

JAERI-Research
95-001



HTTR実機用ハステロイXRの総合特性評価
—その5 母材および溶接部材の大気中クリープ特性—

1995年1月

渡辺勝利・中島 甫・小池上 一^{*1}・樋口 洵^{*1}
仲西恒雄^{*2}・斎藤貞一郎^{*3}・高津玉男^{*3}

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

本レポートは、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。

入手の間合わせは、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、お申し越してください。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）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is 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, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

HTTR実機用ハステロイXRの総合特性評価
—その5 母材および溶接部材の大気中クリープ特性—

日本原子力研究所東海研究所材料研究部

渡辺 勝利 ・中島 甫⁺ ・小池上 一^{*1} ・樋口 洵^{*1}
仲西 恒雄^{*2} ・斎藤貞一郎^{*3} ・高津 玉男^{*3}

(1995年1月5日受理)

HTTR実機用ハステロイXRと同一ヒートの母材および実機用溶加材を用いて、母材および溶接部材の900°Cおよび950°Cにおける大気中クリープ特性を検討し、次のような結果を得た。

クリープ破断強度については、ハステロイXRのマスターカーブと同等以上であり、設計破断応力強さ $[S_R]$ を十分に上回っていた。さらに、これらの溶加材のクリープ破断強度およびクリープ破断延性は、従来のハステロイXR系溶加材のクリープデータと較べても、そのデータバンドの中に位置していることから、ハステロイXR高温溶接構造物用溶加材として十分な適性を有していることが結論された。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

+ 企画室

*1 石川島播磨重工業(株)

*2 富士電機総合研究所

*3 日本ウェルディング・ロッド(株)

Evaluation on Materials Performance of Hastelloy Alloy XR for HTTR Uses-5
(Creep Properties of Base Metal and Weldment in Air)

Katsutoshi WATANABE, Hajime NAKAJIMA⁺, Hajime KOIKEGAMI^{*1}, Makoto HIGUCHI^{*1}
Tsuneo NAKANISHI^{*2}, Teiichiro SAITOH^{*3} and Tamao TAKATSU^{*3}

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

(Received January 5, 1995)

Creep properties on weldment made from Hastelloy Alloy XR base metals and filler metals for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) components were examined by means of creep and creep rupture tests at 900 and 950 °C in air. The results obtained are as follows: creep rupture strength was nearly equal or higher than those of Hastelloy Alloy XR master curve and was much higher than design creep rupture strength[S_R]. Furthermore, creep rupture strength and ductility of the present filler metal was in the data band in comparison with those of the previous filler metals. It is concluded from these reasons that this filler metal has fully favorable properties as HTTR uses.

Keywords: Creep Properties, Hastelloy Alloy XR, Filler Metal, HTTR, Creep Rupture Strength, Ductility

+ Office of Planning

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

*2 Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.

*3 Nippon Welding Rod Corporation

目 次

1. 緒 言	1
2. 供試材料	2
2.1 母 材	2
2.2 溶加材	2
3. 溶接施工	3
3.1 厚板（厚さ60mm）の溶接	3
3.2 薄板（厚さ15mm）の溶接	3
4. 評価結果	4
4.1 施工確認用溶加材のクリープ特性	4
4.2 実機用溶加材のクリープ特性	5
4.3 従来材とのクリープ特性の比較	7
4.4 クリープ強度特性の予測	8
4.5 まとめ	8
5. 結 言	9
謝 辞	10
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Materials	2
2.1 Base Metal	2
2.2 Filler Metal	2
3. Welding Procedures.....	3
3.1 Welding of 60 mm-thick Plate	3
3.2 Welding of 15 mm-thick Plate	3
4. Results	4
4.1 Creep Properties of Filler Metal for Welding Process Test	4
4.2 Creep Properties of Filler Metal for HTTR Uses	5
4.3 Comparison of Present Results with Previous Ones in Creep Properties	7
4.4 Prediction in Creep Rupture Time by Multiple Regression Analysis	8
4.5 Summary	8
5. Conclusions	9
Acknowledgements	10
References	10

1. 緒 言

高温工学試験研究炉(H T T R)は平成10年臨界を目指して、日本原子力研究所大洗研究所に建設が進められている⁽¹⁾。ハステロイXRは周知の如くH T T Rの中間熱交換器のための高温部構造材料として開発され、その後の開発研究を通じて特性改良がなされてきた合金である。

中間熱交換器は定格運転時850°C、高温試験運転時950°Cにおいて用いられる溶接構造物であることから、高ニッケル合金に特有の溶接性および溶接部材の高温強度特性についての解決されねばならない重要な課題があることが従来から指摘され、これまでに一連の開発研究が鋭意進められてきた。

第1期の研究^{(2) - (4)}では重回帰分析手法を用いた合金設計により溶加材を試作し、それらの特性評価を通じて、優れた性能を有する溶加材を見出した。

第2期の研究⁽⁵⁾では実機への使用条件により近づけるべく薄肉溶接構造物(厚さ15mm程度)を想定した特性評価試験を通じて、開発された溶加材の溶接性および溶接部材の高温強度特性とも極めて良好であることを実証した。しかしながら、この段階において、本溶加材の厚肉溶接構造物に対する適合性の問題が重要な課題として残された。

第3期の研究^{(6)・(7)}ではこれまでに得られた成果をふまえて、中間熱交換器が厚肉溶接構造物(厚さ60mm程度)であることから、実機の使用条件を考慮し重回帰分析による微量元素量の最適化を行った溶加材の試作および特性評価試験を行った。これらを通じて溶接部材の高温強度特性を損なうことなく厚肉溶接構造物特有の溶接割れ感受性を低減した優れた性能を有する溶加材を開発することが出来た。本溶加材は現在、実機に適用され、H T T Rの中間熱交換器の製作のために用いられている。

本報はこれらの一連の開発研究を経て得られた厚板溶接構造物への適用可能な溶加材の総合特性評価の一環として、母材および溶接部材の大気中クリープ特性に関わる検討結果について述べたものである。

ここでは工業規模で作製した実機と同一ヒートの母材および実機用溶加材を用いて、実用条件近似下でのクリープ試験を行い、溶接構造物への信頼性評価に資することを目的としている。

2. 供試材料

2.1 母材

既報⁶⁾において開発した Hastelloy XR 系厚肉構造物用溶加材 (J 案合金) を、実機製作時と同じ工業規模溶解で多量に供給できることを確認すると共に、実機製作に先立ち必要となる溶接施行法確認試験および実機に適用する溶接条件の最終確認のために、施工確認用溶加材を製作した。この施工確認用溶加材のための試験に用いる母材として、厚さ 60mm および 15mm の Hastelloy XR 熱間圧延板を工業規模で溶製した。

一方、実機用溶加材のための試験に用いる母材としても同様に、厚さ 60mm および 15mm の Hastelloy XR 熱間圧延板を溶製した。この実機用溶加材のための試験に供する母材は、HTTR の中間熱交換器 (IH X) の耐圧部材 (第一種容器) に使用される母材と同一のインゴット (チャージ番号: G1-867) から製造されている。

これらの供試材の製造方法は、いずれも既報^{2)・5)・6)}と同じであり、真空誘導溶解 (VI) + エレクトロスラグ再溶解 (ESR) の二重溶解で 2 ton インゴットを溶製し、熱間鍛造、熱間圧延により所定の板厚に整え、最終熱処理を施した後、試験に供した。なお、これらの供試材の化学成分分析結果および機械的性質の各々について、溶接施工確認用母材については Table 1 および Table 2 に、実機用母材については Table 3 および Table 4 に示す。

2.2 溶加材

試験に供した施工確認用溶加材は、HTTR の中間熱交換器 (IH X) の溶接施行法確認試験に使用された溶加材と同じものであり、チャージ番号は 0-124 である。

一方、試験に供した実機用溶加材は、HTTR 実機向け溶加材として製造した 3 チャージのうち 1 チャージであり、チャージ番号は 2-083 である。

施工確認用溶加材および実機用溶加材の製造方法は、既報^{2)・5)・6)}と同様であり、真空誘導溶解 (VI) により、500kg インゴットを溶製し、熱間鍛造、熱間圧延および冷間引抜により直径 5.5mm の丸棒素線を製造した後、焼鈍および冷間引抜の繰り返しにより最終直径 1.2mm の溶加材とした。また、加工中の B 量の減少抑制および制御については、既報^{2)・5)・6)}の溶加材開発で実績のある製造条件を踏襲した。なお、これらの供試材の化学成分分析結果は、施工確認用溶加材については Table 5 に、実機用溶加材については Table 6 に示す。

3. 溶接施工

厚さ60mmおよび15mmの Hastelloy XR 母材と施工確認用溶加材および実機用溶加材を用いて、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を使用し、溶接は実機と同様に自動TIG溶接による片側溶接とした。

3.1 厚板（厚さ60mm）の溶接

施工確認用溶加材を用いた場合の溶接施工条件は、これまでの予備試験の結果を踏まえて、実機と同一の条件を設定した。Table 7 に溶接施工条件を示し、Fig. 1に開先形状を示す。パス数が低減されると、ひずみの累積による溶接金属の硬さ上昇を抑制し、曲げ試験における割れ感受性を低減させる効果があると考えられるので、既報⁶⁾よりも狭開先のインサート材なしのU型開先を採用した。積層は、約30層、約70パスであり、通常開先の既報⁶⁾の場合の約40層、約140パスに較べて、パス数で約 $\frac{1}{2}$ になった。なお、Fig. 2に別報⁸⁾で報告する試験の試験片も含め、各試験片の採取要領を示す。

実機用溶加材を用いた場合の溶接施工条件は、実機と同一の条件を適用した。Table 8 に溶接施工条件を示し、Fig. 3 に開先形状を示す。開先は、インサート材なしのU型開先で、溶接施工確認用溶加材の場合と同様に、曲げ試験における割れ感受性を低減させる効果がある狭開先としており、開先角度は 10° とした。積層は、Fig. 4 に示すように、29層、54パス程度であり、通常開先の既報⁶⁾の場合の約40層、約140パスに比べて、層数およびパス数ともに大幅に減少した。なお、実機の溶接においては、確実な裏波溶接とするため、インサート材有りの溶接となるが、本試験板の溶接では、実施する試験に影響を及ぼさないと判断し、インサート材なしの施工とした。

また、開先面および溶接部に対して実施した非破壊検査の結果を、Table 9 に示す。試験方法および判定基準は、総理府令第74号第15条、別表第12および別表15によった。開先面に対しては、浸透探傷試験（PT）を実施し、溶接部に対しては、浸透探傷試験（PT）および放射線透過試験（RT）を実施したが、いずれも溶接欠陥は認められず判定基準を満足していた。なお、Fig. 5(a)およびFig. 5(b)に別報⁸⁾で報告する試験の試験片も含め、各試験片の採取要領を示す。

3.2 薄板（厚さ15mm）の溶接

施工確認用溶加材を用いた場合の溶接施工条件は、既報⁶⁾と同一の条件を適用した。Table 10に溶接施工条件を示し、Fig. 6 に開先形状を示す。開先角度は 60° とし、溶接金属試験片採取用および溶接継手試験片採取用とで、ルート間隔は、各々、10mmお

よび2mmであり、共金材の裏当て金を用いた。積層は、各々、9層、23パスおよび8層、14パス程度であった。また、溶接施工においては、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。

なお、Fig.7 およびFig.8 に別報⁸⁾で報告する試験の試験片も含め、各試験片の採取要領を示す。

また、これらの溶接施工要領は、実機用溶加材の場合と同じである。

なお、実機用溶加材を用いた場合の溶接施工条件は施工確認用溶加材を用いた場合のそれと同一とした。

4. 評価結果

4.1 施工確認用溶加材のクリープ特性

(1) 目的

施工確認用溶加材（チャージ番号：0-124）を用いて製作した溶接試験板から試験片を採取し、溶接金属および溶接継手の大気中クリープおよびクリープ破断試験を実施し、そのクリープ特性を評価する。

(2) 試験方法

厚さ60mmの場合は、溶接金属のクリープ試験を実施した。また、厚さ15mmの場合は、溶接金属のクリープ試験およ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。また、参考のため、溶接継手についても、クリープ曲線を求めた。Fig.9 に厚さ60mmおよび15mmの場合の試験片の形状および寸法を示す。

試験雰囲気は大気中であり、試験温度は900℃とした。なお、厚さ60mmの場合は、負荷応力 38.0MPa、45.0MPa、52.0MPaおよび58.8MPaの4水準の応力レベルとし、最長時間3000hを目標とした。一方、厚さ15mmの場合は、溶接金属および溶接継手とも、負荷応力 38.0MPa、45.0MPaおよび52.0MPaの3水準の応力レベルとし、厚さ60mmの場合と同様に最長時間3000hを目標とした。

(3) 結果および考察

Table 11に厚さ60mmの場合の溶接金属のクリープ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および溶接継手のクリープ破断試験結果をまとめて示す。

Fig.10に負荷応力とクリープ破断時間の関係を、Fig.11およびFig.12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。負荷応力とクリープ破断時間の関係では、厚さ60mmおよび15mmのいずれの場合も、溶接金属のクリープ破

よび2mmであり、共金材の裏当て金を用いた。積層は、各々、9層、23パスおよび8層、14パス程度であった。また、溶接施工においては、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。

なお、Fig. 7 およびFig. 8 に別報⁸⁾で報告する試験の試験片も含め、各試験片の採取要領を示す。

また、これらの溶接施工要領は、実機用溶加材の場合と同じである。

なお、実機用溶加材を用いた場合の溶接施工条件は施工確認用溶加材を用いた場合のそれと同一とした。

4. 評価結果

4.1 施工確認用溶加材のクリープ特性

(1) 目的

施工確認用溶加材（チャージ番号：0-124）を用いて製作した溶接試験板から試験片を採取し、溶接金属および溶接継手の大気中クリープおよびクリープ破断試験を実施し、そのクリープ特性を評価する。

(2) 試験方法

厚さ60mmの場合は、溶接金属のクリープ試験を実施した。また、厚さ15mmの場合は、溶接金属のクリープ試験およ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。また、参考のため、溶接継手についても、クリープ曲線を求めた。Fig. 9 に厚さ60mmおよび15mmの場合の試験片の形状および寸法を示す。

試験雰囲気は大気中であり、試験温度は900℃とした。なお、厚さ60mmの場合は、負荷応力 38.0MPa、45.0MPa、52.0MPaおよび58.8MPaの4水準の応力レベルとし、最長時間3000hを目標とした。一方、厚さ15mmの場合は、溶接金属および溶接継手とも、負荷応力 38.0MPa、45.0MPaおよび52.0MPaの3水準の応力レベルとし、厚さ60mmの場合と同様に最長時間3000hを目標とした。

(3) 結果および考察

Table 11に厚さ60mmの場合の溶接金属のクリープ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および溶接継手のクリープ破断試験結果をまとめて示す。

Fig. 10に負荷応力とクリープ破断時間の関係を、Fig. 11およびFig. 12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。負荷応力とクリープ破断時間の関係では、厚さ60mmおよび15mmのいずれの場合も、溶接金属のクリープ破

断時間は Hastelloy XR 母材のマスターカーブ²⁾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、厚さ15mmの溶接継手の場合も、Hastelloy XR 母材のマスターカーブ²⁾を上回っていた。

クリープ破断延性に関しては、クリープ破断時間が長いほど、破断伸びおよび破断絞りが減少する傾向にあり、厚さ60mmの方が、厚さ15mmの場合よりも多少延性が低下するものもあるが、ほぼ同じ値であった。

溶接金属の場合について、Fig. 13に最小クリープ速度と負荷応力の関係を示し、Fig. 14に最小クリープ速度とクリープ破断時間の関係を示す。いずれの場合も、ほぼ直線関係にあるといえ、最小クリープ速度とクリープ破断時間の関係は、いわゆる Monkman-Grant の関係にあることが確認できる。

Fig. 15からFig. 18に、各応力レベルにおける溶接金属および溶接継手のクリープ曲線を示す。溶接金属においても、2次および3次クリープ領域が明瞭に現れており、従来のデータと同様な傾向を示した。

4.2 実機用溶加材のクリープ特性

(1) 目的

実機と同一ヒート材の母材（チャージ番号：G1-867）および実機用溶加材（チャージ番号：2-083）を用いて製作した溶接試験板から、母材、溶接金属および溶接継手の試験片を採取し、大気中クリープおよびクリープ破断試験を実施し、そのクリープ特性を評価する。

(2) 試験方法

厚さ60mmおよび厚さ15mmのいずれの場合も、母材のクリープ試験、溶接金属のクリープ試験および溶接継手のクリープ破断試験を実施した。母材および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。また、参考のため、溶接継手についても、クリープ曲線を求めた。試験片の形状および寸法は、施工確認用溶加材の場合と同一である。

試験雰囲気は大気中で、試験温度は900℃および950℃とした。なお、900℃の場合は、負荷応力 38.0MPa、47.0MPaおよび58.0MPaの3水準の応力レベルとし、950℃の場合は、負荷応力 22.0MPa、30.0MPaおよび40.0MPaの3水準の応力レベルとした。いずれも、最長時間 3000hを目標とした。

(3) 結果および考察

Table 12に厚さ60mmおよび厚さ15mmの場合の母材および溶接金属のクリープ試験結果並びに溶接継手のクリープ破断試験結果をまとめて示す。

900℃および950℃の場合について、Fig. 19およびFig. 20に負荷応力とクリープ破断時間の関係を、Fig. 21からFig. 24には、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。

負荷応力とクリープ破断時間の関係では、厚さ60mmおよび15mmのいずれの場合も、母材、溶接金属および溶接継手のいずれのクリープ破断時間も、ハステロイXR母材のマスターカーブ⁹⁾と同等以上であり、設計クリープ破断応力強さ $[S_R]$ よりも十分に長いことがわかった。厚さ60mmと15mmの場合について、母材のクリープ破断時間を比較すると、900°Cでは、厚さ15mmの方が、厚さ60mmの場合よりも長時間側になる傾向が見られたが、950°Cでは、ほとんど差が認められなかった。また、溶接金属のクリープ破断時間については、900°Cおよび950°Cのいずれの試験温度においても、厚さ60mmと15mmの間で大きな差は認められなかった。900°Cでは、溶接金属の方が、母材よりもクリープ破断時間が長時間側になる傾向にあったが、950°Cでは、長時間側で溶接金属のクリープ破断時間が母材よりも多少低下する傾向が見られた。

クリープ破断延性に関しては、クリープ破断時間が長いほど、破断伸びおよび破断絞りが減少する傾向にあり、溶接金属の場合は、厚さ60mmの方が、厚さ15mmの場合よりも多少延性が低下する傾向にあった。しかしながら、溶接金属の破断伸びおよび破断絞りの値は、従来と同様な値を示した。また、母材の場合は、厚さ60mmと15mmとの間で、クリープ破断延性に大きな差は認められなかった。

Fig. 25からFig. 30に、各温度・応力レベルにおけるクリープ曲線を示す。溶接金属においても、2次および3次クリープ領域が明瞭に現れており、施工確認用溶加材の場合と同様な曲線が得られた。

Fig. 31からFig. 34に厚さ60mmおよび15mmの場合の試験後の試験片外観を示す。母材試験片では、高応力・短時間側で、かなりの破断絞りが認められるが、溶接金属試験片では、高応力・短時間側でも、僅かに破断絞りが認められる程度であり、低応力・長時間側では、ほとんど見られなかった。なお、溶接継手については、母材破断の場合は、かなりの破断絞りを伴っていた。

Fig. 35からFig. 40に板厚が60mmの場合の900°Cおよび950°Cにおける破断部縦断面からみた組織の代表例を示す。Fig. 35およびFig. 38に母材の組織を示す。破断部近傍の粒界には大小いくつかのポイドが粒界に点在し、それらのポイドが生長伝播して破断した様相の組織を呈していた。

Fig. 36およびFig. 39に溶接金属の組織を示す。破断部近傍では母材の結晶粒よりも粗大化した柱状晶組織に沿った連続的なポイドが形成され、その形態は母材の場合とは異なる。またそのポイド形成の傾向は900°Cのものより950°Cの方がやや顕著であった。溶接金属の破断部は粒界に形成された連続的なポイドから柱状晶の粒界が剝離したような組織を呈していた。このように母材と溶接金属の破断部とでは組織に差異が認められたが、このことは一般に母材に較べ溶接金属のクリープ延性が低いことを反映しているものと考えられる。Fig. 37およびFig. 40に溶接継手の組織

を示す。溶接継手の場合は、破断位置が母材もしくは溶接金属部かによってそれぞれ先に述べた様相の組織を呈していた。

Fig. 41からFig. 46に板厚が15mmの場合の母材、溶接金属および溶接継手の組織を示す。その結果は板厚が60mmの場合とほぼ同様で板厚の相違による破断部近傍における組織の顕著な差異はほとんど認められなかった。

4.3 従来材とのクリープ特性の比較

(1) 厚肉構造物用溶加材における比較

本報で供試された施工確認用溶加材（チャージ番号：0-124）および実機用溶加材（チャージ番号：2-083）は、ハステロイXR系厚肉構造物用溶加材として既報⁶⁾において開発したJ案合金とほぼ同一の化学組成を有するので、これら3種類の厚肉構造物用溶加材について、クリープ特性を比較した。

溶接金属の場合について、Fig. 47に負荷応力とクリープ破断時間の関係を、Fig. 48およびFig. 49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。なお、試験温度は900°Cであり、試験雰囲気は大気中である。

負荷応力とクリープ破断時間の関係では、3種類の厚肉構造物用溶加材の間で、大きな差異は認められない。一方、クリープ破断延性に関しては、J案合金に較べ施工確認用溶加材および実機用溶加材の場合の方が、多少延性が大きくなる傾向にある。

したがって、施工確認用溶加材および実機用溶加材のクリープ特性は、厚肉構造物用溶加材として既報⁶⁾において開発したJ案合金のクリープ特性と同等以上であるといえ、工業規模溶解で多量に製造した場合にも、期待したクリープ特性を有することが確認された。また、工業規模溶解で多量に製造した施工確認用溶加材および実機用溶加材の間には、クリープ破断強度およびクリープ破断延性のいずれにも有意な差異はなく、同一の化学組成を目標にして製造された溶加材の場合には、クリープ特性が再現されることが確認された。

(2) ハステロイXR系溶加材における比較

本報で供試された施工確認用溶加材（チャージ番号：0-124）および実機用溶加材（チャージ番号：2-083）と、既報^{2), 5), 6), 10)}において開発され試験したBを約20~50ppm含む従来のハステロイXR系溶加材とのクリープ特性を比較した。

溶接金属の場合について、Fig. 50およびFig. 51に負荷応力とクリープ破断時間の関係を、Fig. 52からFig. 55には、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。なお、試験温度は900°Cおよび950°Cであり、試験雰囲気は大気中である。

工業規模溶解で多量に製造した施工確認用溶加材および実機用溶加材のクリープ破断強度およびクリープ破断延性は、Bを約20~50ppm含む従来のハステロイXR系溶加材のデータバンドの中に入っており、HTTRの中間熱交換器（IHX）の

ようなハステロイXR高温厚肉構造物用溶加材として、十分なクリープ特性を有していることが確認された。

4.4 クリープ強度特性の予測

本報では既報⁶⁾における溶接金属のクリープ強度データに施工確認用および実機用溶加材のデータを加え、より多くのデータをもとに予測精度を高めることをねらって溶加材の化学成分と溶接金属のクリープ強度との関係を表す重回帰式を求めることを試みた。なお、重回帰式は900°C、44.0 MPaにおける溶接金属のクリープ破断時間、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。算出された重回帰分析結果並びにその適用範囲を各々Table 13およびTable 14に示す。ここで、各係数の符号で(+)はクリープ強度を増加させ、(-)はクリープ強度を低下させると考えられる元素である。

クリープ破断時間を予測するための偏回帰係数(Partial regression coefficient)は既報⁶⁾において得られたものとはほぼ同様でMnが(-)でかつその絶対値が他の元素に比べ最も大きく、Mn量の増大によりクリープ強度を低下させることが推定できる。各元素間におけるクリープ強度への影響力を比較できる標準偏回帰係数(Standard partial regression coefficient)でみると(-)符号の元素ではMnの他にSも比較的その絶対値が大きい。(+)符号の元素ではMoやBの絶対値が比較的大きい。他の元素の影響を一定と考えた上でのクリープ強度との真の相関性を示す偏相関係数もMn、S、MoおよびBについては比較的高い。従って、かなりの影響力でMnおよびSなどはクリープ強度を低下させるが、MoおよびBなどはクリープ強度を増加させる効果を有するものと推定できる。

Fig. 56に溶接金属のクリープ破断時間について実験値と重回帰式により求めた計算値との比較を示す。重回帰式のあてはまりの精度を示す寄与率(R^2)が0.7846と高く実験値と計算値とが比較的良く一致した。このことは溶接金属のクリープ強度がTable 14に示す適用範囲内では溶加材の化学成分によりほぼ予測でき、さきの第4.3項で述べたように同一化学組成を目標にした製造された溶加材の場合にはクリープ特性の再現性が良好であることを示唆していると言えよう。

4.5 まとめ

HTTRの中間熱交換器(IHX)の溶接施行法確認試験に使用された施工確認用溶加材(チャージ番号: 0-124)およびHTTR実機向け溶加材として製造した3チャージのうち1チャージである実機用溶加材(チャージ番号: 2-083)を用いて、大気中クリープおよびクリープ破断試験を実施したところ、クリープ破断強度は、ハステロイXRのマスターカーブと同等以上であり、設計クリープ破断応力強さ[S_R]

を十分に上回ることがわかった。

また、これらの溶加材のクリープ破断強度およびクリープ破断延性は、従来の Hastelloy X R 系溶加材のクリープデータと較べても、そのデータバンドの中に位置していることから、HTTR の中間熱交換器 (IHX) のような Hastelloy X R 高温厚肉構造物用溶加材として、十分なクリープ特性を有していると判断された。

更に、工業規模溶解で多量に製造した施工確認用溶加材および実機用溶加材の間には、クリープ破断強度およびクリープ破断延性のいずれにも有意な差異はなく、同一の化学組成を目標にして製造された溶加材の場合のクリープ特性の再現性が良好であることが確認された。

一方、溶接金属についての重回帰分析によるクリープ強度特性予測については、実験値と計算値との間に比較的良好な一致が見られたことから、本合金設計法の妥当性が実証されたと言えよう。

5 . 結 言

施工確認用溶加材および HTTR 実機用溶加材を用いて、母材および溶接部材の大気中クリープ試験およびクリープ破断試験を行い、次のような結果を得た。

- (1) クリープ破断強度は、Hastelloy X R のマスターカーブと同等以上であり、設計破断応力強さ〔 S_R 〕を十分に上回ることが分かった。
- (2) これらの溶加材のクリープ破断強度およびクリープ破断延性は、従来の Hastelloy X R 系溶加材のクリープデータと較べても、そのデータバンドの中に位置していることから、Hastelloy X R 高温溶接構造物用溶加材として十分な適性を有していると言える。
- (3) クリープ破断強度およびクリープ破断延性のいずれについても施工確認用および実機用の溶加材の間に有意な差はなく、同一の化学組成を目標にして製造された溶加材のクリープ特性の再現性が良好であることが確かめられた。
- (4) 溶接金属についての重回帰分析によるクリープ強度特性予測において、実験値と予測値との間に比較的良好な一致が見られたことから、本合金設計法の妥当性が実証された。

を十分に上回ることがわかった。

また、これらの溶加材のクリープ破断強度およびクリープ破断延性は、従来の Hastelloy X R 系溶加材のクリープデータと較べても、そのデータバンドの中に位置していることから、HTTR の中間熱交換器 (IH X) のような Hastelloy X R 高温厚肉構造物用溶加材として、十分なクリープ特性を有していると判断された。

更に、工業規模溶解で多量に製造した施工確認用溶加材および実機用溶加材の間には、クリープ破断強度およびクリープ破断延性のいずれにも有意な差異はなく、同一の化学組成を目標にして製造された溶加材の場合のクリープ特性の再現性が良好であることが確認された。

一方、溶接金属についての重回帰分析によるクリープ強度特性予測については、実験値と計算値との間に比較的良好な一致が見られたことから、本合金設計法の妥当性が実証されたと言えよう。

5 . 結 言

施工確認用溶加材および HTTR 実機用溶加材を用いて、母材および溶接部材の大気中クリープ試験およびクリープ破断試験を行い、次のような結果を得た。

- (1) クリープ破断強度は、Hastelloy X R のマスターカーブと同等以上であり、設計破断応力強さ〔 S_R 〕を十分に上回ることが分かった。
- (2) これらの溶加材のクリープ破断強度およびクリープ破断延性は、従来の Hastelloy X R 系溶加材のクリープデータと較べても、そのデータバンドの中に位置していることから、Hastelloy X R 高温溶接構造物用溶加材として十分な適性を有していると言える。
- (3) クリープ破断強度およびクリープ破断延性のいずれについても施工確認用および実機用の溶加材の間に有意な差はなく、同一の化学組成を目標にして製造された溶加材のクリープ特性の再現性が良好であることが確かめられた。
- (4) 溶接金属についての重回帰分析によるクリープ強度特性予測において、実験値と予測値との間に比較的良好な一致が見られたことから、本合金設計法の妥当性が実証された。

謝 辞

本研究を行う上で、石川島播磨重工業(株)、(株)富士電機総合研究所、日本ウェルディング・ロッド(株)および日本原子力研究所の関係各位に多大なる御支援と御協力を頂きましたことを感謝致します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所編：高温工学試験研究の現状，(1993)。
- (2) 渡辺、中島、佐平、倉内、斉藤、高津、仲西：JAERI-M 89-206(1989)
- (3) 渡辺、仲西、高津、佐平、中島：高温学会誌、Vol.16, No.6, (1990)368
- (4) 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)81.
- (5) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、斉藤、仲西、辻、塚田：JAERI-M 91-181(1991)。
- (6) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、斉藤、高津、仲西、小池上、樋口：JAERI-M 91-189(1991)。
- (7) K. Watanabe, K. Sahira, T. Takatsu, T. Nakanishi, M. Higuchi and H. Nakajima : Computer Aided Innovation of New MaterialsII, Elsevier Sci. Publishing Co., (1993) p.1491.
- (8) 渡辺、中島、斉藤、高津：小池上、樋口、仲西、佐平、丸七、竹入 : JAERI-Research 94-046(1994)
- (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の溶接継手強度に関する調査研究、成果報告書 JWES-AE-9005(1990)

謝 辞

本研究を行う上で、石川島播磨重工業(株)、(株)富士電機総合研究所、日本ウェルディング・ロッド(株)および日本原子力研究所の関係各位に多大なる御支援と御協力を頂きましたことを感謝致します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所編：高温工学試験研究の現状，(1993)。
- (2) 渡辺、中島、佐平、倉内、斉藤、高津、仲西：JAERI-M 89-206(1989)
- (3) 渡辺、仲西、高津、佐平、中島：高温学会誌、Vol.16, No.6, (1990)368
- (4) 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)81.
- (5) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、斉藤、仲西、辻、塚田：JAERI-M 91-181(1991)。
- (6) 渡辺、中島、佐平、丸七、竹入、斉藤、高津、仲西、小池上、樋口：JAERI-M 91-189(1991)。
- (7) K. Watanabe, K. Sahira, T. Takatsu, T. Nakanishi, M. Higuchi and H. Nakajima : Computer Aided Innovation of New MaterialsII, Elsevier Sci. Publishing Co., (1993) p.1491.
- (8) 渡辺、中島、斉藤、高津：小池上、樋口、仲西、佐平、丸七、竹入 : JAERI-Research 94-046(1994)
- (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の溶接継手強度に関する調査研究、成果報告書 JWES-AB-9005(1990)

Table 1 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR plates for welding process test

(t15mm plate:ch.0-644 , t60mm plate:ch.0-644) (mass %)

element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Co	B	Ni	N
Ladle, ch.0-644	0.07	0.35	0.85	<0.001	0.002	21.7	18.1	9.2	0.49	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.002	Rem.	<0.01
Slab(Top)	0.07	0.33	0.86	<0.001	<0.001	21.7	18.0	9.2	0.49	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.001	Rem.	<0.01
Slab(Bottom)	0.07	0.33	0.85	<0.001	<0.001	21.6	18.0	9.3	0.49	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.001	Rem.	<0.01
Specification **	min	0.05	0.25	—	—	20.5	17.0	8.0	0.20	—	—	—	—	—	—	—
	max	0.15	0.50	0.040	0.030	23.0	20.0	10.0	1.00	0.50	0.05	0.03	2.50	0.010	Rem.	—

* : thickness 60mm, 15mm ** : Ref. JAERI-M90-148
 Rem. : Remainder — : Not specified or not analysed

Table 2 Materials properties of Hastelloy Alloy XR plates for welding process test

(t15mm plate:ch.0-644 , t60mm plate:ch.0-644)

	Ultimate Tensile Strength (MPa)	0.2%offset Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)	Grain Size (AGS No.)**	Creep Rupture at 815°C, 105MPa		Creep Rupture at 900°C, 49MPa	
						Rupture Time(hr)	Elongation(%)	Rupture Time(hr)	Elongation(%)
t15mm plate	687	343	55	87	2.0	88	48	242	49
t60mm plate	686	341	56	80	2.0	55	83	171	50
Specification *	≥ 655	≥ 241	≥ 35	—	2 to 5	≥ 24	≥ 10	≥ 100	≥ 10

* : Specification of manufacturer
 ** : Average Grain Size Number

Table 3 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR plates for HFTR components

element	(115mm plate:ch.G1-867, 160mm plate:ch.G1-867)											(mass%)				
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Co	B	Ni	N
Ladle, ch.G1-867	0.06	0.37	0.89	0.001	0.001	21.8	18.1	9.0	0.49	<0.01	<0.01	0.01	0.03	0.004	Rem.	0.003
Slab (Top)	0.06	0.33	0.89	0.001	<0.001	21.60	17.99	9.06	0.49	<0.01	<0.01	0.01	0.03	0.0037	Rem.	0.004
Slab (Bottom)	0.06	0.34	0.88	0.001	<0.001	21.62	18.05	9.04	0.49	0.08	<0.01	0.01	0.04	0.0019	Rem.	0.011
t15mm plate	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0029	—	—
t60mm plate	0.06	0.34	0.90	<0.001	0.001	21.81	18.13	9.01	0.49	<0.01	<0.01	0.01	0.03	0.0030	Rem.	0.005
Specification #	min	0.25	0.75	—	—	20.5	17.0	8.0	0.20	—	—	—	—	—	—	—
	max	0.15	0.50	0.040	0.030	23.0	20.0	10.0	1.00	0.50	0.05	0.03	2.50	0.010	Rem.	—
Aim range **	min	0.05	0.25	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	—	0.0010	—	—
	max	0.09	0.50	0.040	0.030	23.00	20.00	10.00	1.00	0.50	0.05	0.03	0.10	0.0050	Rem.	—
Aim point **	0.07	0.35	0.90	LAP	LAP	21.50	18.00	9.00	0.50	LAP	LAP	LAP	LAP	0.0030	Rem.	LAP

Rem. : Remainder
 — : Not specified or not analysed
 LAP : Low as possible
 * : Bylaws of Science and Technology Agency (unpublished)
 ** : Aim range and Aim point of Hastelloy XR for HFTR

Table 4 Materials properties of Hastelloy Alloy XR plates for HTTR components

(115mm plate:ch.G1-867, 160mm plate:ch.G1-867)

	Ultimate Tensile Strength (MPa)	0.2%offset Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)	Grain Size* (AGS No.)	Creep Rupture at 815°C, 105MPa		Creep Rupture at 900°C, 40MPa	
						Rupture Time(hr)	Elongation(%)	Rupture Time(hr)	Elongation(%)
115mm plate	7 2 7	3 2 9	5 0	8 6	(T)4.5 (L)4.5	8 7	1 0 1	2 4 4	8 8
160mm plate	6 6 8	2 9 0	5 7	8 4	(T)3.0 (L)3.0	9 9	1 0 0	2 8 8	6 6
Spec. **	≥ 6 5 5	≥ 2 4 1	≥ 3 5	—	—	≥ 2 4	—	—	—
Spec. ***	≥ 6 5 5	≥ 2 4 1	≥ 3 5	—	2 to 5	≥ 2 4	≥ 1 0	≥ 1 0 0	≥ 1 0

* AGS No. : Average Grain Size Number

(T) : Transverse plane to direction of rolling

(L) : Longitudinal plane to direction of rolling

** : Bylaws of Science and Technology Agency (unpublished)

*** : Specification of manufacturer

Table 5 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR filler metal for welding process test

		(mass%)																
element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Mg	Co	B	Ni	N	O
Ladle, ch. 0-124	0.056	0.36	0.82	<0.001	0.001	21.60	18.05	9.10	0.49	<0.01	0.04	<0.01	0.02	0.02	0.0054	Rem.	0.003	0.001
* Specification	min	0.25	0.75	—	—	20.5	17.0	8.0	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	max	0.15	0.50	0.040	0.030	23.0	20.0	10.0	1.00	0.50	0.05	0.03	—	2.50	0.010	Rem.	—	—
Aim Range of ladle **	min	0.25	0.75	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.02	—	0.0040	—	—	—
	max	0.065	0.50	0.040	0.030	23.00	20.00	10.00	1.00	0.50	0.05	0.03	0.04	0.10	0.0060	Rem.	0.003	0.002
Check(φ5.5mm) Location:Top	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	***	—	—	—
Check(φ5.5mm) Location:Bottom	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	***	—	—	—
Check(φ5.5mm)	—	—	—	0.001	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0030	—	0.0052	—
Check(φ1.2mm, filler metal)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.008	—	0.0021	—	—	—
Aim Range of filler metal**	min	0.050	0.25	—	—	20.50	17.00	8.00	0.20	—	—	—	0.01	—	0.0020	—	—	—
	max	0.070	0.50	0.040	0.030	23.00	20.00	10.00	1.00	0.50	0.05	0.03	0.05	0.10	0.0050	Rem.	0.010	0.002
Aim point of filler metal **	0.055	0.35	0.80	≤0.010	≤0.010	21.5	18.0	9.0	0.50	≤0.1	0.04	≤0.01	0.030	≤0.05	0.0030	Rem.	0.003	≤0.002

Rem. : Remaninder
 — : Not specified or not analysed
 ** : Ref. JAERI-M91-189
 LAP : Low as possible
 * : Ref. JAERI-M90-148
 *** : After heat treatment

Table 6 Chemical composition of Hastelloy Alloy XR filler metal for HTTR components

		(mass%)																	
element		C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Al	Ti	Mg	Co	B	Ni	N	O
Ladle, ch. 2-083		0.053	0.34	0.80	<0.001	0.002	21.44	18.20	9.00	0.48	<0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.008	Rem.	0.002	0.001
	*	min max	0.25 0.50	0.75 1.00	— 0.040	— 0.030	20.5 23.0	17.0 20.0	8.0 10.0	0.20 1.00	— 0.50	— 0.05	— 0.03	— —	— —	— 2.50	— 0.010	Rem. Rem.	— —
Aim Range of ladle **	min max	0.050 0.065	0.25 0.50	0.75 1.00	— 0.040	— 0.030	20.50 23.00	17.00 20.00	8.00 10.00	0.20 1.00	— 0.50	— 0.05	— 0.03	0.01 0.04	— 0.10	0.005 0.008	Rem. Rem.	— 0.003	— 0.002
	Check(φ5.5mm) Location:Top	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*** 0.0040	—	—	—
Check(φ5.5mm) Location:Bottom	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*** 0.0036	—	—	—
Check(φ5.5mm)****		0.059 0.058	0.38 0.40	0.82 0.80	0.001 0.001	0.003 0.004	21.50 21.45	18.2 18.3	9.07 9.12	0.53 0.52	<0.01 0.001	0.05 0.05	<0.01 <0.001	0.02 0.015	<0.01 0.004	0.0038 0.0043	Rem. Rem.	0.003 0.0038	<0.001 <0.0005
	Check(φ3.2mm)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0033	—	—	—
Check(φ1.2mm, filler metal)		0.052	0.39	0.82	0.001	0.003	21.41	18.1	9.38	0.49	0.003	0.05	<0.001	0.016	0.002	0.0032	Rem.	0.0032	0.0010
	min max	0.050 0.070	0.25 0.50	0.75 1.00	— 0.040	— 0.030	20.50 23.00	17.00 20.00	8.00 10.00	0.20 1.00	— 0.50	— 0.05	— 0.03	0.01 0.05	— 0.10	0.0020 0.0050	Rem. Rem.	— 0.010	— 0.002
Aim point of filler metal **		0.055	0.35	0.80	≤0.010	≤0.010	21.5	18.0	9.0	0.50	≤0.1	0.04	≤0.01	0.030	≤0.05	0.0030	Rem.	0.003	≤0.002

Rem : Remainder
 — : Not specified or not analysed
 ** : Ref. JAERI-N91-189
 **** : 2 samples check
 LAP : Low as possible
 * : Bylaws of Science and Technology Agency (unpublished)
 *** : After heat treatment

Table 7 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	190	9-10	80	1000	20-30

Table 8 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	150-200	9-10	80	600-1000	25

Table 9 Results of nondestructive testings (thickness: 60mm plate)

Groove Face	Welded Joint	
	P T	R T
good	good	good

(Remarks) P T : Liquid penetrant test
 R T : Radiographic test

Table 10 Welding conditions (thickness: 15mm 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)
		Peak	Base				
GTAW	1.2	170	150	8-10	50-100	800	Torch : 15-20 Trailing shield : 15-20

Table 11 Results of creep rupture test and creep test at 900 °C in air

Thick-ness (mm)	Test specimen		Applied stress (MPa)	Rupture time (h)	Fracture elongation (%)	Reduction of area (%)	Minimum creep rate (%/h)	Fracture location
		No.						
60	Weld Metal	JC-1	58.8	302.5	9.33	37.26	0.0042	B
		JC-2		251.8	25.65	55.72	0.0066	A
		JC-3	52.0	693.8	16.23	45.04	0.0023	A
		JC-4		787.9	10.11	15.42	0.0014	A
		JC-5	45.0	1965.8	10.44	21.77	0.00068	A
		JC-6		1771.8	9.19	27.03	0.00068	A
		JC-7	38.0	2230.8	4.97	4.68	0.00026	A
		JC-8		3853.5	8.74	9.48	0.00026	B
15	Weld Metal	J -1	52.0	505.8	14.03	39.68	0.0031	B
		J -2	45.0	1538.7	11.07	25.43	0.00068	A
		J -3	38.0	2549.4	7.67	18.28	0.00026	A
	Welded Joint	JJ-1	52.0	448.1	16.20	32.57	0.0033	(A)
		JJ-2	45.0	1350.9	14.83	22.38	0.0018	(A)
		JJ-3	38.0	2472.1	7.11	11.72	0.0005	(A)

Table 12 Results of creep rupture test and creep test in air

Test specimen	Thick-ness (mm)	Test temp. (°C)	Applied stress (MPa)	Rupture time (h)	Fracture elongation (%)	Reduction of area (%)	Fracture location
Base Metal	15	900	58	172.5	64.4	80.7	B
			47	657.8	38.5	65.2	A
			38	2567.4	40.9	54.2	B
		950	40	110.4	56.4	75.7	B
			30	431.5	46.1	59.6	B
			22	2566.4	32.6	39.9	A
	60	900	58	80.3	68.7	78.2	A
			47	325.4	52.3	64.4	B
			38	2112.3	34.8	40.7	B
		950	40	116.3	62.2	81.3	A
			30	387.6	58.1	69.6	A
			22	2830.3	32.2	38.1	B
Weld Metal	15	900	58	322.2	28.3	60.0	A
			47	1413.5	18.4	37.4	B
			38	4721.3	8.3	18.5	B
		950	40	172.6	18.4	22.2	A
			30	494.1	6.4	9.1	A
			22	1431.0	6.7	22.2	A
	60	900	58	418.6	13.1	25.4	A
			47	1176.3	13.9	50.0	A
			38	4686.9	5.1	9.4	A
		950	40	166.2	8.3	22.4	A
			30	538.1	5.2	10.0	B
			22	1508.6	5.3	4.3	B
Welded Joint	15	900	58	254.8	26.0	73.4	(B)
			47	1117.0	17.4	66.6	(B)
			38	4159.0	18.1	54.4	(B)
		950	40	140.6	22.4	79.6	(B)
			30	520.0	16.9	11.7	(A)
			22	2133.0	7.7	12.8	(A)
	60	900	58	224.3	19.5	70.5	(A)
			47	839.7	11.7	16.0	(B)
			38	2848.9	9.3	39.1	(B)
		950	40	121.9	22.5	78.7	(B)
			30	499.0	12.1	9.3	(A)
			22	1349.2	6.4	3.2	(A)

Table 13 Effect of alloying element on creep strength of weld metal

Element	Partial regression coefficient	Standard Partial regression coefficient	Partial correlation coefficient	correlation coefficient
Mn	-6104.2	-0.5564	-0.7273	-0.4977
B	+7.3	+0.3594	+0.5080	+0.4826
Mo	+2152.8	+0.4787	+0.6803	+0.2481
S	-24.3	-0.4245	-0.6512	-0.3748
Al	-0.9	-0.3013	-0.4640	-0.2496
Si	-3102.8	-0.2351	-0.3595	+0.1420
Zr	+2.5	+0.1644	+0.3268	+0.0882

Constant
term=-11240

Table 14 Applicable range of multiple regression analysis

C(%): 0.052~0.13	Mn(%): 0.49~0.94	Fe(%): 17.59~19.10
Si(%): 0.31~0.61	Co(%): 0.001~1.04	Cr(%): 20.70~21.90
Mo(%): 8.3~9.36	W(%): 0.36~0.56	Y(ppm): 0~220
La,Ce(ppm): 0~260	B(ppm): 0~160	Mg(ppm): 50~230
Cu(ppm): 5~300	Zr(ppm): 0~180	Al(ppm): 20~1000
Ti(ppm): 10~170	P(ppm): 5~50	S(ppm): 5~60
O(ppm): 4~129	N(ppm): 20~340	

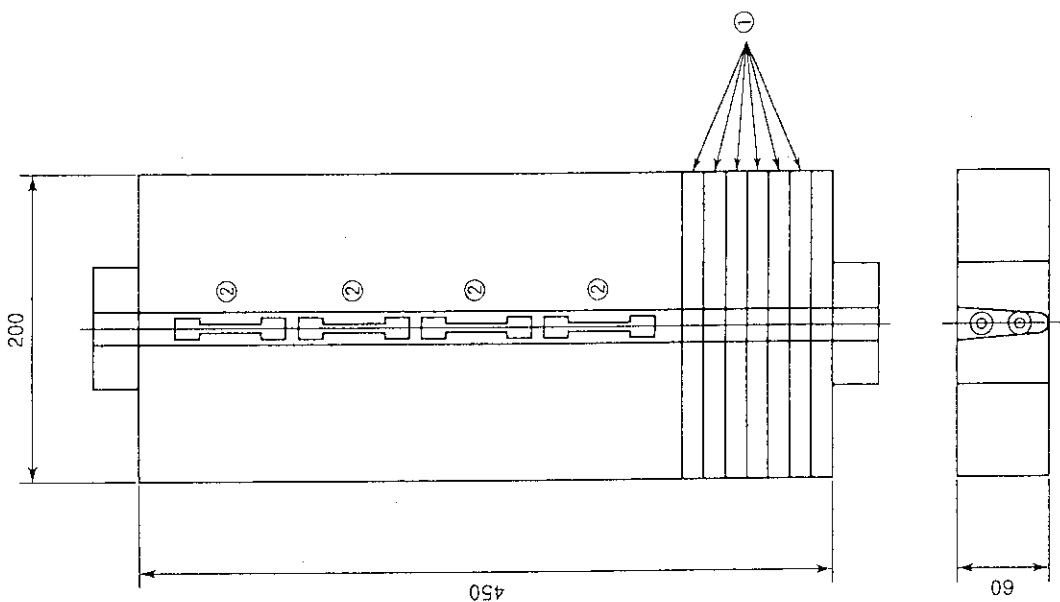


Fig. 2 Sampling location of test specimens (thickness: 60mm plate)

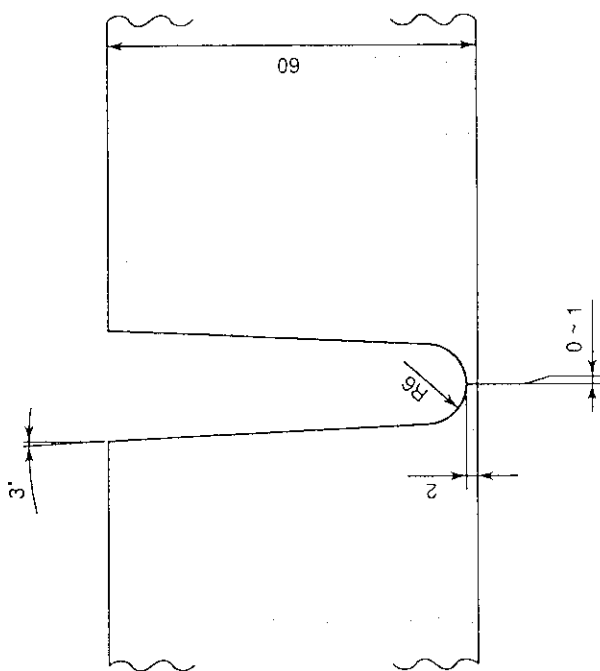


Fig. 1 Groove geometry (thickness: 60mm plate)

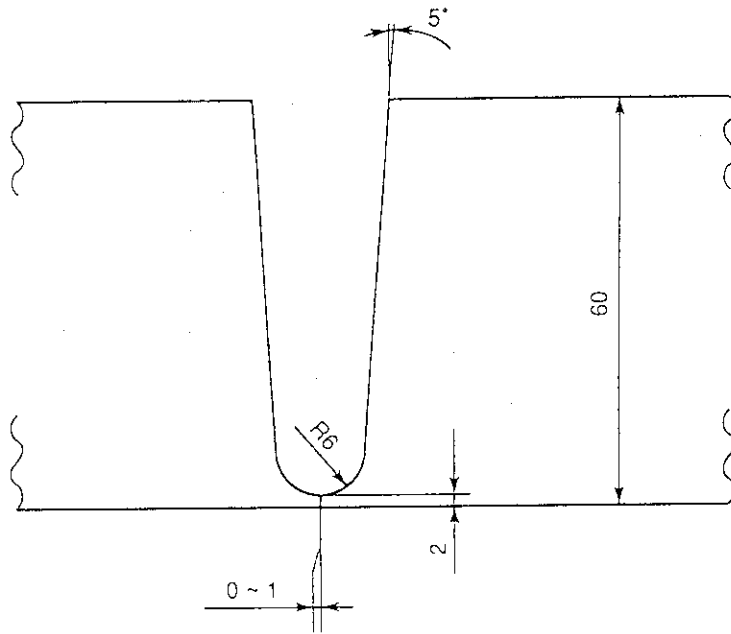


Fig.3 Groove geometry (thickness: 60mm plate)

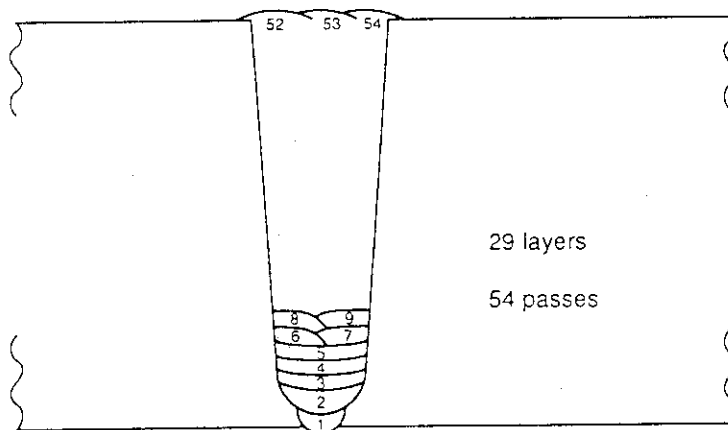
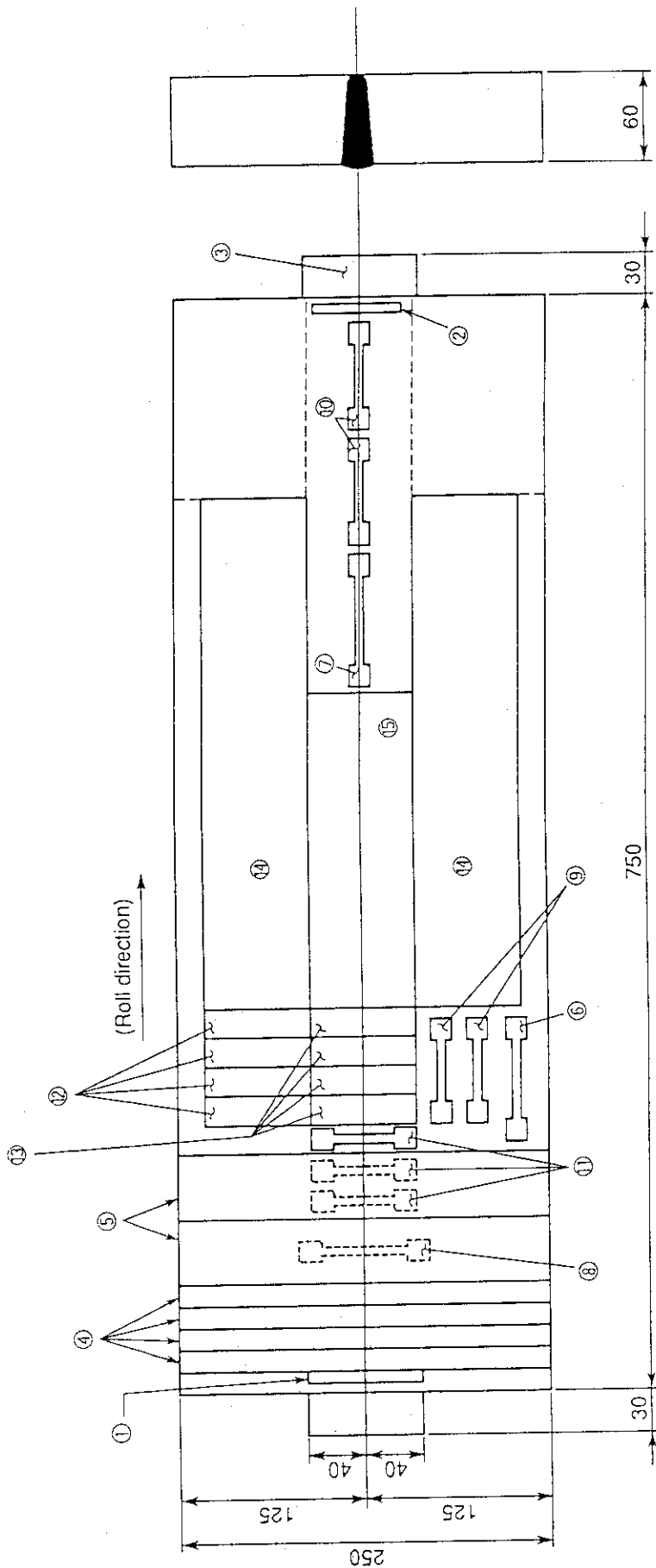


Fig.4 Build-up sequence (thickness: 60mm plate)



- | | |
|--|---|
| ① Macrostructure and hardness test | ⑨ Creep test (base metal) |
| ② Microstructure | ⑩ Creep test (weld metal) |
| ③ Chemical composition test (weld metal) | ⑪ Creep test (welded joint) |
| ④ Side bend test | ⑫ Test block for Charpy impact test (base metal) |
| ⑤ Face bend test | ⑬ Test block for Charpy impact test (weld metal) |
| ⑥ Tensile test (base metal) | ⑭ Test block for fracture toughness test (base metal) |
| ⑦ Tensile test (weld metal) | ⑮ Test block for fracture toughness test (weld metal) |
| ⑧ Tensile test (welded joint) | |

Fig. 5(a) Sampling location of test specimens (thickness: 60mm plate)

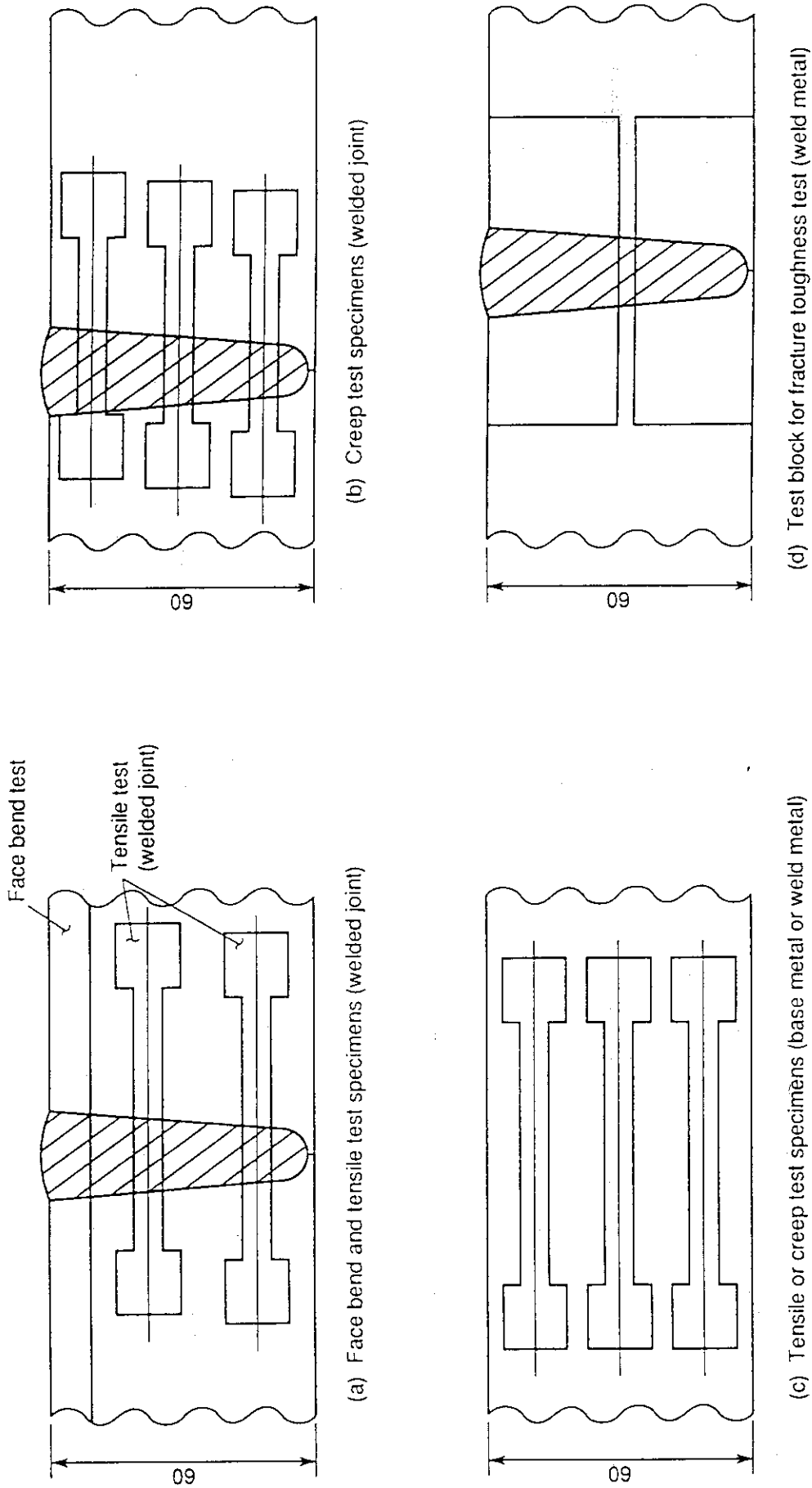


Fig. 5(b) Sampling location of test specimens (thickness: 60mm plate)

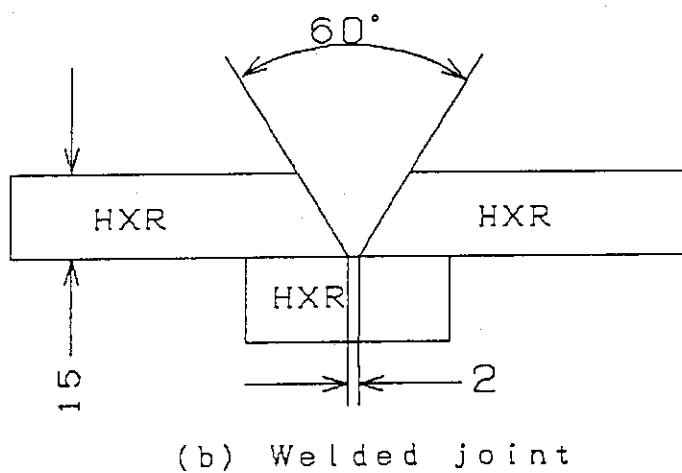
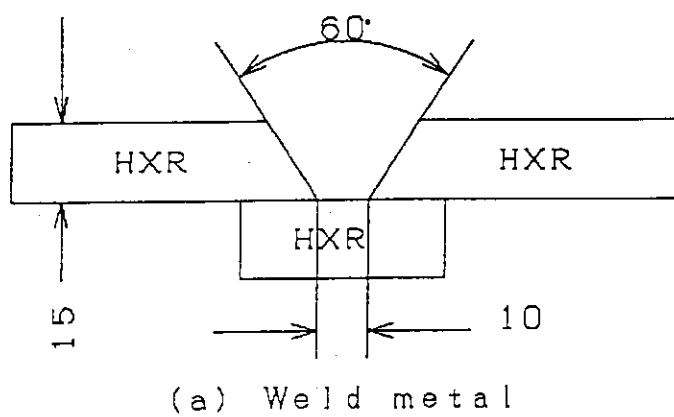


Fig.6 Groove geometry (thickness: 15mm plate)

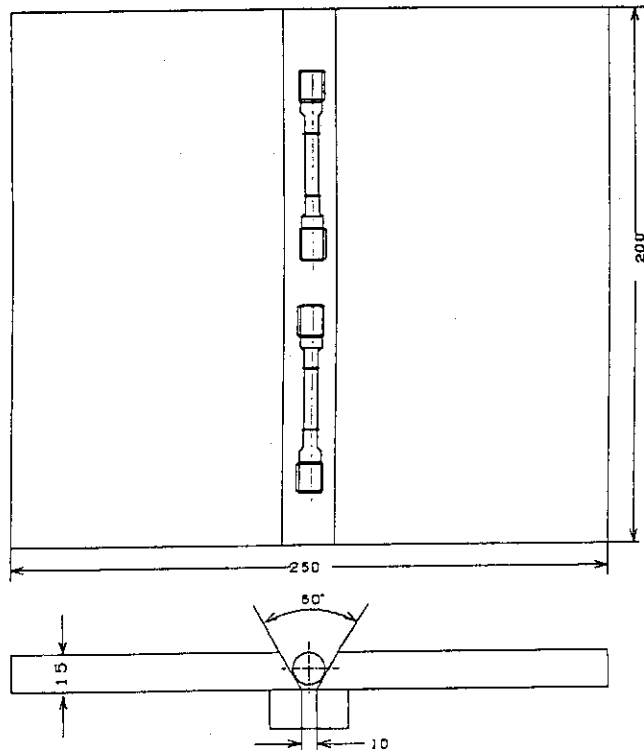


Fig.7 Sampling location of weld metal specimens (thickness: 15mm plate)

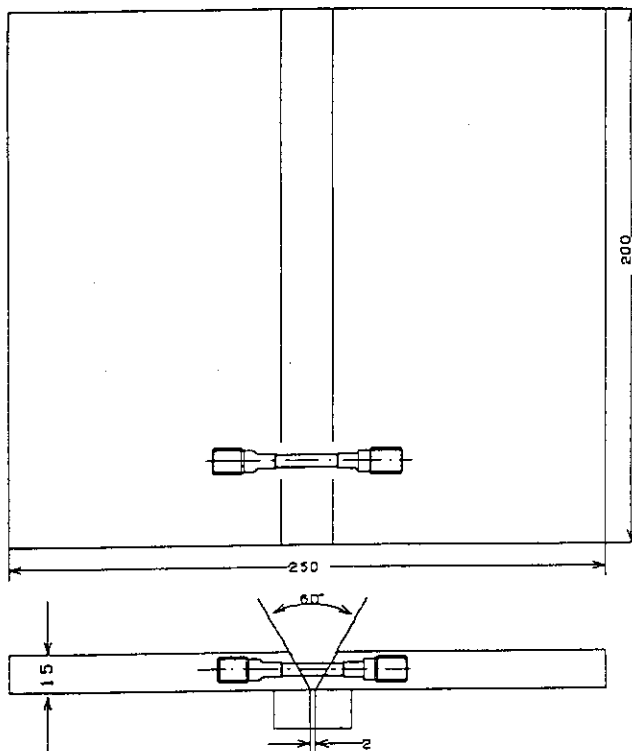


Fig.8 Sampling location of welded joint specimens (thickness: 15mm plate)

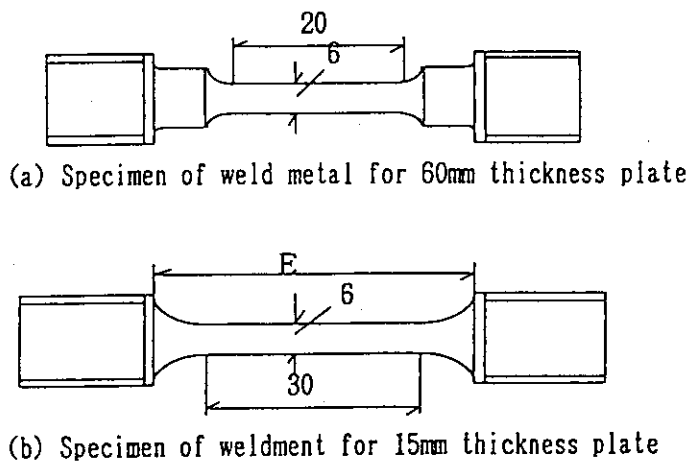


Fig. 9 Geometry of creep specimen

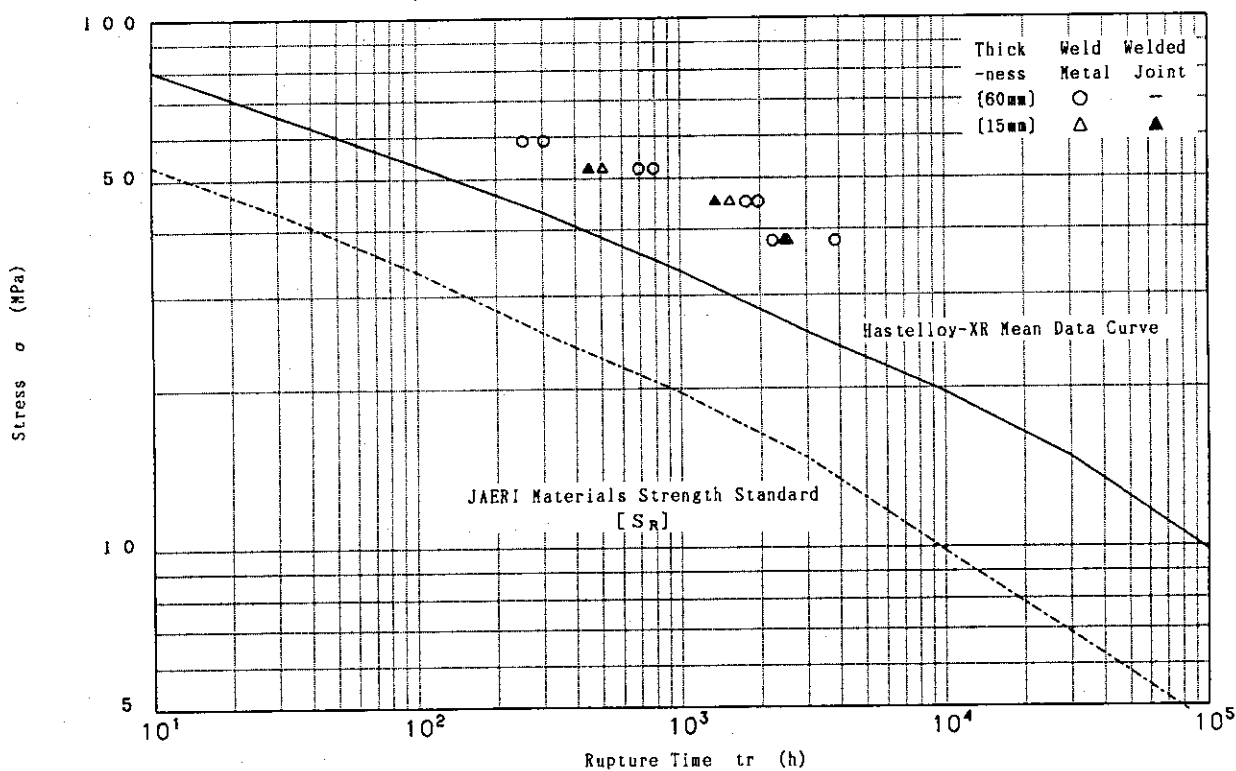


Fig. 10 Relation between applied stress and creep rupture time at 900°C in air

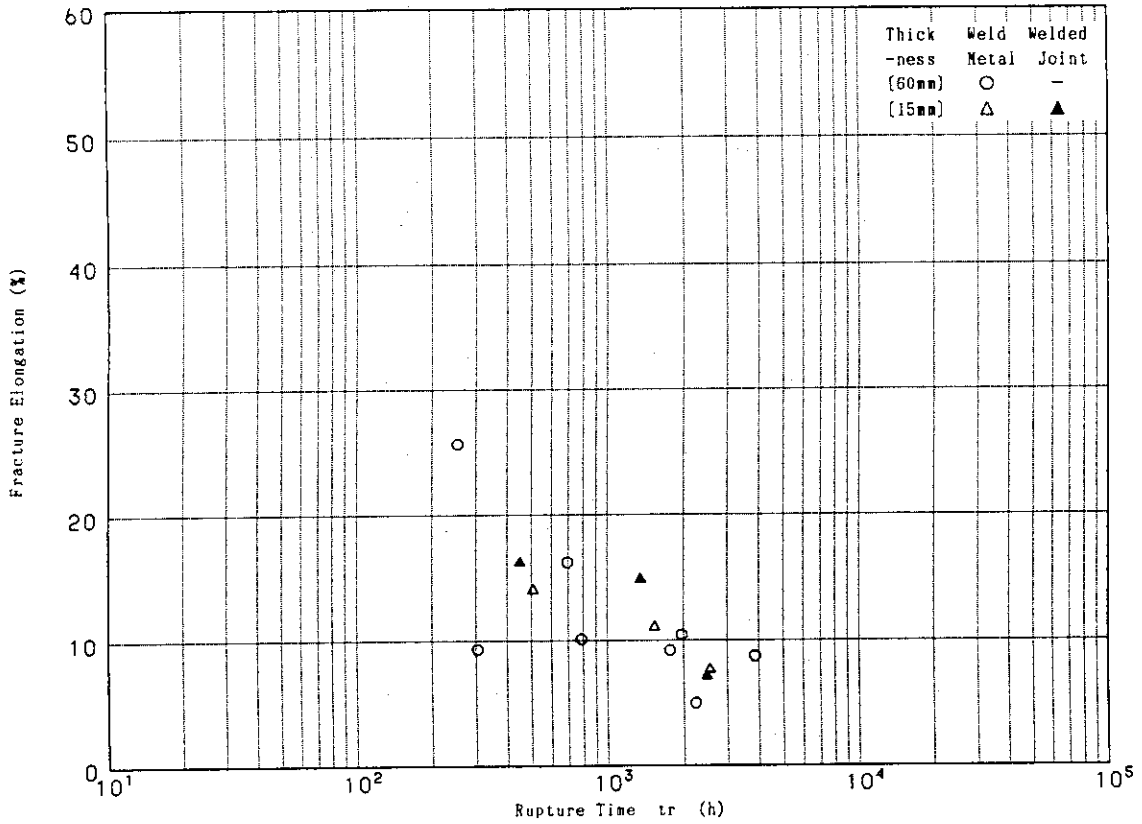


Fig. 11 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 900°C in air

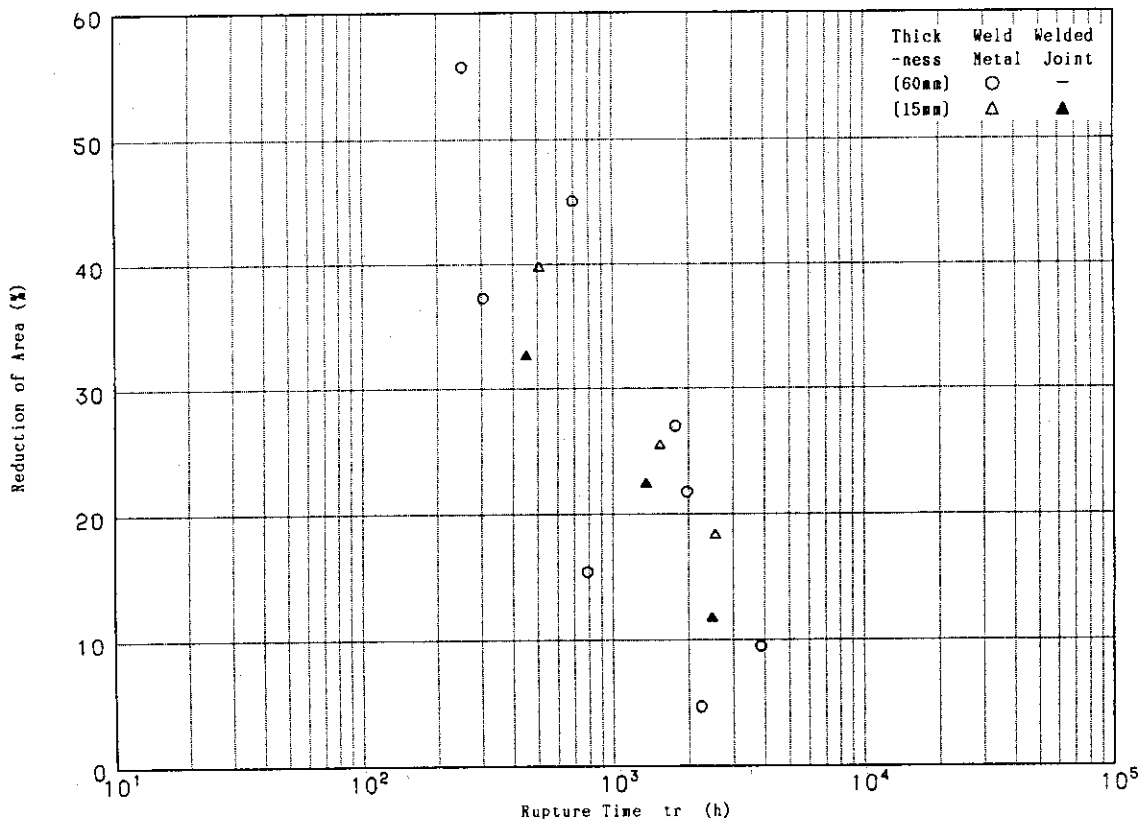


Fig. 12 Relation between reduction of area and creep rupture time at 900°C in air

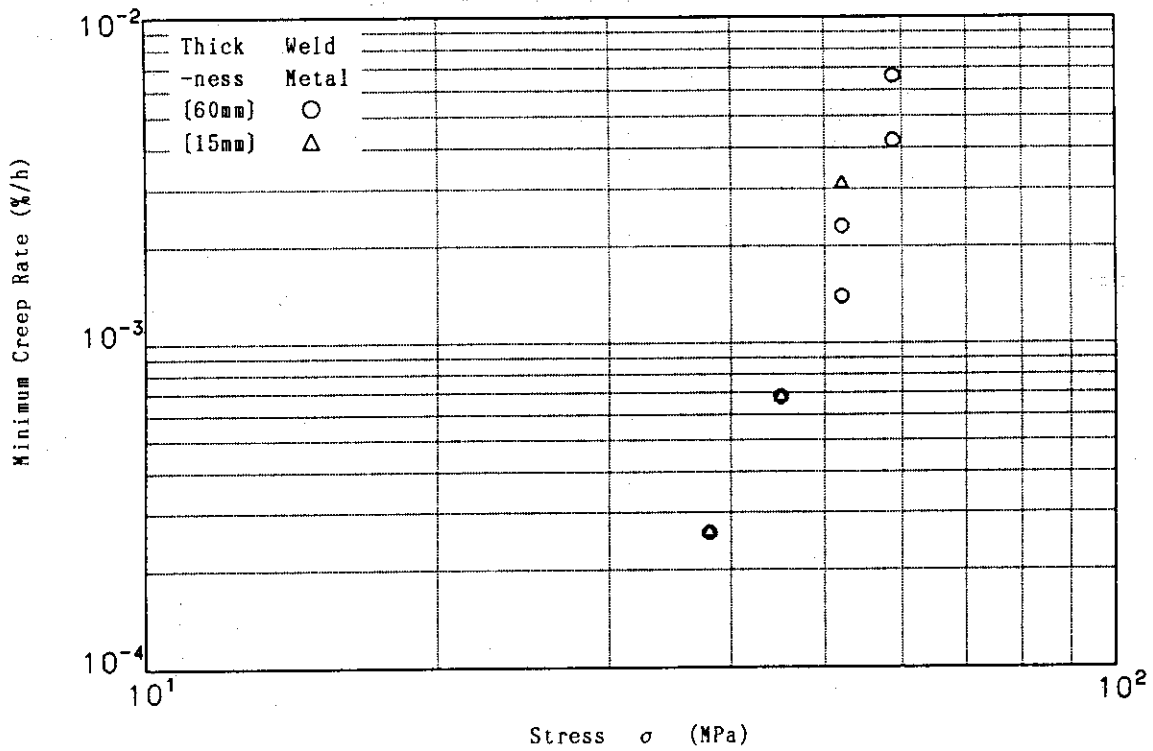


Fig. 13 Relation between minimum creep rate and applied stress at 900°C in air (Weld metal)

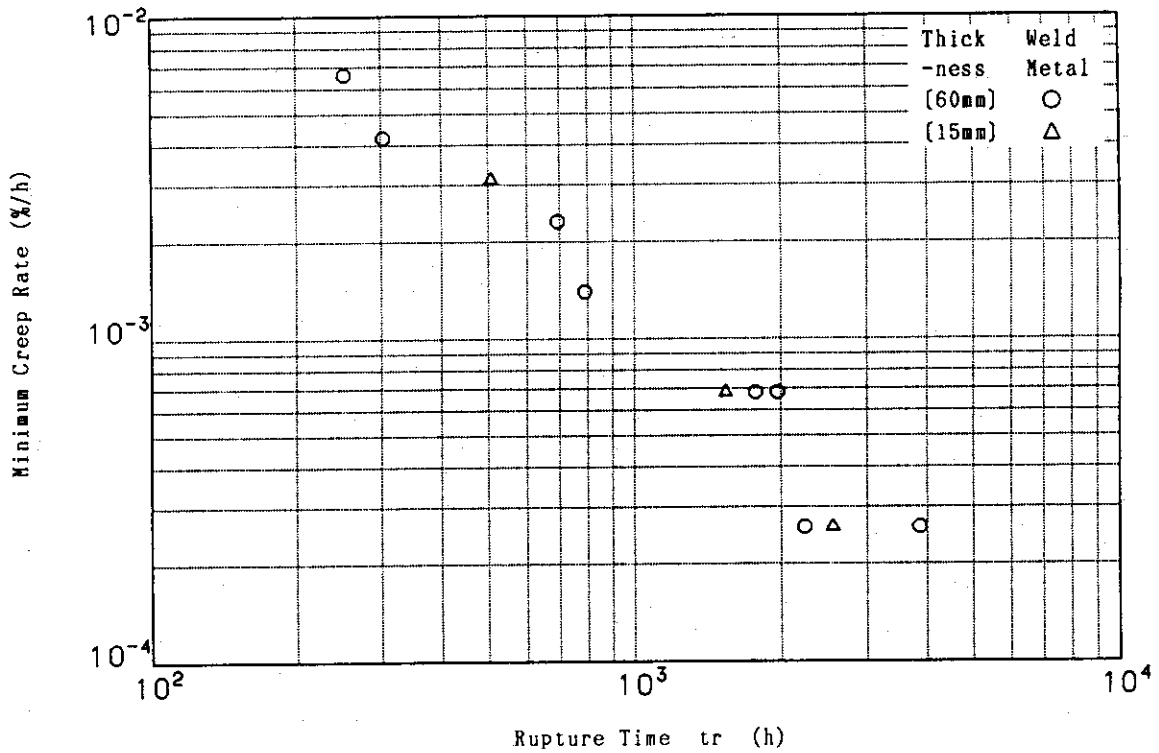


Fig. 14 Relation between minimum creep rate and creep rupture time at 900°C in air (Weld metal)

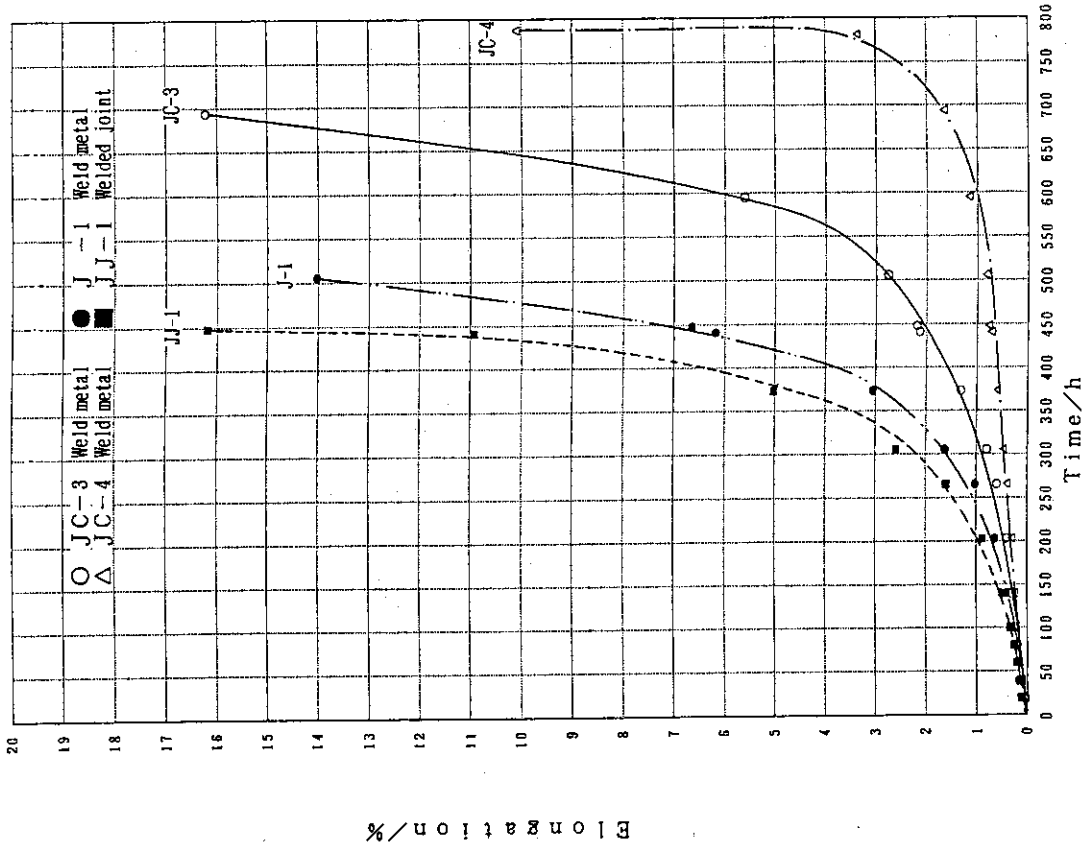


Fig. 15 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 900°C in air under stress of 58.8MPa

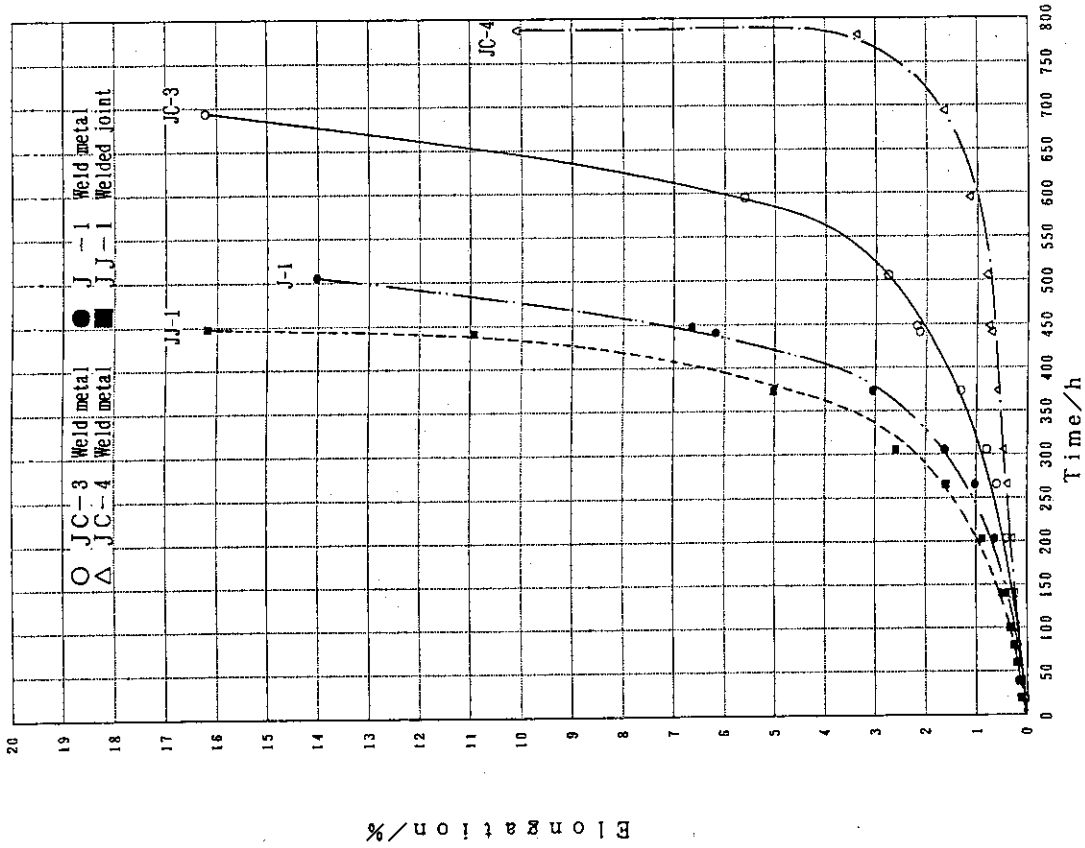


Fig. 16 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 900°C in air under stress of 52.0MPa

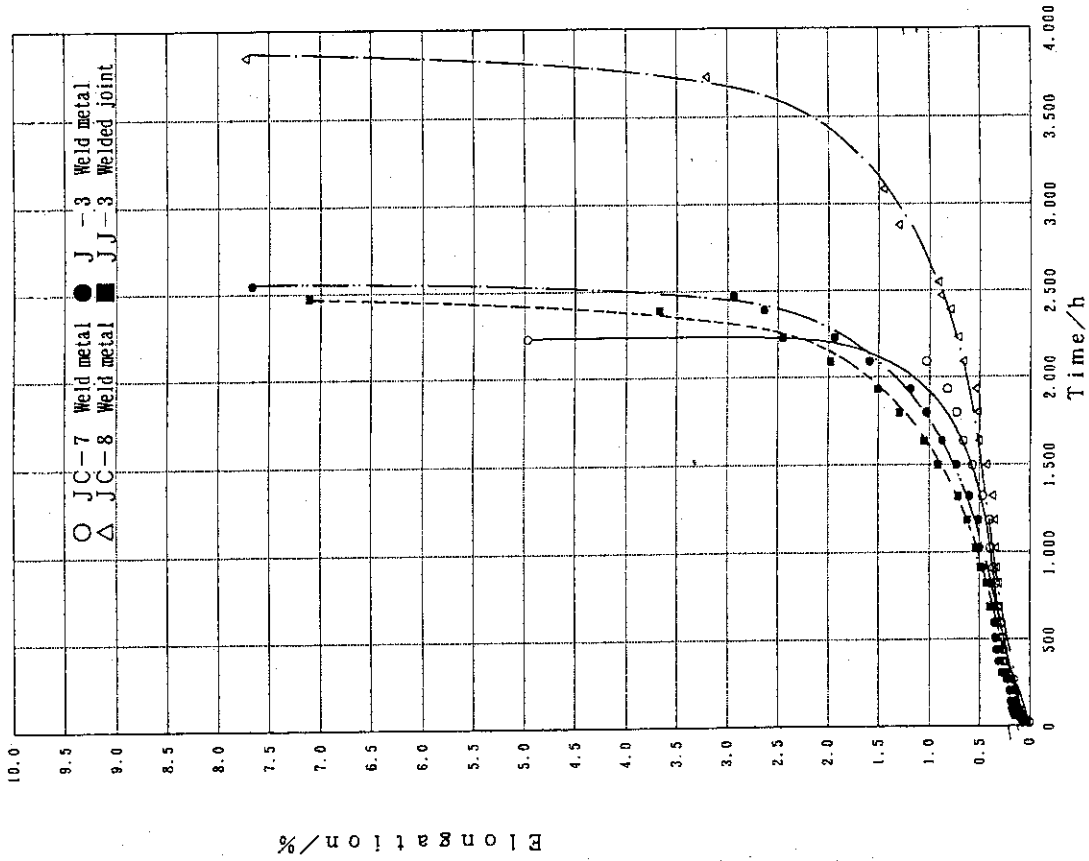


Fig. 18 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 900°C in air under stress of 38.0MPa

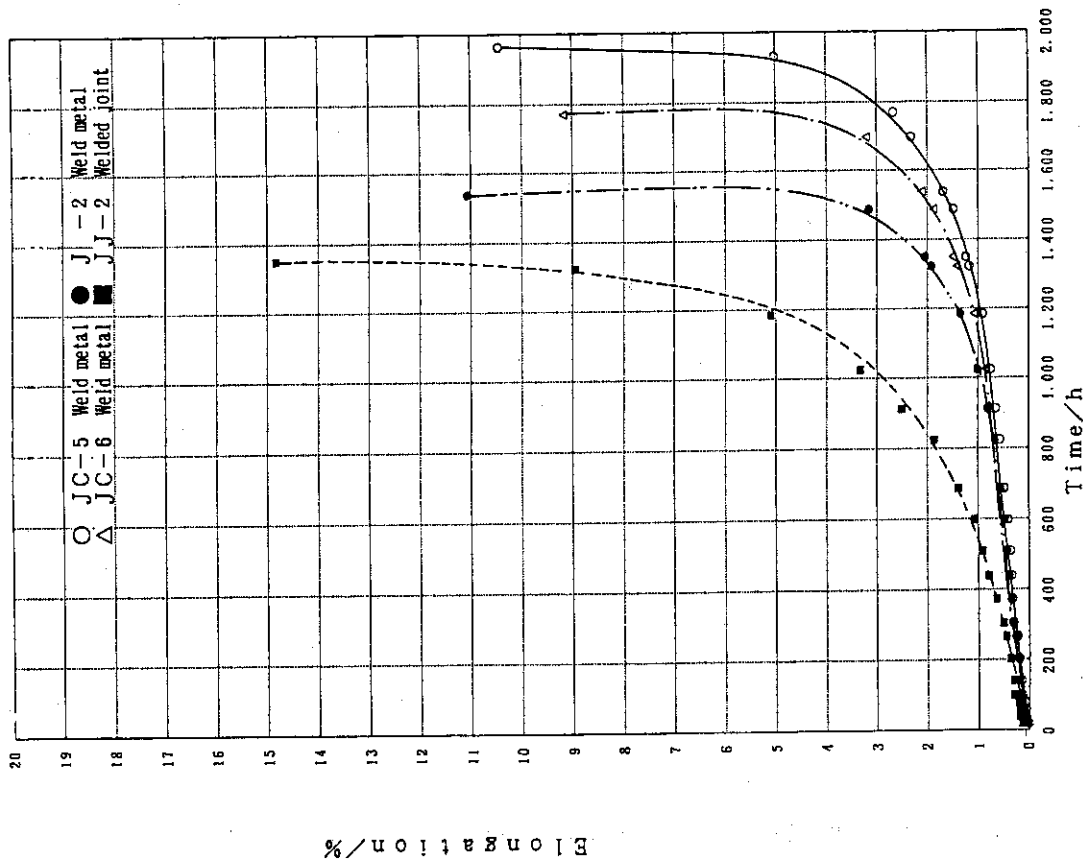


Fig. 17 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 900°C in air under stress of 45.0MPa

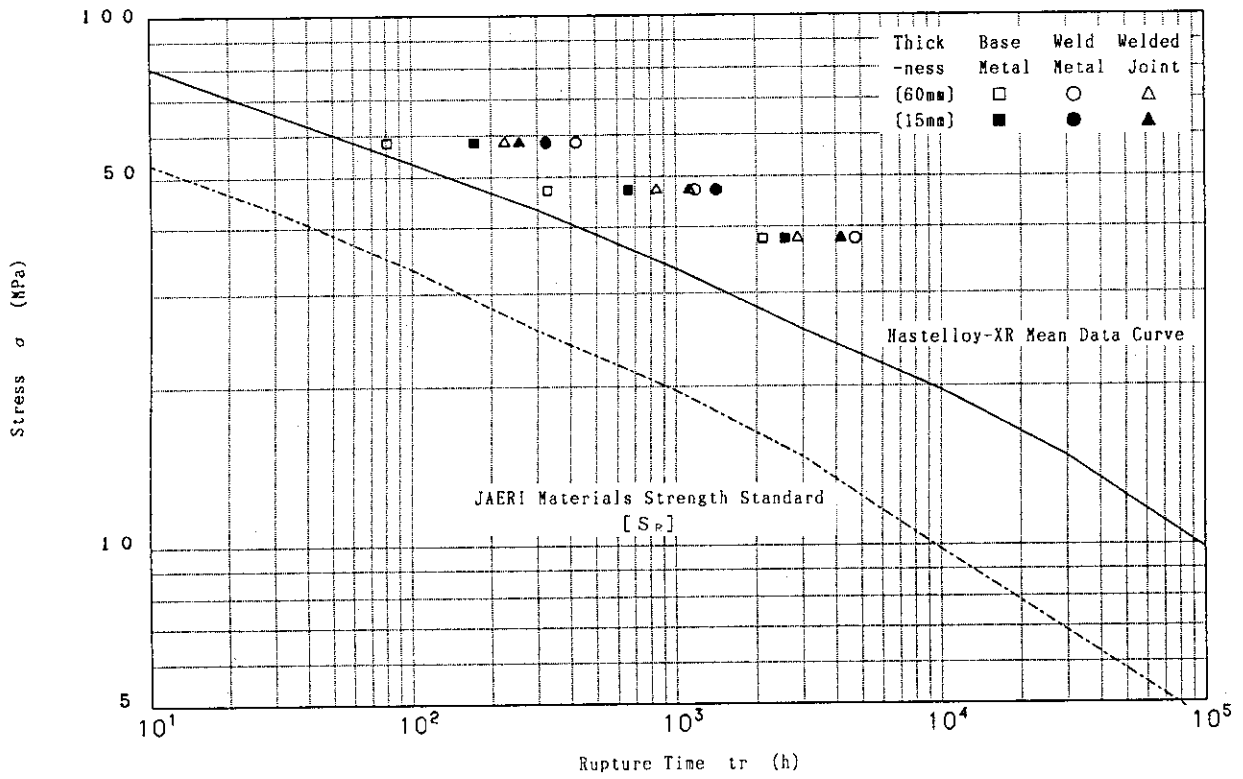


Fig.19 Relation between applied stress and creep rupture time at 900°C in air

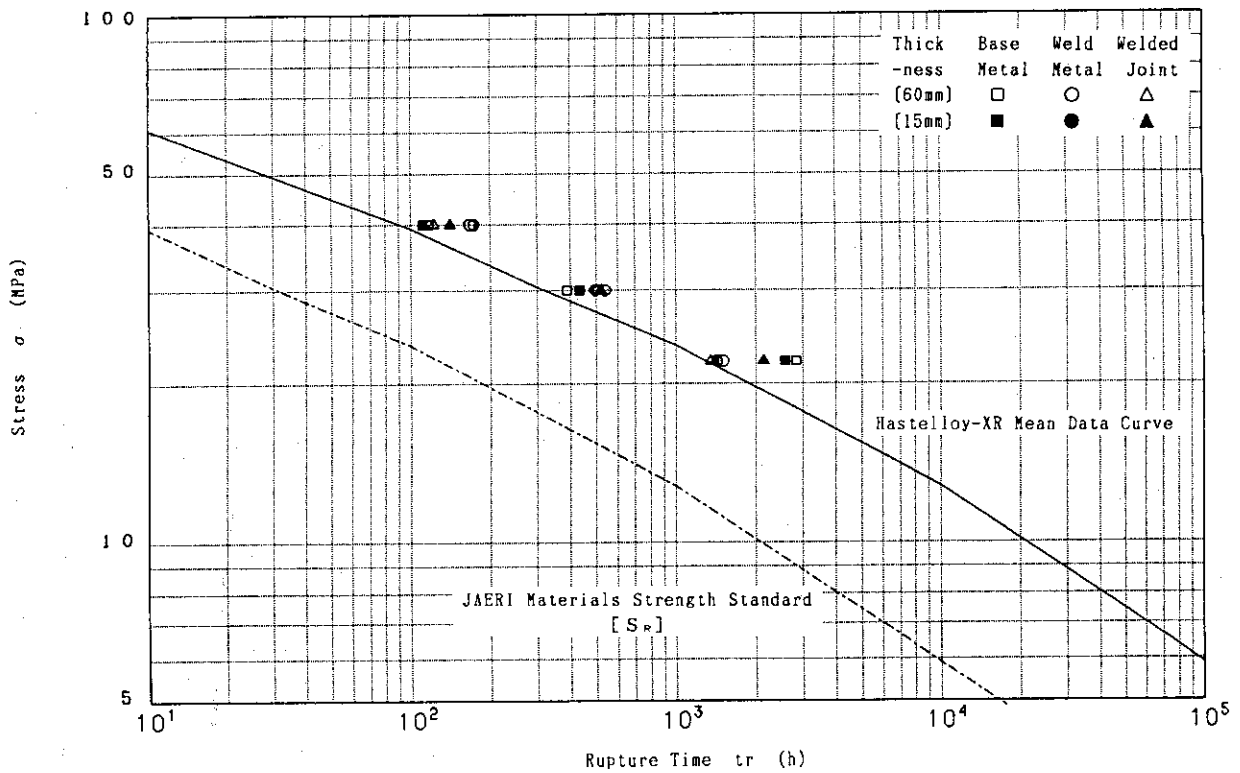


Fig.20 Relation between applied stress and creep rupture time at 950°C in air

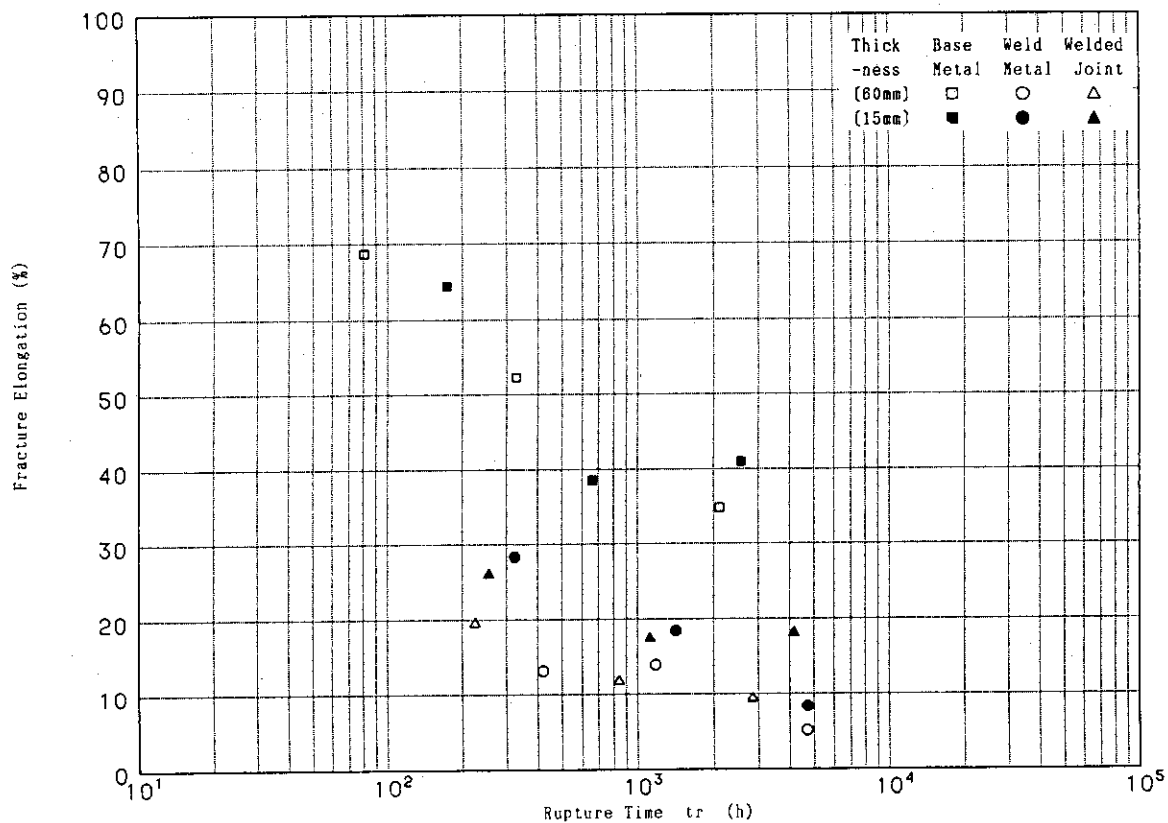


Fig.21 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 900°C in air

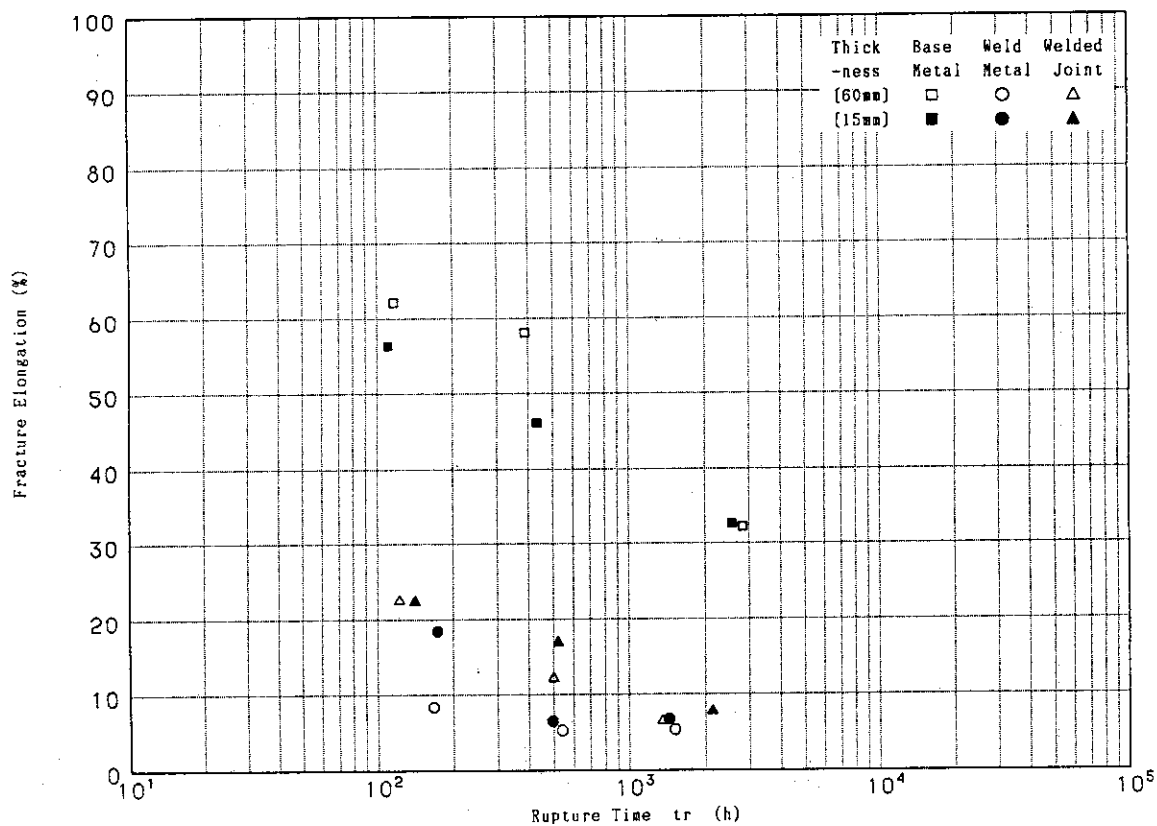


Fig.22 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 950°C in air

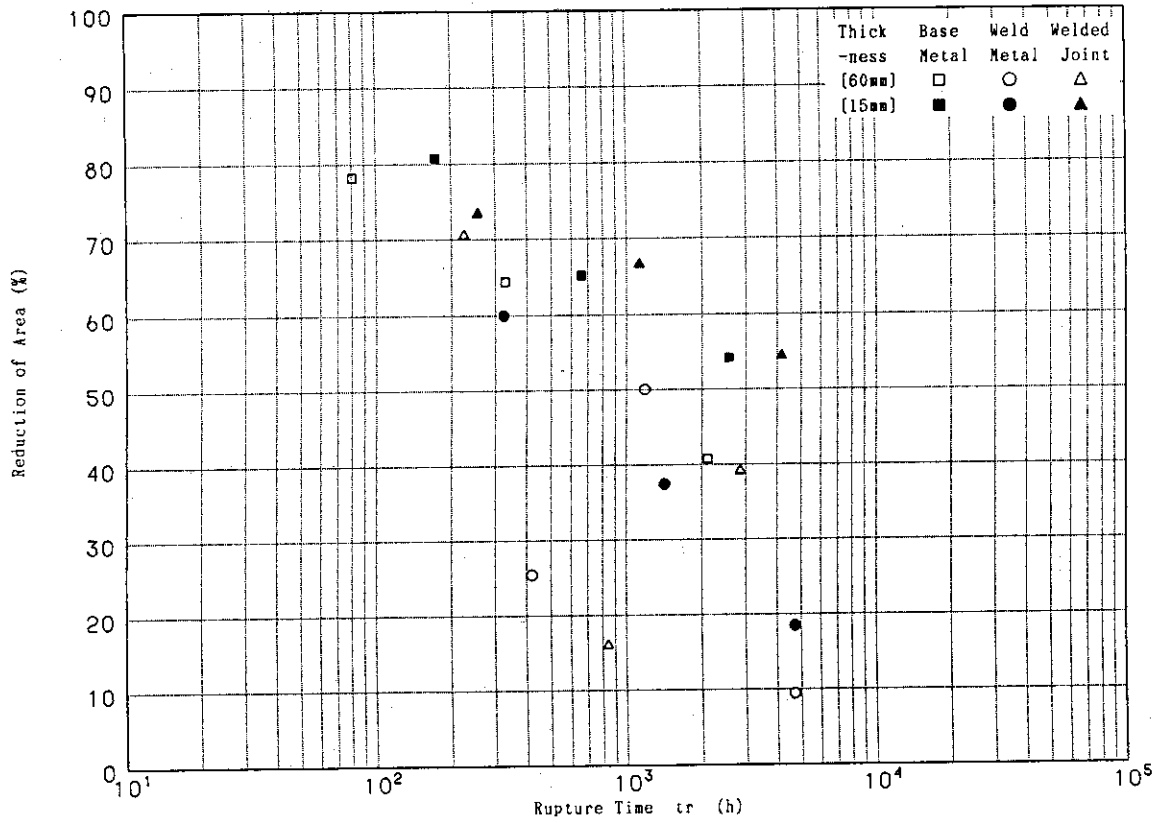


Fig.23 Relation between reduction of area and creep rupture time at 900°C in air

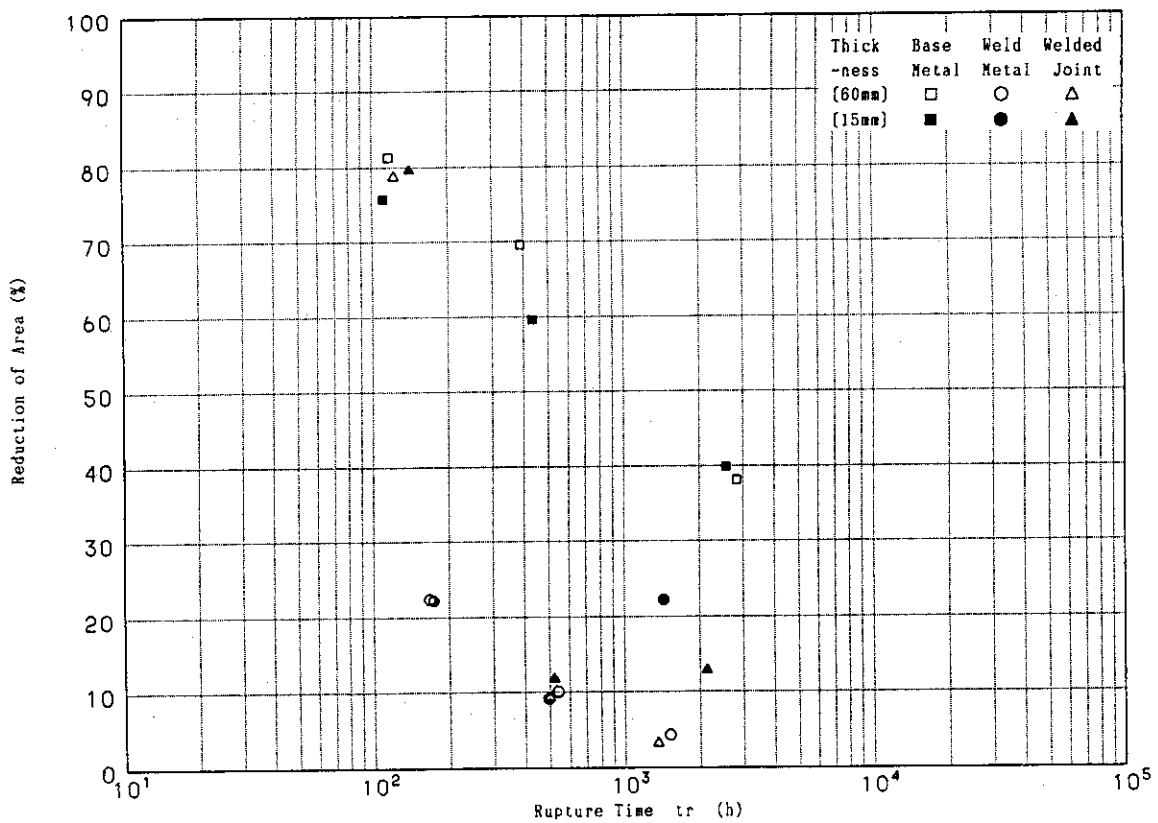


Fig.24 Relation between reduction of area and creep rupture time at 950°C in air

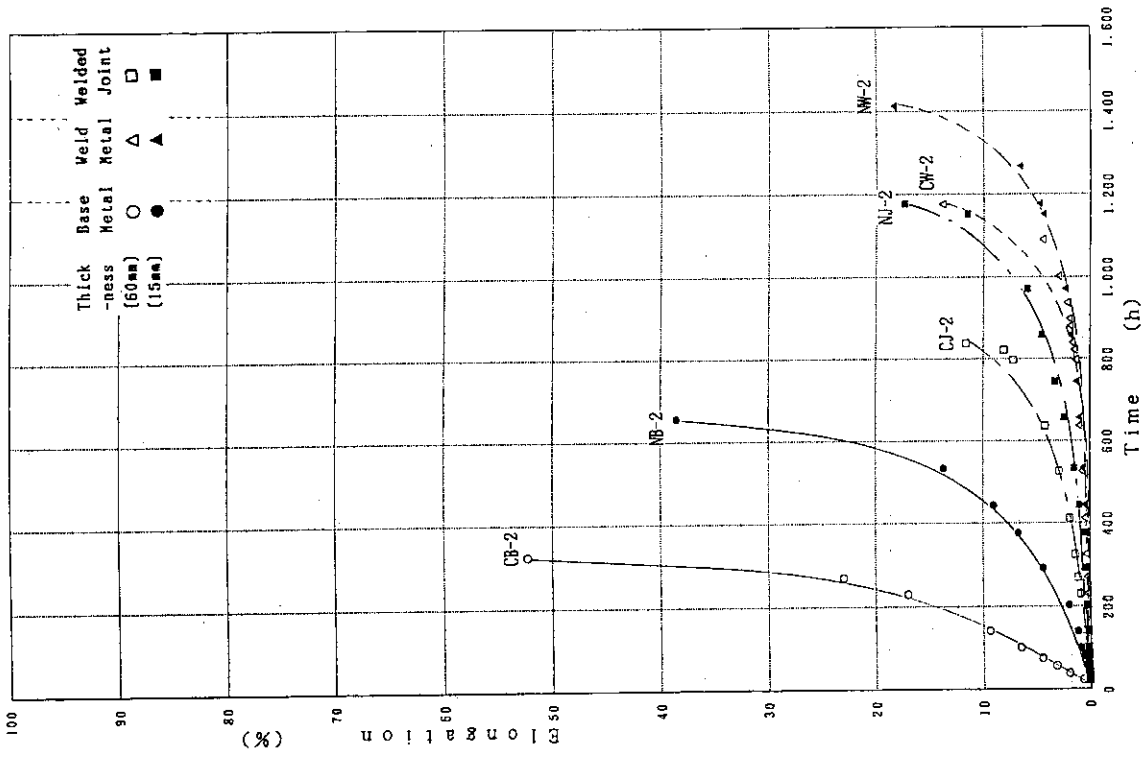


Fig.26 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 900°C in air under stress of 47.0MPa

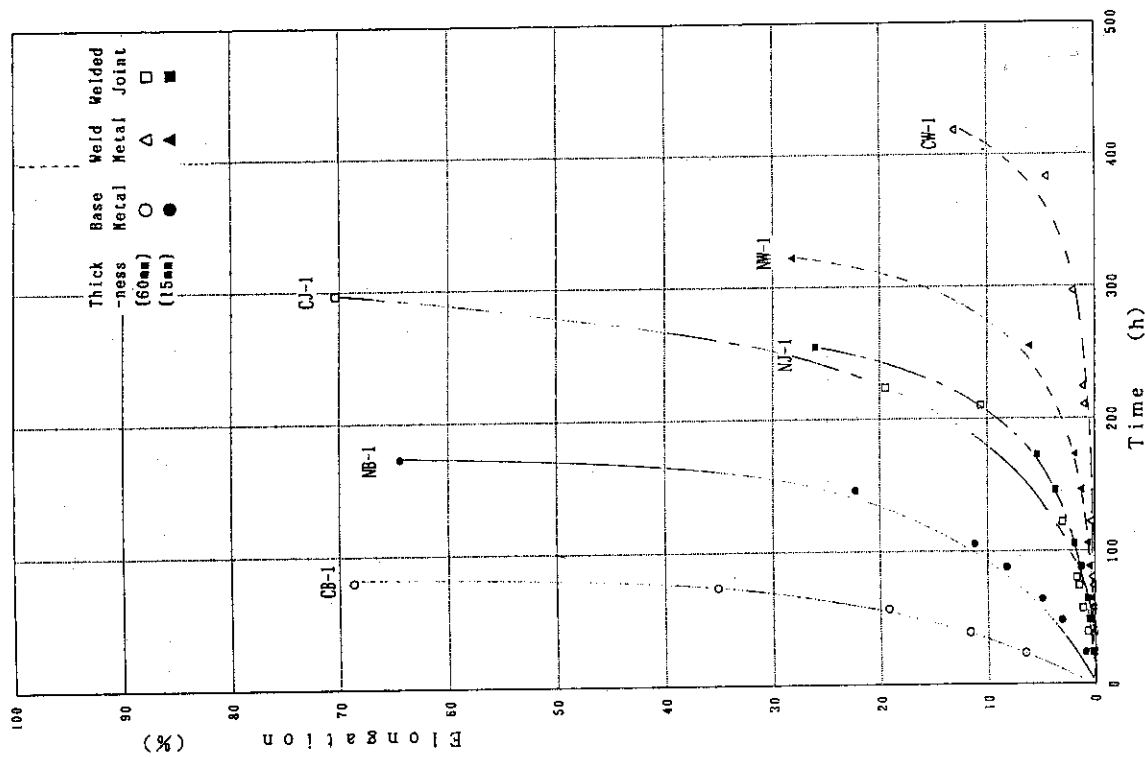


Fig.25 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 900°C in air under stress of 58.0MPa

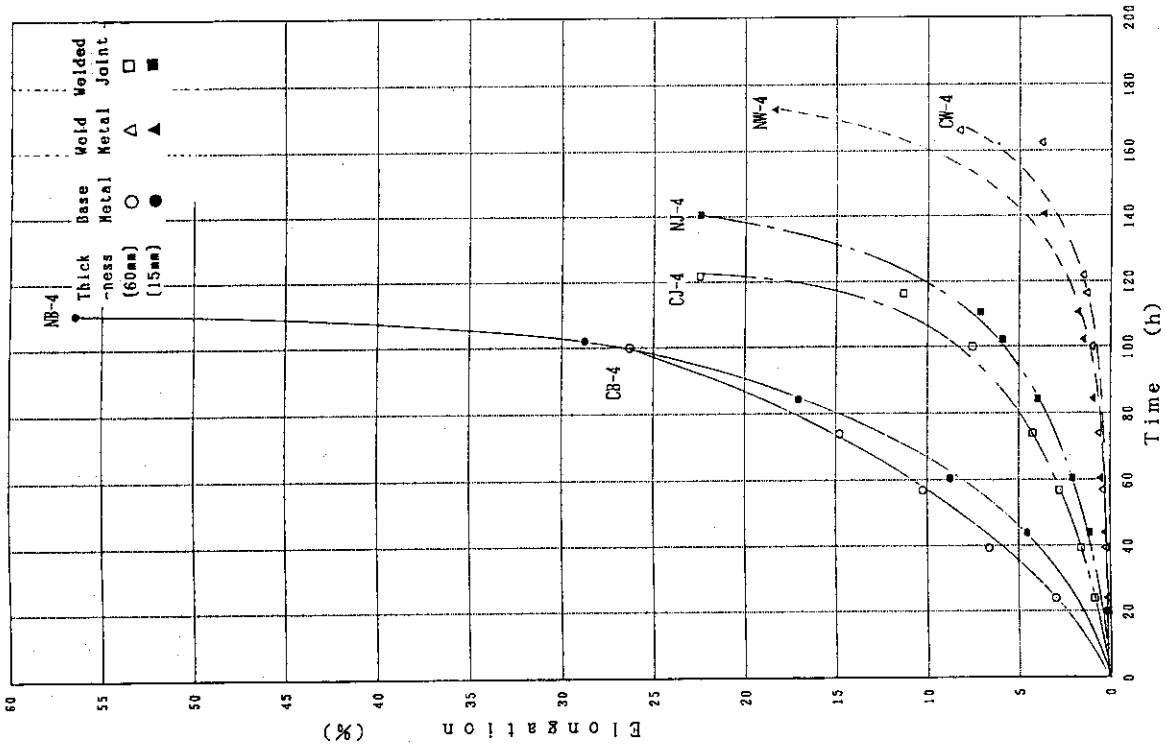


Fig. 28 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 950°C in air under stress of 40.0MPa

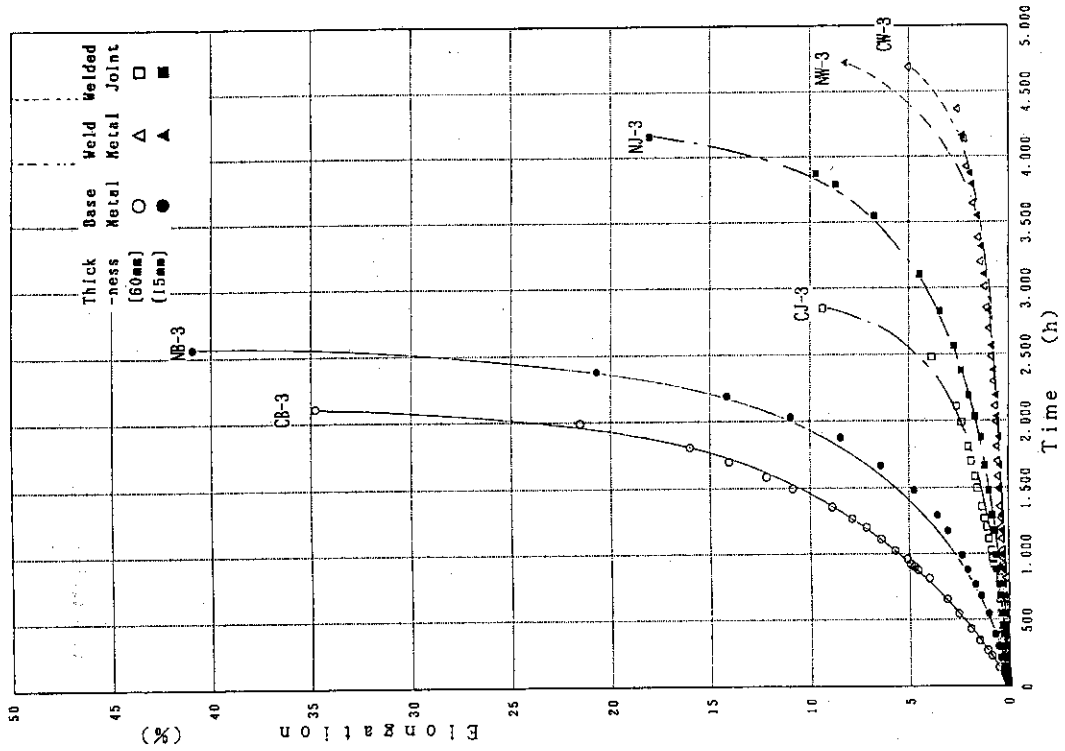


Fig. 27 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 900°C in air under stress of 38.0MPa

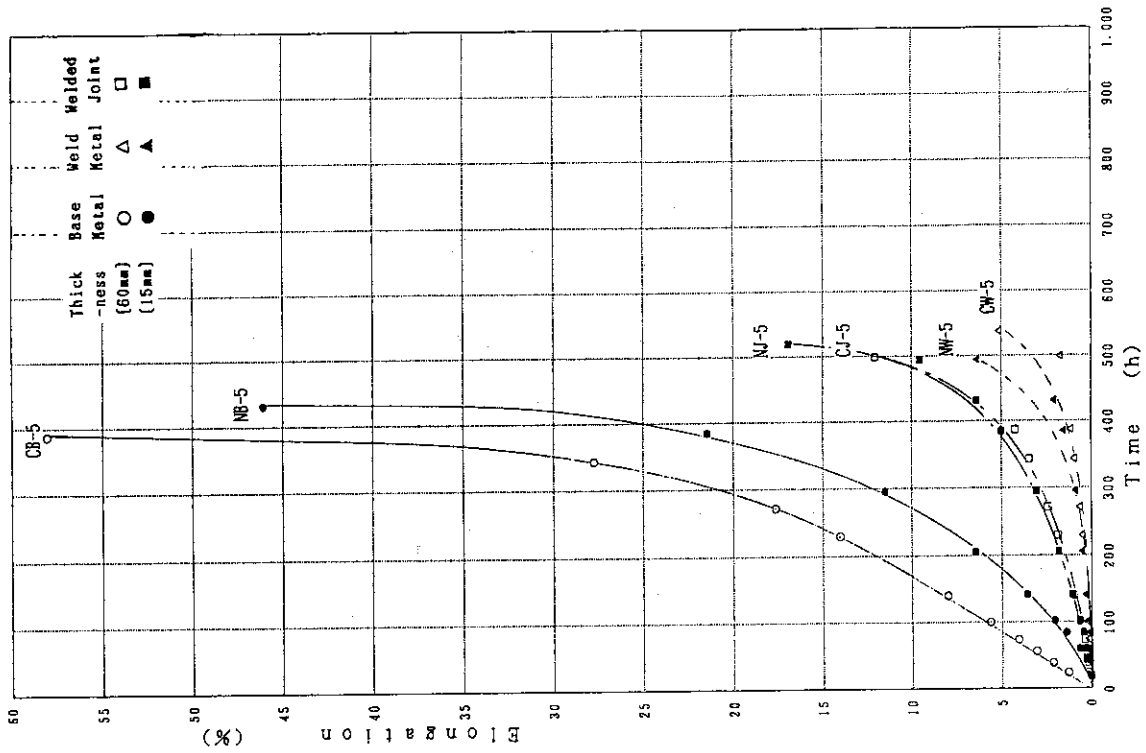


Fig. 29 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 950°C in air under stress of 30.0MPa

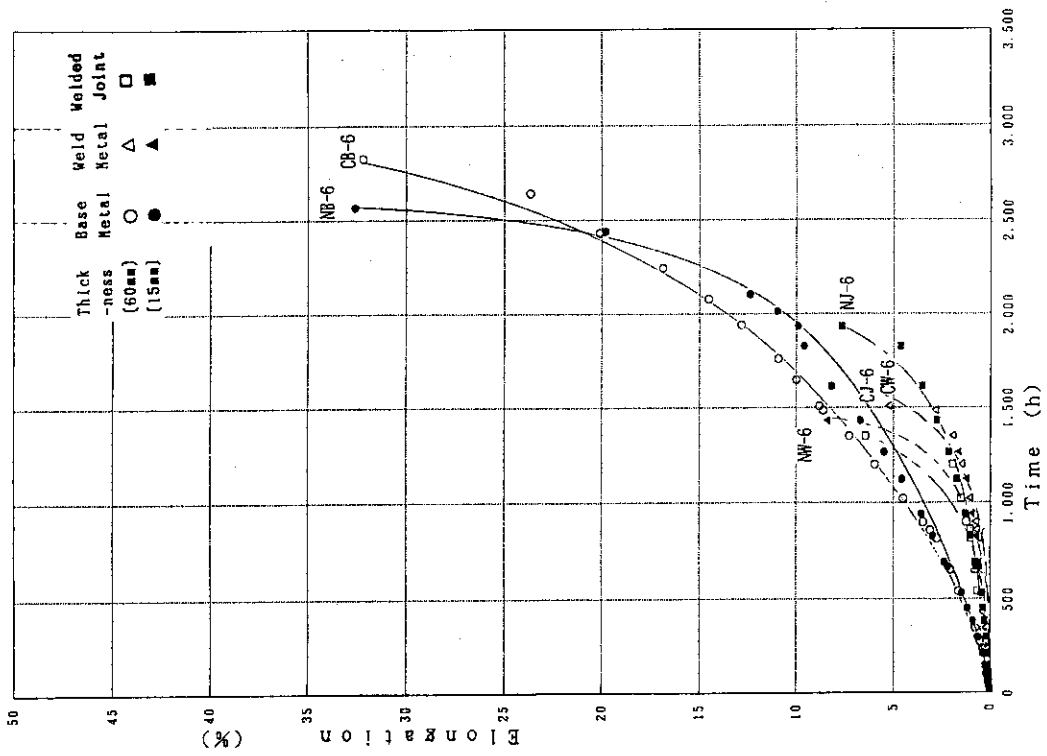
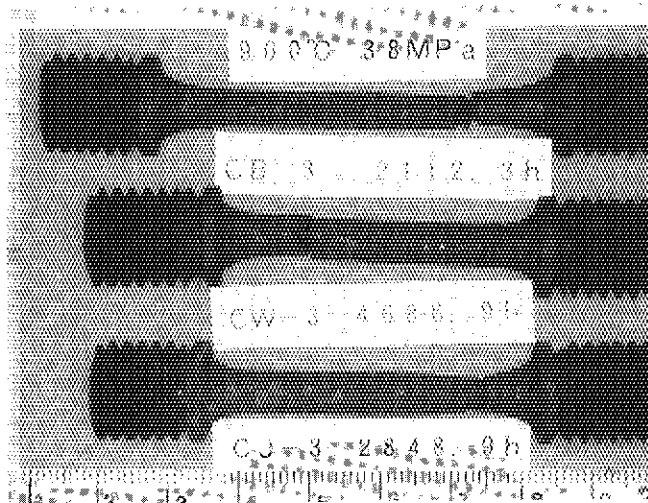
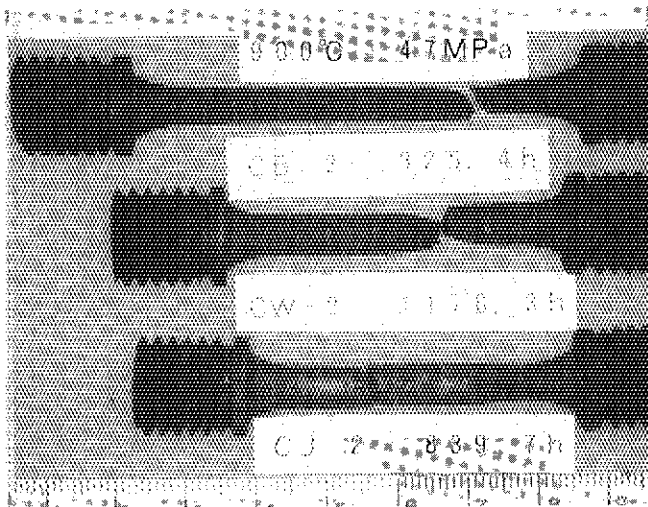
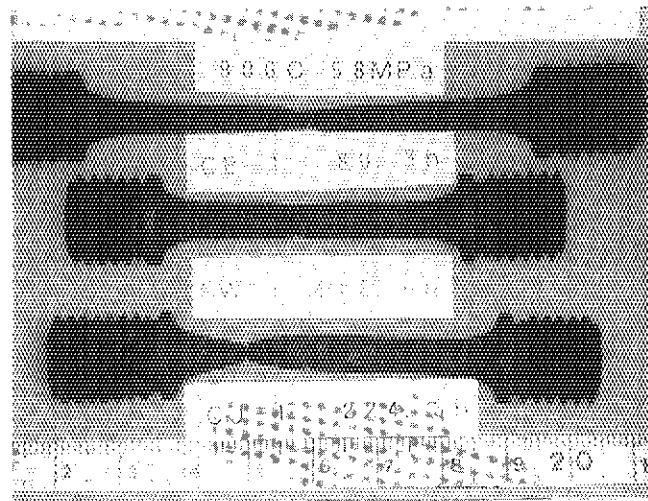
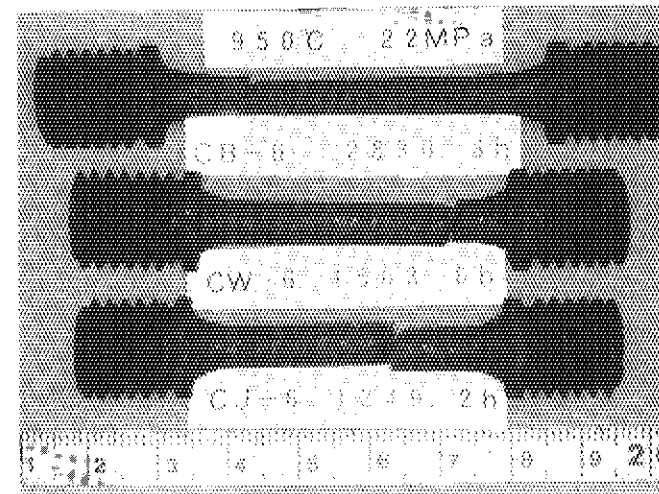
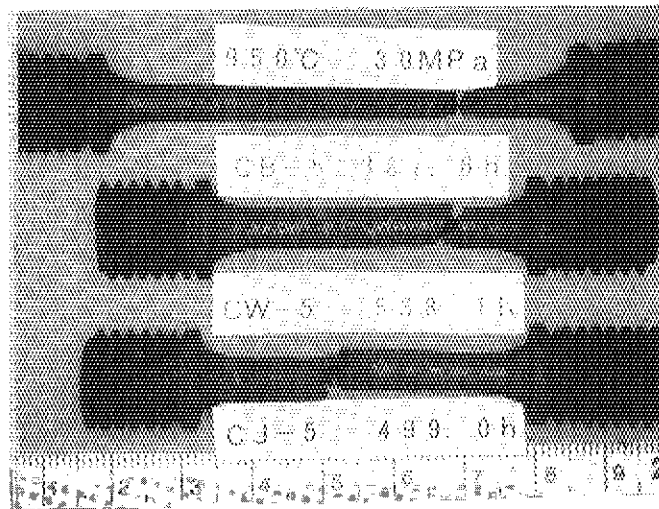
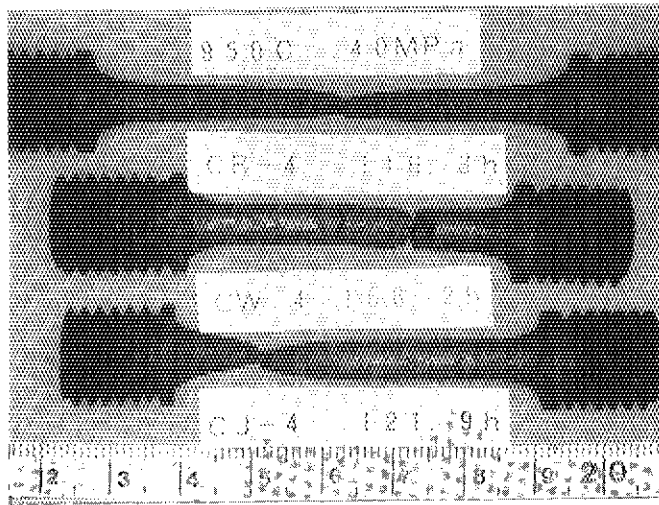


Fig. 30 Creep curves of Hastelloy alloy XR weldment at 950°C in air under stress of 22.0MPa



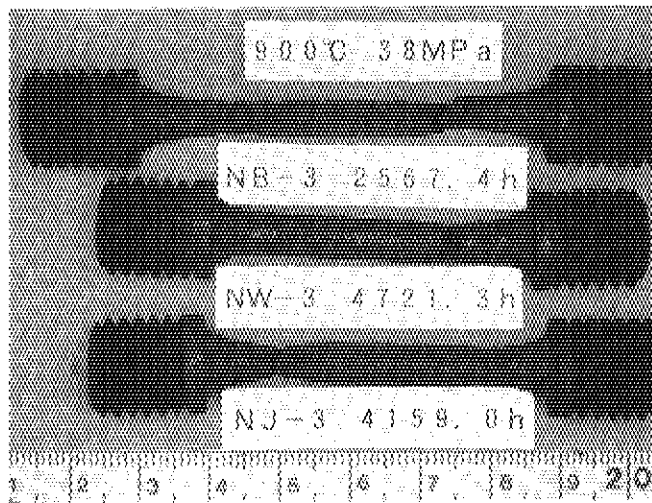
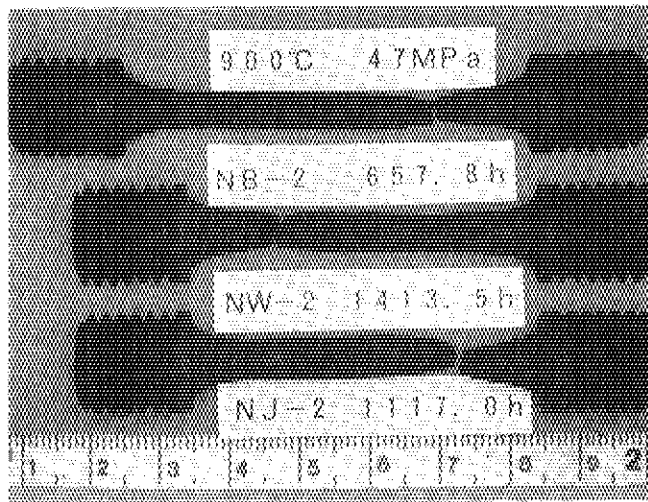
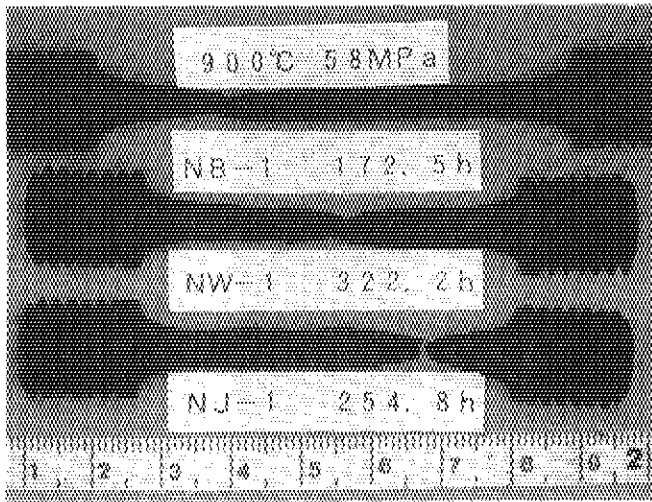
CB: Base Metal
 CW: Deposited Metal
 CJ: Welded Joint

Fig.31 Appearance of creep specimens after testing at 900°C
 (thickness: 60mm plate)



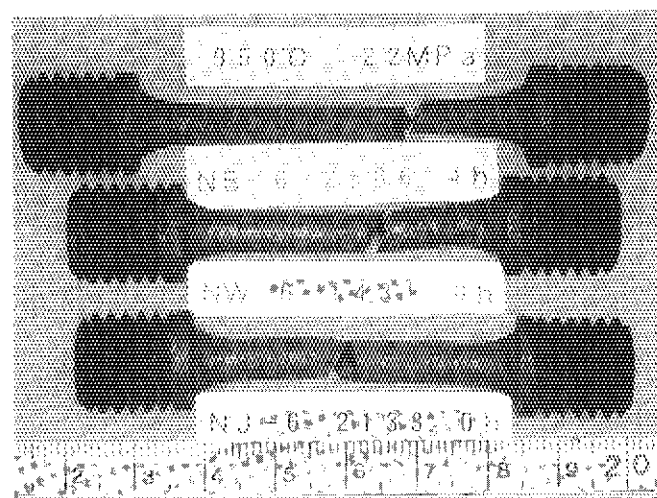
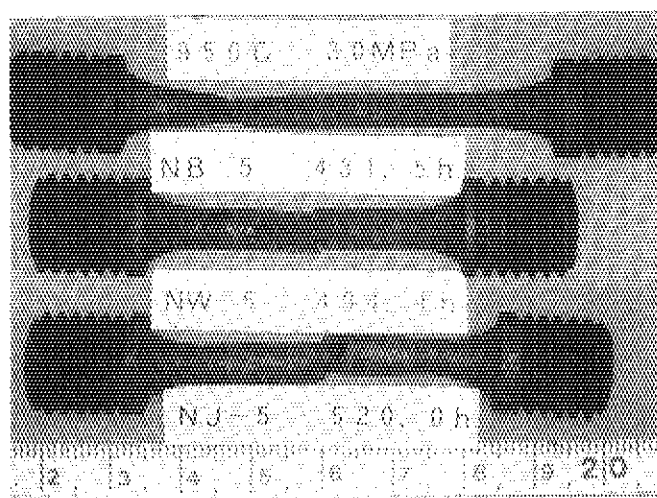
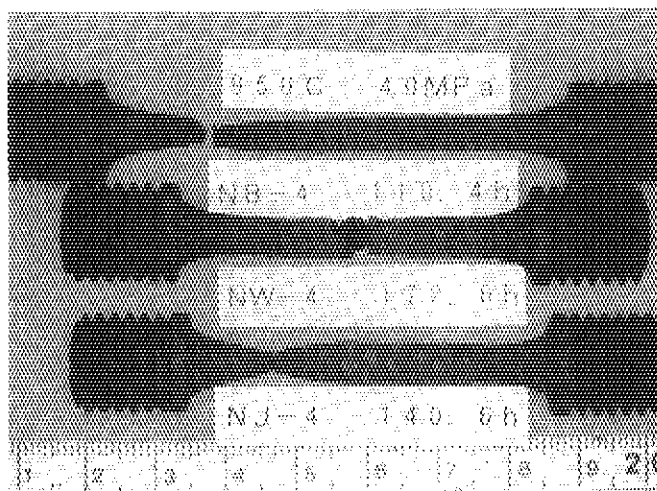
CB: Base Metal
CW: Deposited Metal
CJ: Welded Joint

Fig. 32 Appearance of creep specimens after testing at 950°C
(thickness: 60mm plate)



CB: Base Metal
 CW: Deposited Metal
 CJ: Welded Joint

Fig.33 Appearance of creep specimens after testing at 900°C
 (thickness: 15mm plate)



CB: Base Metal
 CW: Deposited Metal
 CJ: Welded Joint

Fig.34 Appearance of creep specimens after testing at 950°C
 (thickness: 15mm plate)

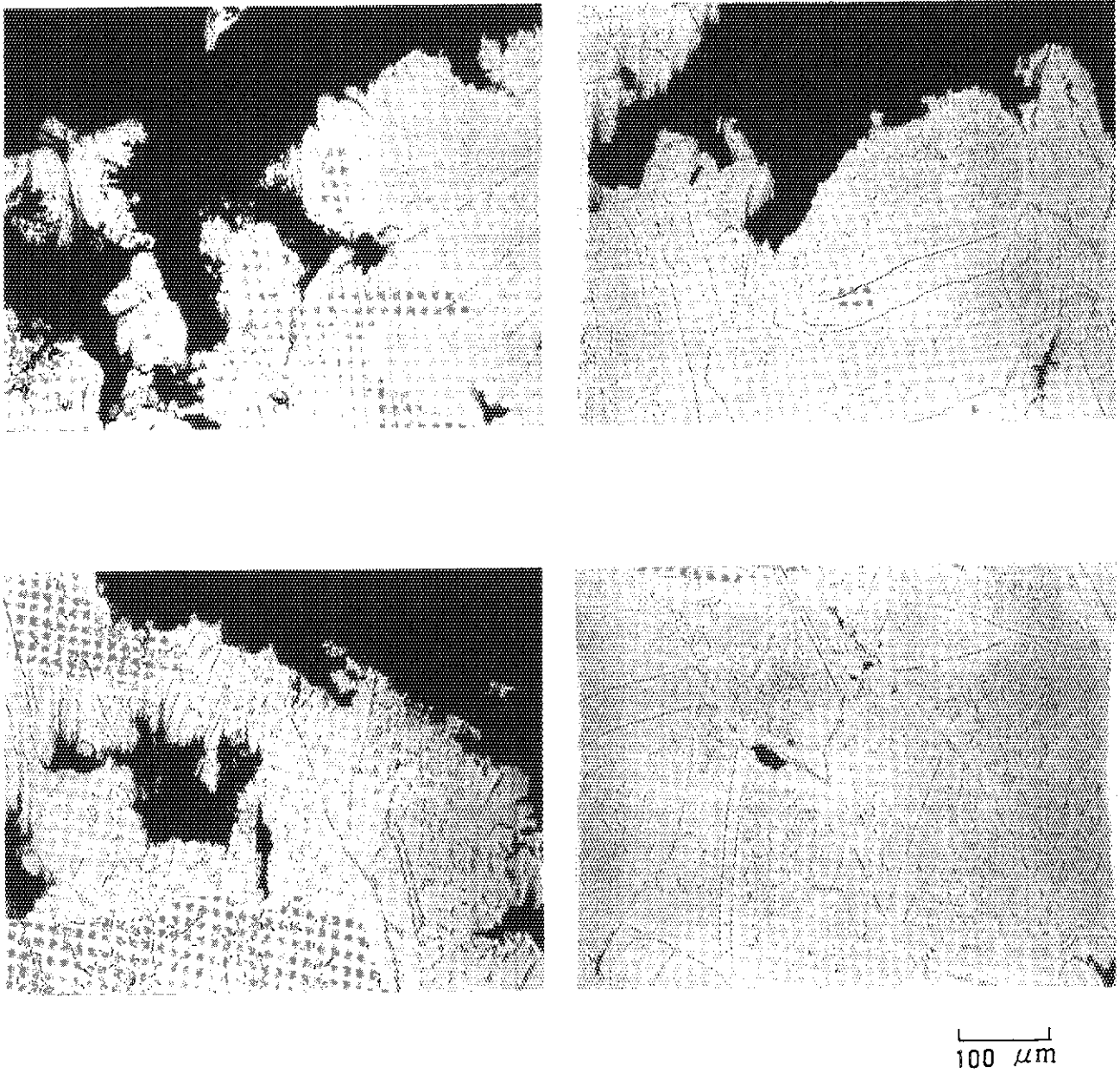


Fig. 35 Microstructure of fracture section for base metal
(900°C, 2112.3h, 38.0MPa, thickness: 60mm, specimen No. CB-3)

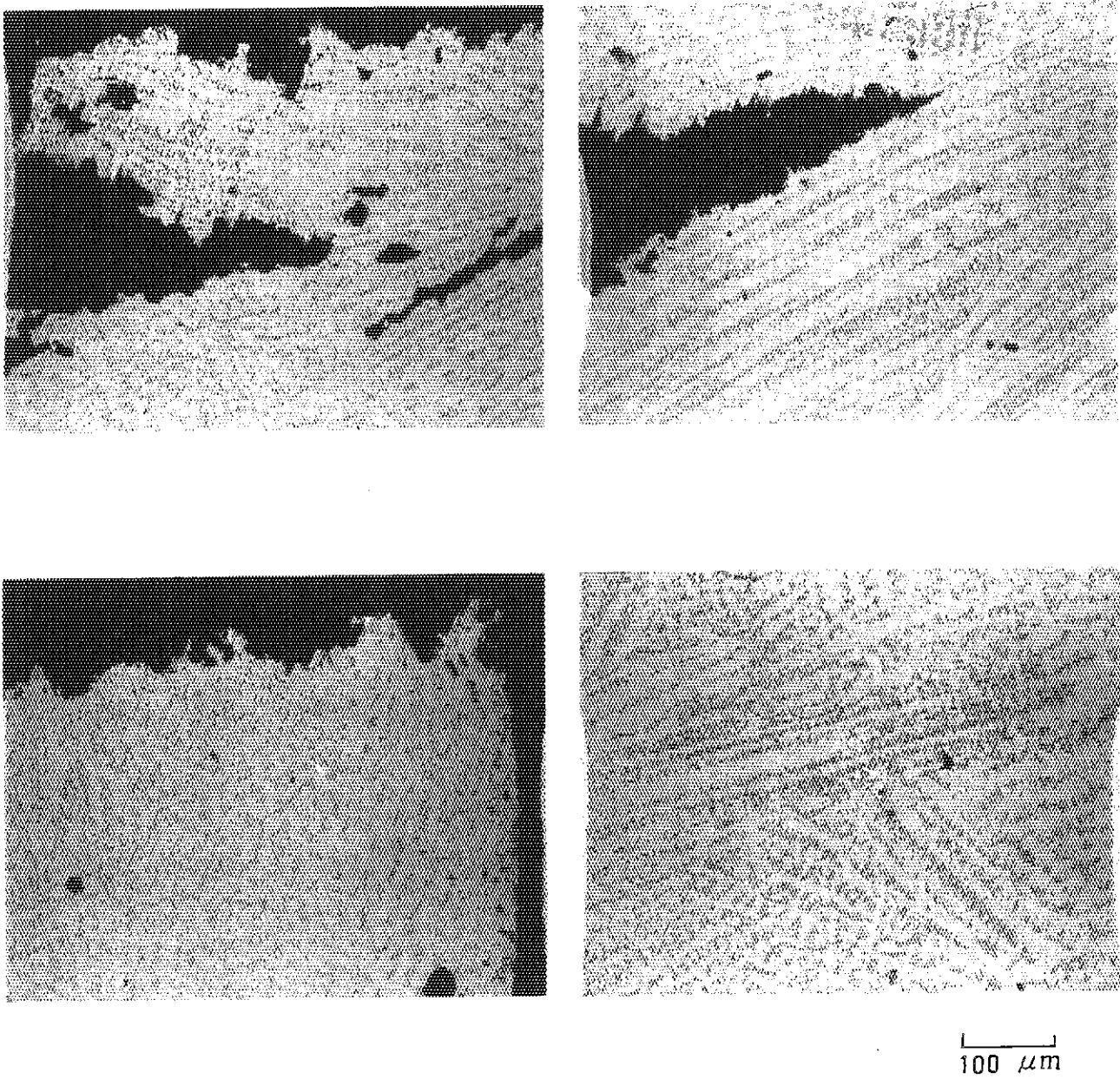


Fig. 36 Microstructure of fracture section for weld metal
(900°C, 4686.9h, 38.0MPa, thickness: 60mm, specimen No. CW-3)

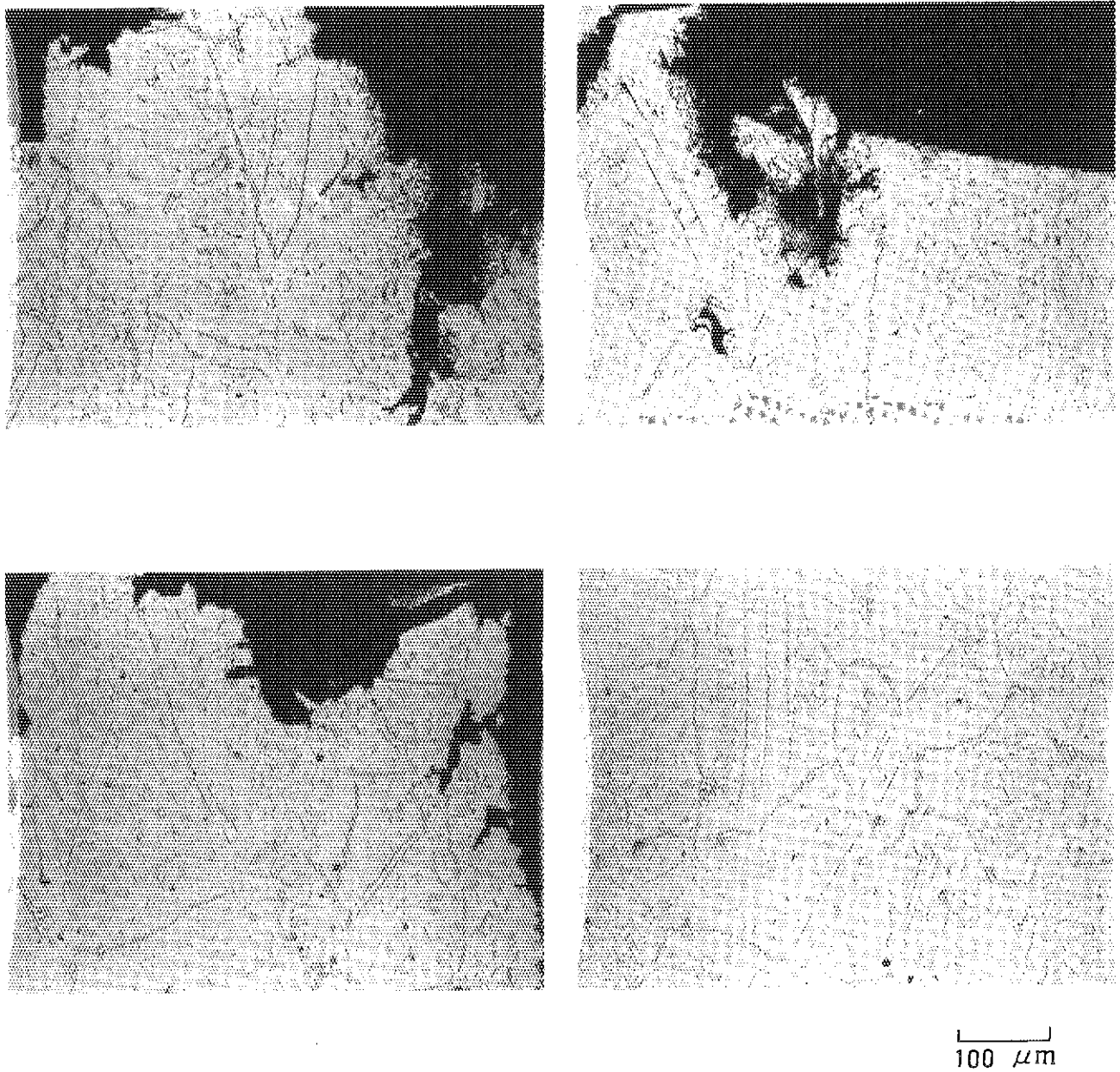


Fig. 37 Microstructure of fracture section for welded joint
(900°C, 2848.9h, 38.0MPa, thickness: 60mm, specimen No.CJ-3)

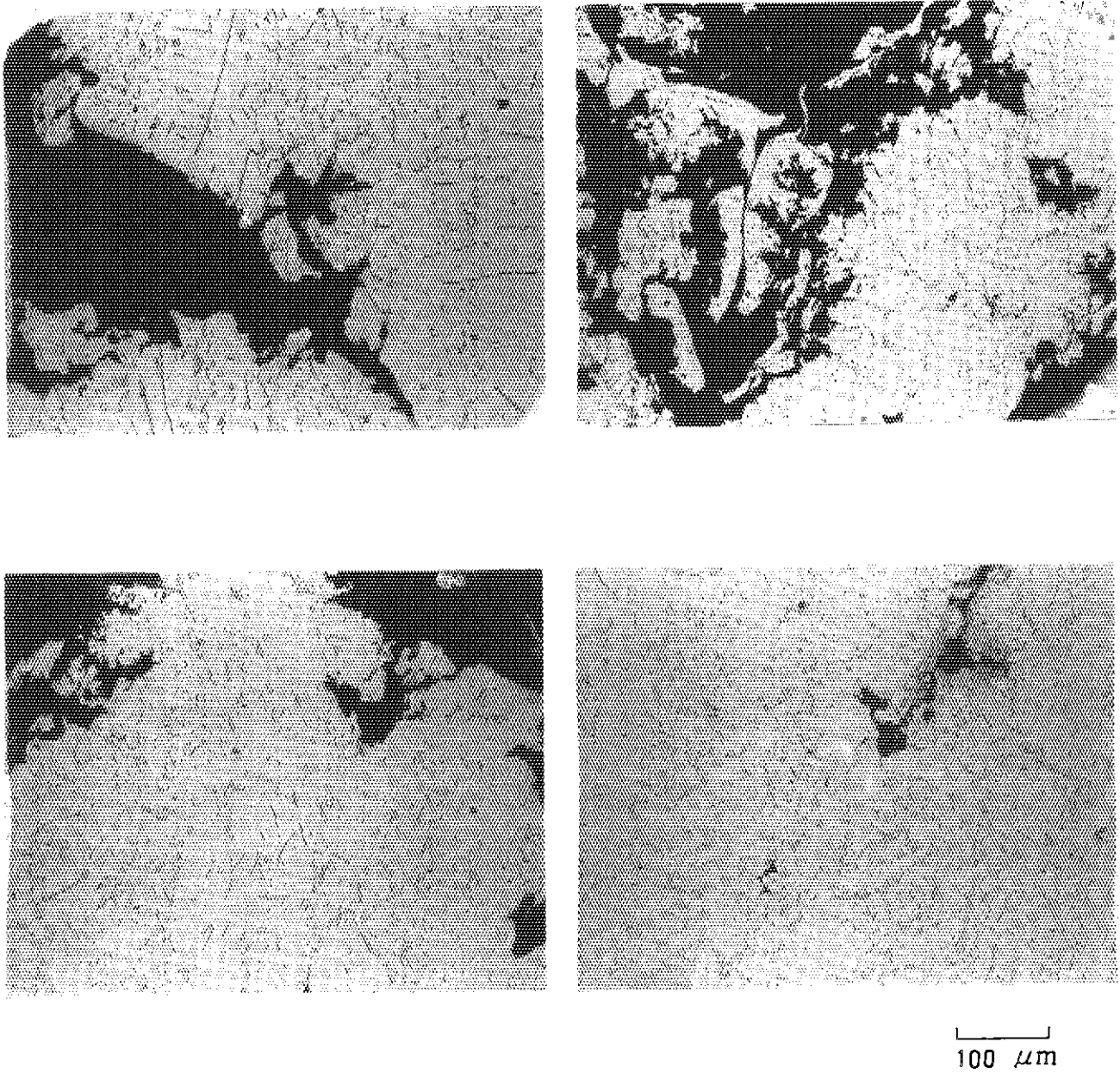


Fig. 38 Microstructure of fracture section for base metal
(950°C, 2830.3h, 22.0MPa, thickness: 60mm, specimen No. CB-6)

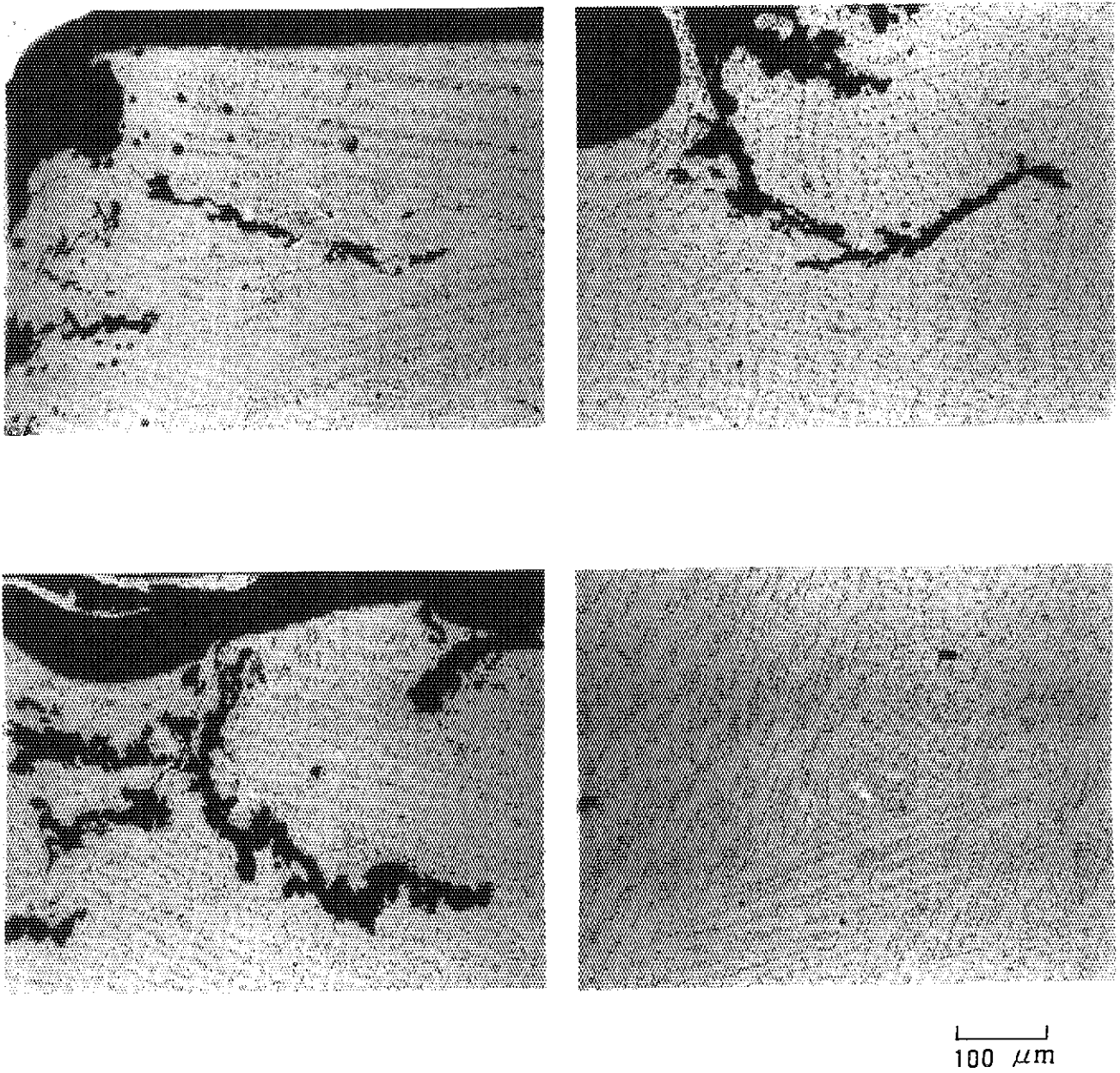


Fig. 39 Microstructure of fracture section for weld metal
(950°C, 1508.6h, 22.0MPa, thickness: 60mm, specimen No. CW-6)

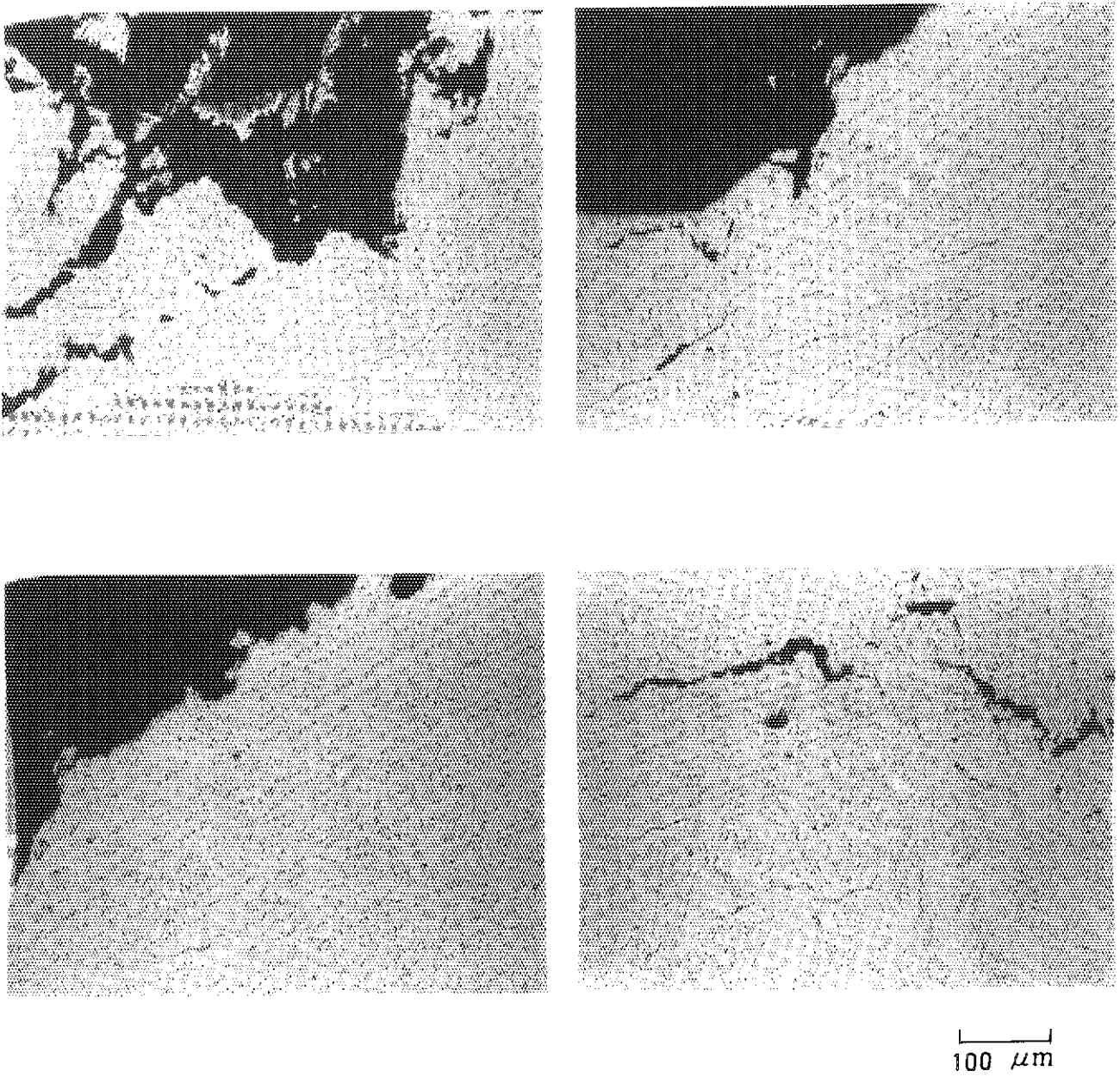


Fig. 40 Microstructure of fracture section for welded joint
(950°C, 1349.2h, 22.0MPa, thickness: 60mm, specimen No.CJ-6)

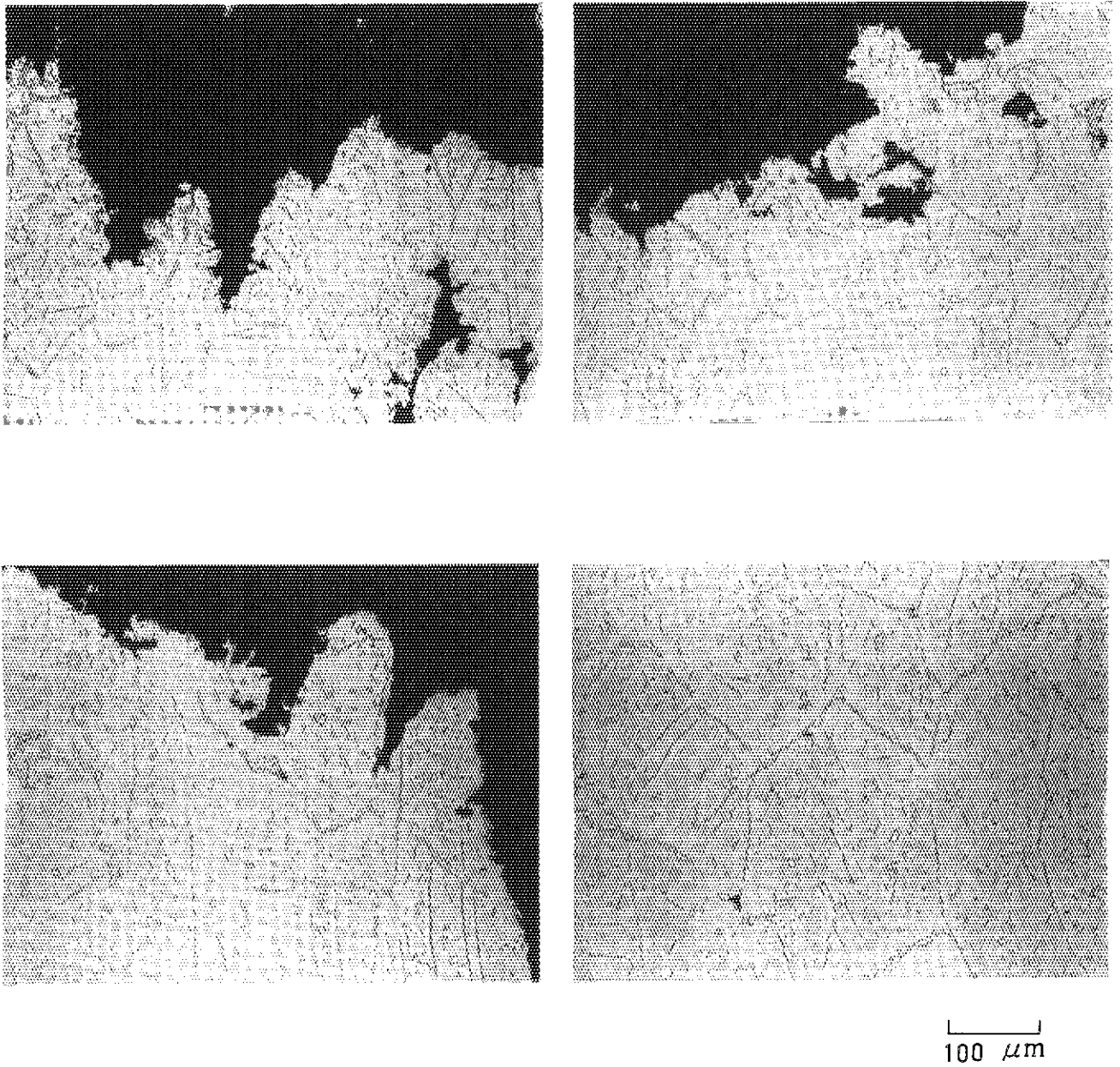


Fig. 41 Microstructure of fracture section for base metal
(900°C, 2567.4h, 38.0MPa, thickness: 15mm, specimen No.NB-3)

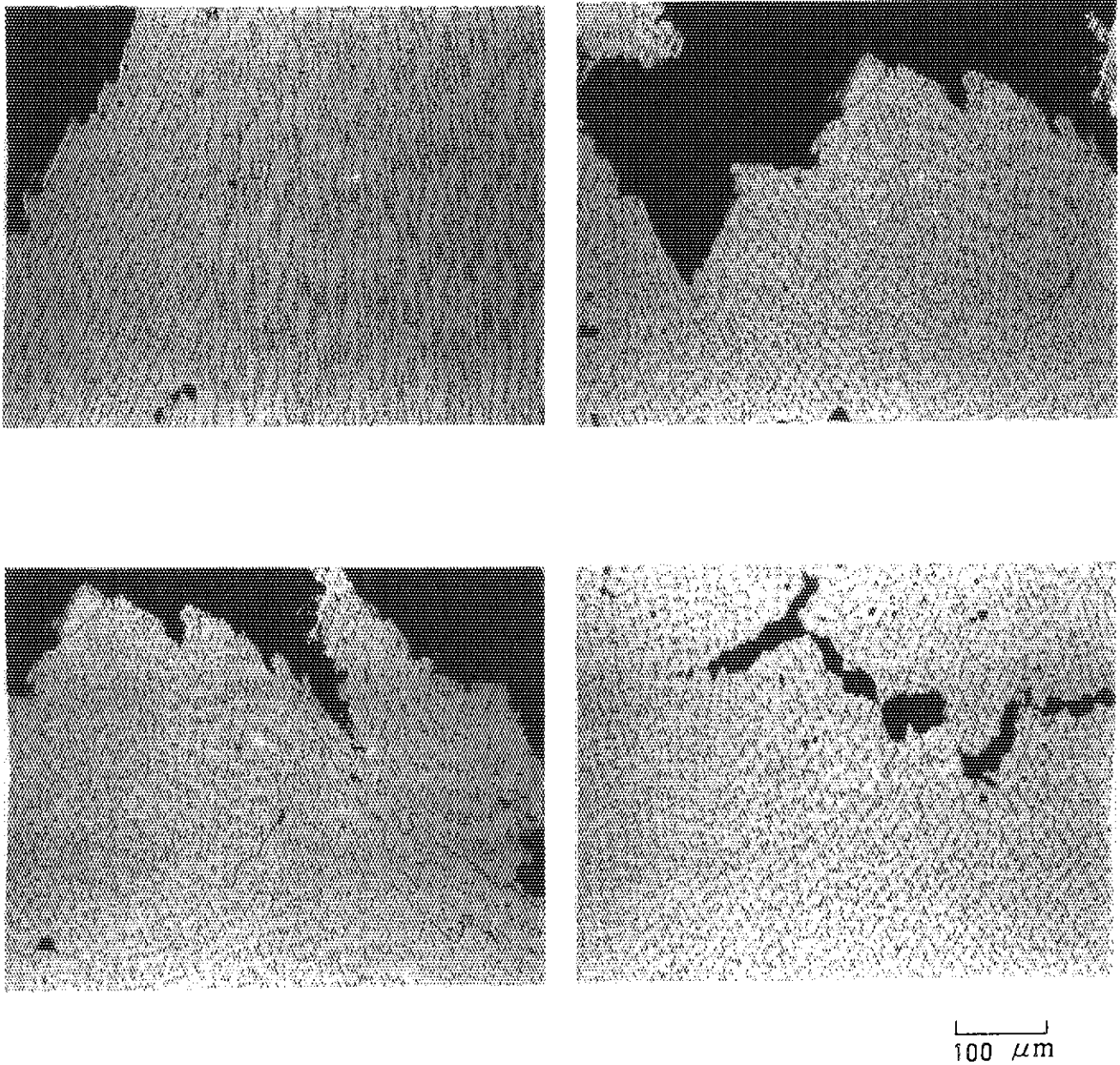


Fig. 42 Microstructure of fracture section for weld metal
(900°C, 4721.3h, 38.0MPa, thickness: 15mm, specimen No. NW-3)

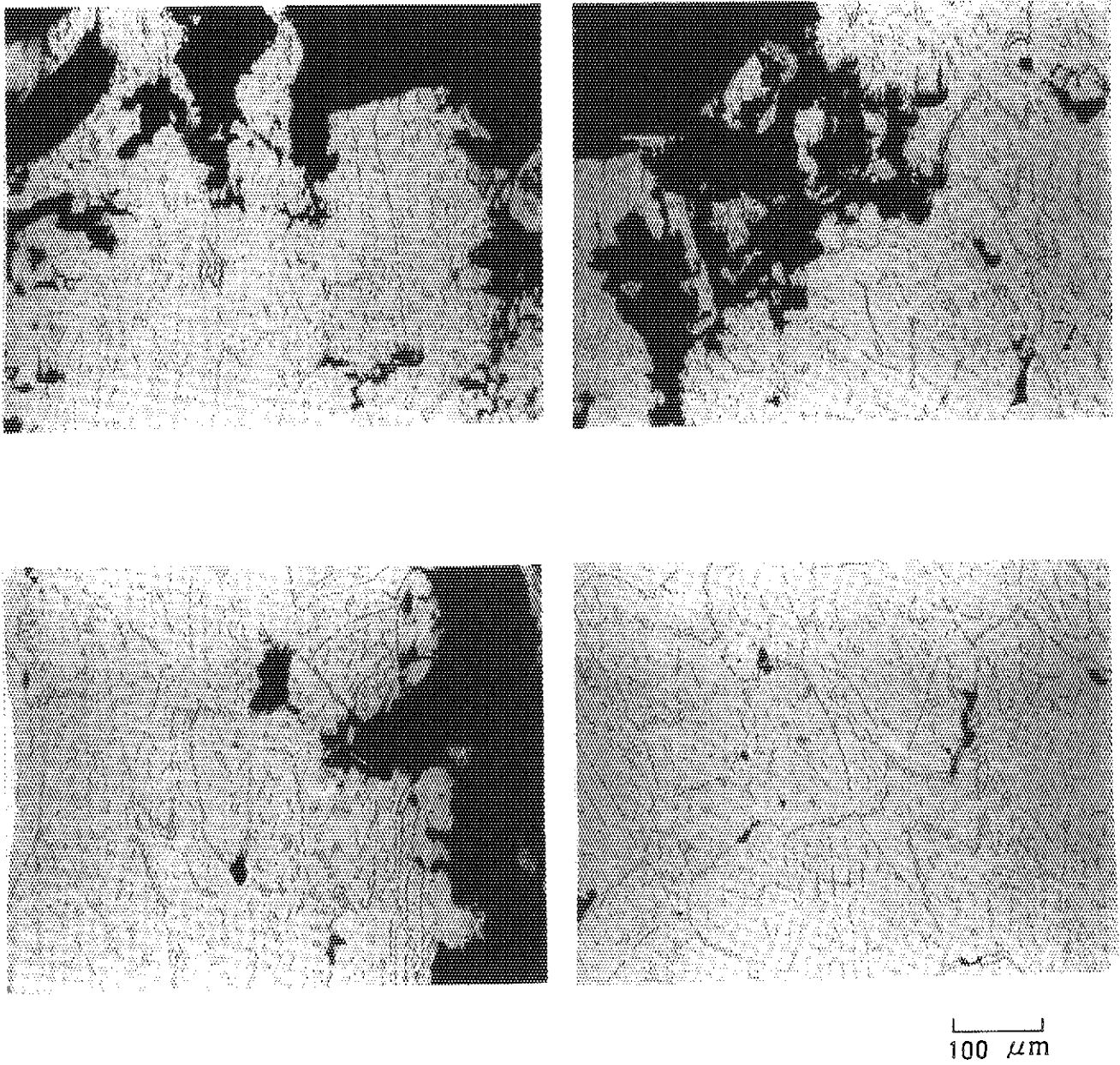


Fig. 43 Microstructure of fracture section for welded joint
(900°C, 4159.0h, 38.0MPa, thickness: 15mm, specimen No.NJ-3)

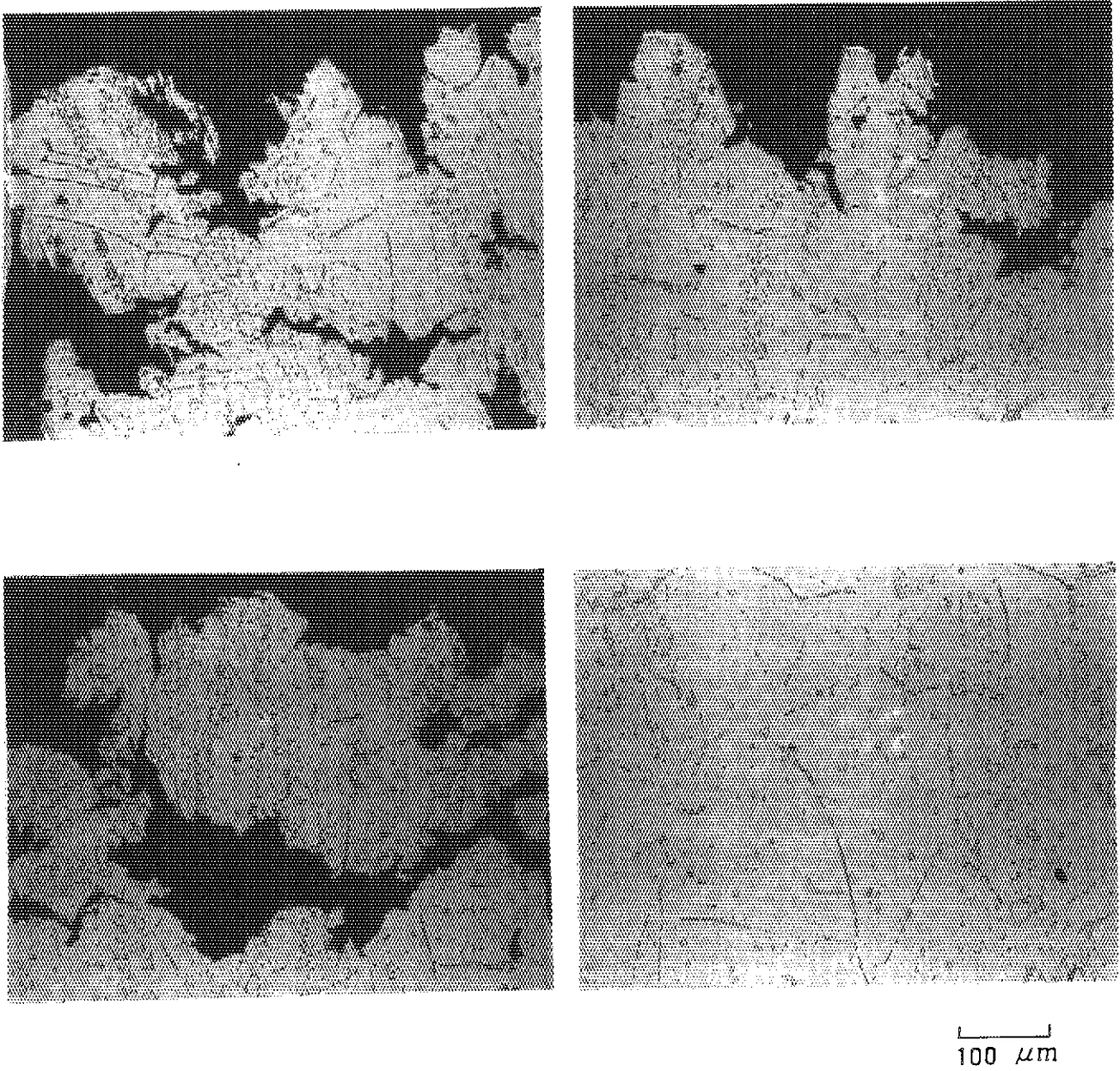


Fig. 44 Microstructure of fracture section for base metal
(950°C, 2566.4h, 22.0MPa, thickness: 15mm, specimen No.NB-6)

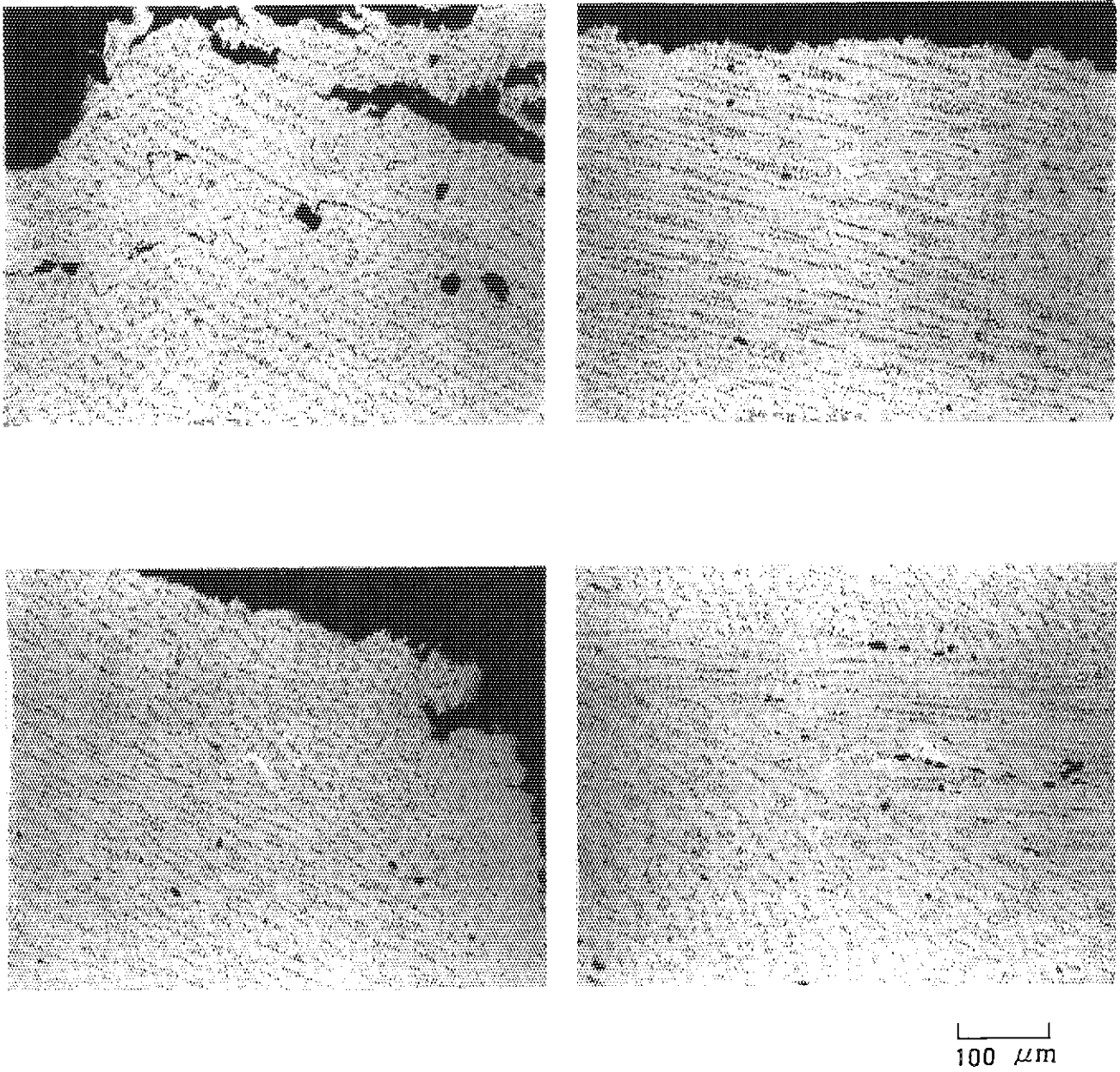


Fig. 45 Microstructure of fracture section for weld metal
(950°C, 1431.0h, 22.0MPa, thickness: 15mm, specimen No. NW-6)

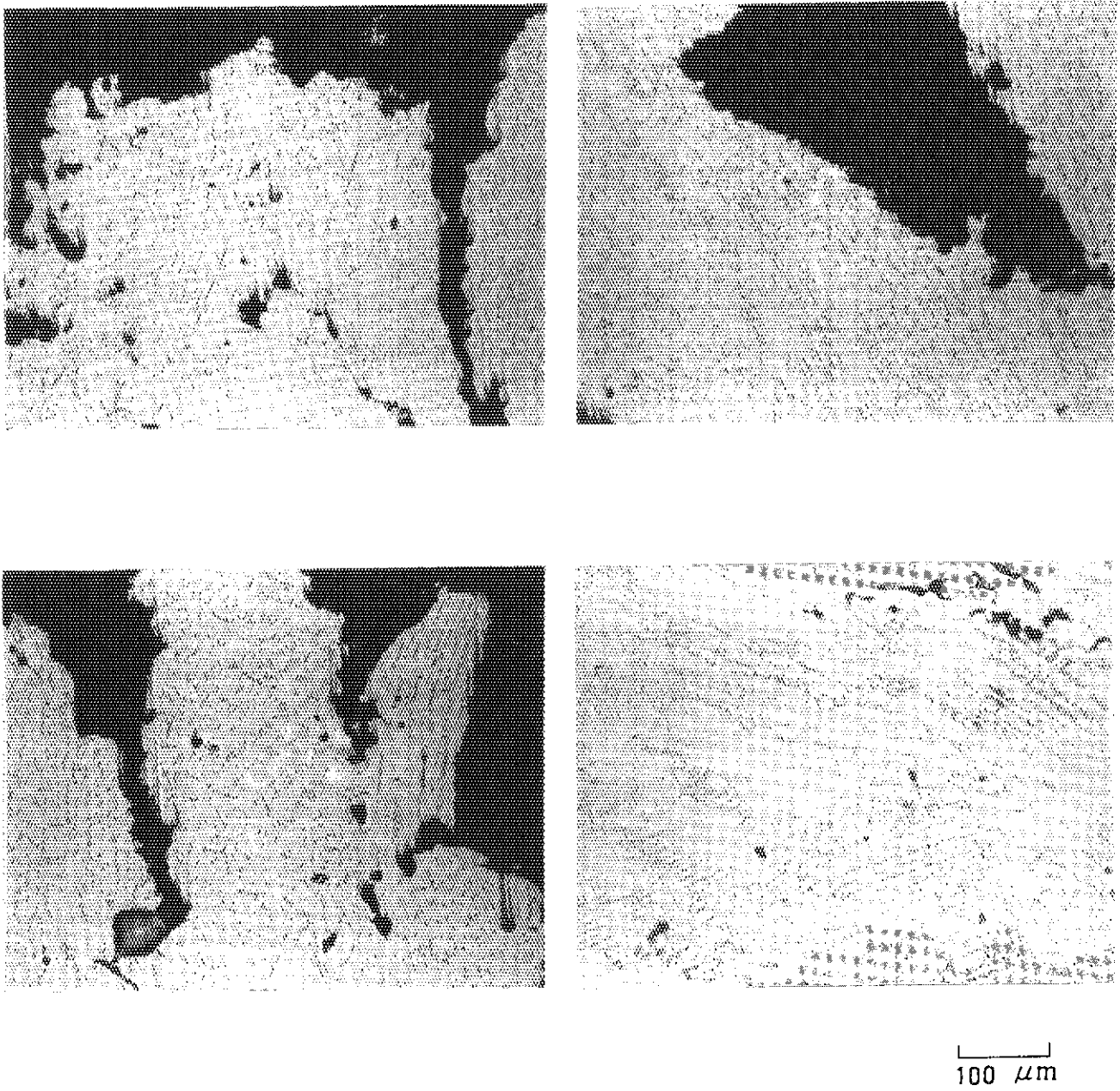


Fig. 46 Microstructure of fracture section for welded joint
(950°C, 2133.0h, 22.0MPa, thickness: 15mm, specimen No. NJ-6)

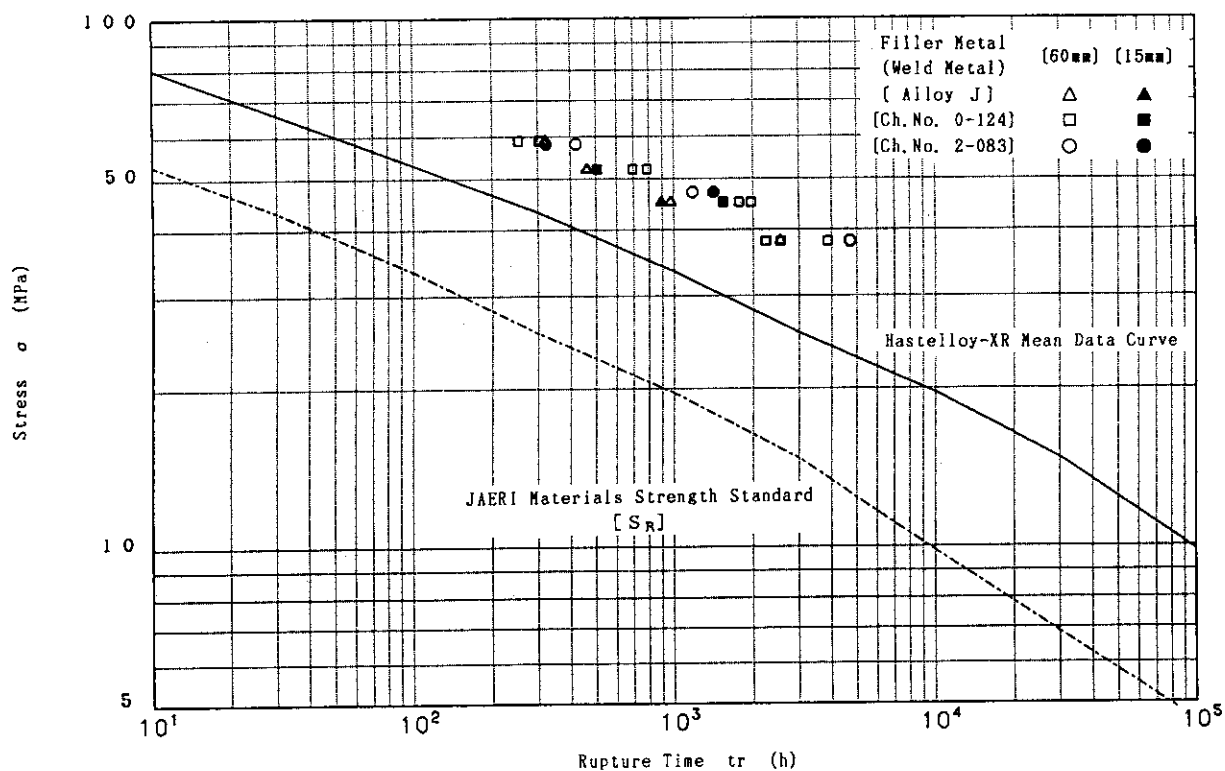


Fig. 47 Relation between applied stress and creep rupture time at 900°C in air (Weld metal)

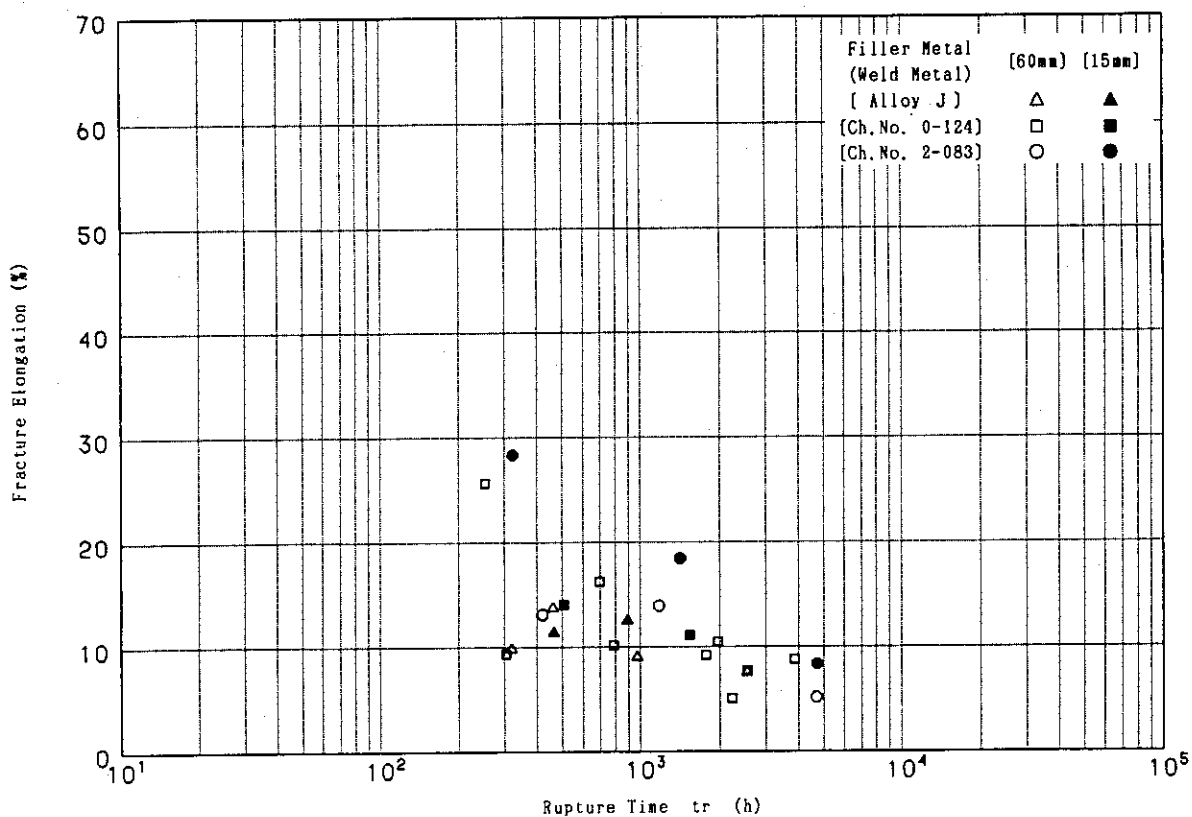


Fig. 48 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 900°C in air (Weld metal)

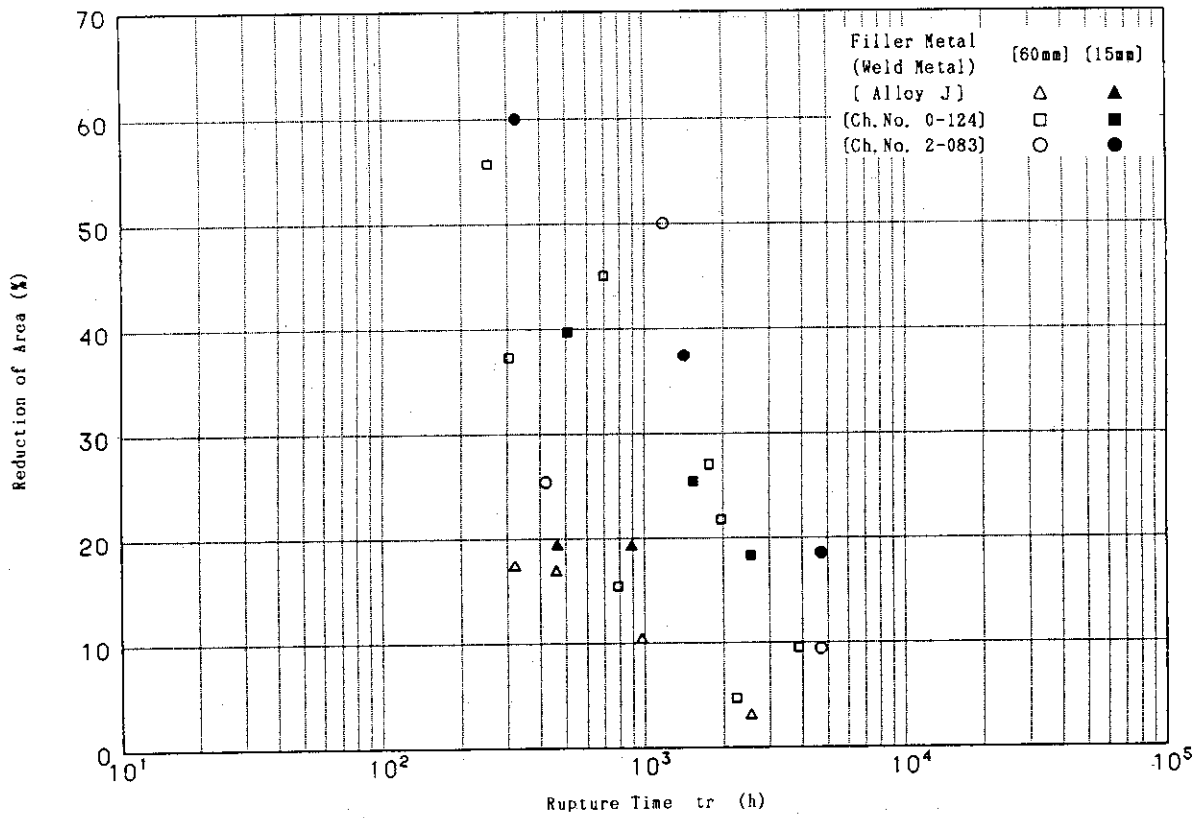


Fig. 49 Relation between reduction of area and creep rupture time at 900°C in air (Weld metal)

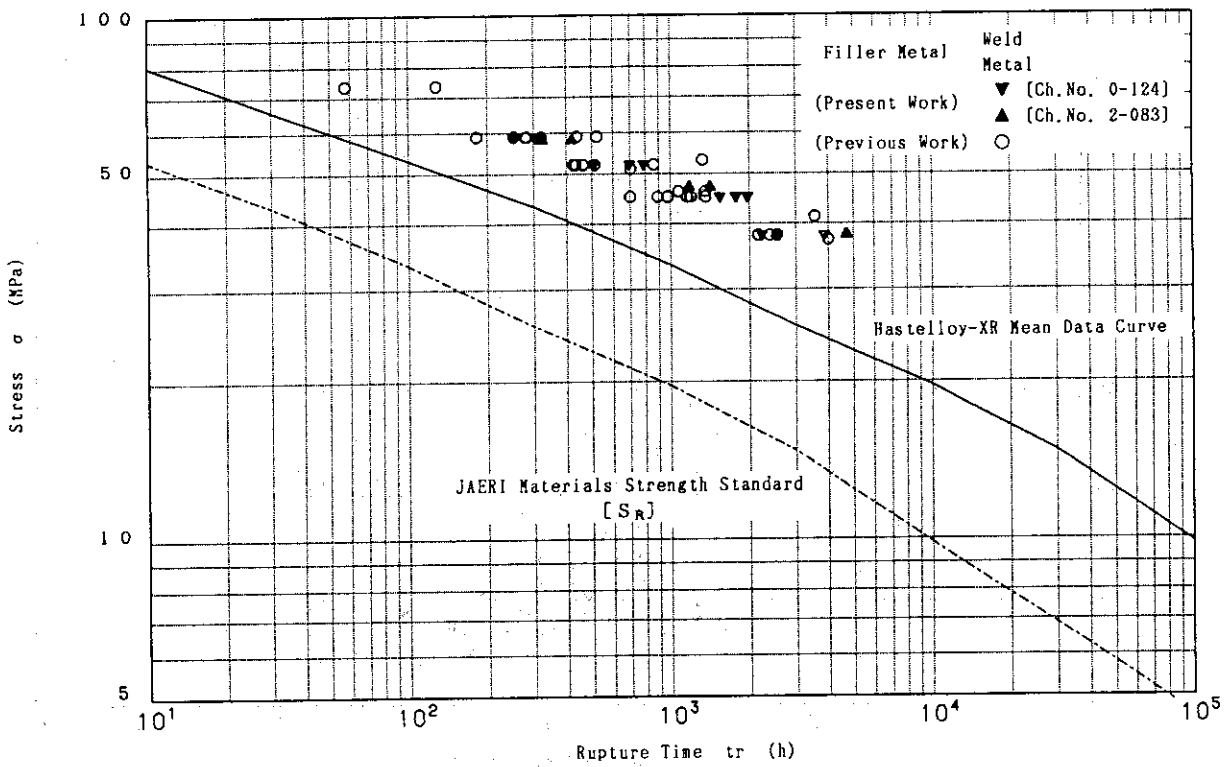


Fig. 50 Relation between applied stress and creep rupture time at 900°C in air (Weld metal)

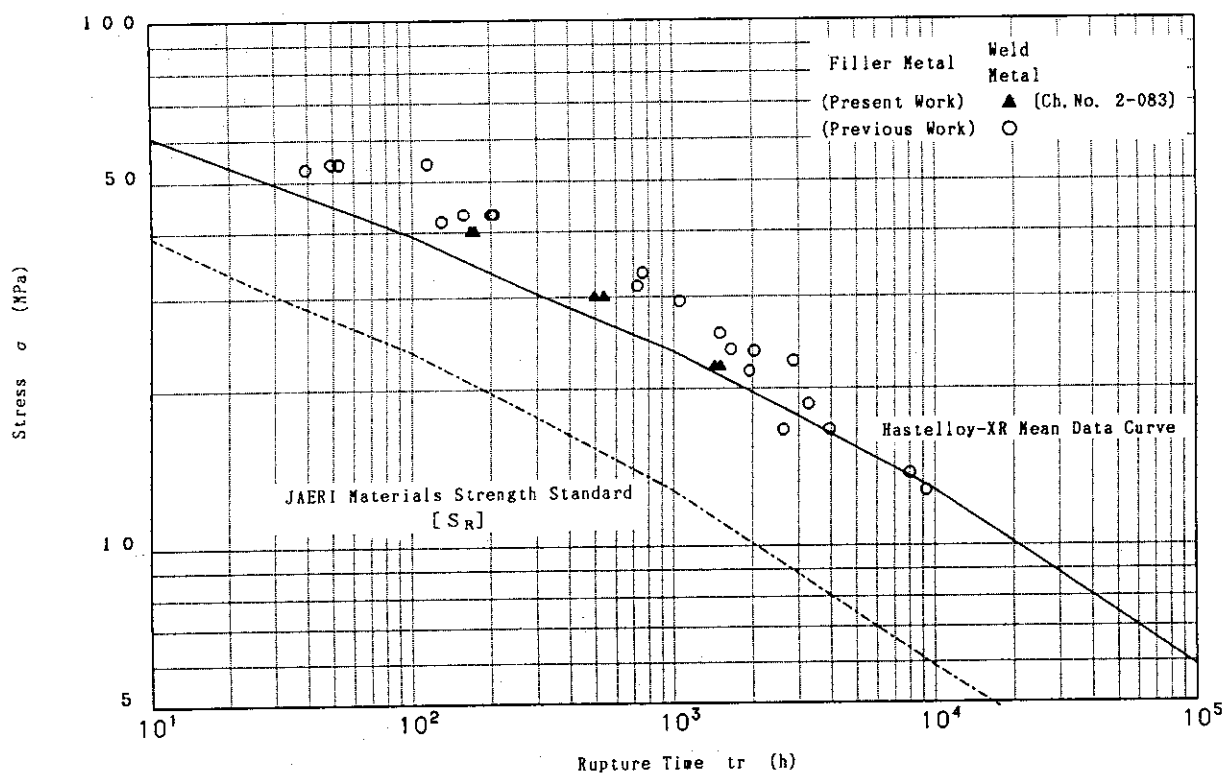


Fig. 51 Relation between applied stress and creep rupture time at 950°C in air (Weld metal)

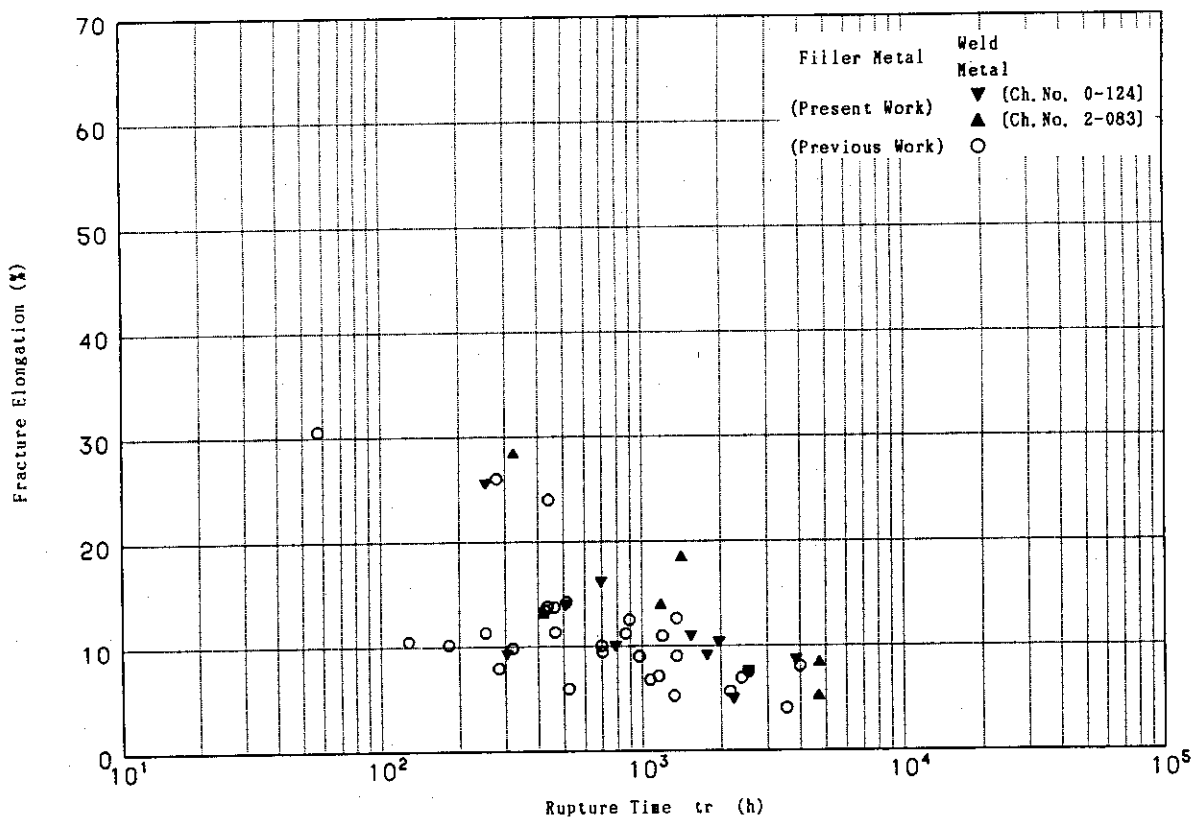


Fig. 52 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 900°C in air (Weld metal)

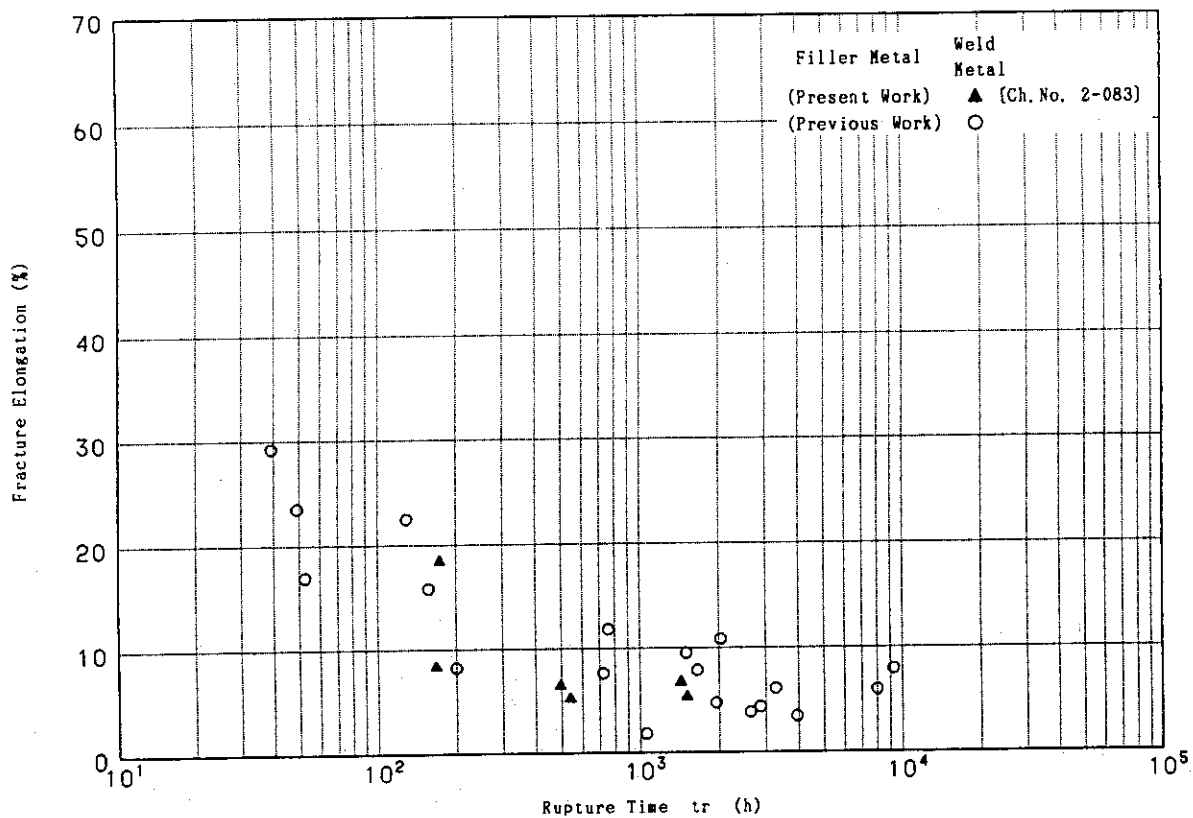


Fig. 53 Relation between fracture elongation and creep rupture time at 950°C in air (Weld metal)

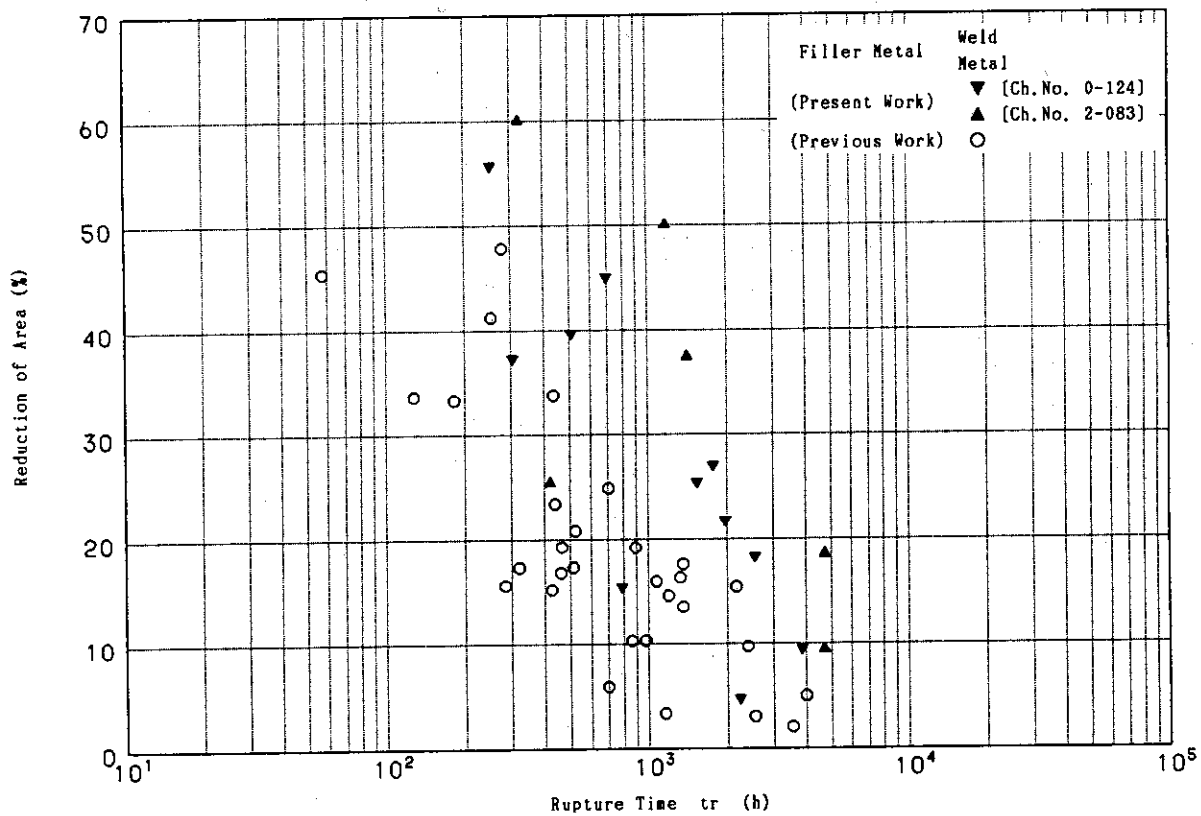


Fig. 54 Relation between reduction of area and creep rupture time at 900°C in air (Weld metal)

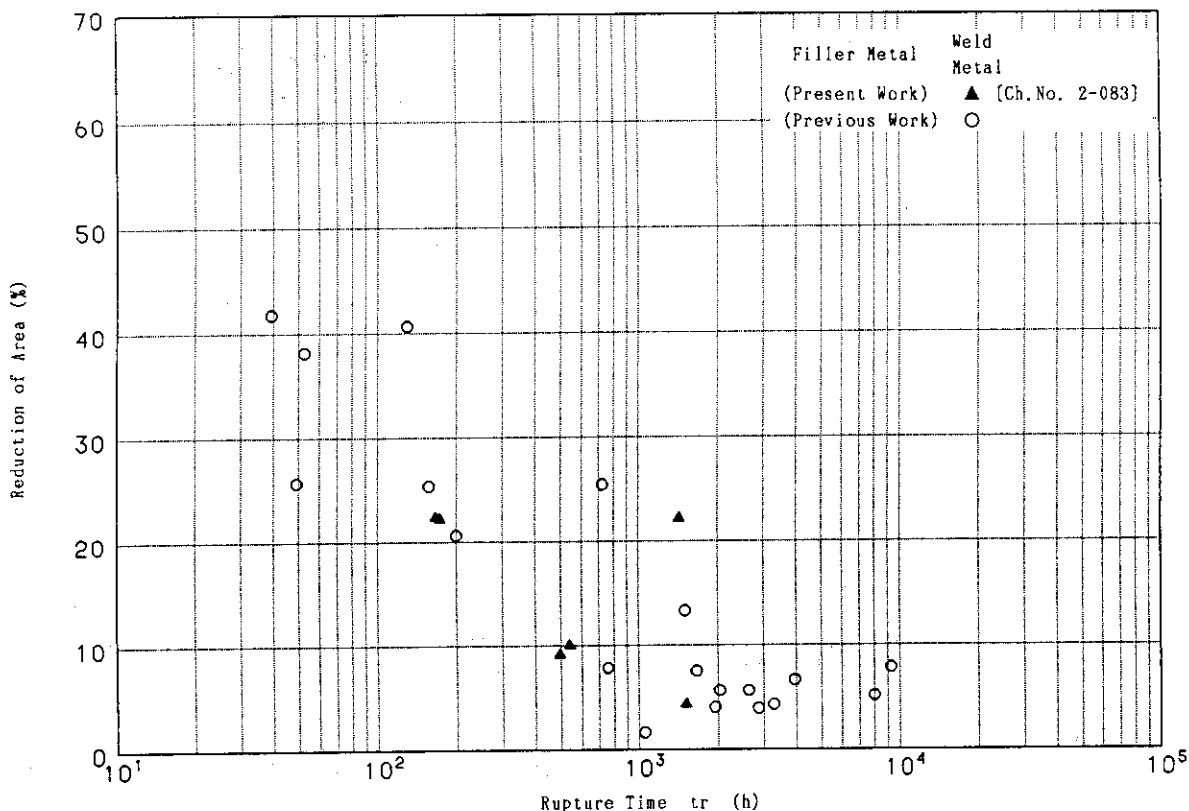


Fig. 55 Relation between reduction of area and creep rupture time at 950°C in air (Weld metal)

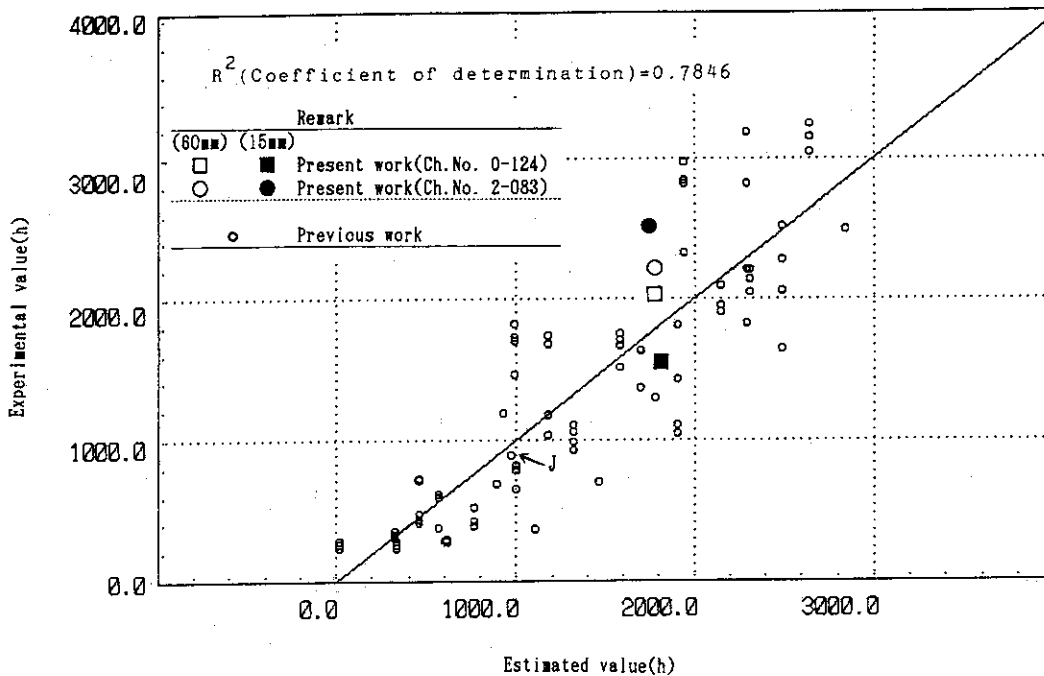


Fig. 56 Comparison of creep rupture time of weld metal between value estimated by multiple regression analysis and experimental ones under stress of 44.0MPa at 900°C