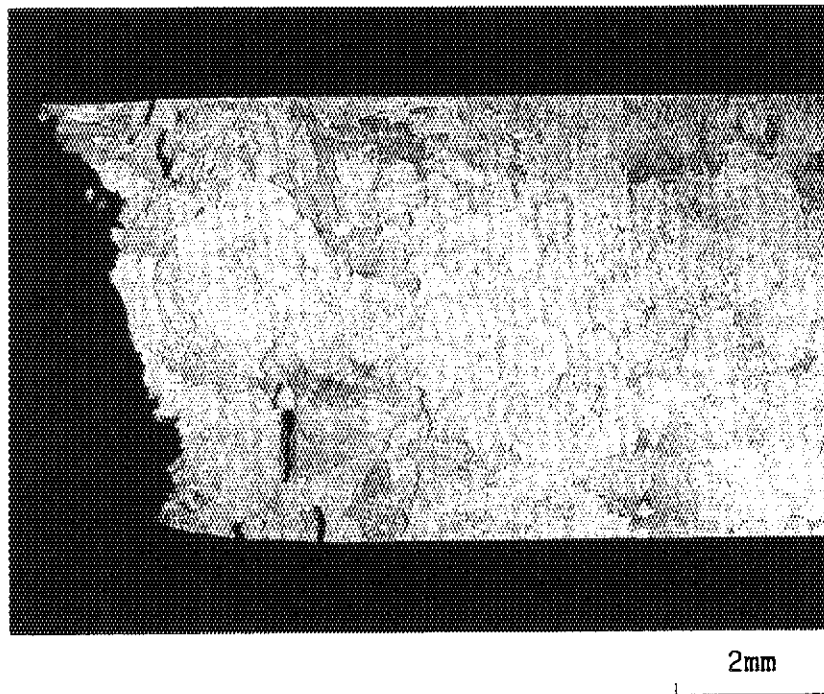


Fig. 4.26 Microstructure of fracture section for Hastelloy XR weld metal (900°C, 2389.4h, 38.0MPa, thickness: 60mm, specimen No.GTC-4)

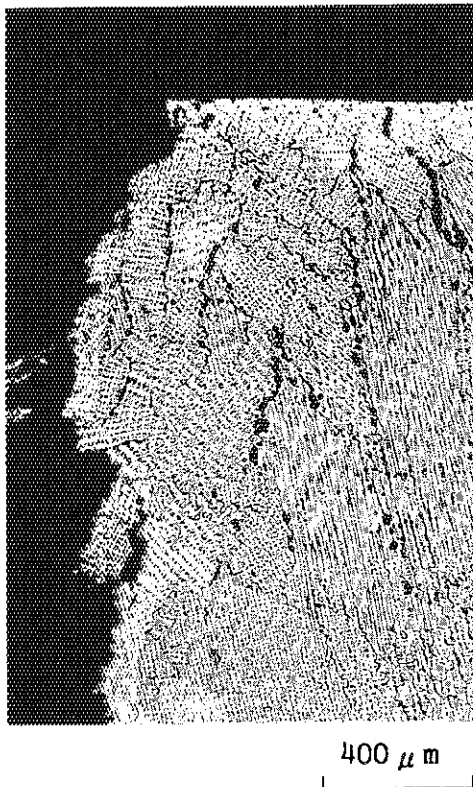
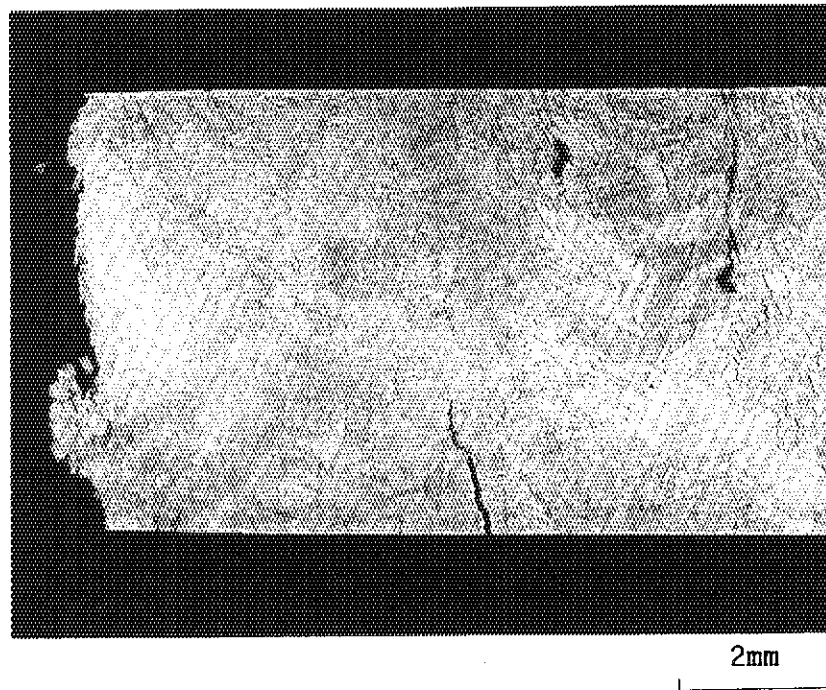


Fig. 4.27 Microstructure of fracture section for Hastelloy XR weld metal (900°C, 2542.3h, 38.0MPa, thickness: 60mm, specimen No.JTC-4)

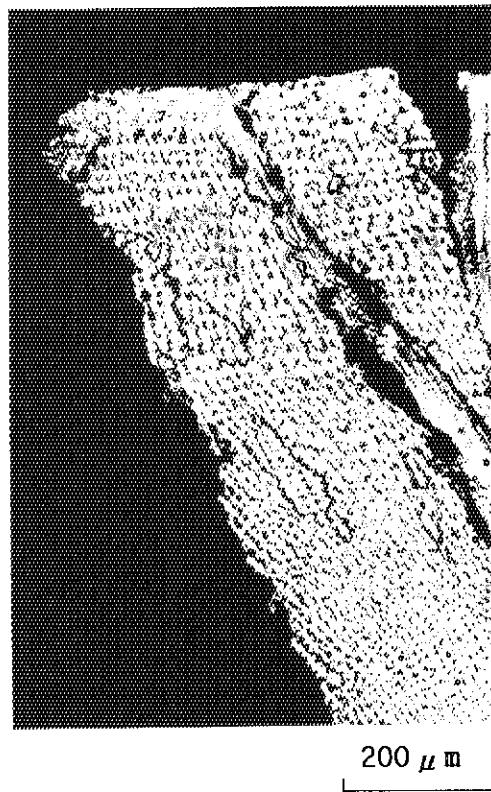
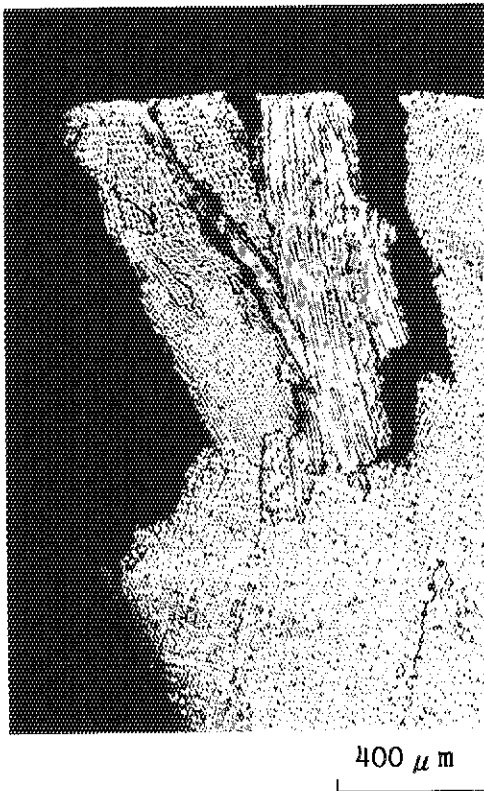
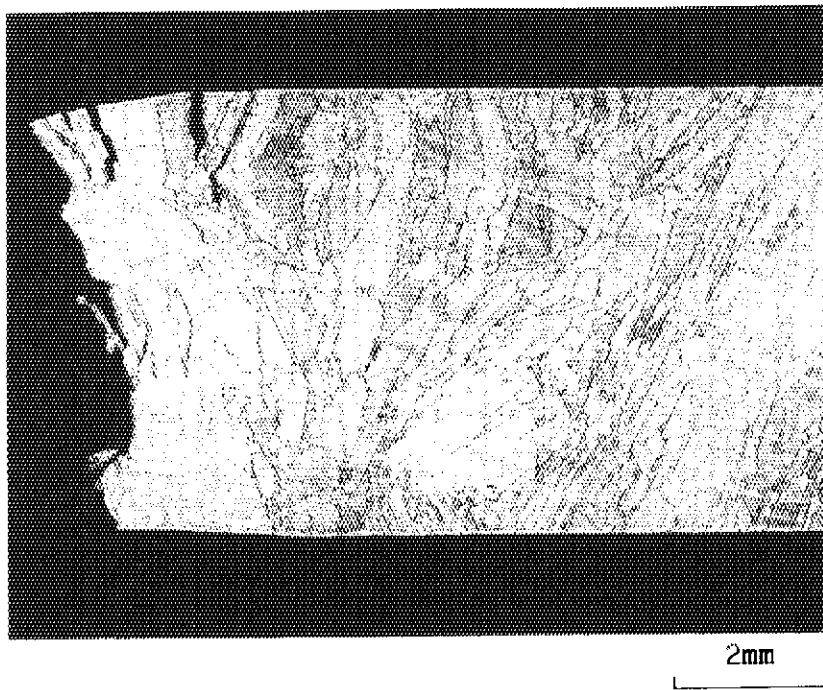


Fig. 4.28 Microstructure of fracture section for Hastelloy XR weld metal (900°C, 2164.4h, 38.0MPa, thickness: 60mm, specimen No.KTC-4)

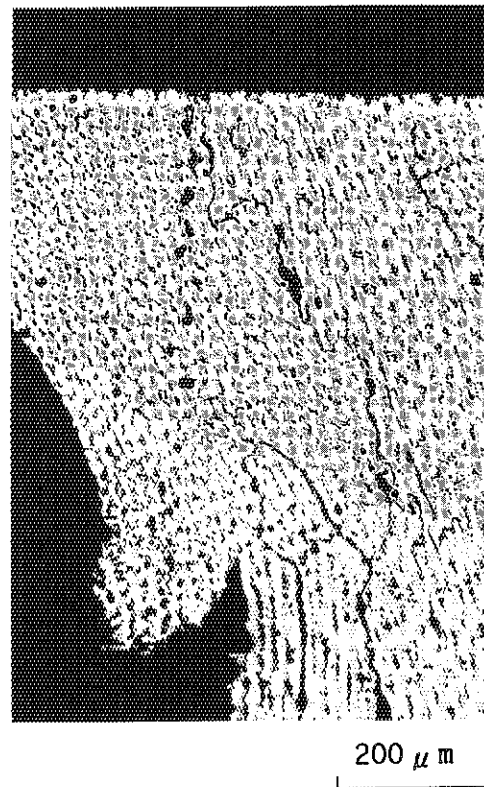
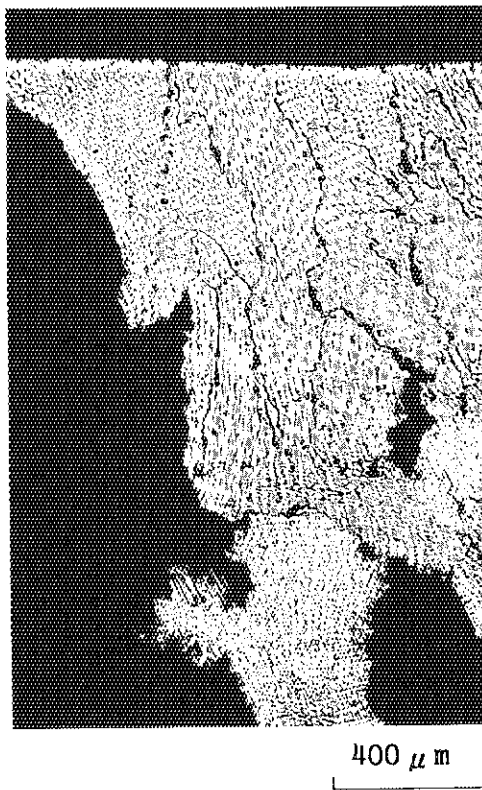
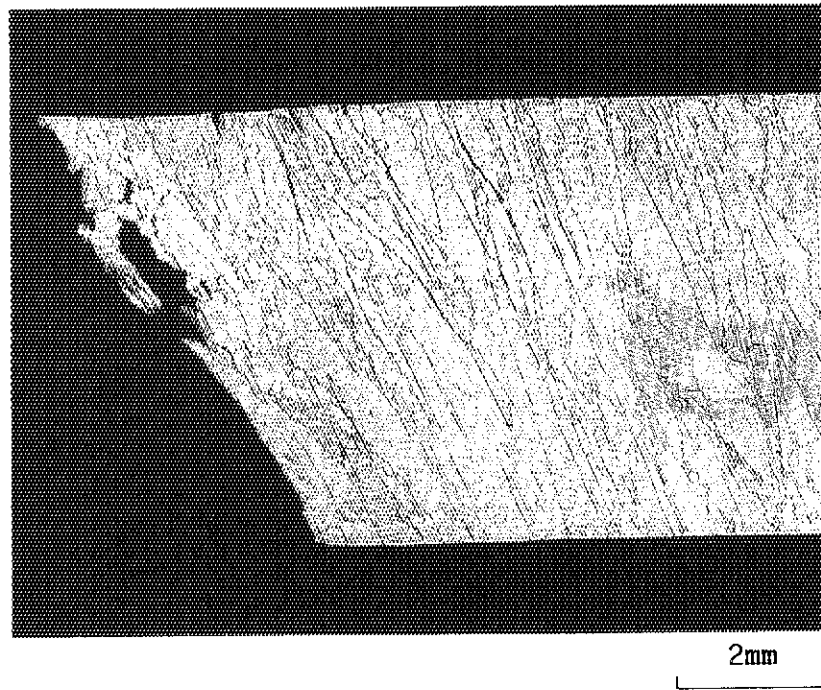


Fig. 4.29 Microstructure of fracture section for Hastelloy XR weld metal (900°C, 696.3h, 45.0MPa, thickness: 15mm, specimen No.GD-2)

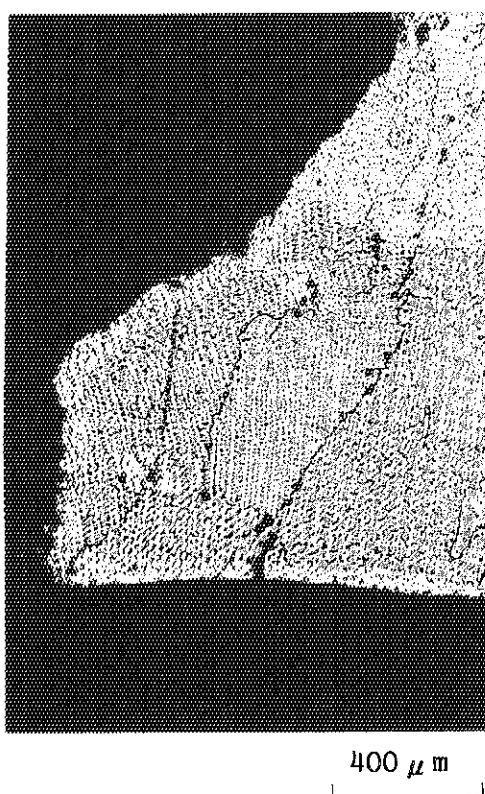
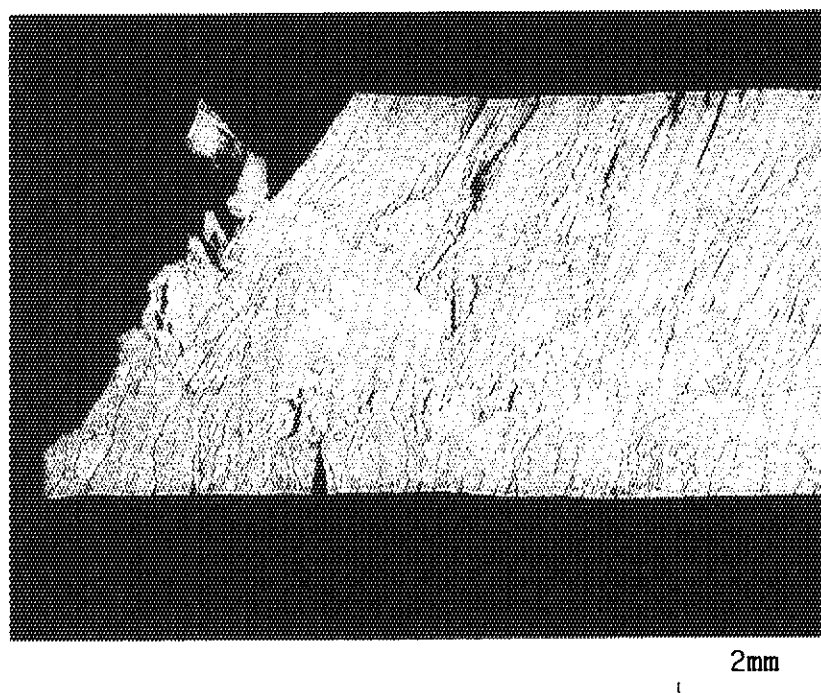


Fig. 4.30 Microstructure of fracture section for Hastelloy XR weld metal (900°C, 890.0h, 45.0MPa, thickness: 15mm, specimen No.JD-2)

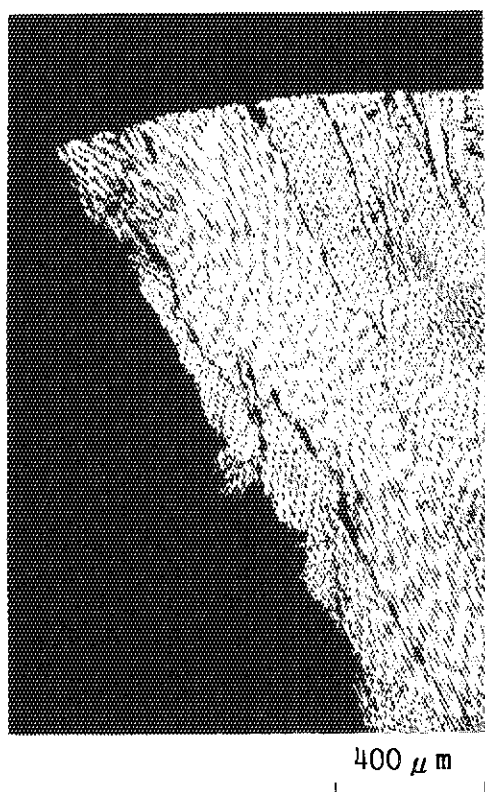
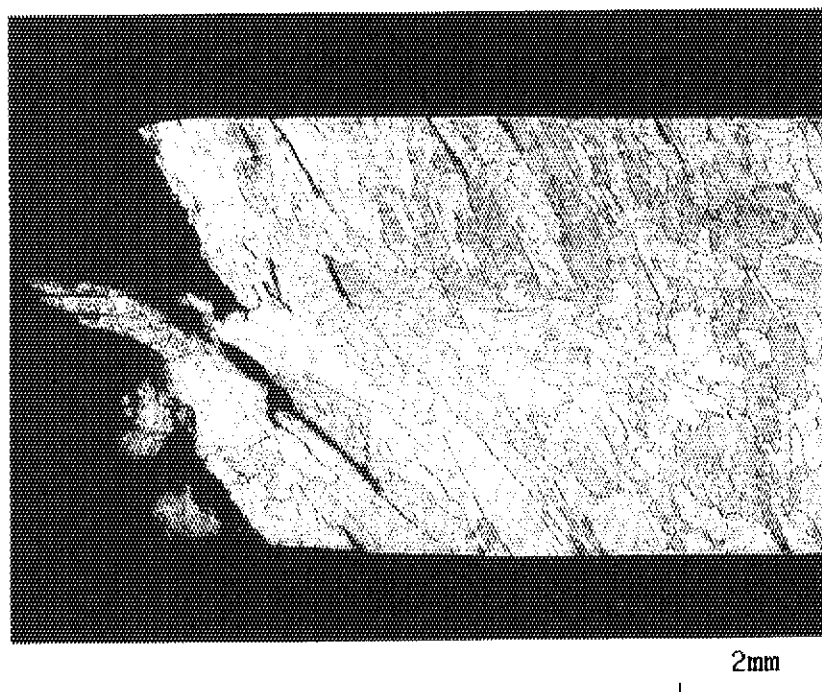


Fig. 4.31 Microstructure of fracture section for Hastelloy XR weld metal (900°C, 1190.8h, 45.0MPa, thickness: 15mm, specimen No.KD-2)

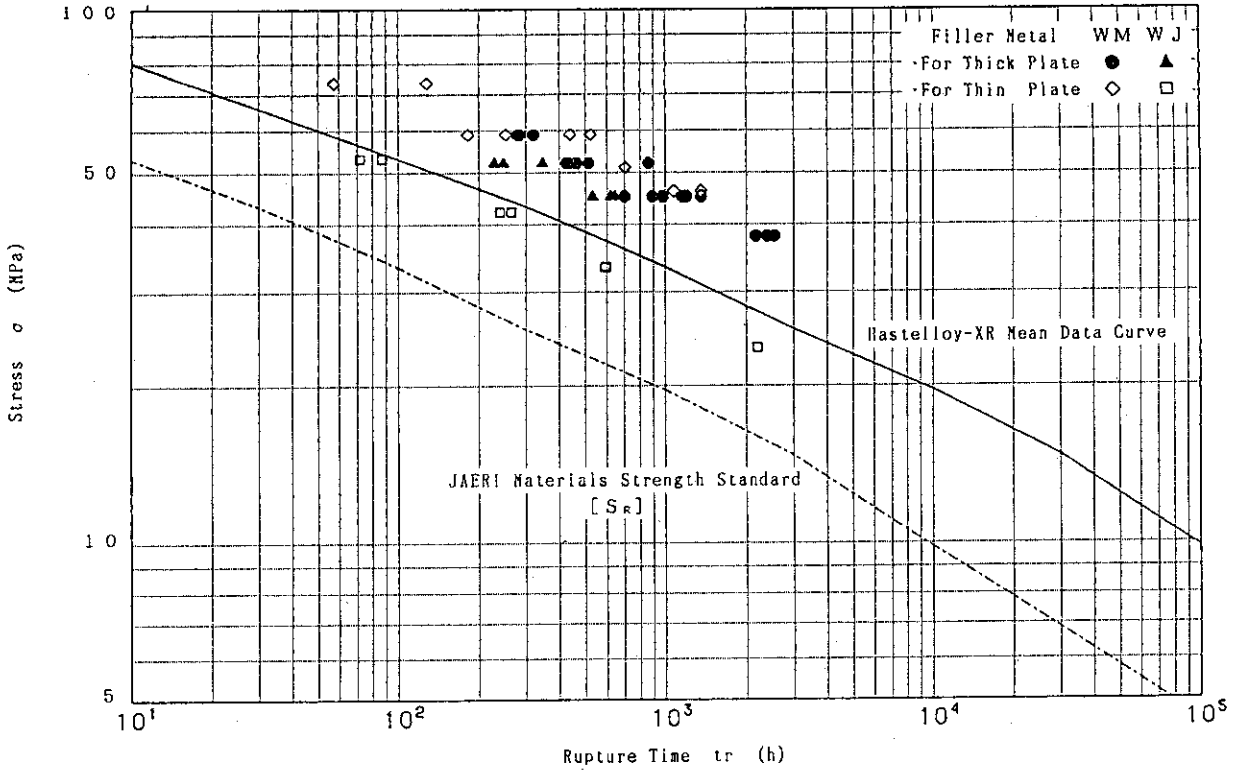


Fig. 4.32 Relation between applied stress and creep rupture time at 900°C in air

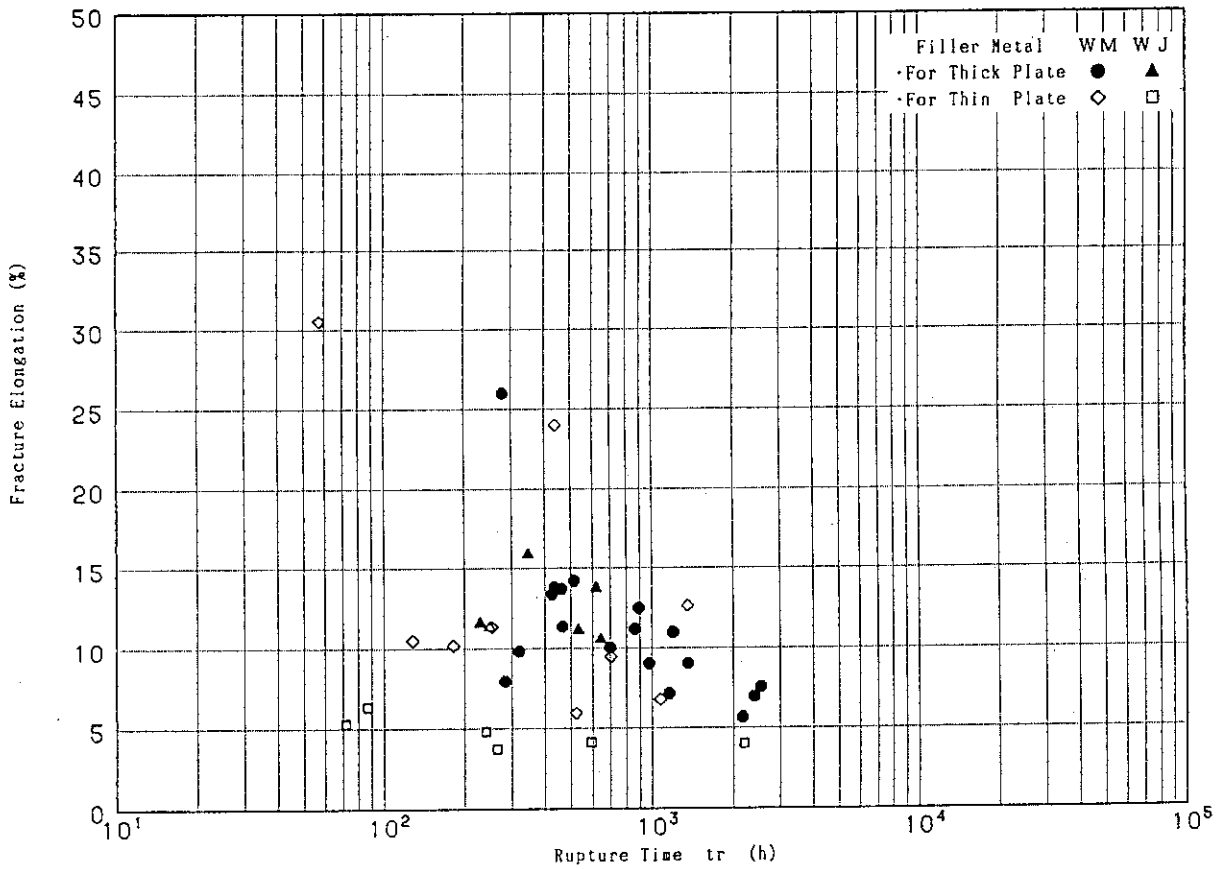


Fig. 4.33 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 900°C in air

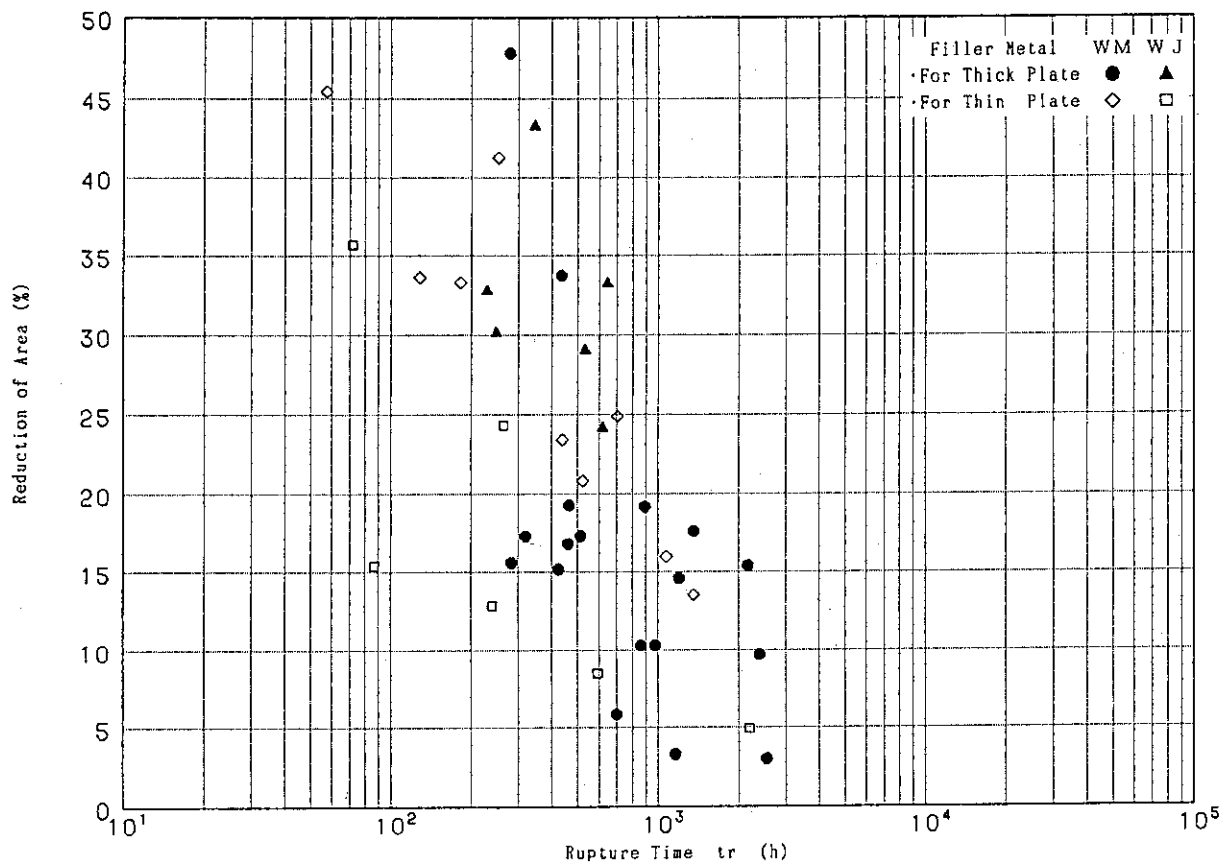


Fig. 4.34 Relation between reduction of area and creep rupture time at 900°C in air

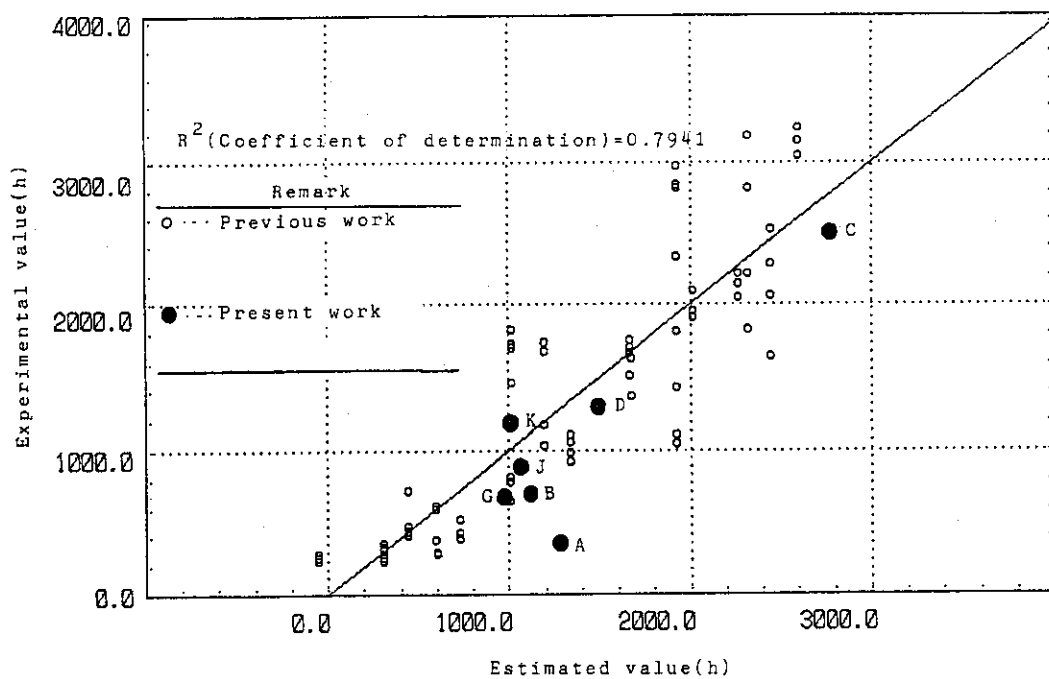


Fig. 4.35 Comparison of creep rupture time of weld metal between estimated value by multiple regression analysis and experimental ones under stress of 44.0MPa at 900°C

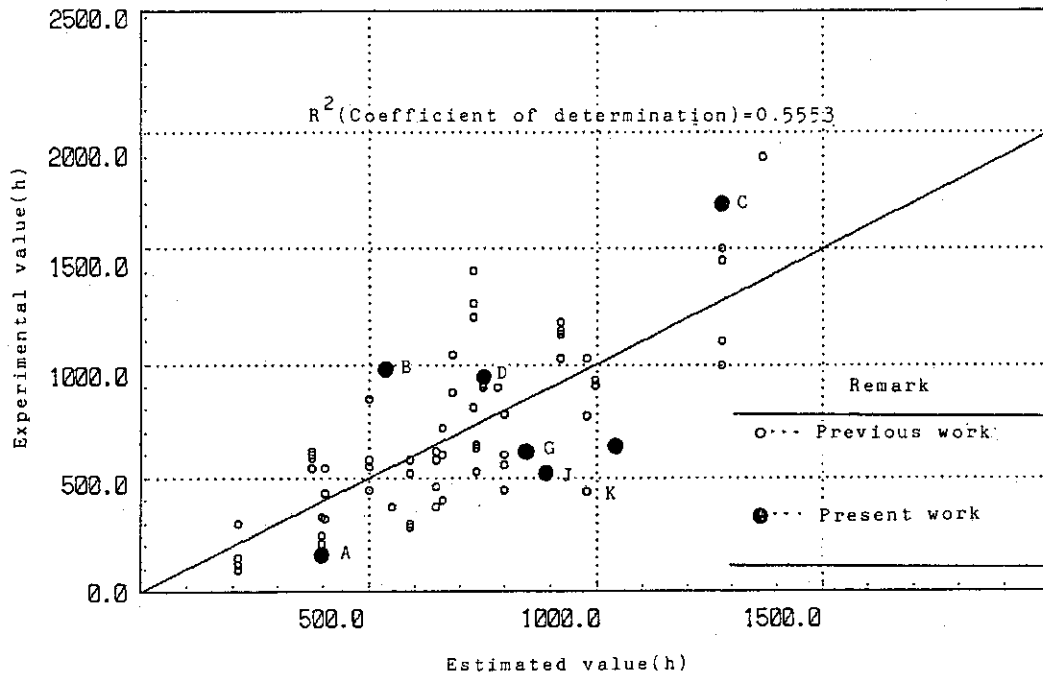


Fig. 4.36 Comparison of creep rupture time of welded joint between estimated value by multiple regression analysis and experimental ones under stress of 44.0MPa at 900°C