

「常陽」サーベイランスバックアップ試験

第4報 炉容器材の熱履歴試験

1980年10月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

The Back-up Tests for the "JOYO" Materials Surveillance Program

4. Effects of Thermal Aging on Tensile and Creep Properties of the Reactor Vessel Materials

October 1980

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

1980年10月

「常陽」サーベイランスバックアップ試験

第4報 炉容器材の熱履歴試験

蟹川昌也^{*}，榊原瑞夫^{*}，谷 賢^{*}
阿部康弘^{*}，佐々木澄男^{*}，原田 守^{*}
鈴木和久^{**}，一海俊景^{*}

要 旨

高速実験炉「常陽」の安全性を確認するため、サーベイランス試験が義務づけられているが、サーベイランス試験結果を正しく評価するためには一連のバックアップ試験が必要である。本試験はその一環として「常陽」炉容器相当材を用いて、熱履歴が引張特性及びクリープ特性に及ぼす影響を検討した。熱履歴は400℃～550℃で最長10,000時間与えた。又一部の試験片は一定応力をかけた状態で400℃，500℃で最長5,000時間の熱履歴を与えた。

本報はそれらの引張試験及びクリープ破断試験結果をまとめたものである。試験結果は以下の通りであった。

1. 引張試験結果

- 1) 母材及び溶接継手とも500℃以上の長時間加熱により耐力は増加し、引張強さ、一様伸び、破断伸び及び破断絞りは減少することが明らかになった。
- 2) 応力負荷状態で熱履歴を受けた母材及び溶接継手は、上記傾向が加速されるようであった。

2. クリープ破断試験結果

- 1) 母材は熱履歴により、クリープ破断強度が短時間側で若干低下する傾向にあったが、長時間側ではほとんどその影響が認められなかった。
- 2) 溶接継手では熱履歴の影響が認められなかった。
- 3) 母材及び溶接継手のクリープ破断強度は長時間熱履歴後も、ASMEの設計曲線及び「常陽」ナトリウム構造設計指針の基準値を上回っていることが明らかになった。

* 大洗工学センター，燃料材料試験部，照射材料試験室

** 現大洗工学センター，燃料材料試験部

Oct., 1980

The Back-up Tests for the "JOYO" Materials Surveillance Program

4. Effects of Thermal Aging on Tensile and Creep Properties of the Reactor Vessel Materials

Masaya Kanikawa*, Mizuo Sakakibara*
Satoshi Tani*, Yasuhiro Abe*
Sumio Sasaki*, Mamoru Harada*
Kazuhisa Suzuki** and Toshikage Ikkai*

Abstract

To confirm the safety of fast experimental reactor "JOYO", the material-surveillance tests are required. As the data of material-surveillance tests are too restrictive to judge the safety, it is evidently necessary to analyze the numerous back up data for evaluating the results. This report is one of the back up tests. We studied the effects of thermal aging on tensile and creep properties of relative plate and its weldment for the reactor vessel of "JOYO". Thermal aging were performed 100~10,000h at 400~550°C with and without stress. This results obtained are summarized as follows.

1. Results of tensile properties

- 1) Yield strength of base metal and welded joint aged above 500°C for long time increased, but tensile strength, uniform elongation, ruptured elongation and reduction of area decreased.
- 2) Above tendency is accelerated with stress aging.

2. Results of creep rupture properties

- 1) Slight reduction in short-term creep rupture strength of base metal aged is observed, but is not observed in long-term properties.
- 2) No effects of thermal aging are observed in welded joints.
- 3) It seemed to think the creep rupture strength of base metal and welded joints aged long-term at high temperature satisfied both of the value of "JOYO" guide line and the design curve of ASME.

* Material Monitoring Section, Fuel and Material Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Fuel and Material Division, O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

1. まえがき	1
2. 供試材	2
3. 試験方法	3
3.1 熱履歴試験法	3
3.2 引張試験法	3
3.3 クリープ破断試験法	3
3.4 金相試験法	4
4. 試験結果	5
4.1 熱履歴試験結果	5
4.2 引張試験結果	5
4.3 クリープ破断試験結果	9
4.4 金相試験結果	10
5. 試験結果の考察	12
5.1 引張試験結果の考察	12
5.2 クリープ破断試験結果の考察	13
6. あとがき	14
7. 謝 辞	15
8. 参考文献	16

List of tables

Table 1	Mill sheet of test specimen	17
Table 2	Welding procedure	18
Table 3	Aging conditions of specimens	19
Table 4(a)	Tensile properties of sus 304 base metal aged and tested at room temperature	20
Table 4(b)	Tensile properties of sus 304 welded joint aged and tested at room temperature	21
Table 4(c)	Tensile properties of sus 304 base metal aged and tested at 400°C	22
Table 4(d)	Tensile properties of sus 304 welded joint aged and tested at 400°C	23
Table 4(e)	Tensile properties of sus 304 base metal aged and tested at 500°C	24
Table 4(f)	Tensile properties of sus 304 welded joint aged ant tested at 500°C	25
Table 4(g)	Tensile properties of sus 304 base metal and welded joint aged under the stress of 7.8 kg/mm ² and tested at 400°C and 500°C	26
Table 5	Creep and creep rupture properties of both sus 304 base metal and welded joint aged and tested at 500°C	27

List of figures

Fig. 1	Profile of specimens	28
Fig. 2	Sampling of specimen	29
Fig. 3	Schematic flow diagram of thermal aging furnace	30
Fig. 4(a)	Effect of thermal aging on 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of sus 304 tested at R.T.	31
Fig. 4(b)	Effect of thermal aging on 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of sus 304 tested at 400°C	32
Fig. 4(c)	Effect of thermal aging on 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of sus 304 tested at 500°C	33
Fig. 5(a)	Relation among L.M.P., 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of sus 304 tested at R.T.	34
Fig. 5(b)	Relation among L.M.P., 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of sus 304 tested at 400°C	35
Fig. 5(c)	Relation among L.M.P., 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of sus 304 tested at 500°C	36
Fig. 6(a)	Effect of thermal aging on uniform elongation of sus 304 tested at R.T.	37
Fig. 6(b)	Effect of thermal aging on uniform elongation of sus 304 tested at 400°C	38
Fig. 6(c)	Effect of thermal aging on uniform elongation of sus 304 tested at 500°C	39
Fig. 7(a)	Relation between L.M.P. and uniform elongation of sus 304 tested at R.T.	40
Fig. 7(b)	Relation between L.M.P. and uniform elongation of sus 304 tested at 400°C	41
Fig. 7(c)	Relation between L.M.P. and uniform elongation of sus 304 tested at 500°C	42
Fig. 8(a)	Effect of thermal aging on ruptured elongation of sus 304 tested at R.T.	43
Fig. 8(b)	Effect of thermal aging on ruptured elongation of sus 304 tested at 400°C	44
Fig. 8(c)	Effect of thermal aging on ruptured elongation of sus 304 tested at 500°C	45
Fig. 9(a)	Relation between L.M.P. and ruptured elongation of sus 304 tested at R.T.	46

Fig. 9(b)	Relation between L.M.P. and ruptured elongation of sus 304 tested at 400°C	47
Fig. 9(c)	Relation between L.M.P. and ruptured elongation of sus 304 tested at 500°C	48
Fig. 10(a)	Effect of thermal aging on reduction of area of sus 304 tested at R.T.	49
Fig. 10(b)	Effect of thermal aging on reduction of area of sus 304 tested at 400°C	50
Fig. 10(c)	Effect of thermal aging on reduction of area of sus 304 tested at 500°C	51
Fig. 11(a)	Relation between L.M.P. and reduction of area of sus 304 tested at R.T.	52
Fig. 11(b)	Relation between L.M.P. and reduction of area of sus 304 tested at 400°C	53
Fig. 11(c)	Relation between L.M.P. and reduction of area of sus 304 tested at 500°C	54
Fig. 12(a)	Effect of thermal aging under the stress of 7.8 kg/mm ² on tensile properties of sus 304 base metal tested at 400°C and 500°C	55
Fig. 12(b)	Effect of thermal aging under the stress of 7.8 kg/mm ² on tensile properties of sus 304 welded joint tested at 400°C and 500°C	56
Fig. 13	Effect of thermal aging on creep rupture strength of sus 304 tested at 500°C	57
Fig. 14	Effect of thermal aging on minimum creep rate of sus 304 tested at 500°C	58
Fig. 15	Effect of thermal aging on creep rupture elongation of sus 304 tested at 500°C	59
Fig. 16	Effect of thermal aging on the reduction of area of specimen ruptured of sus 304 tested at 500°C	60
Fig. 17	Micrographs of base metal after thermal aging	61
Fig. 18	Micrographs of welded joint after thermal aging	63
Fig. 19	Comparison of 0.2% yield strength ratio between this work and others as a function of L.M.P.	65
Fig. 20	Comparison of ultimate tensile strength ratio between this work and others as a function of L.M.P.	66
Fig. 21	Comparison of uniform elongation ratio between this work and others as a function of L.M.P.	67

Fig. 22	Comparison of ruptured elongation ratio between this work and others as a function of L.M.P.	68
Fig. 23	Comparison of reduction of area ratio between this work and others as a function of L.M.P.	69
Fig. 24	Effect of thermal aging on creep rupture life of type 304 stainless steel (base metal)	70
Fig. 25	Comparison of creep rupture strength among this work, the design guide for "JOYO" and design curve ASME Code Case 1592	71

1. ま え が き

高速実験炉「常陽」の安全性を確認するため、サーベイランス試験が義務づけられている。しかし炉心にサーベイランス試験用孔を数多く取れないこと及びキャプセル内容積が限られていることからサーベイランス用試験片数を多く取ることは出来ず、試験条件も自ずから限られている。従ってサーベイランス試験結果を正しく評価するためには一連のバックアップ試験が必要であり、既にいくつかの試験^{1)~6)}が行われて来た。その結果、一部の特性については照射による影響^{2)~6)}が報告されている。しかし材質に与える照射の影響は中性子ものものによる損傷と照射中の熱履歴によるものがあるため、これらの因子を分けて解析検討することが照射の影響を知る上で必要である。本試験は、サーベイランスバックアップ試験の一環として「常陽」炉容器相当材を用いて、熱履歴が引張特性及びクリープ特性に及ぼす影響を検討した。熱履歴は400℃～550℃で最長10,000時間与え、又一部の試験片は一定応力をかけた状態で400℃及び500℃で最長5,000時間の熱履歴を与えた。

2. 供 試 材

供試材は高速実験炉「常陽」炉容器相当材の SUS304 ステンレス鋼の母材及び溶接継手を用いた。炉容器相当母材は「常陽」炉容器材と同じ履歴で製造された SUS304 ステンレス鋼で、そのミルシートを Table 1 に示す。炉容器相当材の溶接継手は実機と同一条件で溶接したものでその溶接施工条件を Table 2 に示す。Fig. 1 には各試験片の形状を示す。引張試験片は平行部径 6 mm, 平行部長さ 42 mm, G.L. 30 mm であり、クリーブ試験片は平行部径 6 mm, G.L. 30 mm である。Fig. 2 に試験片の採取要領を示す。試験片採取位置は板厚中心で、長さ方向をロール方向に平行に取った。溶接継手試験片は長さ方向を溶接線と直角方向に取り、平行部中央に溶接線中心がくるようにした。

3. 試験方法

3.1 熱履歴試験法

熱履歴試験は、照射材料試験室の池田式電気マッフル炉（MFP-300N）6台を使用し実施した。引張試験片及びクリープ試験片の熱履歴は試験片の熱履歴中の表面酸化を防止するためアルゴン雰囲気容器内にて実施した。Fig. 3 に封入容器の概要を示す。ロータリー真空ポンプで容器内を真空引き後アルゴンガスで置換した。この操作を4回以上繰返した後、容器とフランジ間の6φパイプを2箇所を圧着し、フランジ側圧着部を切断し、その切断部をTIG溶接した。又、一部の引張試験片は6連マルチクリープ試験機を使用し、大気中で一定応力を負荷した状態で熱履歴を与えた。なお金相試験片は全て大気中で熱履歴を与えた。各種試験片の熱履歴条件をTable 3 に示す。引張試験片は400℃、450℃、500℃及び550℃の4条件で100hr、300hr、1,000hr、2,000hr、5,000hr及び10,000hr加熱した。又7.8 kg/mm²の一定応力を負荷した状態にて400℃及び500℃で300hr、1,000hr及び5,000hr加熱した。クリープ試験片は500℃で10,000hr加熱した。金相試験片は500℃で100hr、300hr、1,000hr、2,000hr、5,000hr及び10,000hr、又400℃、450℃及び550℃で2,000hr、5,000hr及び10,000hr加熱した。

3.2 引張試験法

室温及び高温引張試験にはインストロン1125型2.5トン引張試験機を用いた。引張試験機は「常陽」サーベイランス確認試験¹⁾の条件に合わせ、室温、400℃及び500℃で行った。高温引張は試験温度に約30分保持したのち行った。引張速度は室温及び高温とも降伏点までは0.1 mm/min (0.24%/min)、降伏点以降は3 mm/min (7.1%/min)とした。又破断伸びはG.L. 30 mm間にボンチしたマーキングを破断後突合せて測定し求めた。一様伸びは便宜上次式により求めた値を採用した。

$$\text{一様伸び} = \text{破断伸び} - \text{チャートから求めた最大荷重通過後の永久伸び}$$

3.3 クリープ破断試験法

クリープ破断試験は東京衡機製単軸クリープ試験機（容量1.5トン）を使用した。伸びはマグネスケールでチャック間距離を測定した。又破断伸びはG.L. 30mmにボンチでマーキングし、破断後突合せて測定し求めた。破断絞りは破断後突合せた状態で90°回転位置の2箇所を測定した。

3.4 金相試験法

熱履歴後の金相試験片について、光学顕微鏡による組織観察を実施した。エッチングは10%過硫酸アンモン溶液中で電解にて行った。写真はオリンパスPNG 2型光学顕微鏡にし100倍及び400倍で撮影した。

4. 試験結果

4.1 熱履歴試験結果

アルゴン雰囲気中で加熱した引張試験片及びクリープ試験片の表面は加熱温度により紫色及び銀白色のテンパーカラーを呈していた。引張及びクリープ試験に際してはこの表面酸化の影響を除くためにエメリー研磨紙により、試験片平行部を研磨し、表面酸化物を除去した。

4.2 引張試験結果

Table 4(a)~(f) に無負荷状態での、又Table 4(g) に応力負荷状態での熱履歴後の引張試験結果をまとめて示す。

4.2.1 引張特性に及ぼす熱履歴の影響

1) 耐力に及ぼす熱履歴の影響

Fig. 4(a)~(c) にそれぞれ室温、400℃及び500℃の耐力に及ぼす熱履歴の影響を示す。母材の場合、室温での耐力には熱履歴の影響は認められなかった。400℃での耐力は550℃、2,000hr~10,000hr 熱履歴により約2 kg/mm² 増加したがその他の熱履歴の影響は認められなかった。又500℃での耐力は500℃及び550℃、2,000hr~10,000hr 熱履歴により時間とともに増加し10,000hrで約5~6 kg/mm² 増加した。

溶接継手の場合、室温及び400℃での耐力は母材の場合とほぼ同じ傾向であり、550℃、10,000hr 熱履歴後400℃での耐力が約2 kg/mm² 増加した。500℃での耐力は550℃、5,000hr以上の熱履歴で増加の傾向を示し、10,000hr 熱履歴では約2~4 kg/mm² 高くなっていた。

Fig. 5(a)~(c) にそれぞれ室温、400℃及び500℃の耐力に及ぼす熱履歴の影響を Larson Miller Parameter (L.M.P. = T(20 + logt)) で整理し示した。母材の場合、室温での耐力には熱履歴の影響は認められないようであった。400℃での耐力はL.M.P. = 19.18 以上で若干増加傾向を示した。500℃での耐力は400℃と同様にL.M.P. = 19.18 以上で増加傾向がみられ、L.M.P. = 19.75 では急激な増加を示していた。

溶接継手の場合、室温及び400℃での耐力は母材と同じ傾向を示していた。500℃の耐力はL.M.P. = 19.50 以上で増加傾向がはっきり認められた。

2) 引張強さに及ぼす熱履歴の影響

Fig.(a)~(c) に引張強さに及ぼす熱履歴の影響を示す。母材の場合、室温の引張強さには熱履歴の影響は認められなかった。400℃及び500℃の引張強さは500℃で5,000hr以上、又550℃で300hr以上の熱履歴で減少の傾向を示し、10,000hrの熱履歴では約2~3 kg/mm²低かった。

溶接継手の場合、室温の引張強さは400℃及び450℃の3,000hr~10,000hr熱履歴により増加の傾向を示し、10,000hrの熱履歴で約3~5 kg/mm²高くなった。しかし500℃及び550℃では熱履歴の影響は認められなかった。400℃の引張強さは400℃の1,000hr~10,000hr熱履歴により、増加の傾向を示し、10,000hrの熱履歴で約3 kg/mm²増加した。又450℃の1,000hr熱履歴で一旦増加し、10,000hr熱履歴では受入材とほぼ等しかった。一方500℃及び550℃熱履歴により低下の傾向を示し、10,000hrの長時間加熱では約3~5 kg/mm²低くなっていた。500℃の引張強さは400℃、10,000hr熱履歴で約2 kg/mm²高くなっていた。400℃、100hr~5,000hr及び450℃の熱履歴の影響は認められなかった。500℃及び550℃熱履歴により引張強さは短時間側で低下したが、さらに長時間加熱してもそれ以上の低下はみられなかった。

Fig. 5(a)~(c) に引張強さに及ぼす熱履歴の影響をL.M.P.で整理し示した。母材の場合、室温での引張強さには熱履歴の影響は認められないが400℃及び500℃の引張強さにはL.M.P. = 18.32以上で減少傾向を示し、18.32~19.75で約2~3 kg/mm²低下した。

溶接継手の場合、室温での引張強さはL.M.P. = 15.13で一旦増加の傾向を示し、15.95~16.63で最も高くなり、18.01以上では受入材とほぼ同じであった。400℃の引張強さはL.M.P. = 15.48~17.38で若干増加の傾向がみられるが、17.78以上では逆に減少していた。500℃の引張強さは17.75で減少するが、L.M.P. 17.75以上ではそれ以上の低下は認められなかった。

3) 一様伸びに及ぼす熱履歴の影響

Fig. 6(a)~(c) に一様伸びに及ぼす熱履歴の影響を示す。母材の場合、400℃~500℃の10,000hrまでの熱履歴では室温引張の一様伸びに対する影響は明らかでないが、550℃の熱履歴では5,000hr以上で約9~10%に低下した。400℃引張の一様伸びは400℃及び450℃の2,000hr以上の熱履歴で減少し、10,000hr熱履歴で約34%であった。又500℃及び550℃の熱履歴時間が長くなるに従い一様伸びが減少し、10,000hrでそれぞれ約30%及び27%であった。500℃引張の一様伸びに対し、400℃及び450℃の熱履歴の影響は明らかでなかった。500℃及び550℃熱履歴時間が長くなるに従い一様伸びは減少し、10,000hrでそれぞれ約30%及び27%であった。

溶接継手の場合、室温引張の一様伸びは400℃の5,000hr熱履歴で一旦増加したが、10,000hrでは受入ままの値と変らなかった。450℃及び500℃熱履歴では2,000hrで最も低下し、10,000hrで受入れままの値まで回復した。550℃熱履歴では時間に関係なく一様伸びは約11%低下した。400℃引張の一様伸びに対し、400℃、10,000hrまでの熱履歴の影響は明らかでなかった。450℃、500℃及び550℃熱履歴では時間が長くなるに従い減少し、10,000hrでそれぞれ約18%、13%及び12%であった。500℃引張では、400℃熱履歴及び450℃、5,000hrまでの熱履歴の一

様伸びに対する影響は明らかでなかった。しかし 450°C, 10,000 hr 熱履歴で約14%に減少した。又 500°C 及び 550°C 熱履歴では 2,000hr まで時間とともに減少し、以後 10,000 hr までその変化はわずかであり、10,000hr でそれぞれ約 14 % 及び 12 % であった。

Fig. 7(a)~(c) に一様伸びに及ぼす熱履歴の影響を L.M.P. で整理し示す。母材の場合、室温、400°C 及び 500°C の一様伸びは L.M.P. = 19.18 までははっきりした熱履歴の影響は認められないが、19.50 以上では著しい減少傾向を示した。

溶接継手の場合、室温引張の一様伸びはバラツキがあり、L.M.P. = 18.55 まではその影響がはっきりしないが、18.93 以上では明らかに減少した。又 400°C 及び 500°C 引張の一様伸びはそれぞれ 17.13 及び 17.78 以上で L.M.P. の増加とともに緩やかではあるが減少する傾向を示した。

4) 破断伸びに及ぼす熱履歴の影響

Fig. 8(a)~(c) に破断伸びに及ぼす熱履歴の影響を示す。母材の場合、室温引張の破断伸びに対し、400°C 及び 450°C 熱履歴の影響は明らかでないが、500°C 及び 550°C 熱履歴ではそれぞれ 10,000hr で約 69% 及び 60% に減少した。400°C 引張の破断伸びは 400°C, 450°C, 500°C 及び 550°C の熱履歴で時間が長くなるにつれて減少し、10,000hr 熱履歴でそれぞれ約 42%, 42%, 36% 及び 34% に減少した。500°C 引張の破断伸びに対し、400°C 及び 450°C の熱履歴の影響は認められなかった。500°C 及び 550°C 熱履歴では 2,000 hr を越えると時間とともに減少し、10,000 hr でそれぞれ約 36% 及び 34% であった。

溶接継手の場合、室温引張の破断伸びに対し、400°C 熱履歴の影響は認められなかった。450°C 及び 500°C 熱履歴では 2,000 hr で最も低くそれぞれ約 38% 及び 35% であったが、10,000hr では受入ままの値まで回復していた。550°C 熱履歴では時間とともに低下し 10,000hr で約 30% であった。400°C 引張の破断伸びに対し、400°C 熱履歴の影響は明らかでなかった。450°C 熱履歴では時間とともに減少し 10,000hr 熱履歴で約 20% であった。500°C 熱履歴では 300hr 以上で又 550°C 熱履歴では 300hr 以上で又 550°C 熱履歴では 100hr ~ 1,000 hr で時間によって影響は明らかでなかったが約 14 ~ 22 % に減少した。500°C 引張の破断伸びに対し、400°C 熱履歴の影響は明らかでなかった。450°C 熱履歴では 5,000 hr まで影響は認められないが、10,000 hr で約 16 % に減少した。500°C 熱履歴では 1,000 hr 以上で低下し、2,000 hr ~ 10,000 hr で約 15 ~ 17% に減少した。550°C 熱履歴では 100hr 以上で低下し、1,000 hr ~ 10,000 hr で約 14 ~ 15% に減少した。

Fig. 9(a)~(c) に破断伸びに及ぼす熱履歴の影響を L.M.P. で整理し示した。母材の場合、室温の破断伸びは L.M.P. = 17.75 で減少し 19.18 まではほぼ同じ値を示すが、19.50 以上では著しく減少した。400°C の破断伸びは L.M.P. = 17.15 以上で L.M.P. の増加とともに減少する傾向がみられ、特に L.M.P. = 19.50 以上で著しく減少した。500°C の破断伸びは L.M.P. = 18.30 以上で減少し、特に 19.50 以上で著しく減少した。

溶接継手の場合、室温引張の破断伸びは L.M.P. = 18.55 までは熱履歴の影響は明らかでないが、18.90 以上では減少傾向を示した。又 400°C 引張の破断伸びは 15.5 で一旦減少し約 17 まで変らな

いが、約 17.13 以上でさらに減少した。500℃ 引張の破断伸びは約 17.13 以上で L.M.P. の増加とともに緩やかに減少した。

5) 破断絞りに及ぼす熱履歴の影響

Fig. 10 (a)~(c) に破断絞りに及ぼす熱履歴の影響を示す。母材の場合、室温引張の破断絞りに対し、400℃ 熱履歴の影響は認められなかった。450℃ 熱履歴では 5,000 hr を越えると低下し、10,000 hr で約 78% であった。500℃ 熱履歴では 300hr を越えると時間とともに低下し 10,000hr で約 70% であった。550℃ 熱履歴では 1,000 hr 以上で時間とともに低下し 10,000hr で約 66% であった。400℃ 引張の破断絞りに対し、400℃ 熱履歴の影響は認められなかった。450℃ 熱履歴では 5,000 hr 以上で低下し 10,000 hr で約 68% であった。500℃ 及び 550℃ 熱履歴材は時間とともに減少し 10,000hr でそれぞれ約 64% 及び 60% であった。500℃ 引張の破断絞りは 400℃ 及び 450℃ の熱履歴の影響は明らかでなかった。500℃ 及び 550℃ 熱履歴材は時間とともに減少し 10,000 hr でそれぞれ約 60% 及び 61% であった。

溶接継手の場合、室温の引張破断絞りはバラツキが大きくその影響は明らかでないが、いずれも 20% 以上の絞り値であった。400℃ 引張の破断絞りはバラツキが大きくその影響は明らかでないが、550℃ の 10,000 hr 熱履歴では低下するようであった。500℃ 引張の破断絞りはバラツキが大きくその傾向は明らかでないが、450℃、500℃ 及び 550℃ で 10,000 hr 熱履歴では絞り値がそれぞれ約 39%、38% 及び 41% に低下するようであった。

Fig. 11 (a)~(c) に破断絞りに及ぼす熱履歴の影響を L.M.P. で整理し示した。母材の場合、室温及び 400℃ の破断絞りは L.M.P. = 17.35 以上で、500℃ の破断絞りは 17.00 以上で L.M.P. の増加とともに減少した。

溶接継手の場合、各試験温度ともバラツキが大きく傾向が明らかでないが、実験範囲の最大 L.M.P. (19.75) では減少しているようであった。

4.2.2 引張特性に及ぼす応力負荷熱履歴の影響

Fig. 12(a) 及び 12(b) に母材及び溶接継手の 400℃、500℃ での引張特性に及ぼす応力負荷熱履歴の影響を、無負荷熱履歴試験結果と合わせて示す。

1) 耐力に及ぼす応力負荷熱履歴の影響

母材の場合、400℃ の耐力は 400℃、1,000 hr 及び 5,000 hr 並びに 500℃、5,000 hr 熱履歴で応力負荷の影響が認められなかったが、500℃、1,000 hr 熱履歴では応力負荷材が約 2.5 kg/mm² 高くなった。500℃ の耐力は 400℃、5,000 hr 熱履歴で応力負荷材が約 1 kg/mm² 低くなったが、500℃、1,000 hr 及び 5,000 hr 熱履歴では逆に約 1~2 kg/mm² 高くなった。

溶接継手の場合、400℃ の耐力は 400℃、1,000 hr 熱履歴では応力負荷の影響が認められなかったが、500℃、1,000 hr 及び 5,000 hr 熱履歴では応力負荷材が約 1~1.5 kg/mm² 高くなった。500℃ の耐力は 500℃、1,000 hr 及び 5,000 hr 熱履歴で応力負荷の影響は認められなかった。

2) 引張強さに及ぼす応力負荷熱履歴の影響

本熱履歴条件範囲では 400°C, 500°C での母材及び溶接継手の引張強さに対し、応力負荷の影響は認められないようであった。

3) 一様伸びに及ぼす応力負荷熱履歴の影響

母材の場合、400°C の一様伸びは 400°C, 1,000 hr 及び 500°C, 1,000 hr 熱履歴で応力負荷材が約 1~2% 低くなったが、400°C, 5,000 hr 及び 500°C, 5,000 hr 熱履歴では逆に 1% ほど高くなった。500°C の一様伸びは応力負荷材が 400°C, 5,000 hr 熱履歴で約 2%, 500°C, 1,000 hr 及び 5,000 hr 熱履歴で約 1% 低くなった。

溶接継手の場合、400°C の一様伸びは応力負荷材が 400°C × 1,000 hr, 500°C × 1,000 hr 及び 500°C × 5,000 hr 熱履歴でそれぞれ約 2%, 0.5% 及び 1% 低くなった。500°C の一様伸びも同様に応力負荷材が 500°C × 1,000 hr 及び 500°C × 5,000 hr 熱履歴でそれぞれ約 2.5% 及び 0.5% 低くなった。

4) 破断伸びに及ぼす応力負荷熱履歴の影響

母材の場合、400°C の破断伸びは応力負荷材が 400°C × 1,000 hr, 500°C × 1,000 hr 熱履歴でそれぞれ約 15% 及び 3% 低くなったが、400°C × 5,000 hr, 500°C × 5,000 hr 熱履歴では約 2% 高くなった。又 500°C の破断伸びは 400°C × 5,000 hr, 500°C × 5,000 hr 熱履歴で約 0.5% 低くなったが、500°C × 1,000 hr では逆に約 15% 高くなった。

溶接継手の場合、400°C の破断伸びは応力負荷材が 400°C × 1,000 hr, 500°C × 1,000 hr 及び 500°C × 5,000 hr 熱履歴でそれぞれ約 2%, 3.5% 及び 2.5% 低くなった。又 500°C の破断伸びは 500°C × 1,000 hr 熱履歴で約 2% 低くなったが、500°C × 5,000 hr ではほぼ同じであった。

5) 破断絞りに及ぼす応力負荷熱履歴の影響

母材の場合、400°C の破断絞りは応力負荷材が、400°C × 5,000 hr, 500°C × 1,000 hr 及び 500°C × 5,000 hr 熱履歴でそれぞれ約 3%, 8%, 2% 低くなった。400°C × 1,000 hr では応力負荷の影響は認められなかった。又 500°C の破断絞りは 400°C × 1,000 hr, 500°C × 5,000 hr 熱履歴でそれぞれ約 2% 及び 6% 低くなったが、500°C × 1,000 hr では逆に約 15% 高くなった。

溶接継手の場合、400°C の破断絞りは応力負荷が 500°C × 1,000 hr, 500°C × 5,000 hr 熱履歴でそれぞれ約 10% 及び 5.5% 低くなった。又 500°C の破断絞りは 500°C × 1,000 hr, 500°C × 5,000 hr でそれぞれ約 7% 及び 1% 低くなった。

4.3 クリープ破断試験結果

Table 5 に試験結果をまとめて示す。母材及び溶接継手のクリープ特性に対する熱履歴の影響として以下の点が明らかになった。

4.3.1 クリープ破断強度に及ぼす熱履歴の影響

Fig. 13に 500°C のクリープ破断強度に及ぼす熱履歴の影響を示す。母材の場合、熱履歴材のクリープ破断強度は受入材に比較して短時間側で若干低下する傾向にあるが、長時間側の約 5,000 hr ではほぼ同じであった。

溶接継手の場合、熱履歴材のクリープ破断強度は受入材とほぼ同一直線上にあり熱履歴の影響は認められなかった。

4.3.2 最小クリープ速度に及ぼす熱履歴の影響

Fig. 14に 500°C の最小クリープ速度に及ぼす熱履歴の影響を示す。母材の場合、熱履歴材の 500°C における最小クリープ速度は受入材に比較して高応力側で約 5 倍速いが低応力長時間側ではほぼ等しかった。

溶接継手の場合、熱履歴材の最小クリープ速度は受入材とほぼ同一直線上にあり、熱履歴の影響は認められなかった。

4.3.3 クリープ破断伸びに及ぼす熱履歴の影響

Fig. 15に 500°C のクリープ破断伸びに及ぼす熱履歴の影響を示す。母材の場合、熱履歴材の 500°C におけるクリープ破断伸びは受入材と同様に時間が長くなるに従い減少する傾向にあり、実験範囲の最長時間 (3555.1 hr) で 27.4% であった。また受入材に比較して実験範囲内で約 3 ~ 7% 高かった。

溶接継手の場合、熱履歴材のクリープ破断伸びは受入材とほぼ同じであると同時に時間が長くなるに従い減少する傾向にあり、実験範囲の最長時間 (1742.6 hr) において約 12% であった。

4.3.4 クリープ破断絞りに及ぼす熱履歴の影響

Fig. 16に 500°C のクリープ破断絞りに及ぼす熱履歴の影響を示す。母材の場合、熱履歴材のクリープ破断絞りは受入材と同様に時間が長くなるに従い減少する傾向にあり、実験範囲の最長時間 (3555.1 hr) で 36% であった。又、受入材に比較して実験範囲内で約 5 ~ 7% 高かった。

溶接継手の場合、熱履歴材のクリープ破断絞りは受入材が時間が長くなるにつれて減少するのに対し、実験範囲内で時間に関係なく約 23 ~ 35% であった。

4.4 金相試験結果

Fig. 17に長時間加熱後の母材の金相写真を示す。400°C 及び 450°C で 10,000 hr 加熱しても炭化物の析出は認められないが、500°C で 1,000 hr 以上加熱すると粒界に炭化物の析出がみられ、その析出量は加熱時間が長くなるにつれて多くなる傾向にあった。又 550°C では何時間の熱履歴から析出物が認められるか明らかではないが、2,000 hr 熱履歴材では既に粒内、粒界に炭化物の

析出物が認められた。Fig.18に溶接継手部の金相写真を示す。溶接継手部では受入まま材で溶接多重熱サイクルに伴ない炭化物の析出が認められた。この析出物は 400℃ ~ 550℃ で加熱時間及び加熱温度が高くなるにつれて粗大化しているようであった。これら析出物と強度の関係については透過電顕による検討を別途進めており、詳しく報告する予定である。

5. 試験結果の考察

5.1 引張試験結果の考察

5.1.1 引張特性に及ぼす長時間熱履歴の影響

Fig. 4～Fig. 11に引張特性に及ぼす熱履歴の影響を示したが、母材及び溶接継手とも長時間熱履歴でL.M.P.が大きくなるにつれて耐力は増大し、引張強さ、一様伸び、破断伸び及び破断絞りは減少する傾向にあった。

V.K.Sikka⁷⁾等はSUS 304鋼を593°C、10,000 hrの熱履歴で593°Cの耐力が増加し、100hr以上の熱履歴で一様伸び、破断伸び及び破断絞りが減少することを報告している。又一様伸びは482°C以上の高温で長時間加熱することにより減少すると報告している。彼等によると、耐力の増加は粒内炭化物析出及びその成長と関係し、一様伸び、破断伸び及び破断絞りは粒界炭化物析出及びその成長と関係している。本試験結果の母材の場合、耐力に及ぼす熱履歴の影響は500°C、2,000 hr以上で増加傾向が認められ、引張強さ、一様伸び、破断伸び及び破断絞りは400°C、450°C熱履歴では顕著な影響を受けないが、500°C以上の長時間加熱により、減少傾向を示した。これらはFig. 17に示した金相試験結果より、それぞれ粒内及び粒界炭化物析出と対応しており、Sikka等の報告と一致しているようである。

溶接金属部は400°C～550°Cに長時間加熱されると固溶Cのほとんどが $M_{23}C_6$ として δ フェライト/オーステナイト境界等に析出すると考えられている^{8), 9), 10)}。本試験結果の溶接継手は、400°C～550°C加熱で析出物が δ フェライト/オーステナイト境界及び δ フェライト内に認められ、その析出物は加熱温度が高いほど粗大化しているようであった。溶接継手部の熱履歴による耐力の増加、一様伸び、破断伸び及び破断絞りの減少はこれら析出物の影響によるものと考えられる。

5.1.2 参考データとの比較

Fig. 19～Fig. 23に500°C試験での引張特性に及ぼす熱履歴の影響をほぼ同一熱履歴温度及び試験温度の参考データJMTR照射70M-60P²⁾及び米国FFTF用CRE 308溶接金属¹¹⁾と比較して示す。

母材の場合、70M-60Pの耐力比(熱履歴後の耐力/熱履歴前の耐力)はL.M.P.=19.9で熱履歴前に比較し減少しているが、本試験においてもL.M.P.=17.78～18.11で減少傾向が認められる。しかしその点を除けば増加傾向にあった。特に19.75では急激な増加を示した。引張強さ比、破断伸び比及び破断絞り比(熱履歴後の特性/熱履歴前の特性)はL.M.P.=17.38～17.78以上で低下し、19.5～19.9では60Pのデータとほぼ同じ値を示した。

溶接継手の場合、CRE 308の耐力比はL.M.P.=17.35～18.9で増加している。本試験結果は19.5以下では熱履歴前とほぼ同じ値であるが、19.5以上で急増した。引張強さ比はL.M.P.=18.15

以下でCRE 308 とほぼ等しかったが、L.M.P.=18.5以上ではCRE材の方が若干高いようである。一様伸び比及び破断伸び比はL.M.P.の増加とともに両者とも低下するが、L.M.P.=18.5以上でCRE 308の低下が大きいようである。本実験材は低下の程度は小さいが、L.M.P.=19.75まで飽和の傾向が認められず、「常陽」の炉寿命末期（設計条件：550℃×131,500 hr（L.M.P.=20.67）
運転条件：500℃×131,500 hr（L.M.P.=19.42））における性質を確認するためには、さらに長時間の熱履歴試験が必要である。本実験の破断絞り比はバラツキが大きくCRE 308との比較は必ずしも出来ないが、最も低い値でもCRE 308のレベル以上であった。

5.2 クリープ破断試験結果の考察

5.2.1 クリープ破断特性に及ぼす熱履歴の影響

Fig. 13～Fig. 16 に示したように500℃試験の母材において熱履歴材は受入材に比較しクリープ破断強度が短時間側で低下し、最小クリープ速度が高応力側で速くなる傾向にあった。500℃試験の溶接継手においては熱履歴材と受入材とではほぼ同等のクリープ破断特性を示し、熱履歴の影響がみられなかった。Fig. 24にクリープ破断寿命比（熱履歴後の寿命／熱履歴前の寿命）を参考材³⁾60Pの結果と比較して示す。本実験材では破断時間に関係なく寿命比はほぼ1であった。60Pでは580℃熱履歴温度以下の500℃及び550℃でクリープ試験されたものは破断時間が短い場合に寿命比が低く、破断時間が長くなるにつれて寿命比の低下は緩和される傾向にあった。又熱履歴温度より高い600℃でのクリープ試験では寿命比はほぼ1であった。これらのことから母材の短時間側で熱履歴材のクリープ破断強度が低く、かつクリープ速度が速いのは熱履歴による材質の変化によるものと考えられるが、長時間側ではクリープ試験中に生じる組織変化との重畳効果により、その影響が緩和されたものと考えられる。

5.2.2 設計基準データとの比較

Fig. 25に本報告結果を「常陽」ナトリウム構造設計指針強度の基準値¹²⁾及びASME Code Case 1592による設計曲線値と比較して示す。母材及び溶接継手は受入材及び熱履歴材とも500℃でのクリープ破断強度はASMEの設計曲線及び「常陽」ナトリウム構造設計指針の基準値を上回っていた。

6. あ と が き

本報では、「常陽」サーベイランス試験結果を正しく評価するため、一連のバックアップ試験の一環として、「常陽」炉容器相当材を用いて、熱履歴が引張特性及びクリープ特性に及ぼす影響を検討した。その結果、引張特性については母材及び溶接継手とも 500℃ 以上の長時間加熱で耐力が増加し、引張強さ、一様伸び、破断伸び及び破断絞りが減少することがわかった。又 500℃ 及び 550℃、10,000hr 加熱でもその影響には飽和傾向が認められず、「常陽」炉寿命末期（設計条件：550℃×131,500hr (L.M.P.=20.67)、運転条件：500℃×131,500hr (L.M.P.=19.42)）の性質を推定する上で、さらに長時間側の熱履歴試験を実施する必要がある。

熱履歴温度と等しい温度でのクリープ試験で母材のクリープ破断強度は短時間側で若干低下する傾向にあったが、長時間側では熱履歴の影響がほとんど認められなかった。又 500℃ 試験の溶接継手においては時間に関係なく熱履歴の影響が認められなかった。なお母材及び溶接継手のクリープ破断強度は ASME の設計曲線及び「常陽」ナトリウム構造設計指針の基準値を上回っていることが確認出来た。

7. 謝 辞

本試験を実施するにあたり、試験を担当された元照射材料試験室現三菱重工業高砂研究所重隆司氏及び実験炉部古平氏をはじめとする関係各位の方に感謝の意を表します。

8. 参 考 文 献

- 1) 鈴木和久, 他 : 「常陽」サーベイランス確認試験 第1報炉容器材の短時間強度試験, 動燃団報告, ZN 941 76-130, (1976)
- 2) 鈴木和久, 他 : 高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後試験 第1報短時間強度試験, 動燃団報告, SN 941 77-139, (1977)
- 3) 鈴木和久, 他 : 高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後試験 第2報 長時間強度試験, 動燃団報告, SN 941 79-21, (1979)
- 4) 鈴木和久, 他 : 高速炉用構造材料及び溶接継手の照射後疲れ試験, 動燃団報告, SN 941 79-10, (1979)
- 5) 鈴木和久, 他 : 「常陽」サーベイランスバックアップ試験 第1報 JMTR照射炉容器及び溶接継手の短時間強度試験, 動燃団報告, SN 941 79-06, (1979)
- 6) 榊原瑞夫, 他 : 「常陽」サーベイランスバックアップ試験, 第2報 JMTR照射炉容器材及び溶接継手の高温疲れ並びにクリープ破断試験, 動燃団報告, SN 941 80-118, (1980)
- 7) V.K. Sikka et al. : Effect of Thermal Aging on Tensile and Creep Properties of Types 304 and 316 Stainless Steels, CONF751106, (1975)
- 8) J.E. Sprviell, W.E. Fett and C.D. Lundin : Welding Journal (1977) 289-S
- 9) 日本溶接協会 FRW小委員会編 : 「高速炉構造用ステンレス鋼の溶接施工に関する研究(II)」, (1972) P.88
- 10) 稲垣道夫, 他 : 鉄と鋼, Vol 65 (1979) 2047.
- 11) A.L. Ward : Austenitic Stainless Steel Weld Material - A Data Compilation and Review, HEDL TME 74-25, (1974)
- 12) 「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針, 動燃団報告, N252 71-01 (1971)

Table 1 Mill sheet of test specimen

	Chemical Composition (w/o)									Mechanical Properties				
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	B	Tensile				Hardness (H _B)
										YS (kg/mm ²)	UTS (kg/mm ²)	Elonga- tion (%)	R.A. (%)	
Spec.	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.03	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00	≤0.25	—	>21.0	≥53.0	≥40.0	—	≤187
Mill Analysis	0.06	0.81	1.54	0.028	0.005	8.90	18.70	0.15	—	23	59	65	72	145
Check Analysis	0.06	0.81	1.51	0.027	0.003	8.98	18.72	0.15	0.0004					

Table 2 Welding procedure

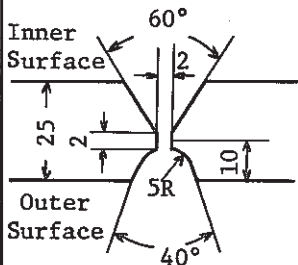
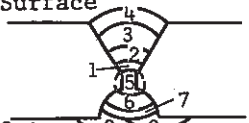
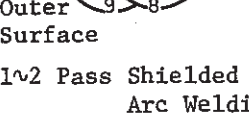
Edge Preparation		Welding Procedure										
<p>Edge Preparation</p> 	<p>Inner Surface</p> 	Welding Process	Welding Material	Pass	Rod Dia. (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Heat Input (J/cm)			
	<p>Outer Surface</p> 	Shielded Metal Arc Welding	WEL 308	1~2	4.0	150 ~160	25	180 ~200	11800 ~12600			
	<p>1~2 Pass Shielded Metal Arc Welding</p>	Submerged Arc Welding	US-308(Wire) PFS-1 (Flux)	3~9	4.0	440 ~480	32	~320	26400 ~28500			
	<p>3~9 Pass Submerged Arc Welding</p>											
	<p>Inner Pass Temperature <180°C</p>	Chemical Composition of Weld Metal (w/o)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	Cu
		0.06	0.69	1.89	0.028	0.010	10.07	20.61	0.23	—	—	—

Table 3 Aging conditions of specimens

Specimen	Aging Stress (kg/mm ²)	Aging Temp. (°C)	Aging time (h)					
			100	300	1,000	2,000	5,000	10,000
Tensile Specimen	—	400	○	○	○	○	○	○
		450	○	○	○	○	○	○
		500	○	○	○	○	○	○
		550	○	○	○	○	○	○
	7.8	400	/	○	○	/	○	/
		500	/	○	○	/	○	/
Creep Specimen		500	/	/	/	/	○	
Metallurgical Specimen	—	400	/	/	/	○	○	○
		450	/	/	/	○	○	○
		500	○	○	○	○	○	○
		550	/	/	/	○	○	○

○ : Aging condition
 / : Untest

Table 4(a) Tensile properties of sus 304 base metal aged and tested at room temperature.

Aging Time (hr)	Aging Temp. (°C)	Specimen Number	Tensile Properties					Fracture Location
			Yield Strength* (kg/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (kg/mm ²)	Uniform Elongation (%)	Ruptured Elongation (%)	Reduction of Area (%)	
0	—	Z8-01	21.8	64.4	64	72	79	A
		02	21.6	66.1	64	76	77	A
		07	21.7	65.1	65	77	79	A
		08	21.7	67.4	61	71	77	A
		09	22.7	66.9	61	71	80	A
100	400	Z7-01	24.3	63.8	60	75	81	A
		02	25.4	64.8	60	74	80	A
	450	14	22.5	63.2	64	78	81	A
		15	24.6	64.5	62	75	80	A
	500	27	24.2	64.4	62	76	81	A
		28	24.1	64.1	60	75	80	A
300	400	Z7-07	25.5	63.9	62	77	90	A
		08	23.5	64.1	62	78	80	A
	450	1A	23.4	64.3	62	78	80	A
		1B	24.5	63.9	63	77	81	A
	500	2D	23.3	64.5	62	76	76	A
		2E	23.9	63.5	62	76	76	A
1,000	400	Z7-0D	22.7	65.0	64	77	82	A
		0E	22.4	65.5	62	75	80	A
	450	1G	22.6	64.6	63	73	81	A
		1H	23.1	64.7	58	72	81	A
	500	2K	22.1	63.5	59	70	82	A
		2L	22.3	65.7	59	68	72	A
	550	3N	22.4	64.5	59	71	79	A
		3P	22.9	64.4	60	74	75	A
2,000	400	Z7-0K	23.2	65.6	62	74	79	A
		1N	23.3	64.4	62	76	82	A
	450	1P	25.3	66.4	62	75	81	A
		2S	24.1	64.4	62	72	71	A
	500	2T	25.3	63.7	58	73	75	A
		3V	22.9	63.7	59	70	71	A
5,000	400	Z7-0S	24.4	64.4	63	77	82	A
		0T	23.3	64.4	64	77	82	A
	450	1V	23.8	64.7	65	79	79	A
		1W	24.7	65.1	62	77	82	A
	500	34	23.4	64.7	59	68	73	A
		35	21.7	64.9	65	74	77	A
	550	41	22.7	65.4	54	65	66	A
		42	23.3	66.0	56	67	68	A
10,000	400	Z7-0Y	24.3	64.5	59	71	83	A
		0Z	23.7	64.1	60	73	82	A
	450	21	24.0	65.4	60	72	78	A
		22	23.4	61.4	64	74	79	A
	500	2Y	22.7	65.4	60	68	71	A
		2Z	22.8	65.8	60	69	70	A
550	47	24.0	65.2	52	60	64	A	
	48	24.7	65.9	53	60	67	A	

* 0.2% offset

Table 4(b) Tensile properties of sus 304 welded joint aged and tested at room temperature.

Aging Time (hr)	Aging Temp. (°C)	Specimen Number	Tensile Properties					Fracture Location
			Yield Strength* (kg/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (kg/mm ²)	Uniform Elongation (%)	Ruptured Elongation (%)	Reduction of Area (%)	
0	—	Z8-0H	31.2	64.6	34	36	45	A
		0J	31.1	65.1	37	38	44	A
		0C	30.5	66.8	35	39	46	A
		0B	31.3	68.4	40	45	46	A
100	400	Z7-4D	29.7	66.0	37	39	41	A
		4E	26.8	64.1	34	35	35	A
	450	5G	29.9	65.6	55	64	81	C
		5H	29.2	67.5	49	58	81	C
	500	6K	28.7	64.9	57	67	81	C
		6L	27.4	65.2	55	64	81	C
300	400	Z7-4K	31.0	67.5	37	40	44	A
		4L	33.2	68.0	40	42	46	A
	450	5N	29.8	69.3	—	—	81	C
		5P	30.7	69.7	44	47	32	A
	500	6S	29.2	65.8	29	39	77	C
		6T	31.9	66.6	36	40	47	A
	550	7V	28.0	63.8	30	33	41	A
		7W	29.8	65.4	34	37	43	C
1,000	400	Z7-4S	32.0	69.9	40	44	42	A
		4T	32.2	68.3	37	41	48	A
	450	5V	32.7	71.0	34	37	35	A
		5W	29.0	69.0	31	43	83	C
	500	6Y	30.9	67.4	29	36	49	A
		6Z	31.3	66.9	34	38	46	A
	550	81	30.3	65.5	22	30	56	A
		82	29.9	67.1	29	37	40	A
2,000	400	Z7-4Y	30.5	66.4	37	43	49	A
		4Z	31.9	69.9	41	45	54	A
	450	61	30.4	68.1	32	41	41	A
		62	31.5	69.1	28	36	36	A
	500	74	29.2	66.4	27	35	35	A
		75	29.2	66.4	31	35	48	A
	550	87	31.1	66.1	29	32	37	A
		88	30.9	66.7	30	31	34	A
5,000	400	Z7-54	31.1	69.9	43	43	36	A
		55	31.2	71.0	43	43	41	A
	450	67	29.6	70.0	34	44	81	C
		68	30.6	69.5	38	43	37	A
	500	7G	30.0	67.4	32	34	46	A
		7H	29.1	66.4	34	36	39	A
	550	8E	31.1	64.2	25	27	38	A
10,000	400	Z7-5A	31.7	69.3	32	35	47	A
		5B	30.9	70.2	37	42	49	A
	450	6D	30.2	69.9	40	42	38	A
		6E	30.7	70.0	39	42	38	A
	500	7F	28.2	65.2	39	42	49	A
		7B	28.8	66.2	37	39	42	A
	550	8K	31.5	66.2	28	30	32	A
		8L	31.5	66.4	29	30	35	A

* 0.2% offset

Table 4(c) Tensile properties of sus 304 base metal aged and tested at 400°C

Aging Time (hr)	Aging Temp. (°C)	Specimen Number	Tensile Properties					Fracture Location
			Yield Strength* (kg/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (kg/mm ²)	Uniform Elongation (%)	Ruptured Elongation (%)	Reduction of Area (%)	
0	—	Z8-03	16.8	45.4	36	47	73	A
		04	16.4	45.7	39	48	73	A
		0A	14.6	45.0	38	46	72	A
		2K	13.4	45.0	37	45	72	A
		2L	14.5	44.3	36	45	73	A
100	400	Z7-03	17.0	45.6	36	46	73	A
		04	15.3	45.6	37	48	75	A
	450	16	16.4	45.8	37	48	71	A
		17	16.1	45.8	36	46	71	A
	500	29	15.4	45.7	39	48	73	A
		2A	16.0	45.1	37	47	80	A
	550	D0-03	14.0	43.8	37	46	70	B
		D0-04	13.3	44.9	33	41	66	A
300	550	Z7-3J	15.3	44.1	35	42	65	A
		3K	15.2	44.1	32	39	65	A
1,000	400	Z7-0G	15.1	45.9	37	45	72	A
		1J	15.9	46.4	37	47	76	A
	450	1K	15.4	45.6	41	48	72	C
		D0-07	13.2	44.3	35	42	69	A
	500	D0-08	13.1	44.7	36	44	69	A
		Z7-3R	16.0	43.3	32	39	58	A
	550	3S	15.0	43.3	34	42	69	A
		400	Z7-0M	15.6	46.3	37	42	71
0N	15.2		46.1	39	49	67	B	
2,000	450	1R	15.7	45.6	37	47	75	A
		1S	17.3	46.4	32	41	72	A
	500	2U	15.2	44.6	32	39	64	A
		3X	16.9	44.3	32	40	64	A
	550	3Y	16.5	43.9	35	44	65	A
5,000	400	Z7-0U	16.1	46.2	34	42	73	A
		0V	16.3	46.4	35	44	73	A
	450	1X	15.3	45.7	37	45	73	A
		1Y	16.0	46.6	36	43	66	A
	500	36	14.9	42.3	30	36	63	A
		37	15.0	43.1	31	38	63	A
	550	43	17.1	43.2	28	35	62	A
		44	17.2	43.9	30	37	61	A
10,000	400	Z7-10	15.9	46.1	35	43	75	A
		11	15.2	46.5	33	43	73	A
	450	23	15.2	46.0	35	43	71	A
		24	15.7	46.2	34	42	66	A
	500	30	15.3	42.5	22	29	61	C
		31	15.7	43.6	30	37	64	A
	550	4A	15.9	42.0	29	36	59	A
		49	17.9	43.2	25	32	61	A

* 0.2% offset

Table 4(d) Tensile properties of sus 304 welded joint aged ant tested at 400°C

Aging Time (hr)	Aging Temp. (°C)	Specimen Number	Tensile Properties					Fracture Location
			Yield Strength* (kg/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (kg/mm ²)	Uniform Elongation (%)	Ruptured Elongation (%)	Reduction of Area (%)	
0	—	Z8-0D	20.9	47.5	24	29	57	A
		0E	21.0	47.3	23	31	61	A
		0K	20.7	47.0	23	28	45	A
		0L	22.0	47.5	22	27	49	A
		2F	21.4	46.8	22	25	48	A
100	400	Z7-4F	23.7	49.1	14	23	71	C
		4G	22.1	48.5	13	22	69	C
	450	5J	21.5	47.4	9	17	72	C
		5K	21.7	47.4	9	18	75	C
	500	E0-03	20.7	49.0	24	28	49	A
		04	22.0	47.7	18	21	37	A
	550	Z7-63	21.2	43.0	16	17	43	A
		64	20.6	43.6	17	20	41	A
300	500	Z7-6U	22.4	47.4	15	18	38	A
		6V	22.1	48.2	15	18	44	A
	550	7X	21.8	42.7	15	18	39	A
		7Y	21.6	42.5	14	18	42	A
1,000	400	Z7-4U	22.6	49.2	23	27	41	A
		4V	23.5	48.6	17	21	43	A
	450	5X	22.4	49.1	23	26	46	A
		5Y	21.3	48.0	15	24	44	C
	500	70	21.0	44.1	18	22	45	A
		E0-05	20.7	44.1	15	18	40	A
	550	Z7-83	21.2	43.8	17	21	46	A
		84	19.9	42.5	17	21	41	A
2,000	400	Z7-50	22.1	49.5	9	18	80	C
		51	23.3	50.1	21	25	46	A
	450	63	21.4	47.7	8	17	72	C
		64	21.8	49.1	11	20	73	C
	500	76	21.3	43.5	15	18	42	A
		77	21.2	44.1	13	17	51	A
	550	89	22.2	42.4	13	16	47	A
		8A	21.5	43.1	14	17	43	A
5,000	400	Z7-56	21.6	48.7	10	19	68	C
		69	21.9	48.8	19	22	41	A
	450	6A	22.2	48.3	15	18	43	A
		7J	21.5	43.0	14	18	40	A
	500	7K	20.8	43.5	15	19	43	A
		8F	23.4	44.3	13	15	41	A
550	8G	22.9	44.1	12	15	39	A	
10,000	400	Z7-5C	22.4	49.8	19	24	46	A
		5D	22.2	49.1	21	26	47	A
	450	6F	21.7	46.7	13	16	42	A
		6G	22.3	49.9	22	24	36	A
	500	7C	21.4	44.2	12	15	43	A
		7D	21.0	43.6	14	17	42	A
	550	8M	22.8	43.0	11	14	38	A
		8N	23.6	43.9	13	18	46	A

* 0.2% offset

Table 4(e) Tensile properties of sus 304 base metal aged and tested at 500°C

Aging Time (hr)	Aging Temp. (°C)	Specimen Number	Tensile Properties					Fracture Location
			Yield Strength* (kg/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (kg/mm ²)	Uniform Elongation (%)	Ruptured Elongation (%)	Reduction of Area (%)	
0	—	Z8-2M	12.4	41.8	33	44	73	A
		2N	12.4	41.6	32	42	71	A
		2P	12.4	42.1	33	44	77	A
		06	13.0	42.1	34	42	75	A
		05	14.6	42.7	33	46	75	A
100	400	Z7-05	14.0	42.5	37	43	73	B
		06	13.8	42.2	35	44	75	A
	450	18	12.6	41.3	32	41	65	A
		19	14.8	42.6	39	45	75	A
	500	D0-05	12.5	42.1	36	44	72	A
		Z7-2C	13.4	42.6	34	45	70	A
	550	D0-01	12.1	41.5	36	44	68	A
		D0-02	12.2	41.0	34	42	68	A
300	400	Z7-0B	15.4	42.2	39	46	72	C
		0C	15.4	42.3	32	43	75	A
	450	1E	13.7	42.7	34	42	76	A
		1F	14.4	43.1	31	42	73	A
	500	2H	13.9	42.8	34	43	70	A
		2J	13.3	42.7	34	42	67	A
	550	3L	13.4	40.7	35	42	60	A
		3M	13.0	40.3	35	40	65	C
1,000	450	Z7-1L	14.1	42.5	28	37	77	C
		1M	14.6	42.7	32	43	76	A
	500	2P	12.3	41.5	36	43	67	A
		2R	12.3	41.5	34	40	66	A
2,000	400	Z7-0P	13.7	43.0	33	45	76	B
		0R	14.9	42.4	35	45	76	A
	450	1T	14.9	42.9	26	35	78	C
		1V	14.3	43.0	31	41	77	C
	500	2W	14.2	41.6	33	41	65	A
		2X	13.1	41.3	34	42	58	B
	550	3Z	14.1	40.3	33	42	65	A
		40	14.8	40.6	32	40	62	B
5,000	400	Z7-0W	15.2	42.5	39	45	72	C
		0X	15.2	42.6	36	44	74	B
	450	1Z	15.9	42.8	28	37	72	C
		20	13.4	42.4	34	44	75	A
	500	38	14.0	40.3	31	39	64	A
		39	14.8	40.3	31	38	65	A
550	45	14.9	39.6	31	39	61	B	
	46	15.2	40.8	30	38	69	A	
10,000	400	Z7-12	14.5	43.1	28	36	74	C
		13	15.4	42.9	33	42	75	A
	450	25	15.4	42.9	32	43	71	A
		26	14.5	43.2	26	35	71	C
	500	32	18.3	39.2	29	35	59	A
		33	13.7	38.8	31	38	60	A
	550	4B	16.7	40.0	26	33	61	A
		4C	19.2	40.0	28	35	62	A

* 0.2% offset

Table 4(f) Tensile properties of sus 304 welded joint aged and tested at 500°C

Aging Time (hr)	Aging Temp. (°C)	Specimen Number	Tensile Properties					Fracture Location
			Yield Strength* (kg/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (kg/mm ²)	Uniform Elongation (%)	Ruptured Elongation (%)	Reduction of Area (%)	
0	—	Z8-0F	20.5	44.2	25	27	42	A
		0G	20.8	44.0	24	27	43	A
		2G	19.9	43.5	19	23	42	A
		2H	18.3	43.7	23	26	48	A
		2J	20.5	44.0	20	23	48	A
100	400	Z7-4H	19.6	42.1	27	34	69	C
		4J	20.2	42.0	26	33	73	C
	450	5L	19.9	42.2	18	23	55	A
		5M	19.5	42.3	25	31	71	C
	500	E0-01	19.3	44.0	20	24	53	A
		02	20.2	44.1	20	24	48	A
	550	Z7-78'	19.9	39.9	14	17	44	A
		79'	19.4	39.4	15	18	46	A
300	400	Z7-4P	19.6	43.7	20	24	46	A
		4R	19.3	43.4	19	23	32	A
	450	5T	19.8	44.2	25	31	72	C
		5U	19.6	43.3	19	23	51	A
	500	6W	19.4	41.0	16	19	43	A
		6X	18.3	42.9	24	27	44	A
	550	7Z	17.1	39.5	17	19	37	A
		80	18.5	39.9	14	18	36	A
1,000	400	Z7-4W	20.2	44.8	11	19	63	C
		4X	20.0	44.5	20	27	47	A
	450	5Z	20.5	45.2	20	24	45	A
		60	19.8	44.8	19	22	47	A
	500	72	20.2	40.2	12	15	57	A
		73	18.8	40.5	19	22	50	A
	550	85	19.8	38.7	10	14	49	A
		86	19.5	38.8	13	16	54	A
2,000	400	Z7-52	18.3	44.8	29	35	72	C
		53	20.2	43.8	18	24	48	A
	450	65	18.8	44.1	23	27	54	A
		66	19.4	43.9	17	21	45	A
	500	78	18.5	40.8	12	15	50	A
		79	17.5	40.1	15	17	42	A
	550	8B	20.0	38.7	11	14	39	A
		8C	20.2	38.9	14	15	50	A
5,000	400	Z7-58	20.7	43.8	23	29	43	B
		59	14.2	44.9	9	20	63	C
	450	6B	19.1	43.6	22	22	42	A
		6C	20.3	43.3	19	22	46	A
	500	7L	19.0	40.3	15	17	36	A
		7M	19.8	40.2	14	17	39	A
	550	8H	21.4	39.7	12	15	40	A
		8J	21.1	40.7	11	14	38	A
10,000	400	Z7-5E	21.4	46.5	9	18	73	C
		5F	20.7	46.6	18	22	40	A
	450	6H	20.5	45.0	13	16	40	A
		6J	20.5	43.1	15	18	37	A
	500	7E	20.3	39.1	13	15	40	A
		7A	18.9	38.9	14	17	35	A
	550	8P	23.3	39.3	11	14	45	A
		8R	24.2	40.8	12	14	37	A

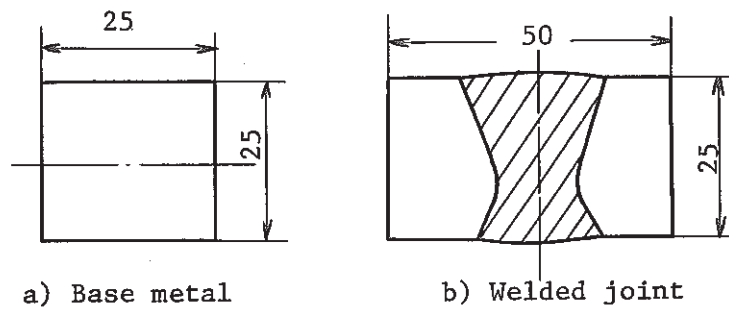
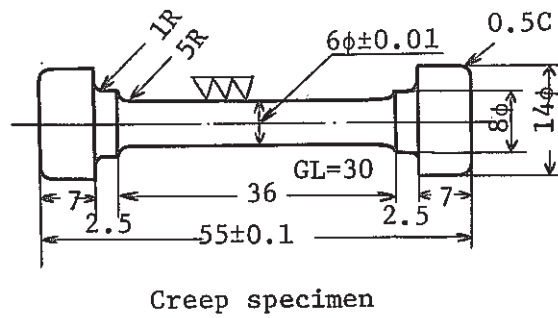
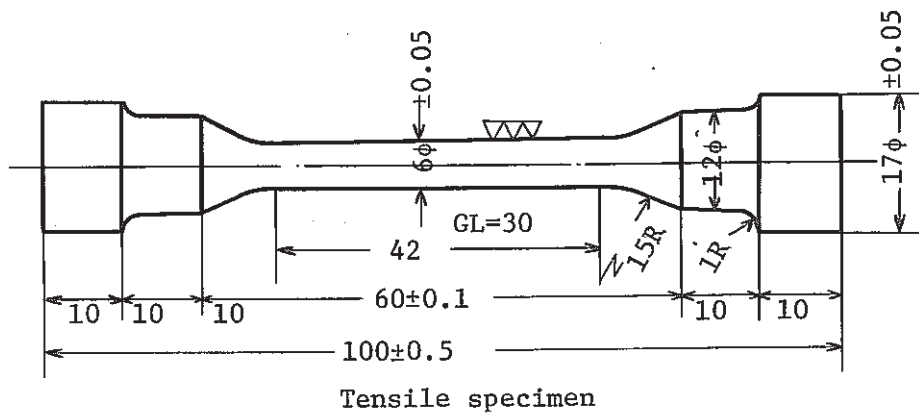
* 0.2% offset

Table 4(g) Tensile Properties of sus 304 base metal and welded joint aged under the stress of 7.8 kg/mm² and tested at 400°C and 500°C

B.M. or W.J.	Test Temp. (°C)	Aging Time (hr)	Aging Temp. (°C)	Specimen Number	Tensile Properties						
					Yield Strength (kg/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (kg/mm ²)	Uniform Elongation (%)	Ruptured Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Fracture Location	
Base Metal	400	300	400	Z7-CS	15.5	45.5	36	45	77	A	
				A-OI	15.2	45.4	35	45	75	A	
			500	Z7-CD	15.4	45.4	35	43	71	A	
				CE	14.6	45.5	35	42	64	A	
		1,000	400	CW	16.5	46.5	34	43	71	A	
				CX	15.4	45.7	35	44	74	A	
			500	CH	15.8	45.1	35	42	61	A	
				CJ	15.7	44.7	32	38	61	A	
		5,000	400	DO	15.9	46.3	36	45	70	A	
				DI	15.8	45.9	35	45	70	A	
			500	CM	15.3	43.2	31	38	59	A	
				CN	16.0	43.4	32	39	62	A	
	500	300	400	Z7-CU	13.6	42.9	31	40	81	A	
				CV	18.6	42.5	35	43	81	A	
			500	CF	14.0	42.5	33	42	82	A	
				CG	14.7	42.2	33	42	72	A	
		1,000	400	CY	15.0	42.6	39	46	82	A	
				CZ	15.5	42.8	36	43	83	A	
			500	CK	13.5	42.0	33	42	68	A	
				CL	14.6	42.2	35	44	69	A	
		5,000	400	D2	15.0	43.2	34	43	74	A	
				A-O2	12.8	42.7	34	44	74	A	
			500	Z7-CP	15.5	41.3	32	41	59	A	
				CR	15.4	39.3	28	36	59	A	
	Welded Joint	400	300	400	Z7-DG	23.7	50.5	11	21	69	C
					B-OI	22.4	50.6	10	18	63	C
				500	Z7-D4	21.7	46.6	15	19	39	A
					D5	23.0	48.3	15	16	39	A
			1,000	400	DL	22.9	49.2	18	22	45	A
					DM	22.2	49.6	8	18	69	C
500				D8	22.2	44.9	13	15	29	A	
				D9	22.9	45.3	15	18	36	A	
5,000			400	DR	21.4	47.7	20	24	47	A	
				DS	22.2	49.4	10	18	73	C	
			500	DC	21.8	44.0	14	16	30	A	
				DD	22.2	43.9	13	16	41	A	
500		300	400	Z7-DJ	21.1	44.5	19	22	48	A	
				DK	21.4	45.2	18	22	39	A	
			500	D6	20.2	42.6	16	18	39	A	
				D7	19.6	43.7	19	22	37	A	
		1,000	400	DN	24.2	45.1	15	24	75	C	
				DP	27.5	45.5	11	21	72	C	
			500	DA	18.7	40.7	16	19	46	A	
				DB	19.0	39.5	11	15	46	A	
		5,000	400	DT	21.1	45.1	9	18	73	C	
				B-O2	20.3	46.4	10	19	71	C	
			500	Z7-DE	19.7	40.1	12	16	42	A	
				DF	19.9	40.7	16	18	31	A	

Table 5 Creep and creep rupture properties of both sus 304 base metal and welded joint aged and tested at 500°C

Aging Condition		Specimen NO.	Stress (kg/mm ²)	Minimum Creep Rate (%/hr)	Time to Rupture (hr)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
As Recieved	Base Metal	Z8000W	38.0	3.0×10^{-2}	178.9	32.1	46
		Z8000R	36.0	3.8×10^{-2}	199.4	27.9	44
		Z8000S	32.0	1.0×10^{-2}	683.6	24.3	37
		Z8000T	27.0	1.7×10^{-3}	4827.8	23.8	28
	Welded Joint	Z80013	38.0	6.7×10^{-2}	98.4	20.0	39
		Z80014	35.0	2.4×10^{-2}	281.5	17.7	37
		Z80015	31.0	5.6×10^{-3}	1136.5	14.8	28
		Z80016	28.0	6.0×10^{-4}	4645.5	8.3	18
Aged	Base Metal	Z70094	37.0	1.5×10^{-1}	80.0	43.2	57
		Z70095	35.0	7.6×10^{-2}	204.9	40.1	50
		Z70096	30.0	4.4×10^{-3}	1311.8	29.4	36
		Z70097	27.0	3.3×10^{-2}	3555.1	27.4	36
	Welded Joint	Z7009W	38.0	9.0×10^{-2}	67.9	17.3	30
		Z7009V	35.0	2.2×10^{-2}	408.9	17.3	35
		Z7009X	33.0	6.6×10^{-3}	623.1	12.3	23
		Z7009Y	30.0	5.0×10^{-3}	1742.6	12.3	32



Metallurgical specimen

Fig. 1 Profile of specimen

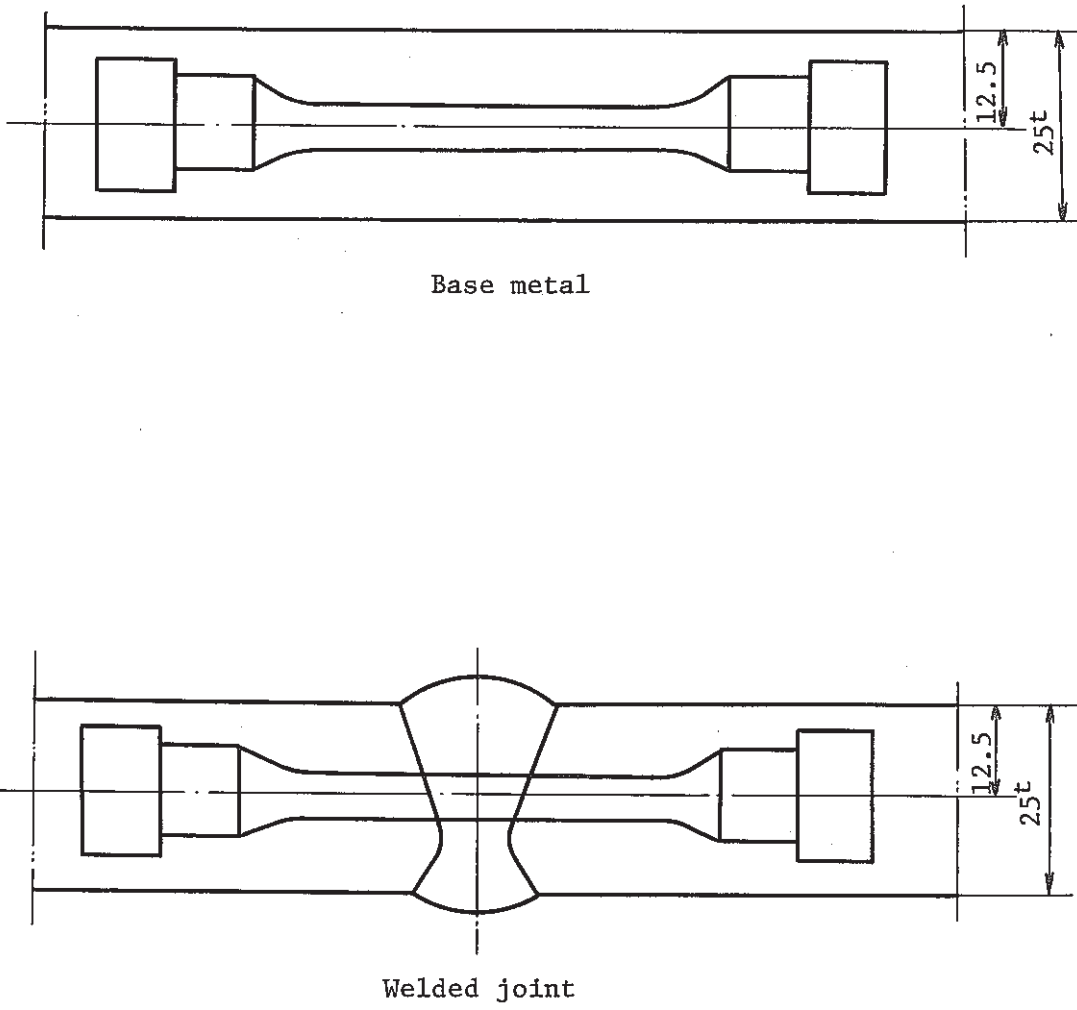


Fig. 2 Sampling of specimen

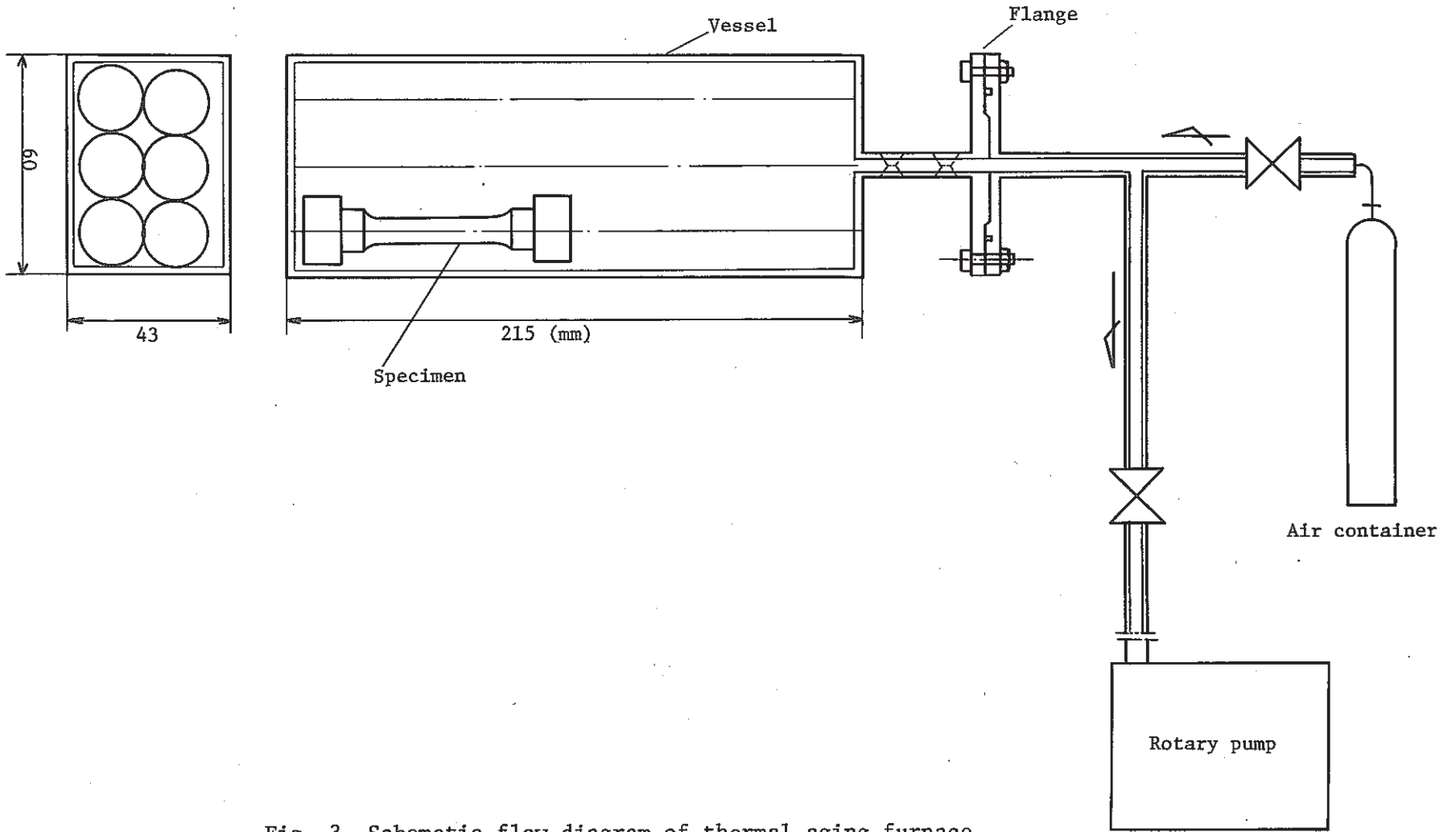


Fig. 3 Schematic flow diagram of thermal aging furnace

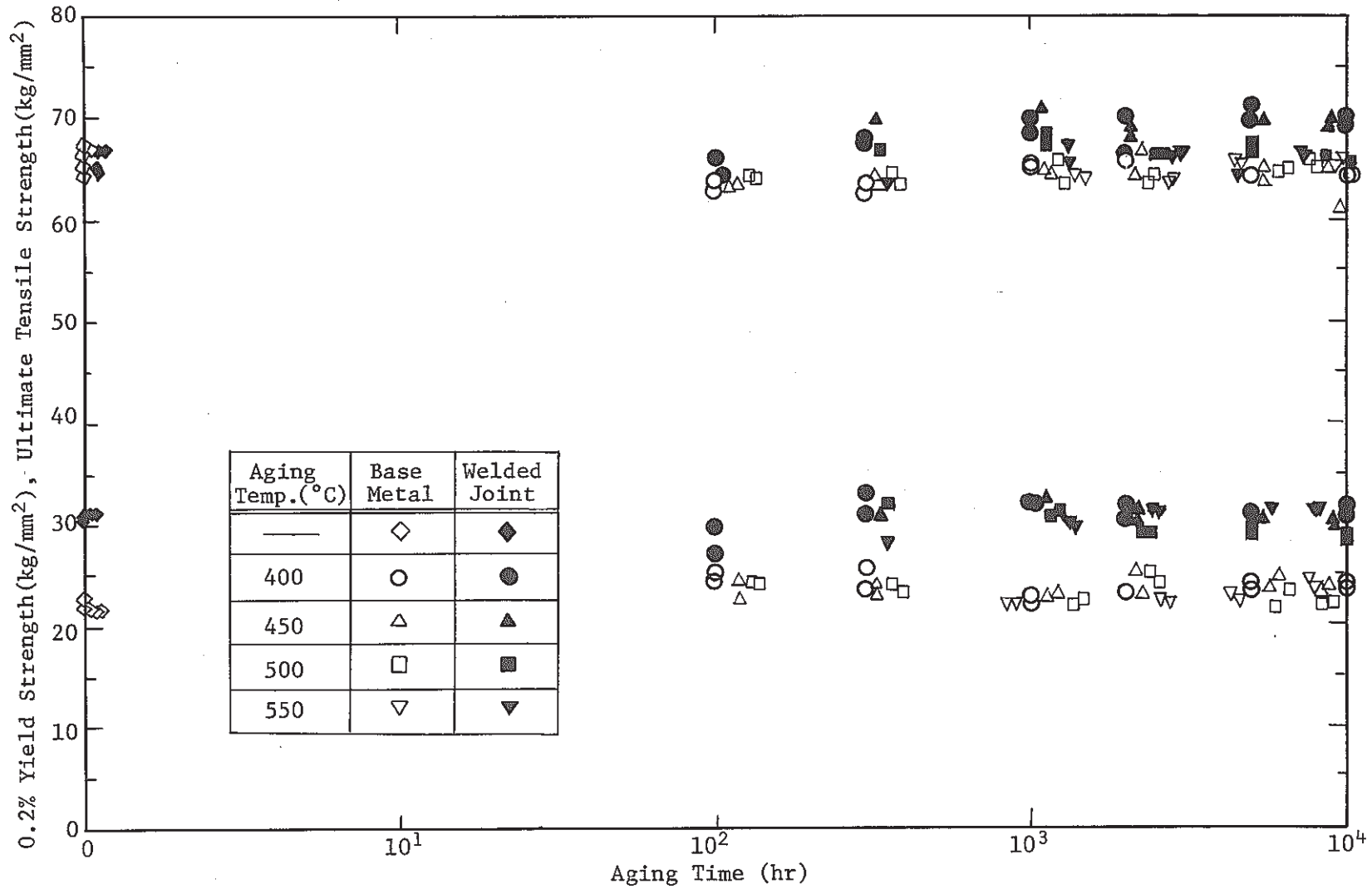


Fig. 4(a) Effect of thermal aging on 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of SUS304 tested at R.T.

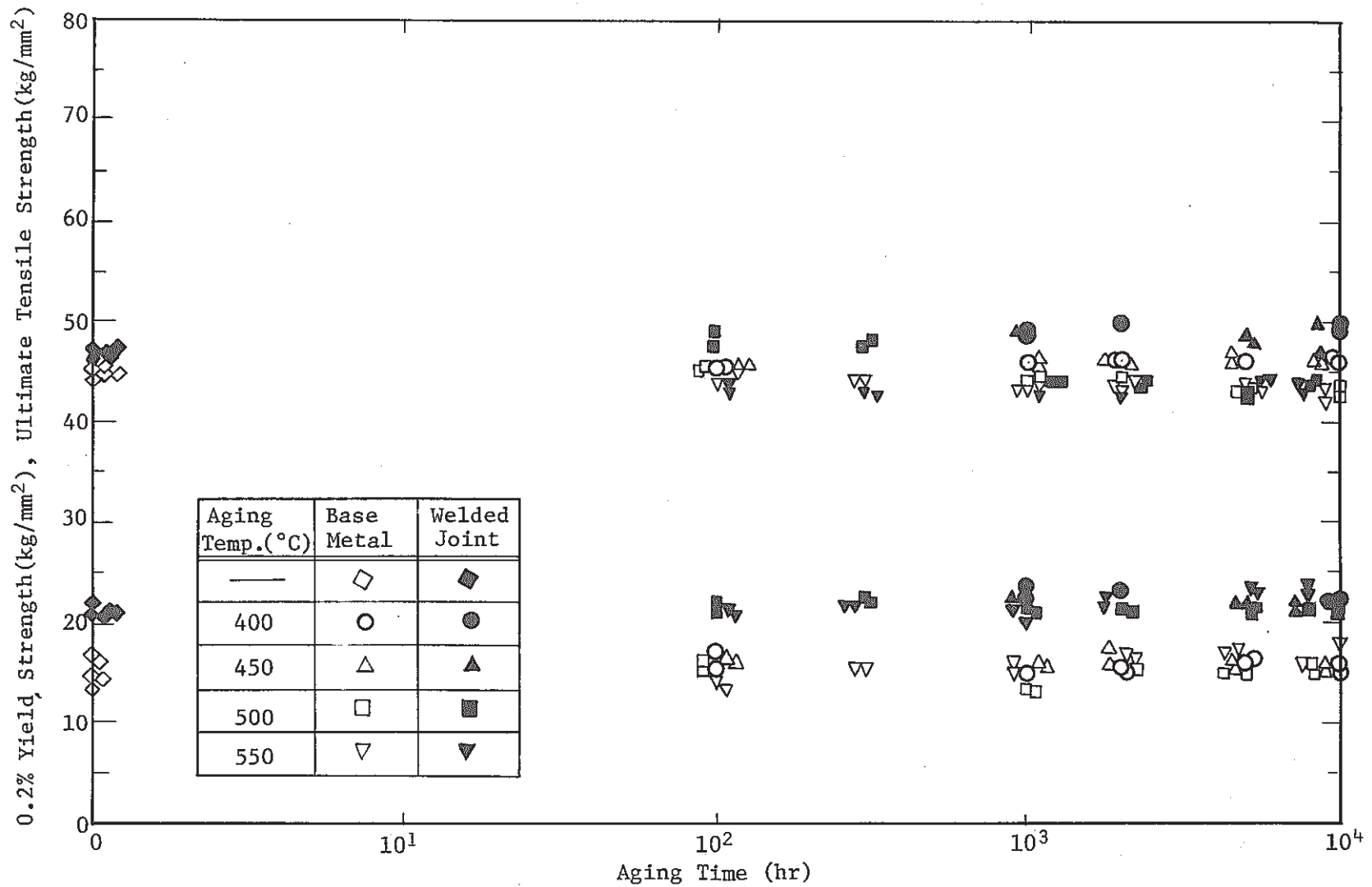


Fig. 4(b) Effect of thermal aging on 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of SUS304 tested at 400°C

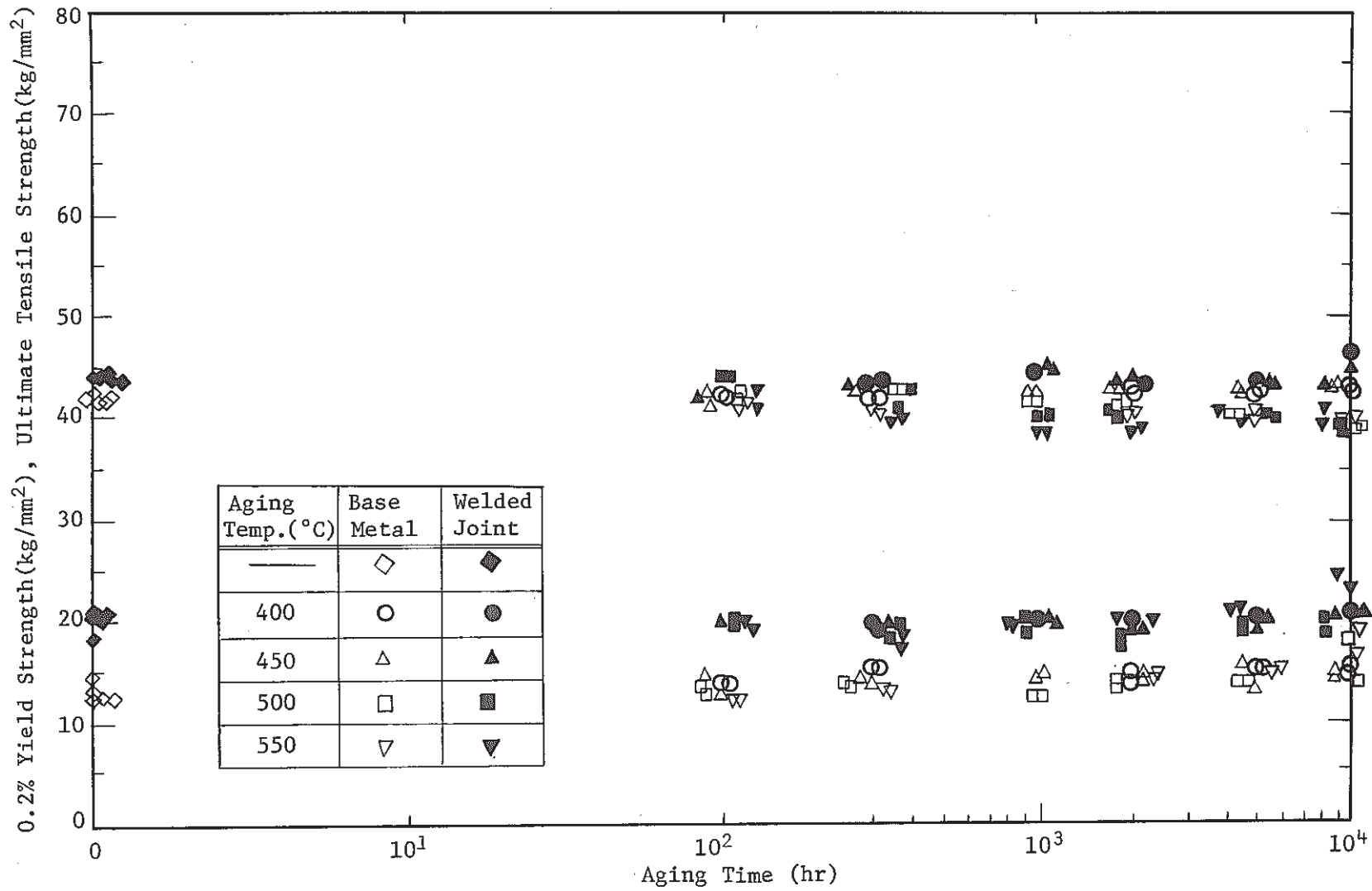


Fig. 4(c) Effect of thermal aging on 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of SUS304 tested at 500°C

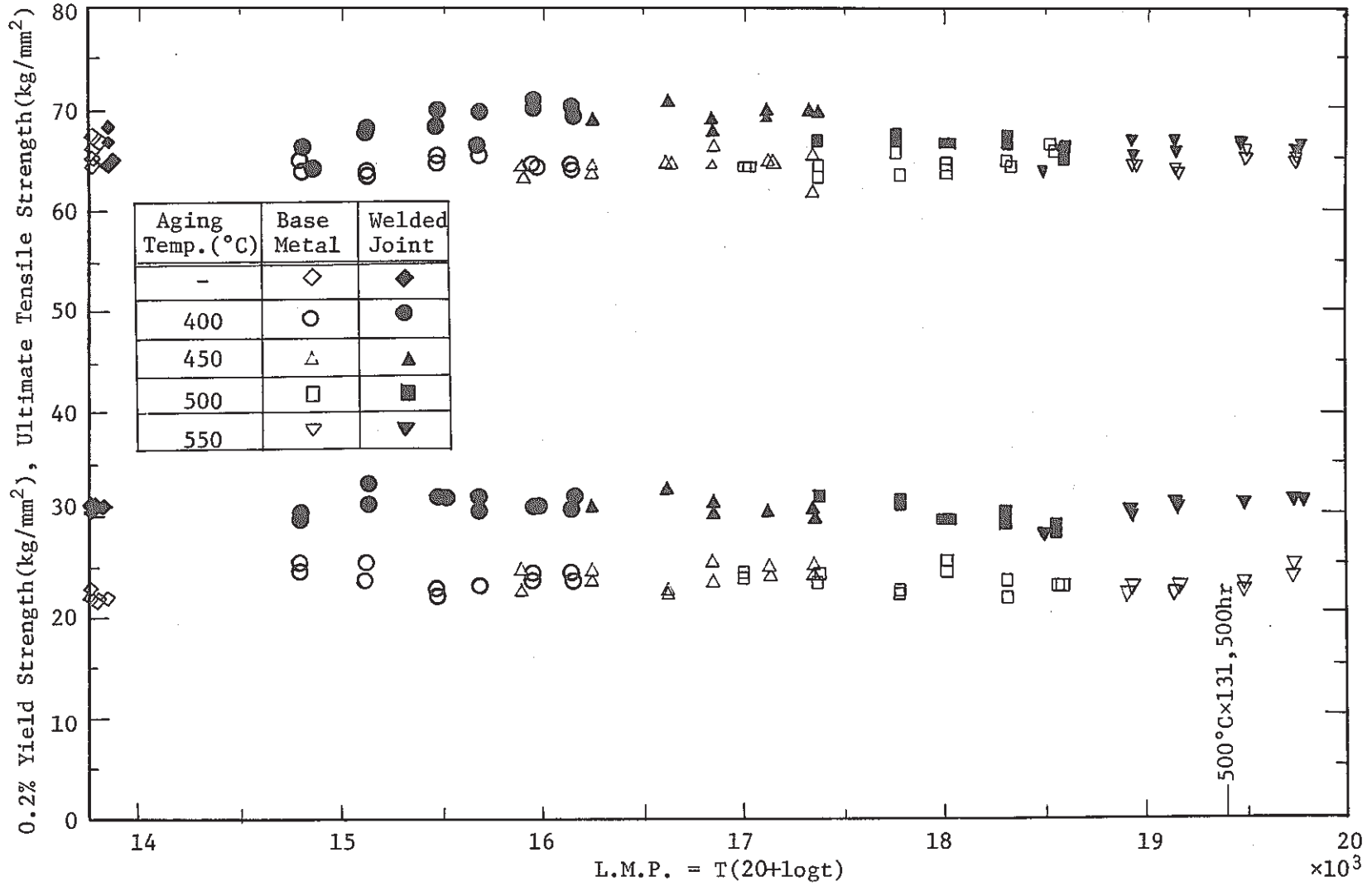


Fig. 5(a) Relation among L.M.P., 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of SUS304 tested at R.T.

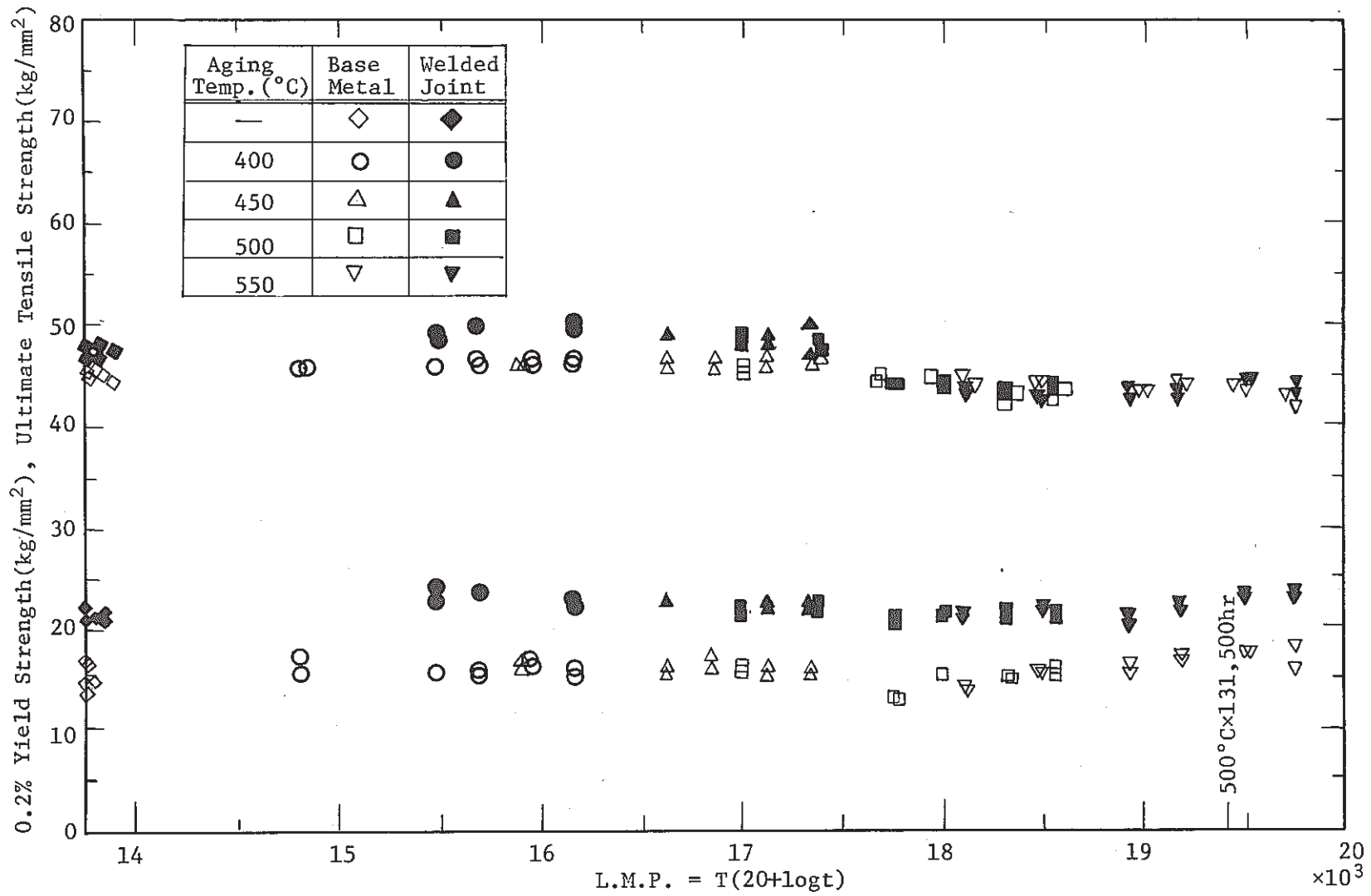


Fig. 5(b) Relation among L.M.P., 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of SUS304 tested at 400°C

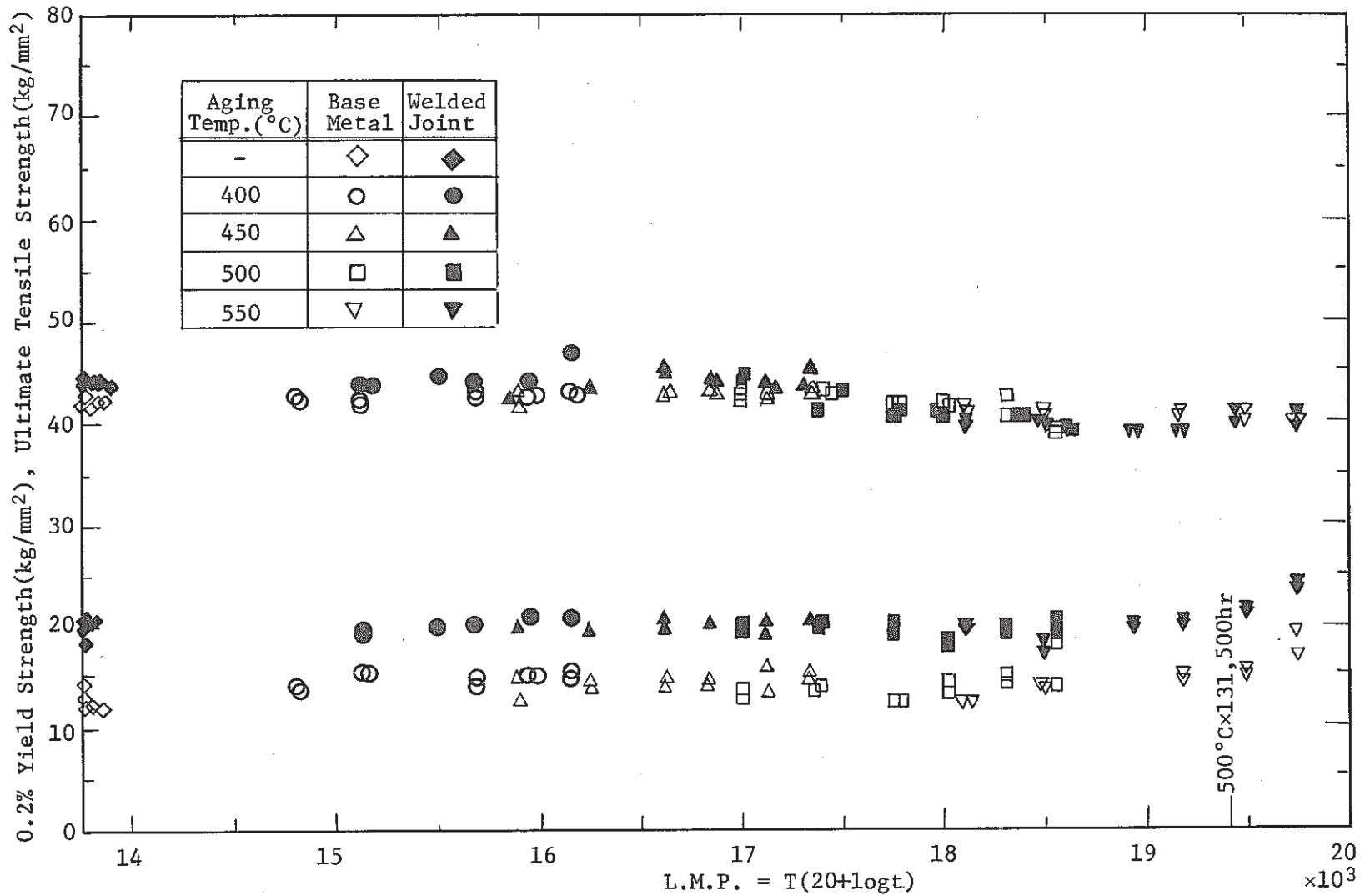


Fig. 5(c) Relation among L.M.P., 0.2% yield strength and ultimate tensile strength of SUS304 tested at 500°C

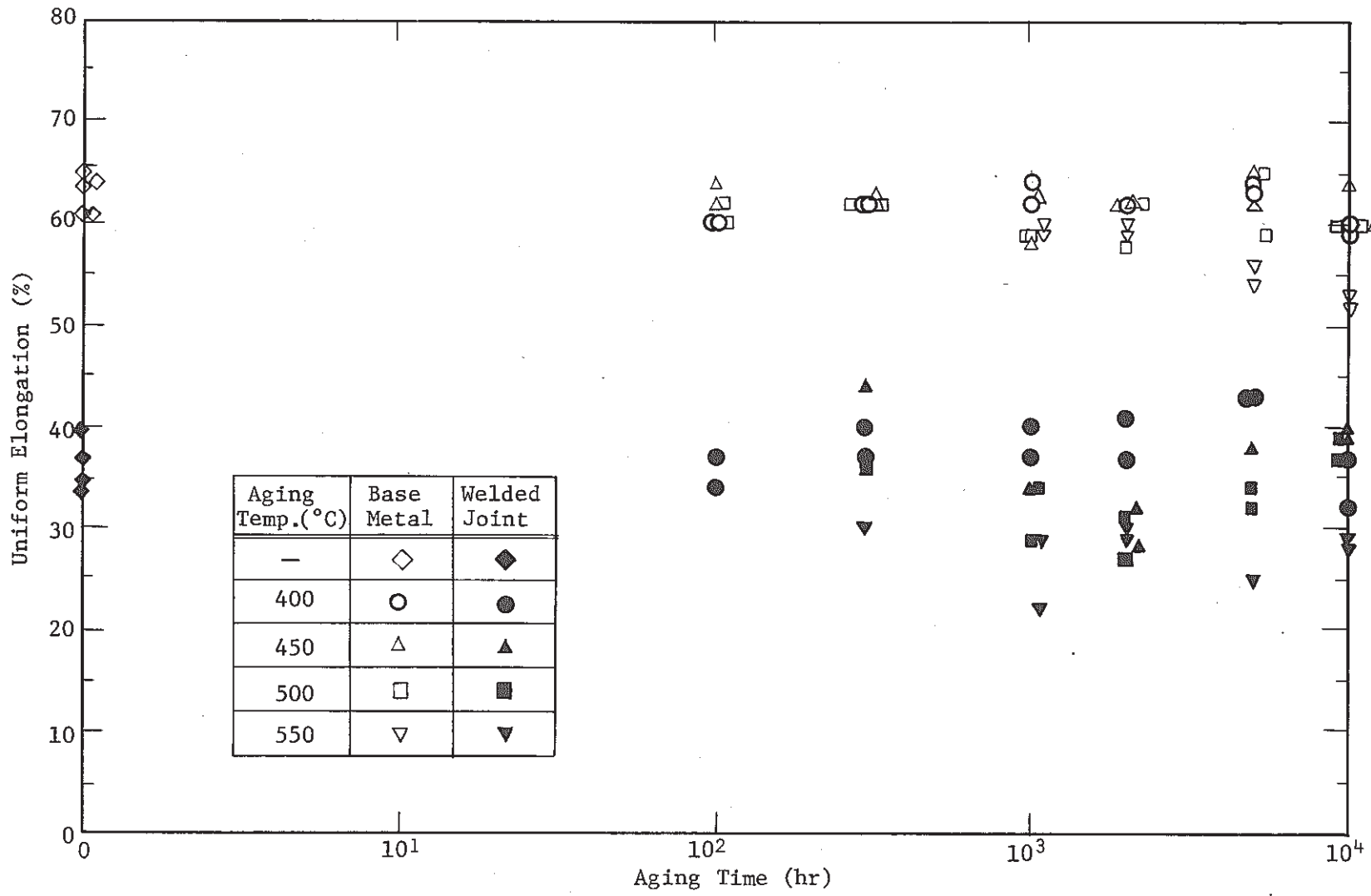


Fig. 6(a) Effect of thermal aging on uniform elongation of SUS304 tested at R.T.

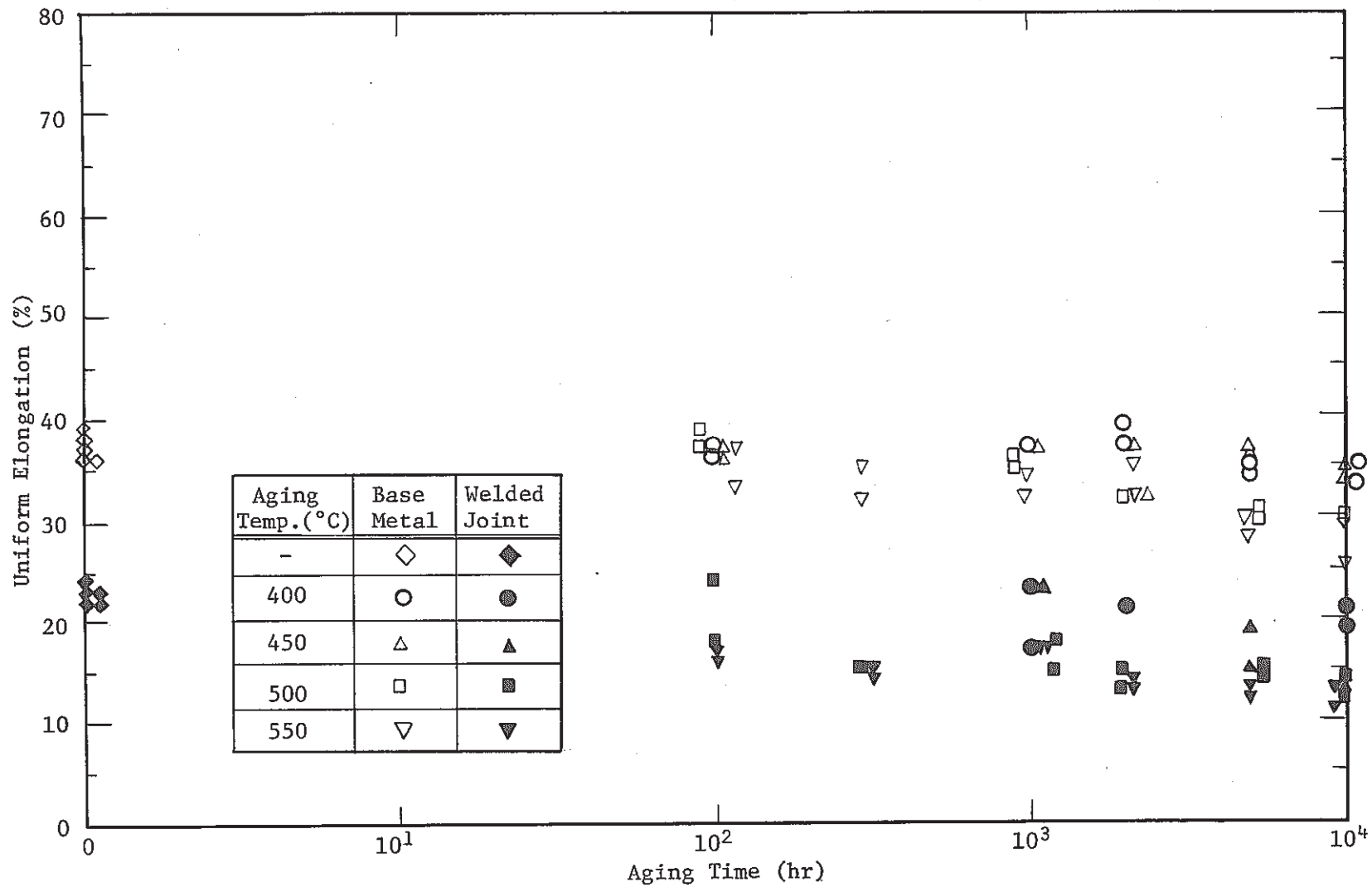


Fig. 6(b) Effect of thermal aging on uniform elongation of SUS304 tested at 400°C

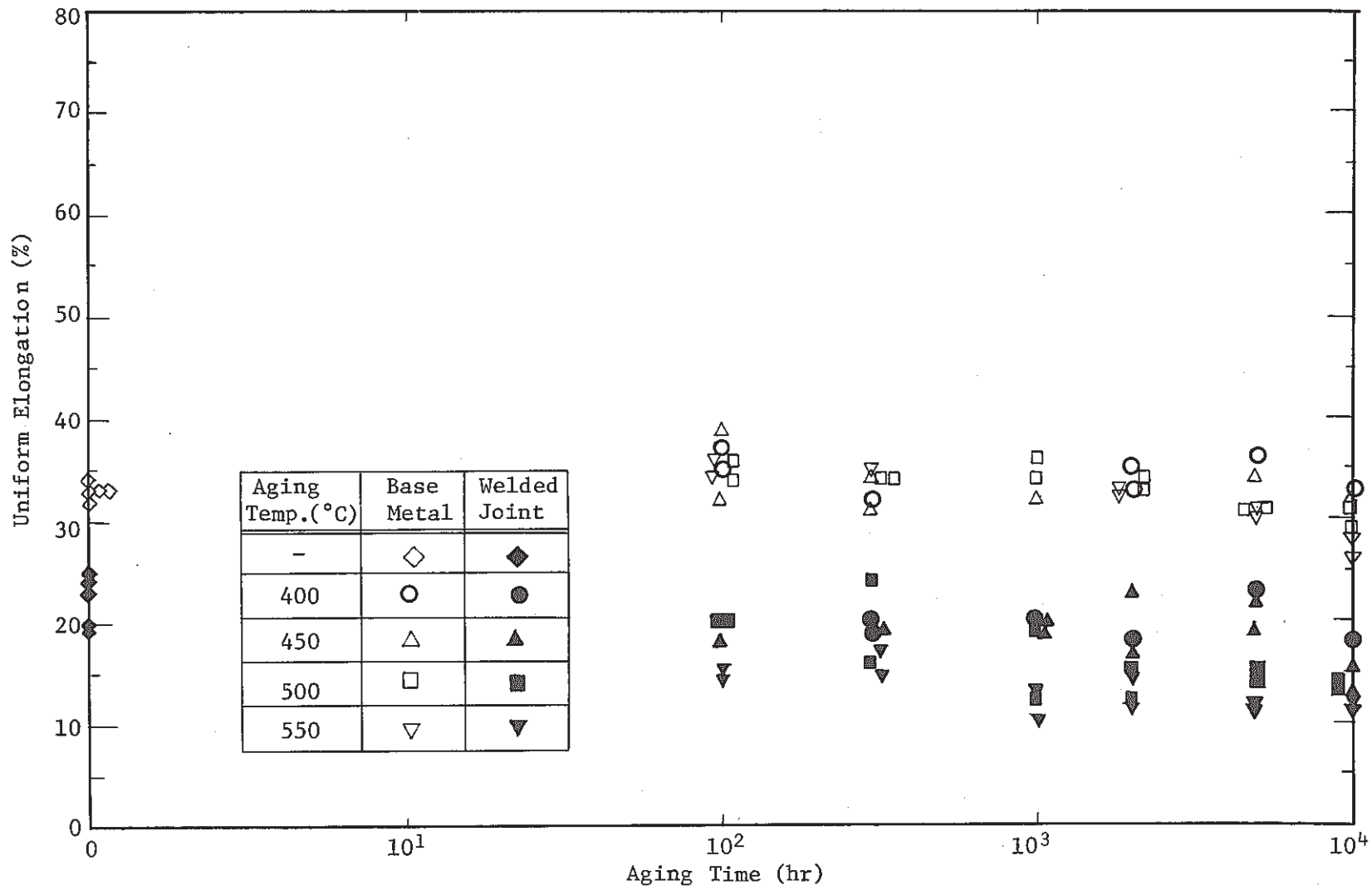


Fig. 6(c) Effect of thermal aging on uniform elongation of SUS304 tested at 500°C

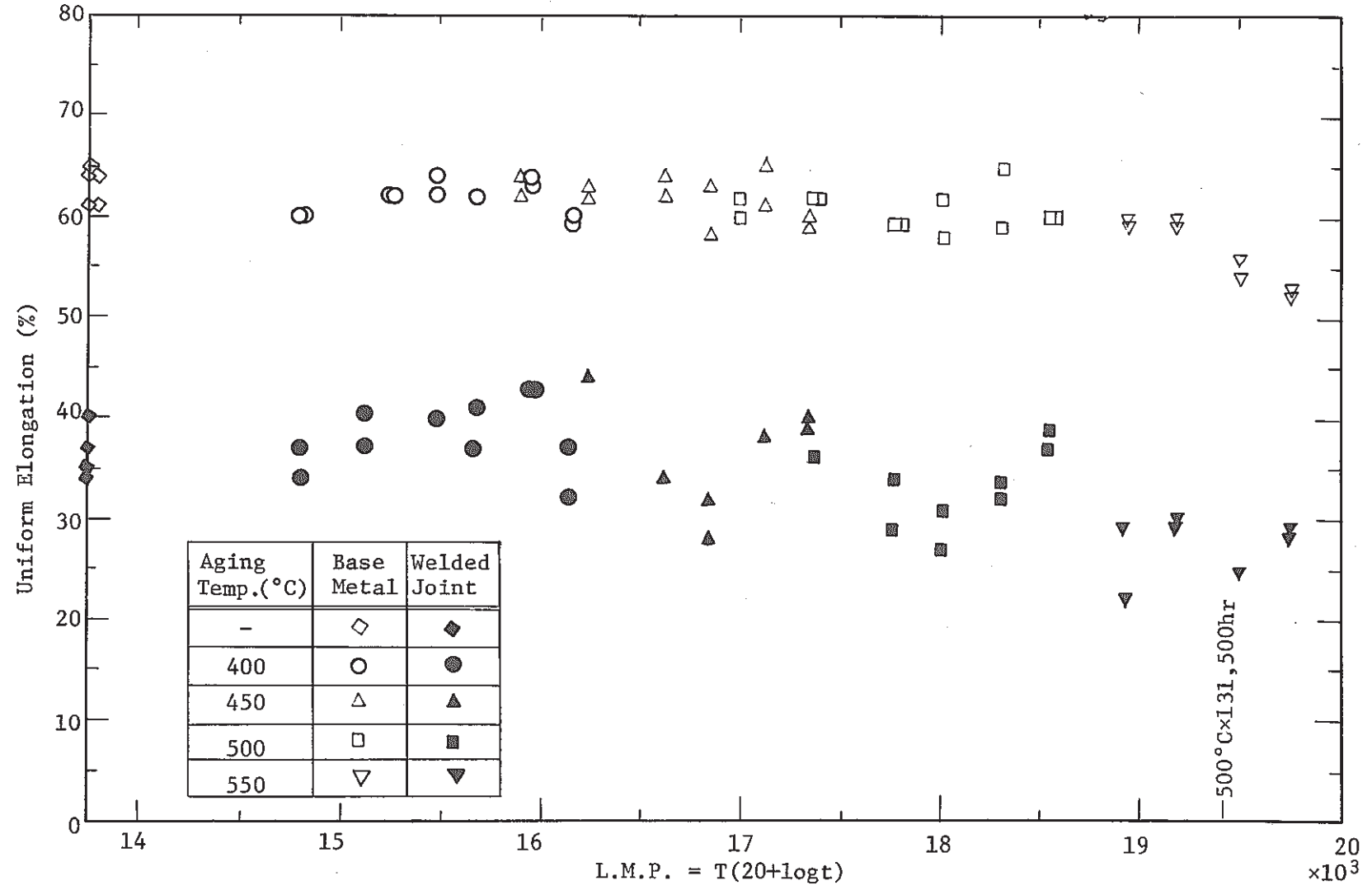


Fig. 7(a) Relation between L.M.P. and uniform elongation of SUS304 tested at R.T.

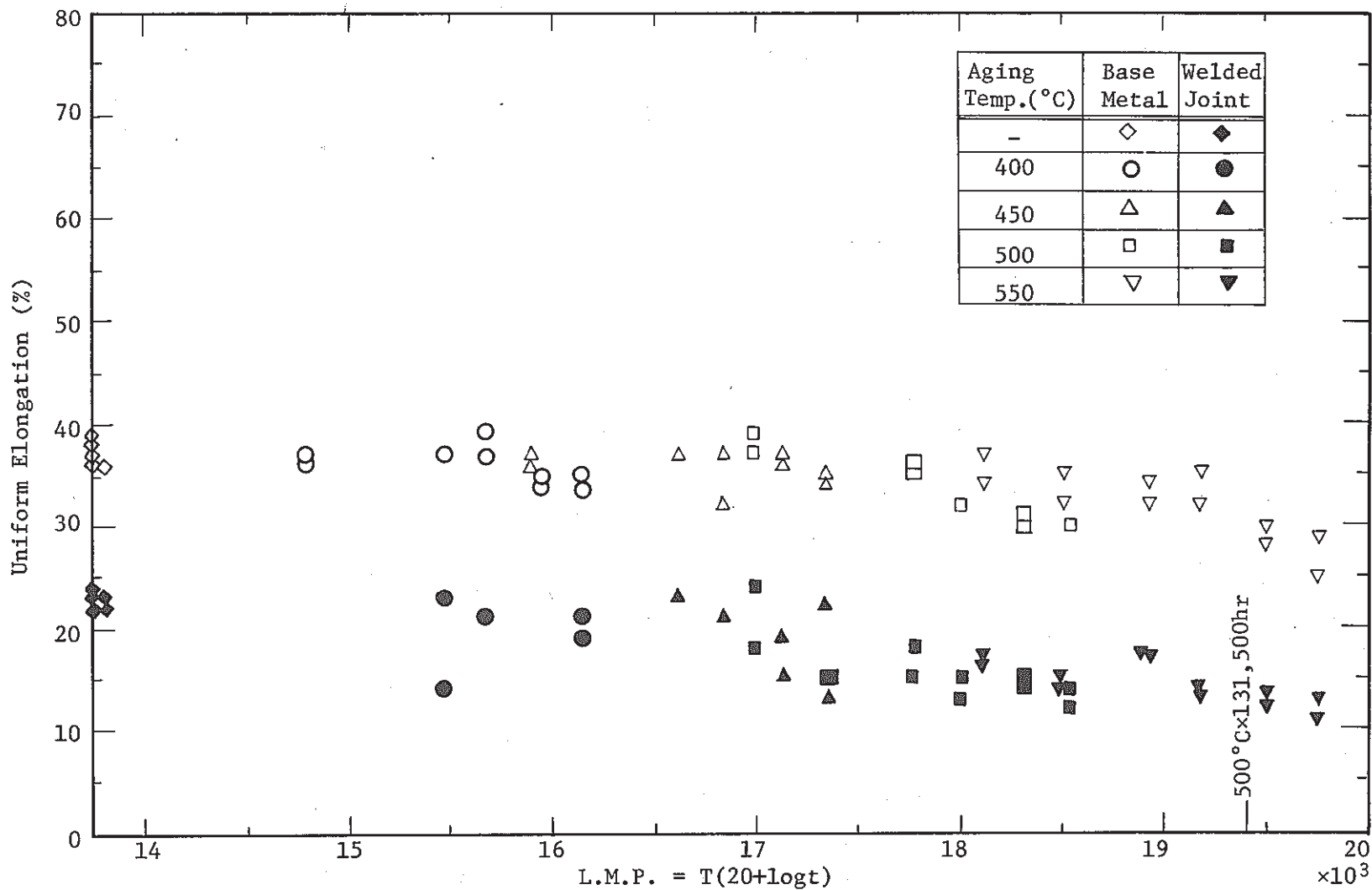


Fig. 7(b) Relation between L.M.P. and uniform elongation of SUS304 tested at 400°C

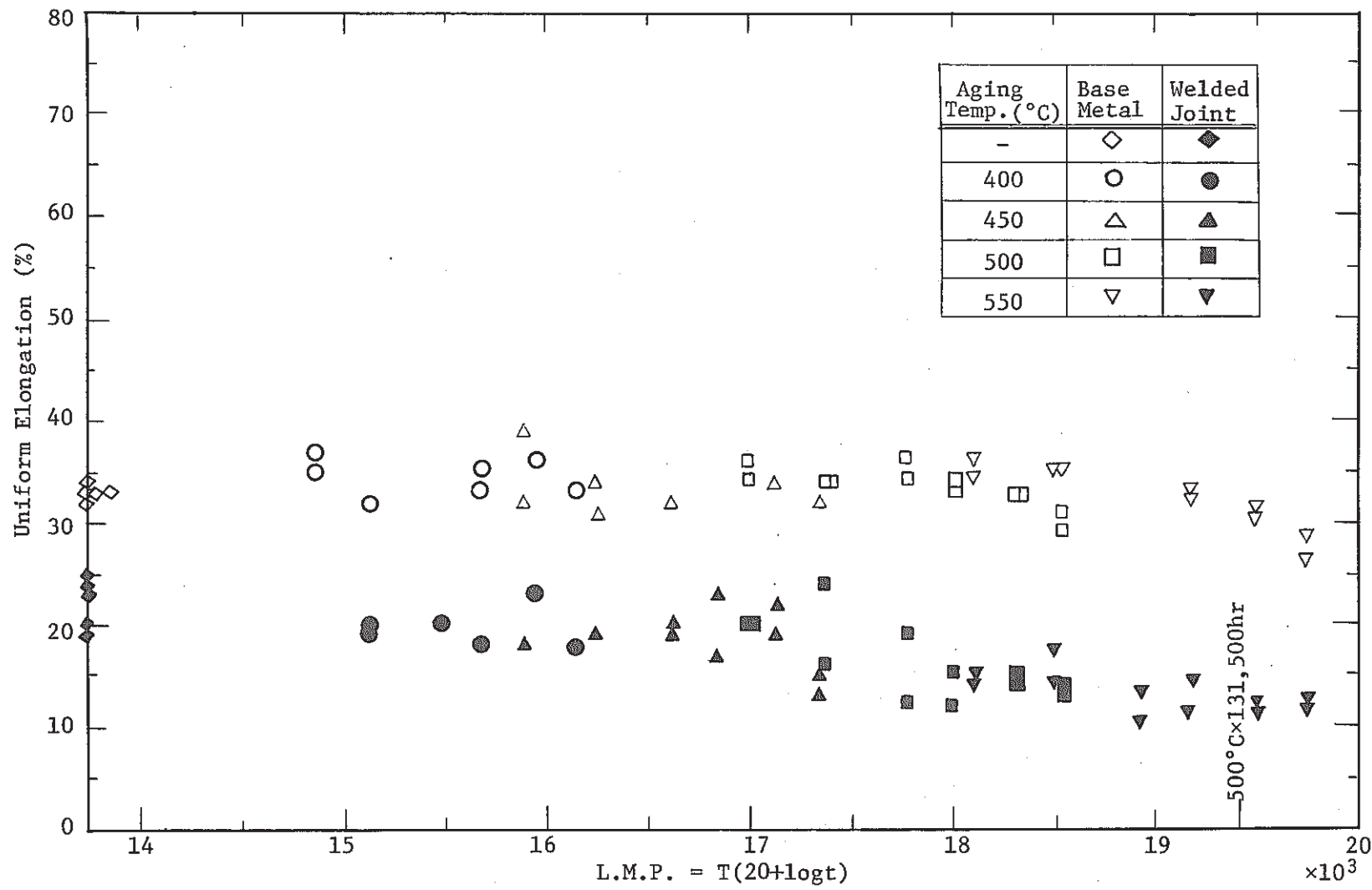


Fig. 7(c) Relation between L.M.P. and uniform elongation of SUS304 tested at 500°C

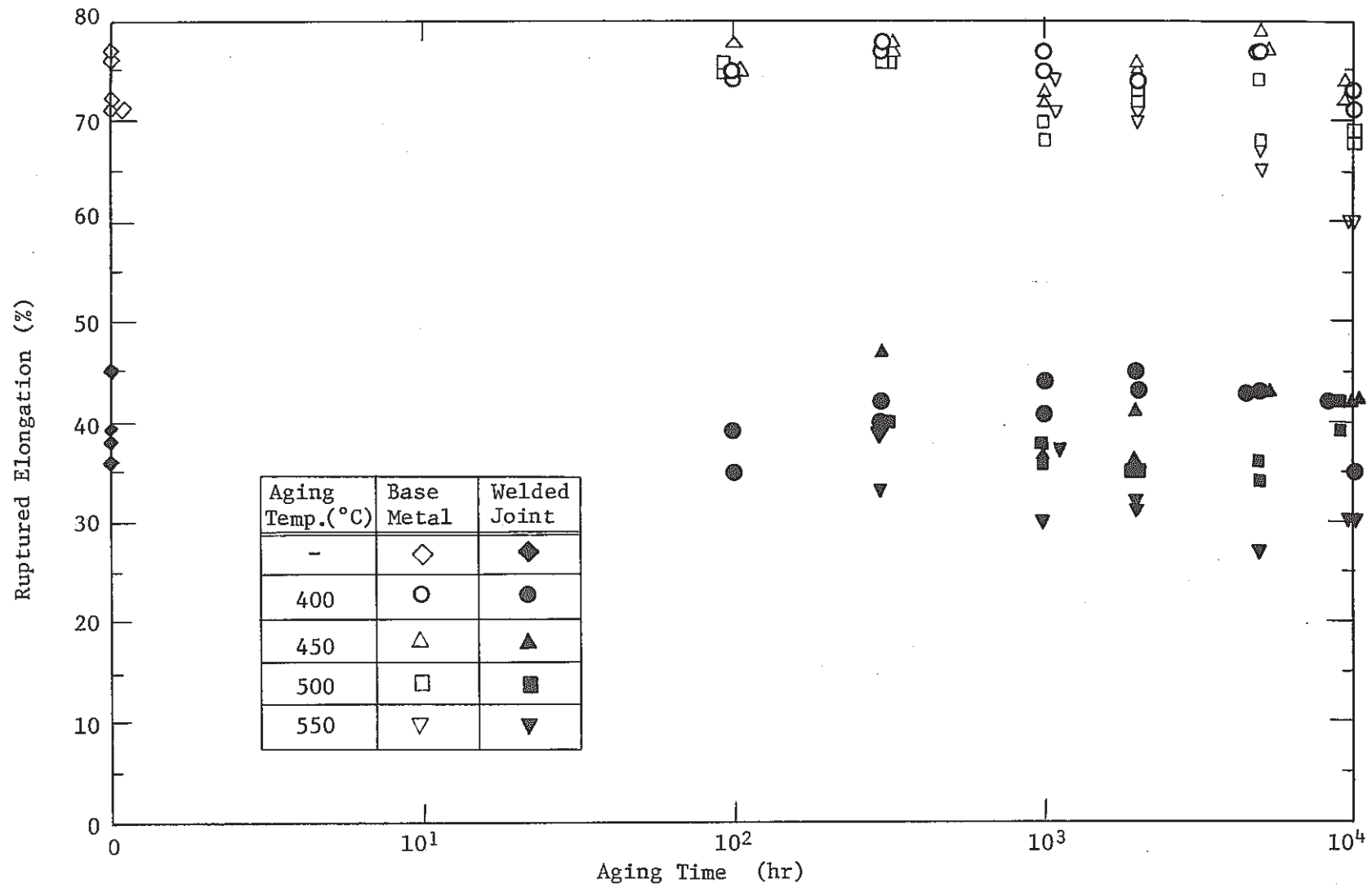


Fig. 8(a) Effect of thermal aging on ruptured elongation of SUS304 tested at R.T.

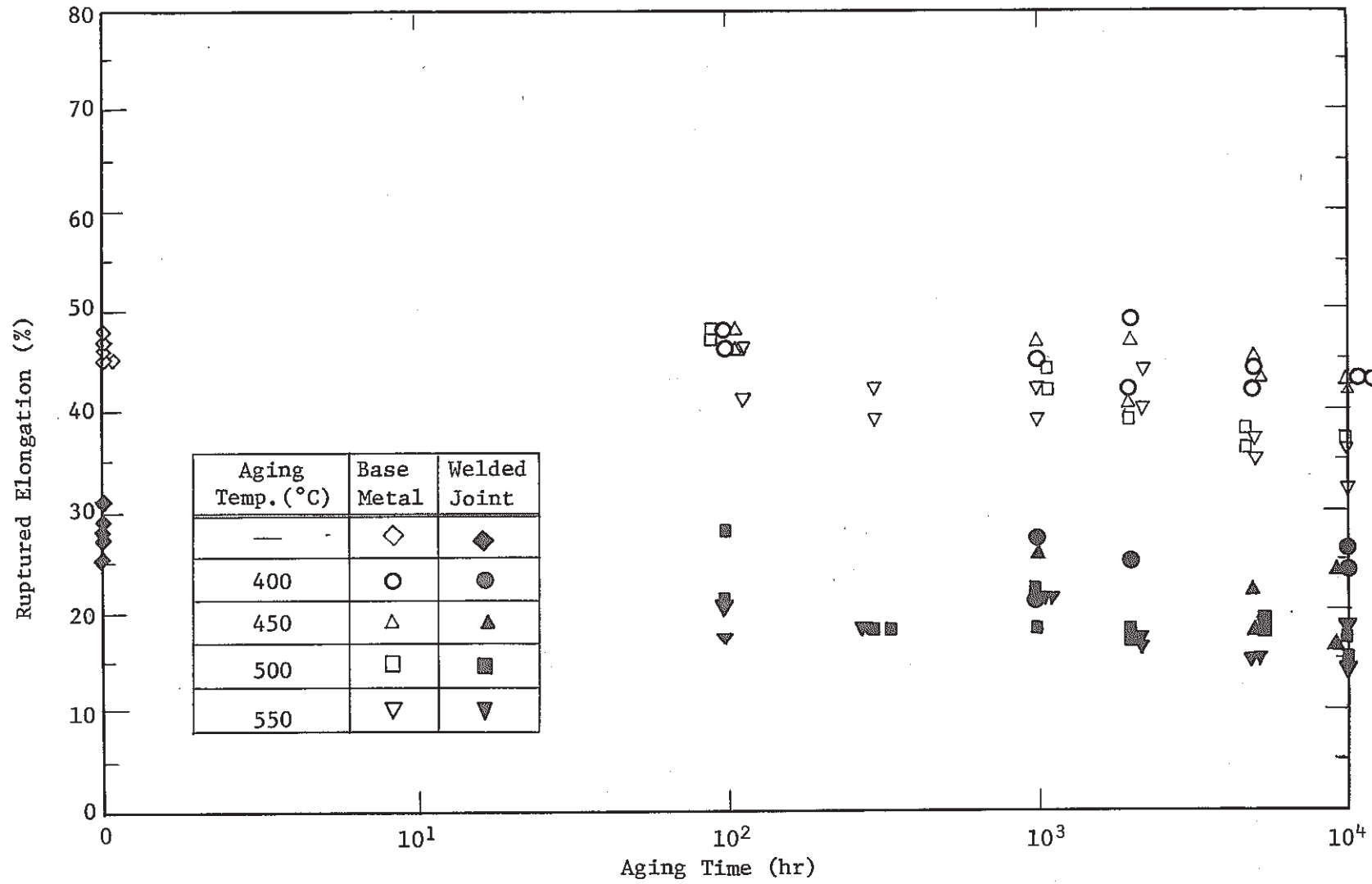


Fig. 8(b) Effect of thermal aging on ruptured elongation of SUS304 tested at 400°C

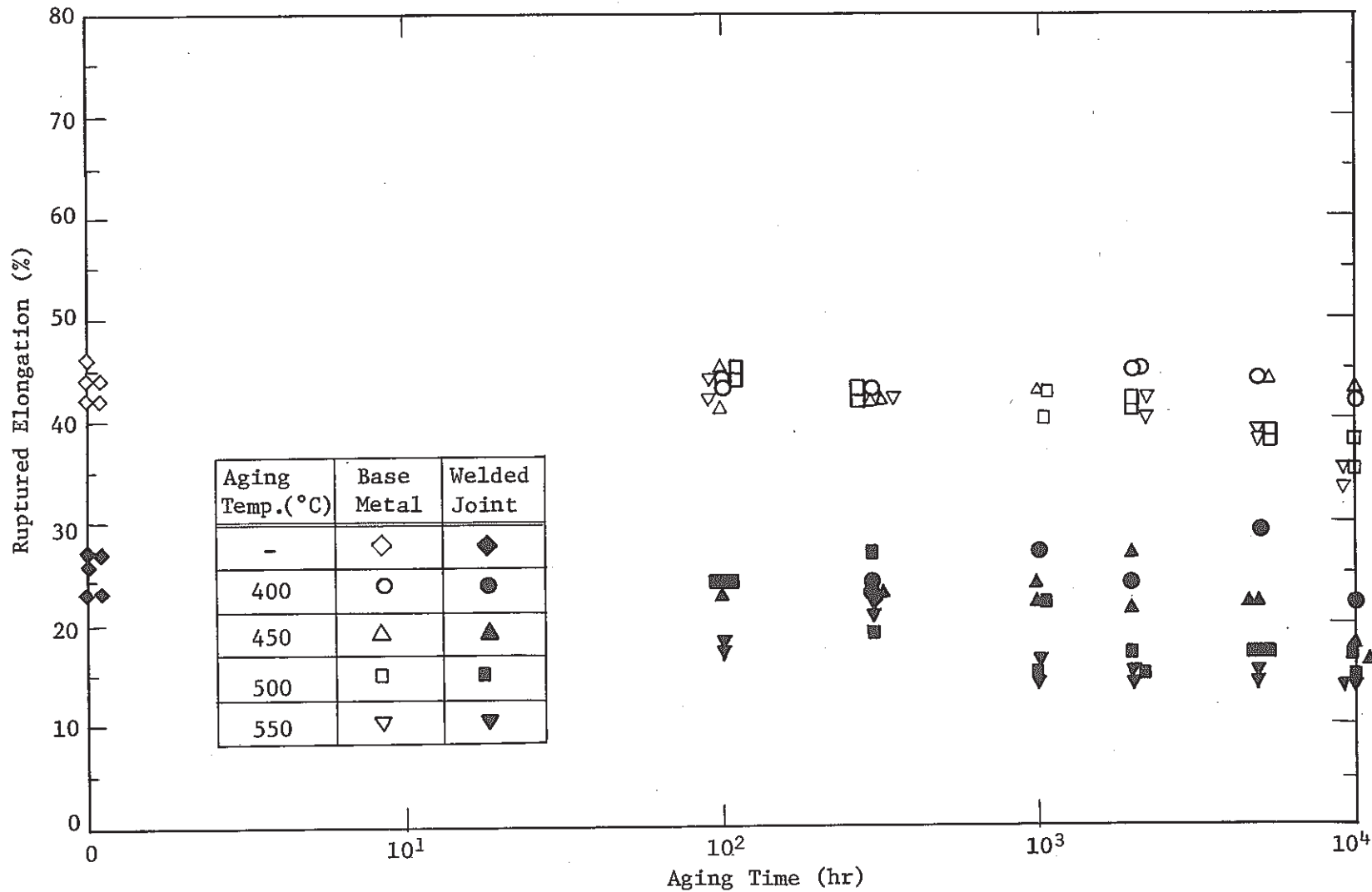


Fig. 8(c) Effect of thermal aging on ruptured elongation of SUS304 tested at 500°C

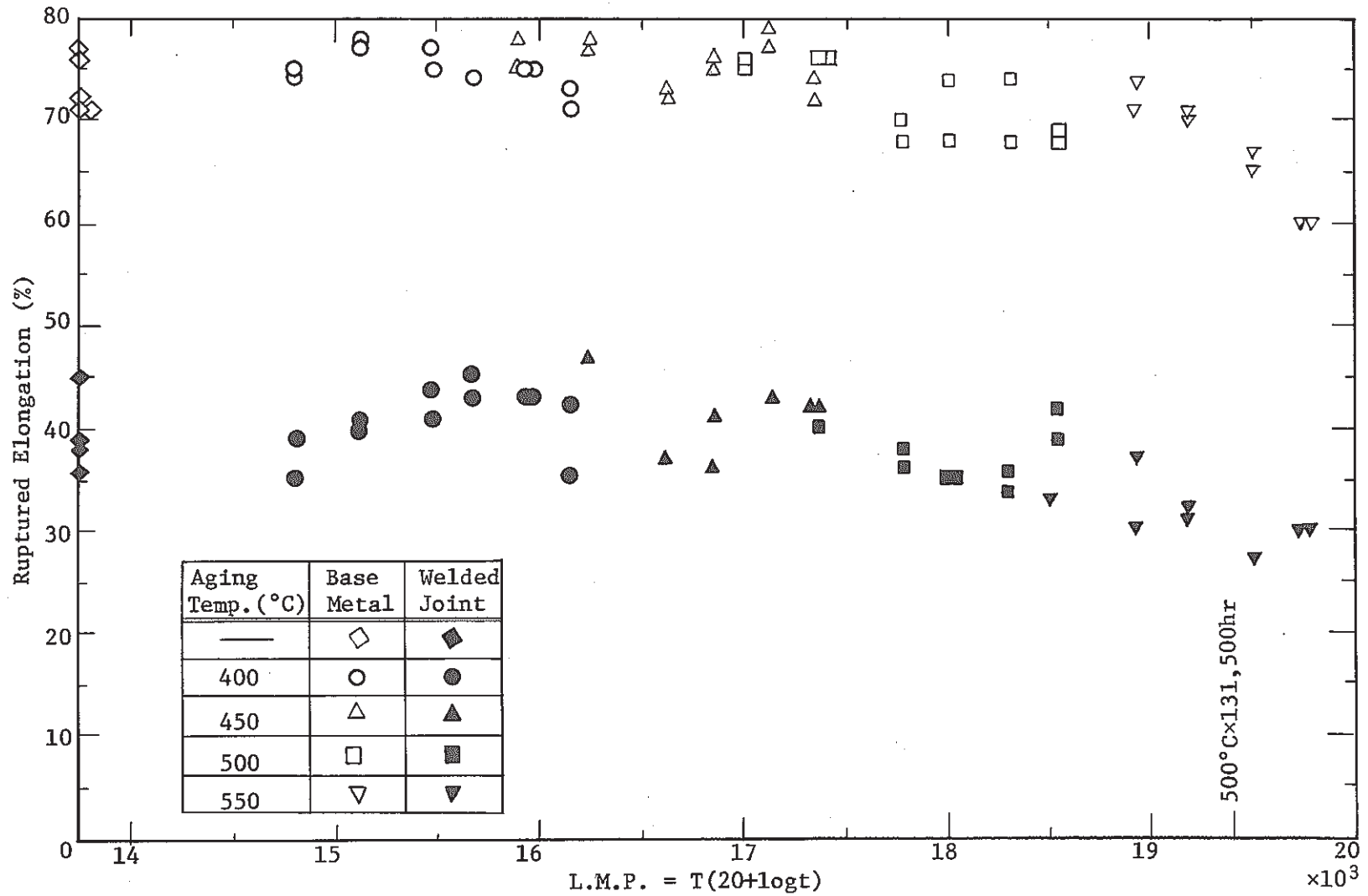


Fig. 9(a) Relation between L.M.P. and ruptured elongation of SUS304 tested at R.T.

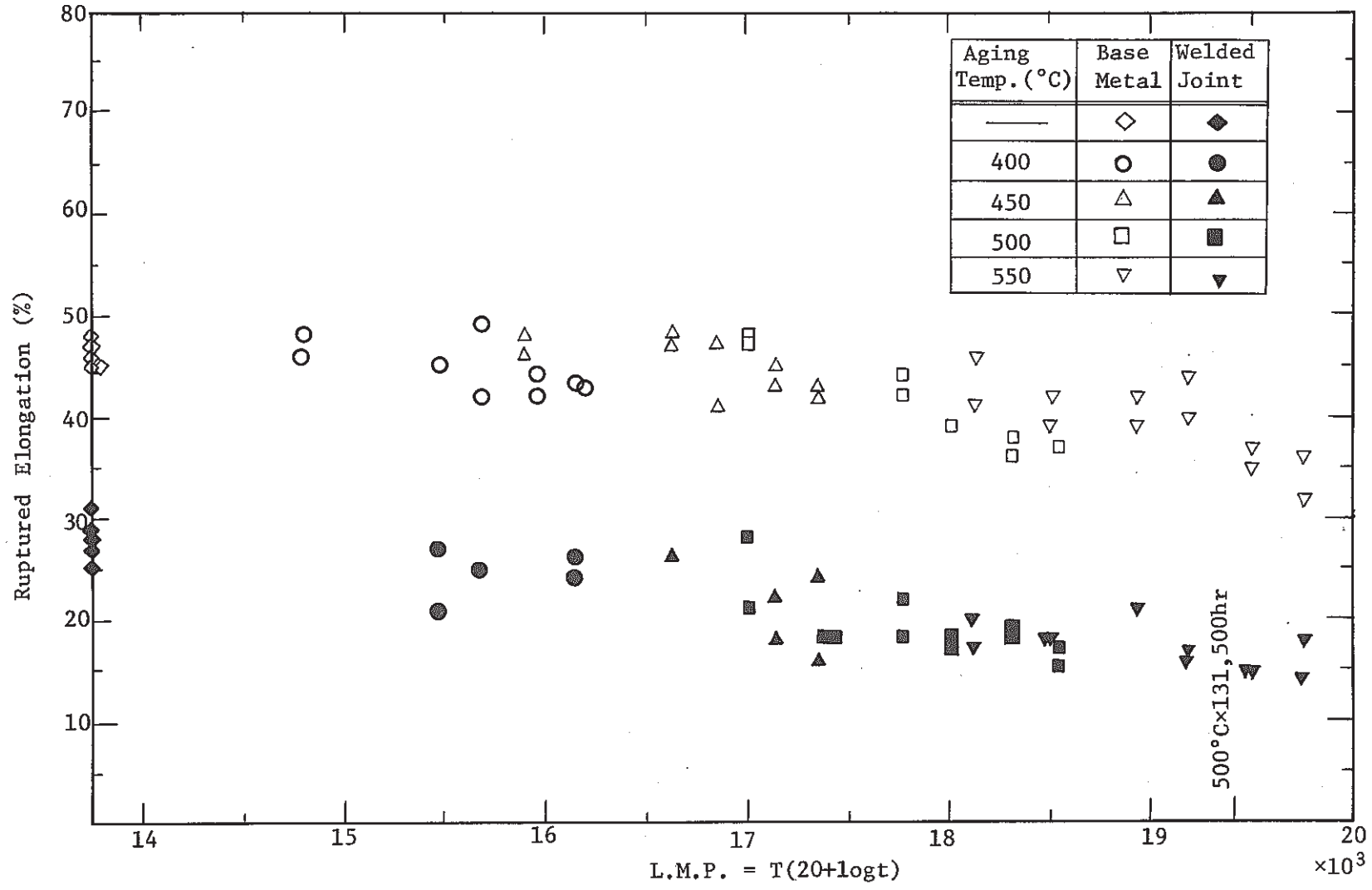


Fig. 9(b) Relation between L.M.P. and ruptured elongation of SUS304 tested at 400°C

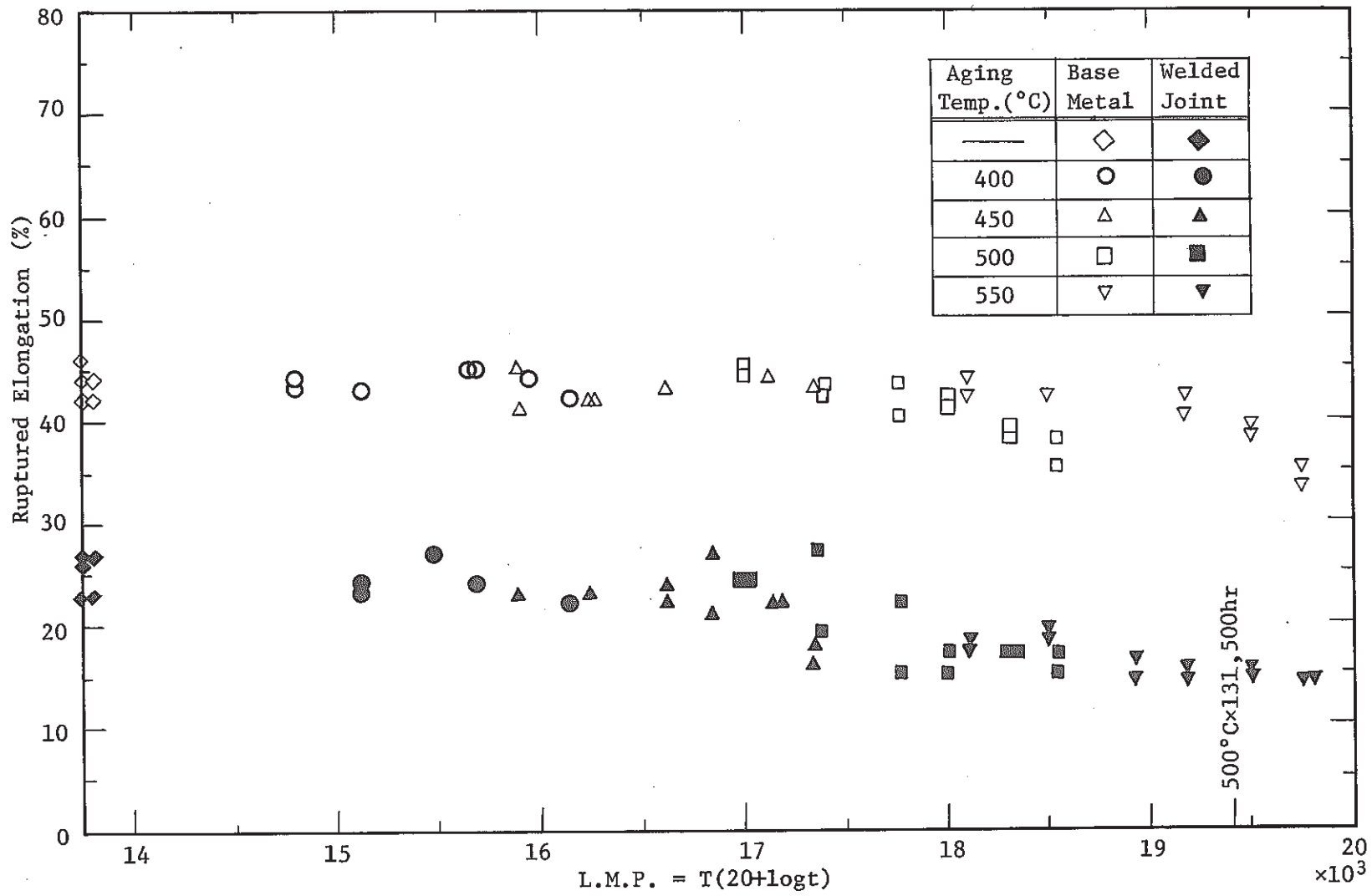


Fig. 9(c) Relation between L.M.P. and ruptured elongation of SUS304 tested at 500°C

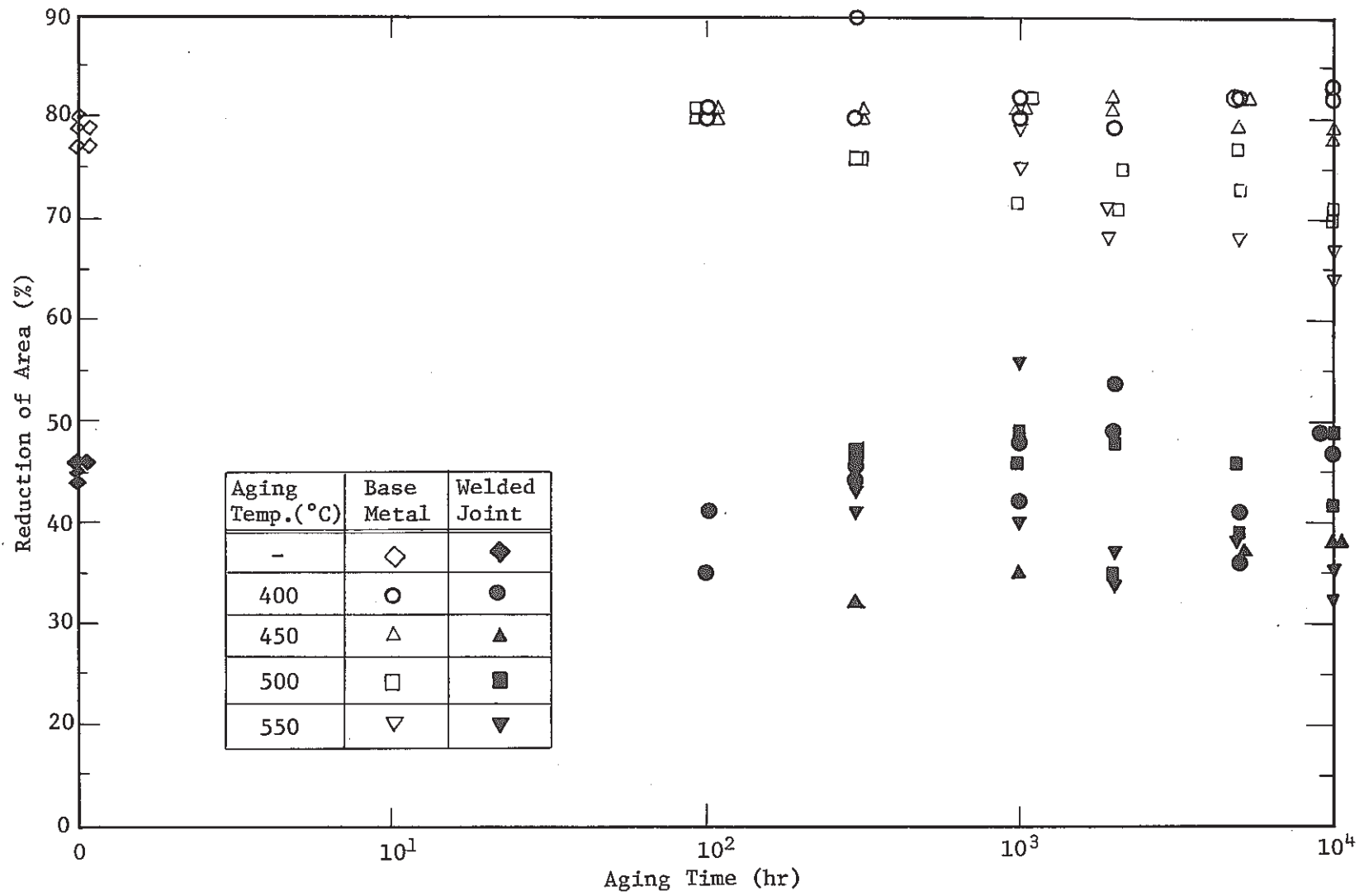


Fig. 10(a) Effect of thermal aging on reduction of area of SUS304 tested at R.T.

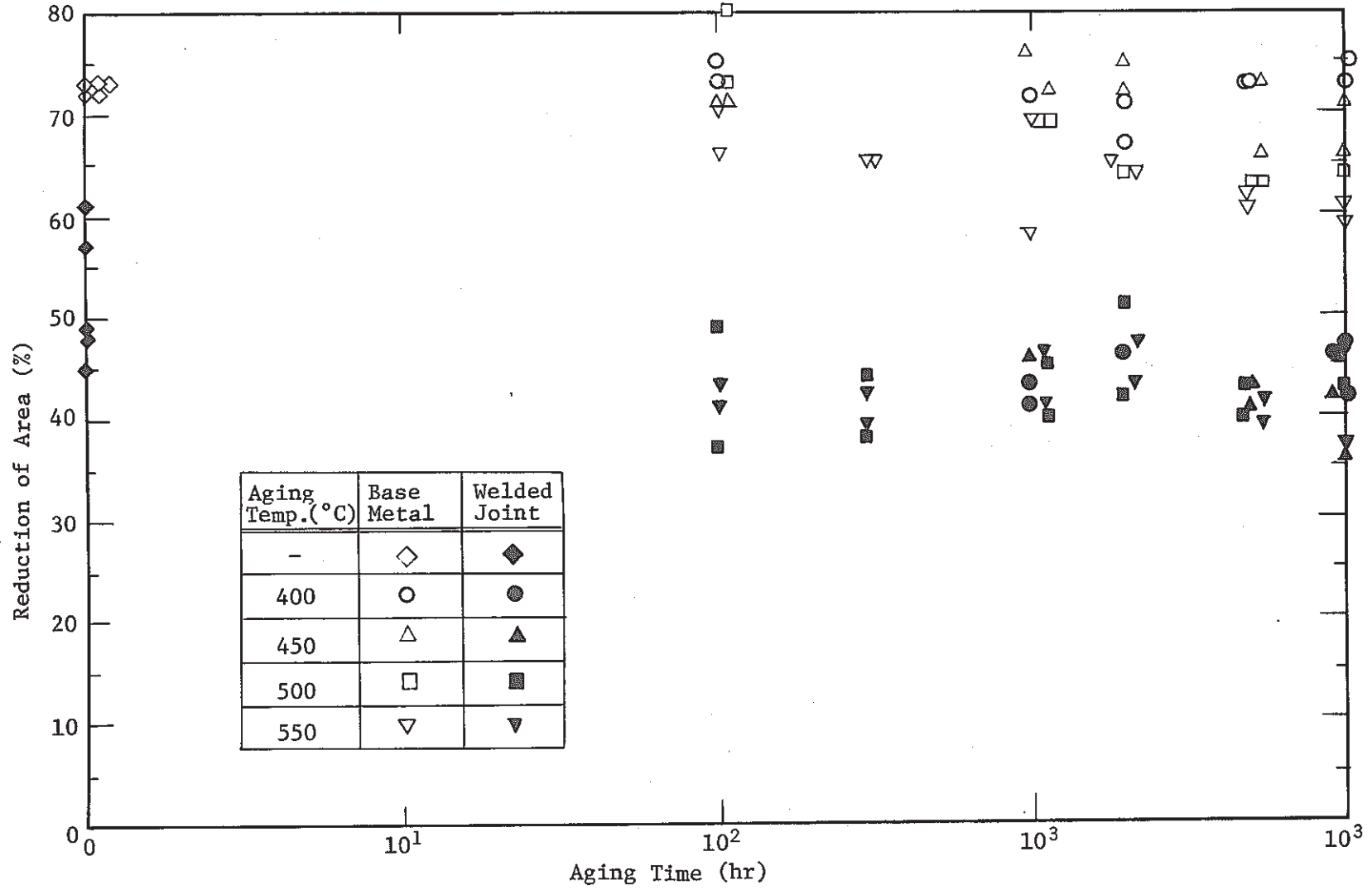


Fig. 10(b) Effect of thermal aging on reduction of area of SUS304 tested at 400°C

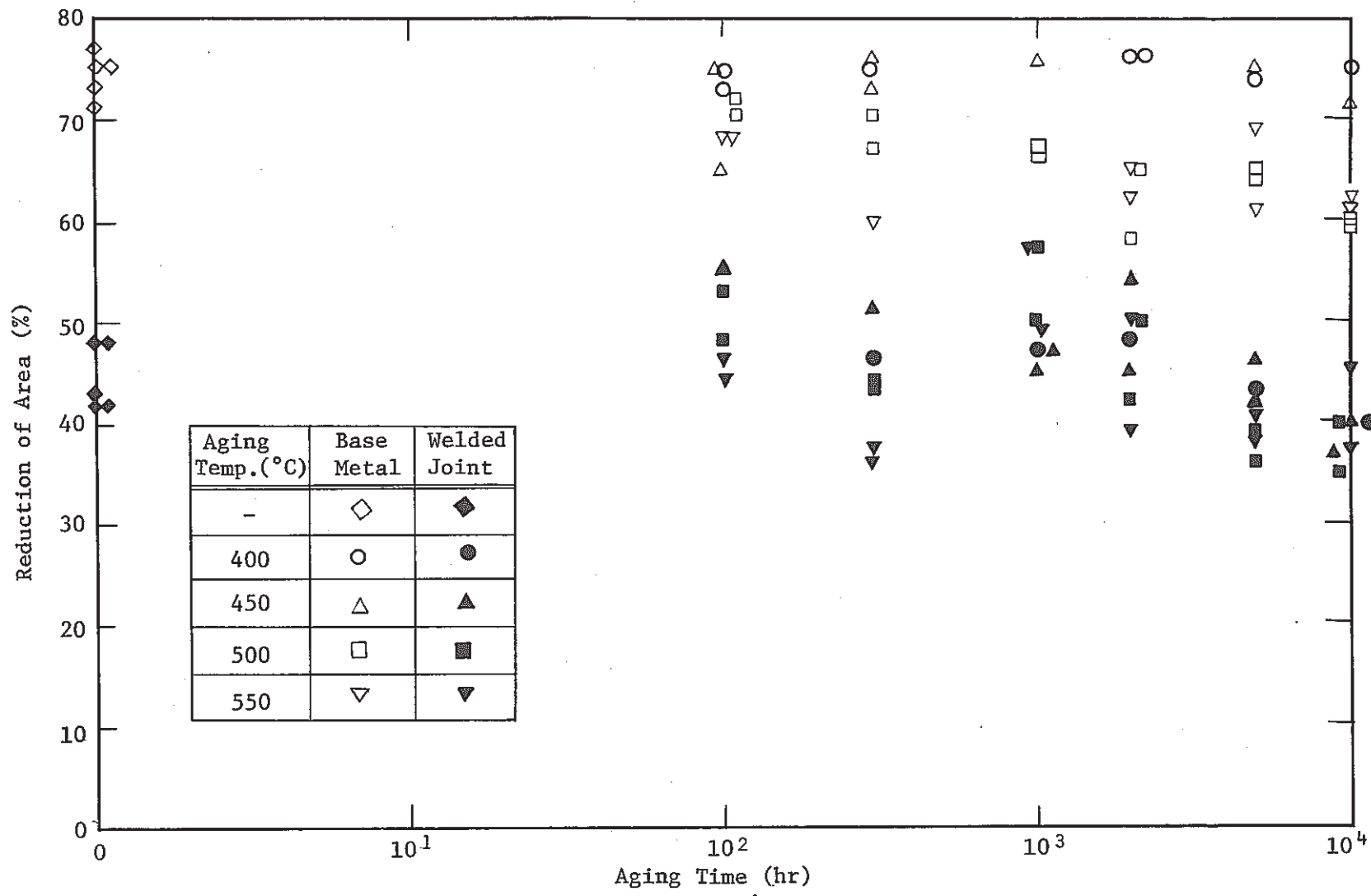


Fig. 10(c) Effect of thermal aging on reduction of area of SUS304 tested at 500°C

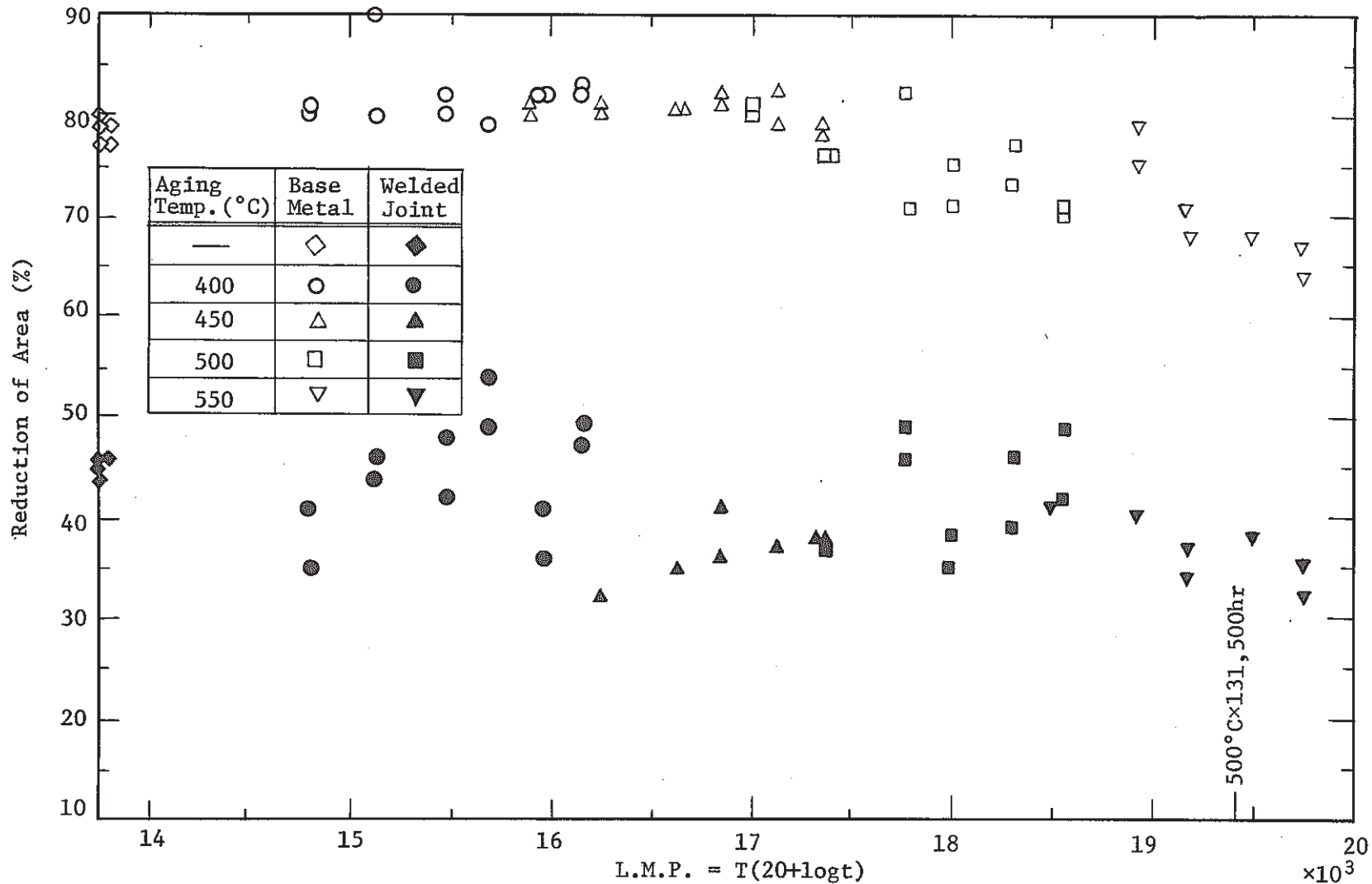


Fig. 11(a) Relation between L.M.P. and reduction of area of SUS304 tested at R.T.

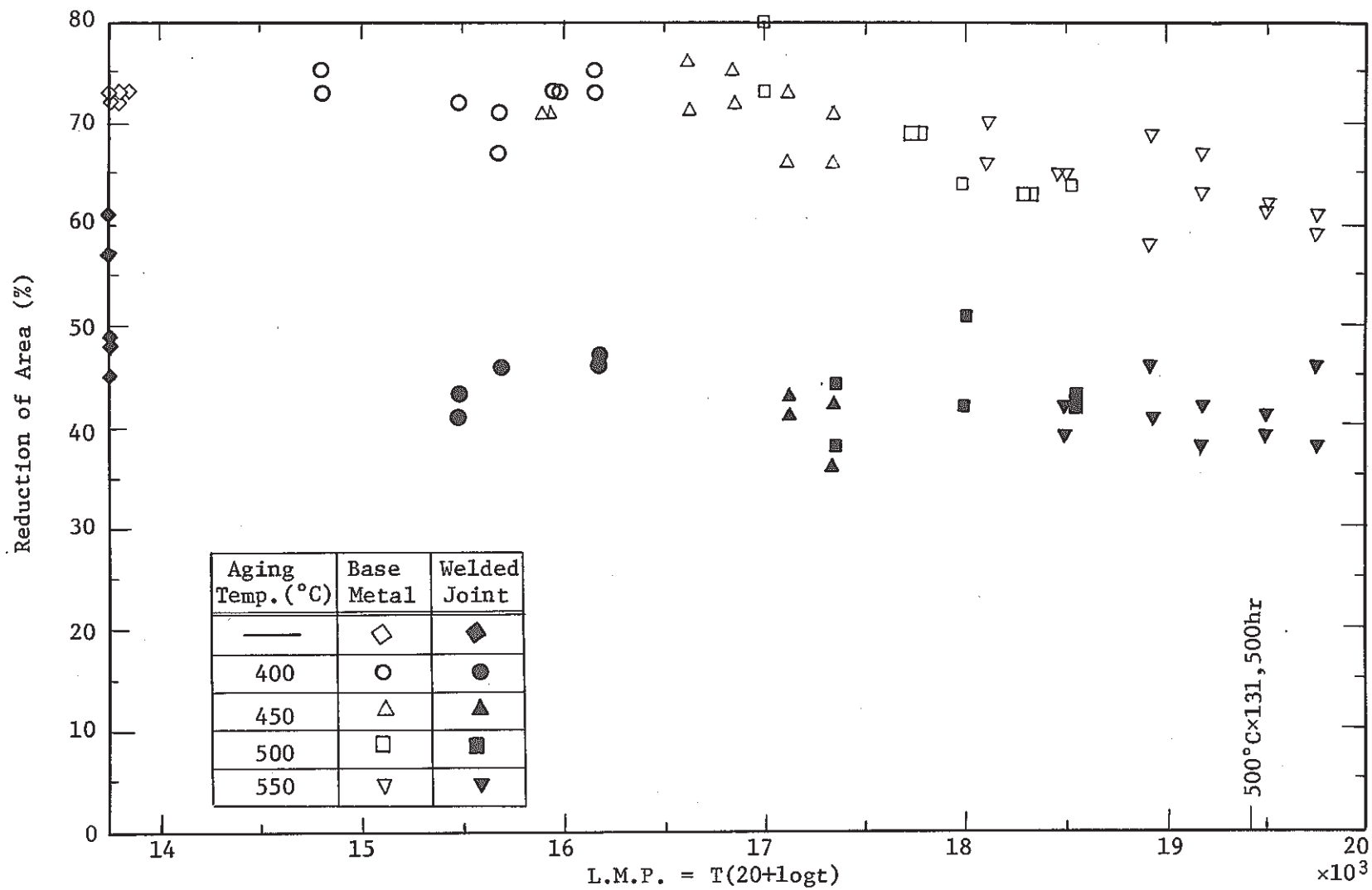


Fig. 11(b) Relation between L.M.P. and reduction of area of SUS304 tested at 400°C

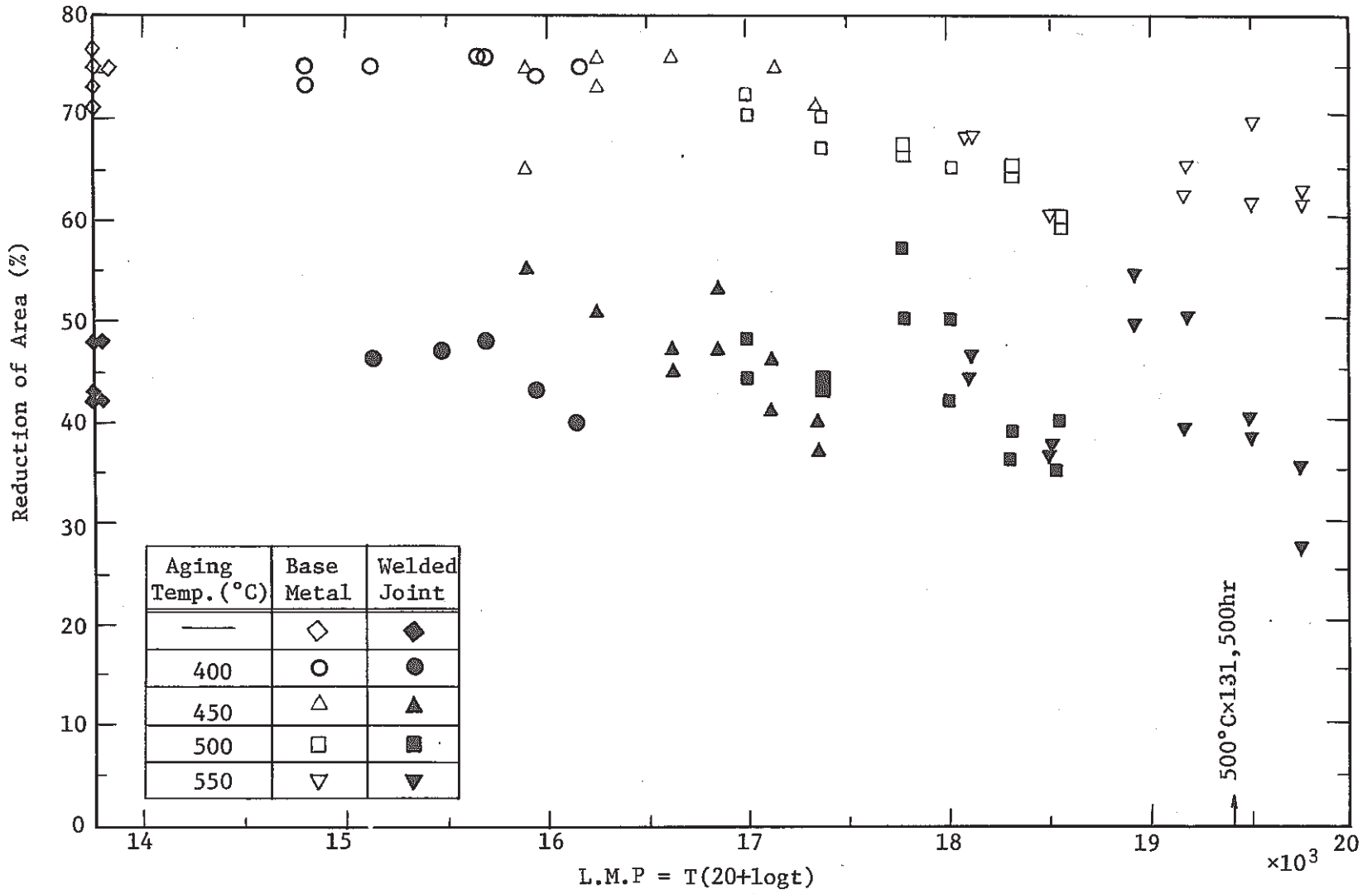


Fig. 11(c) Relation between L.M.P. and reduction of area of SUS304 tested at 500°C

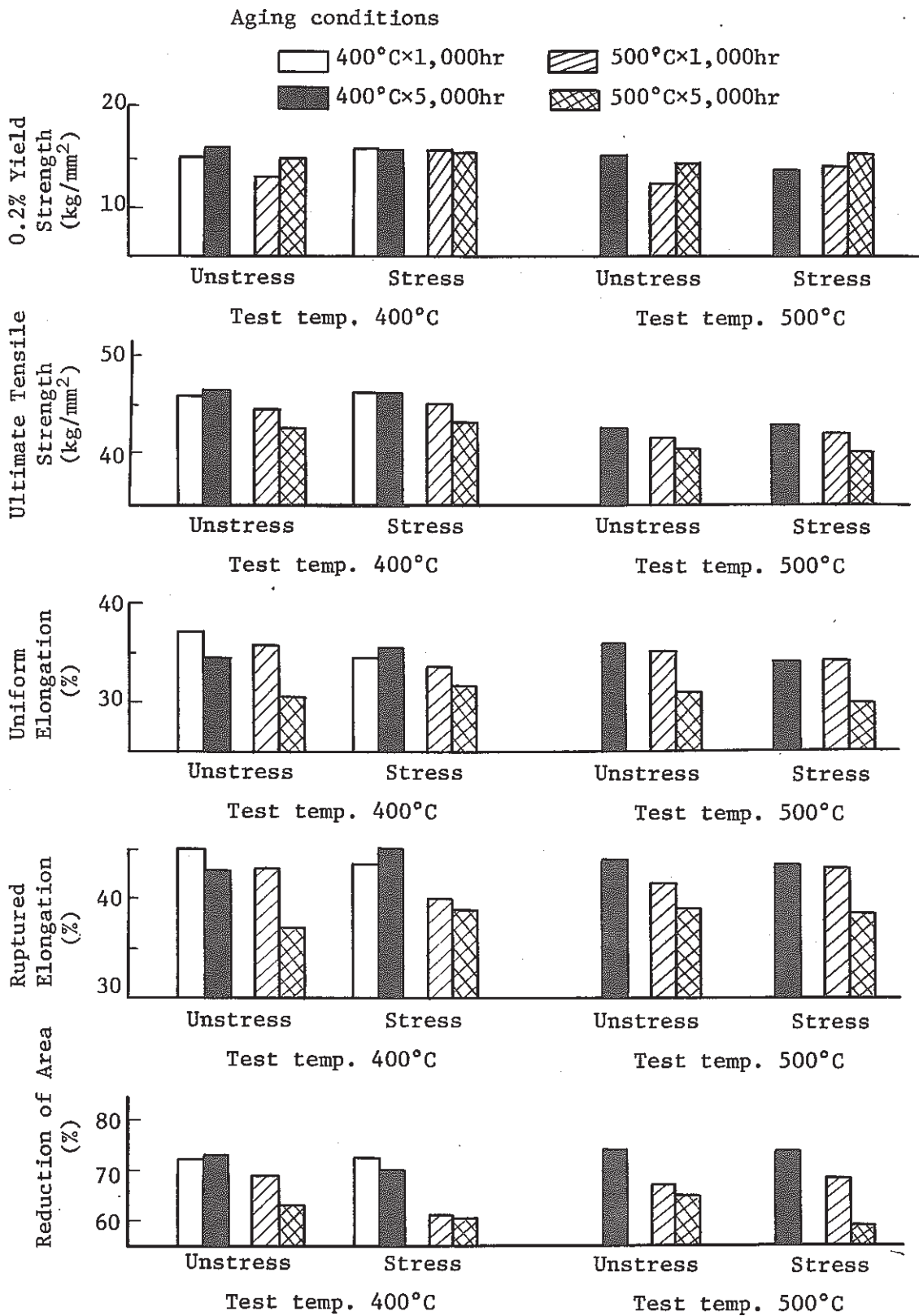


Fig.12(a) Effect of thermal aging under the stress of 7.8 kg/mm² on tensile properties of SUS304 base metal tested at 400°C and 500°C

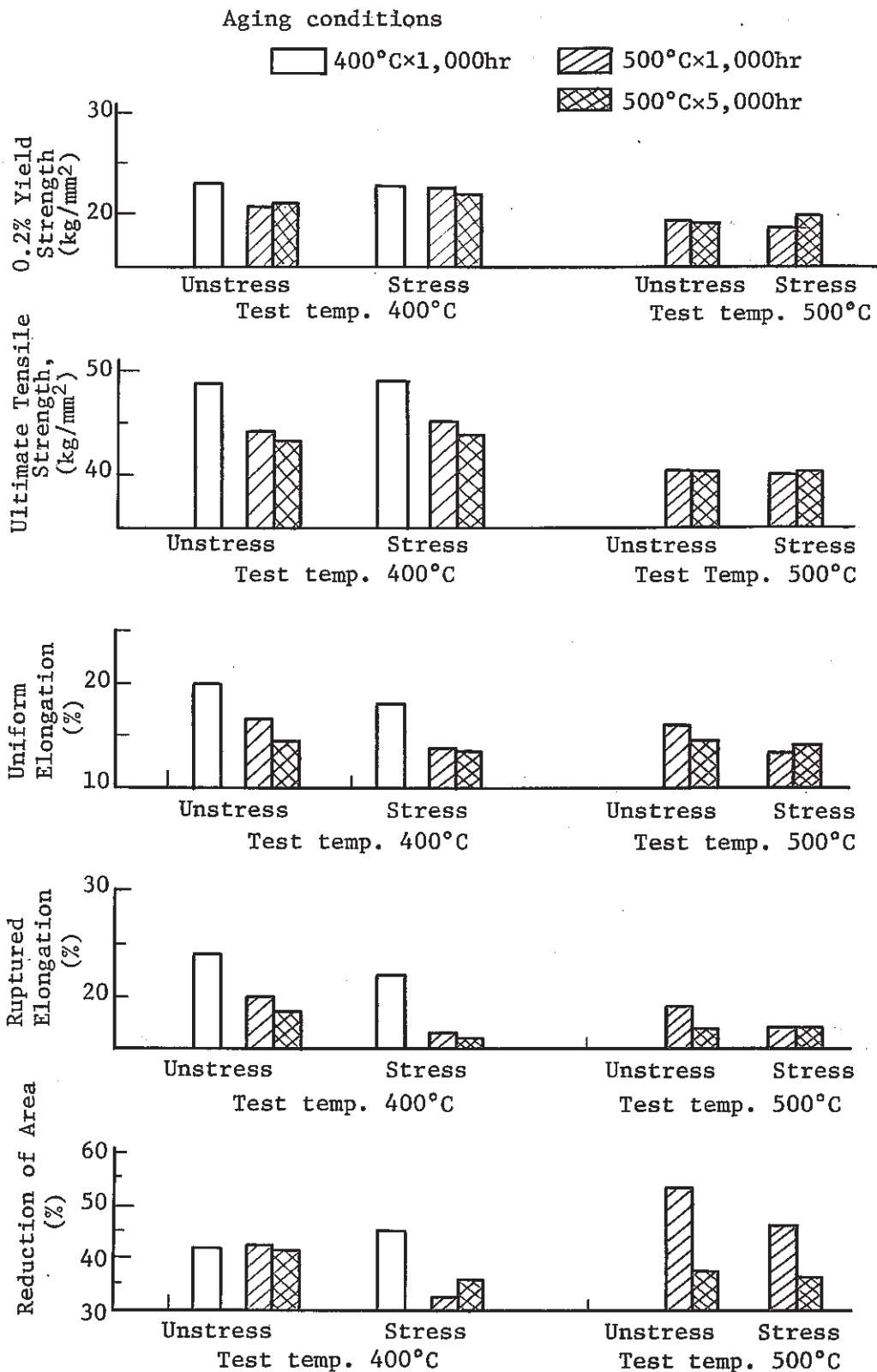


Fig.12(b) Effect of thermal aging under the stress of 7.8 kg/mm² on tensile properties of SUS304 welded joint tested at 400°C and 500°C

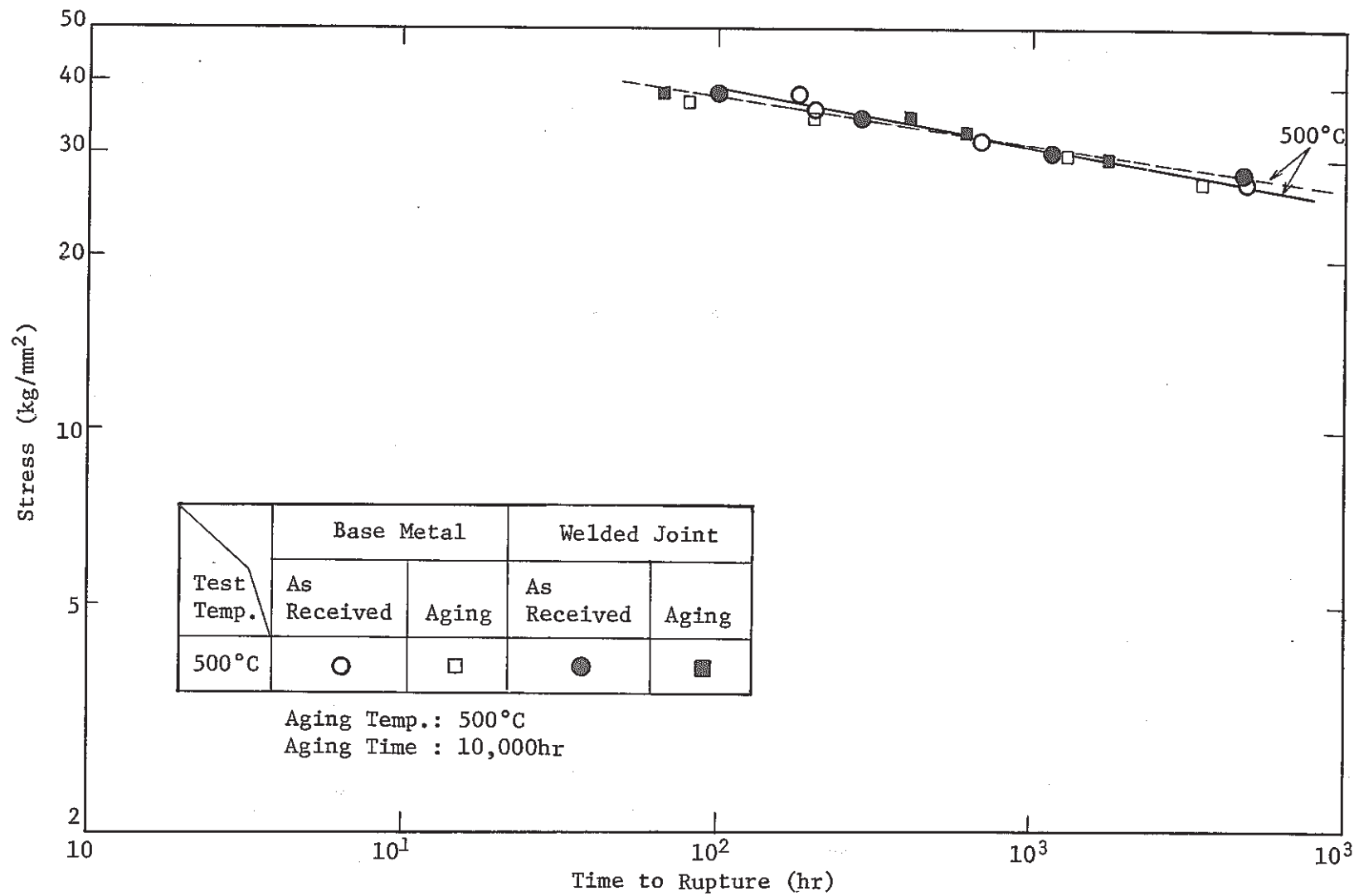


Fig. 13 Effect of thermal aging on creep rupture strength of SUS304 tested at 500°C

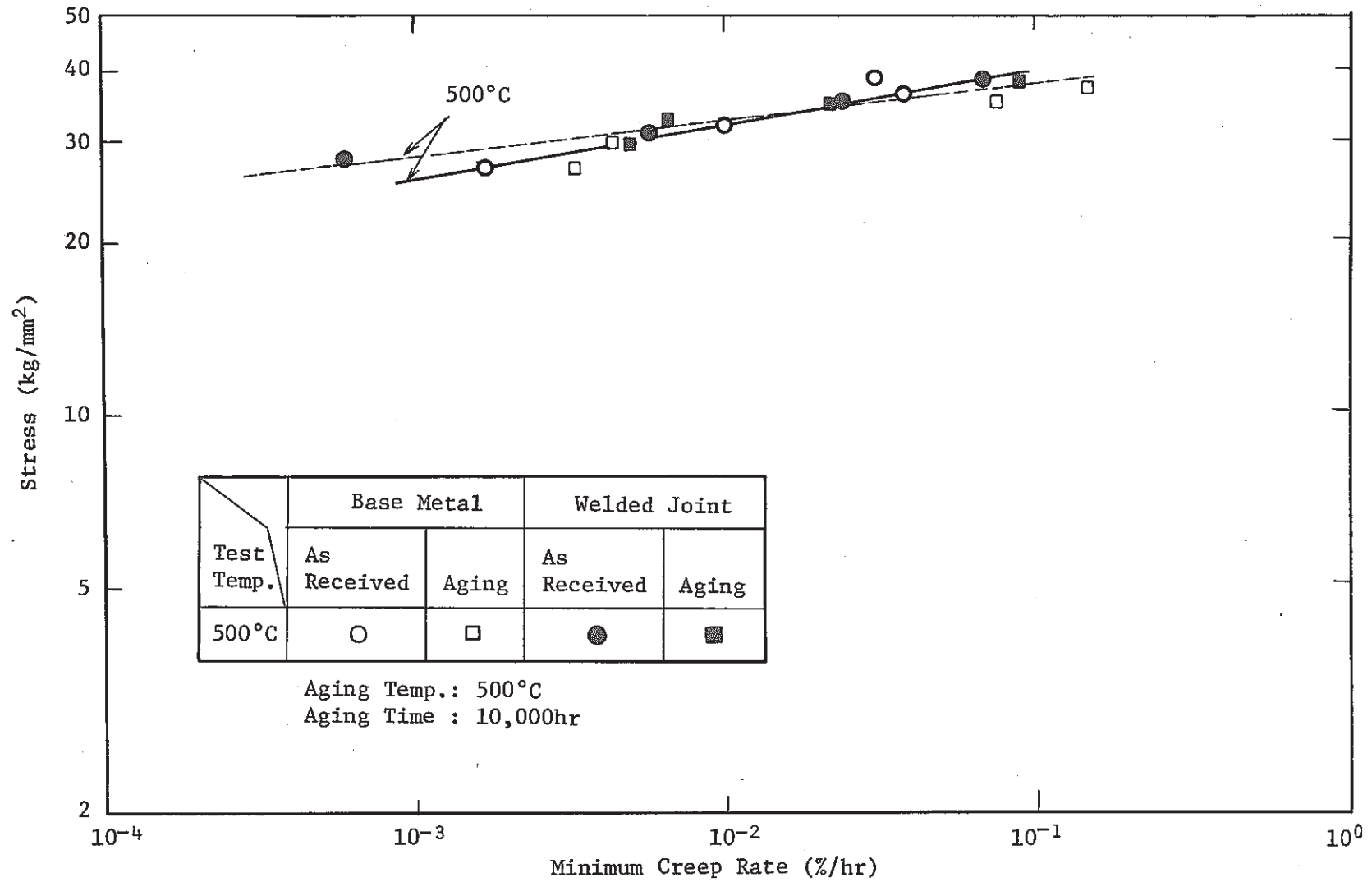


Fig. 14 Effect of thermal aging on minimum creep rate of SUS304 tested at 500°C

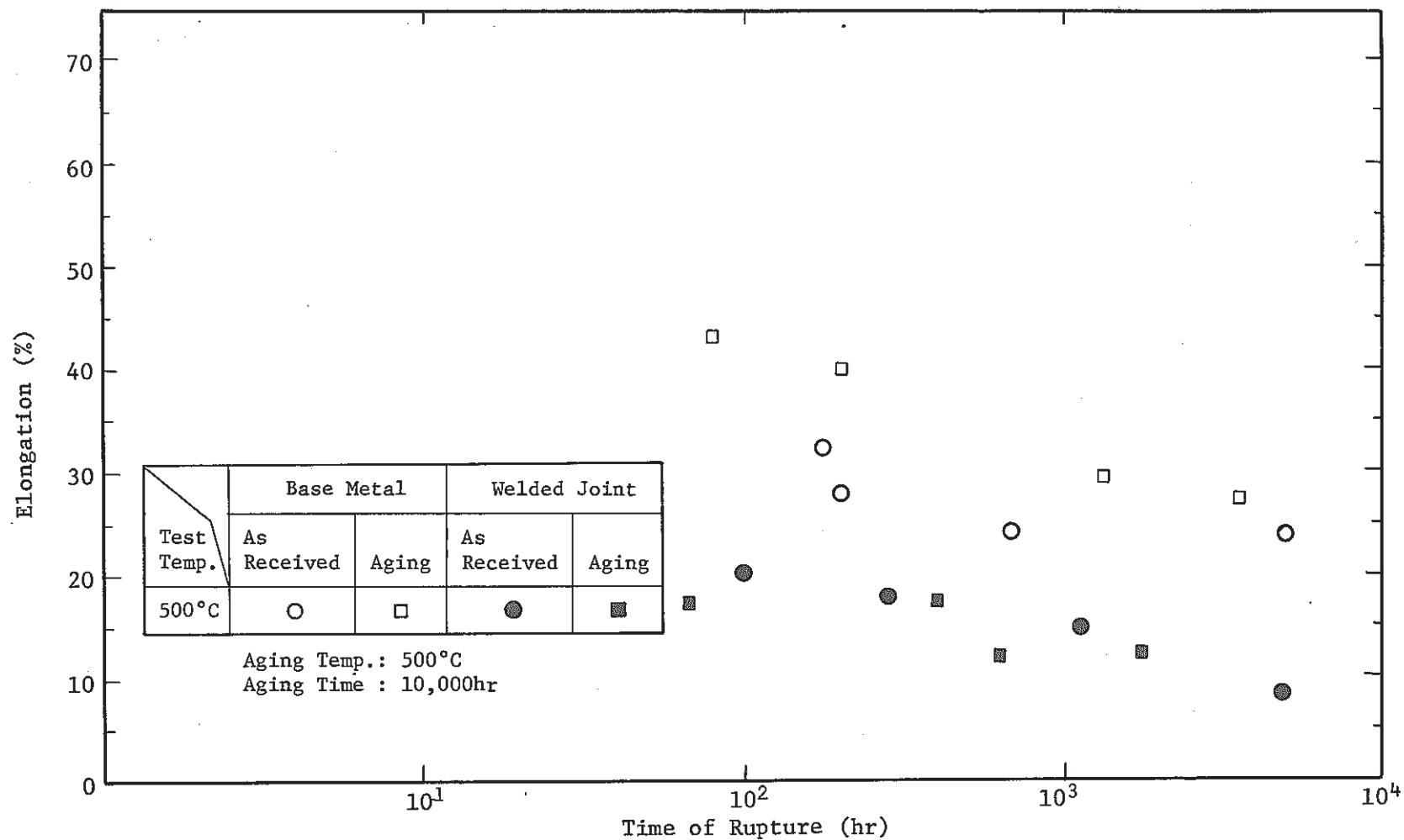


Fig. 15 Effect of thermal aging on creep rupture elongation of SUS304 tested at 500°C

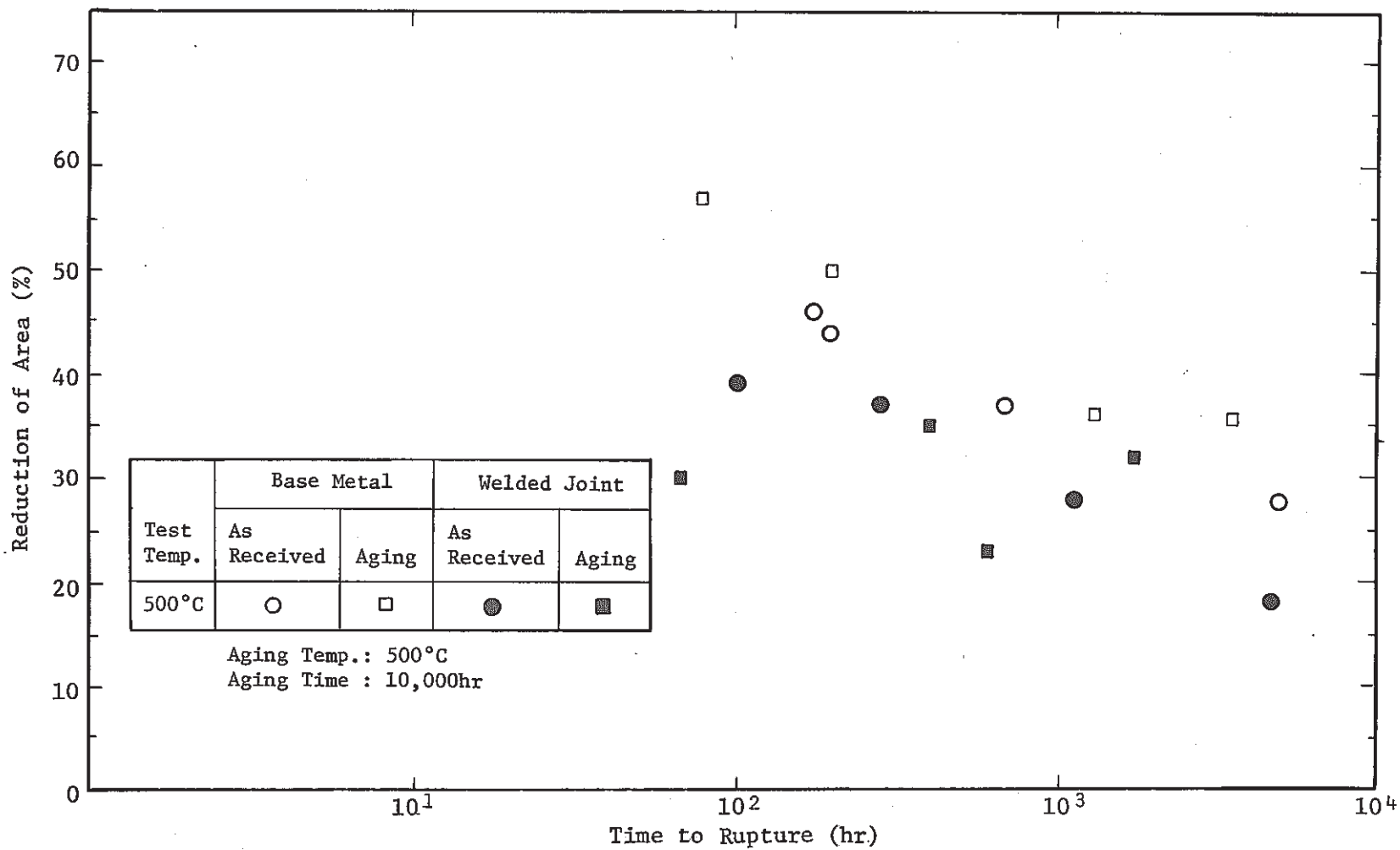
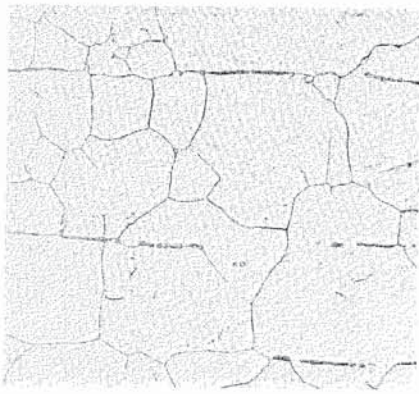
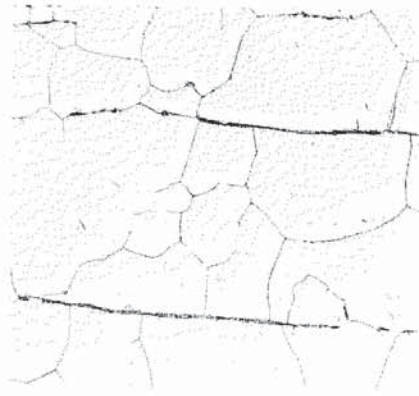


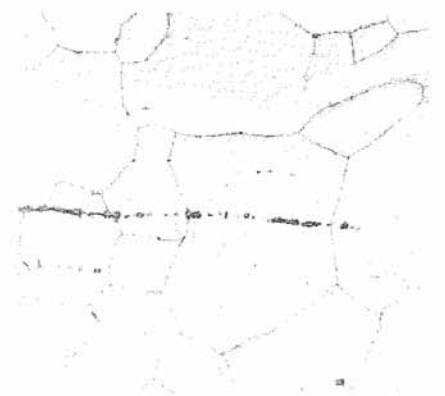
Fig. 16 Effect of thermal aging on the reduction of area of specimen ruptured of SUS304 tested at 500°C



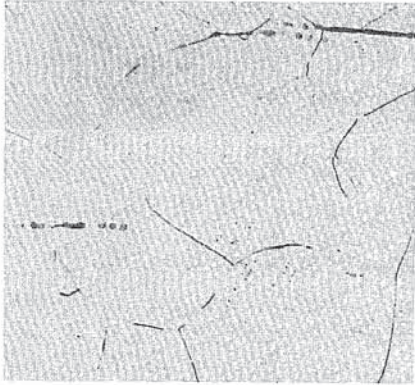
550°C × 2,000 hr



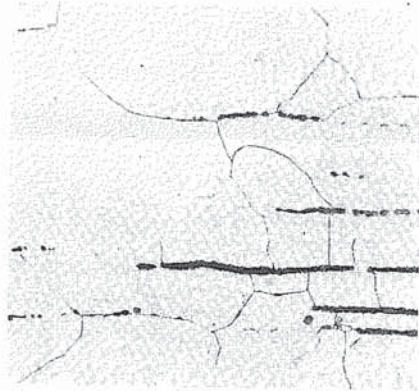
550°C × 5,000 hr



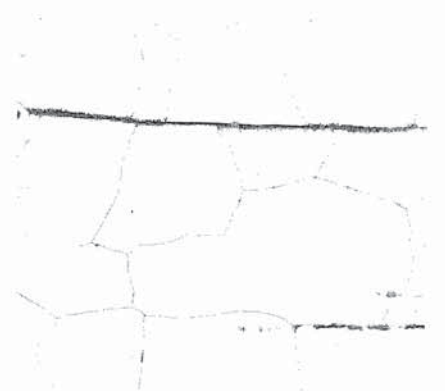
550°C × 10,000 hr



500°C × 2,000 hr



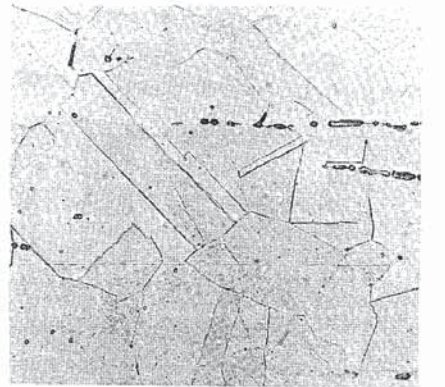
500°C × 5,000 hr



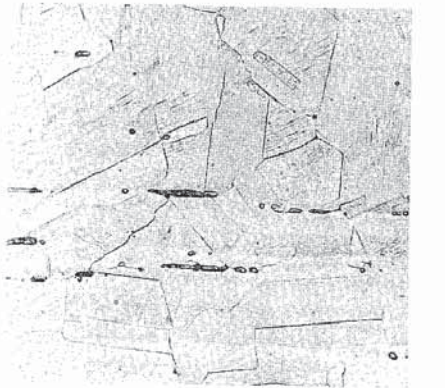
500°C × 10,000 hr



As received

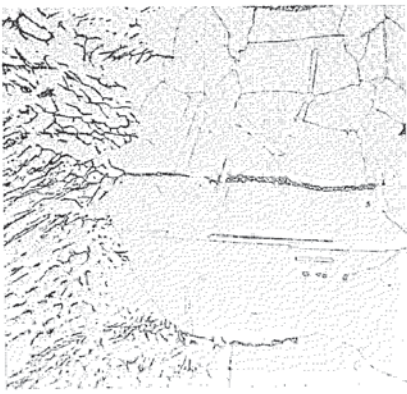


450°C × 10,000 hr

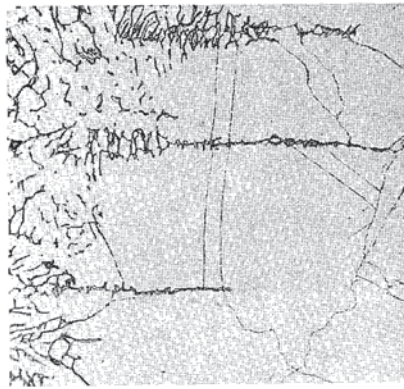


400°C × 10,000 hr

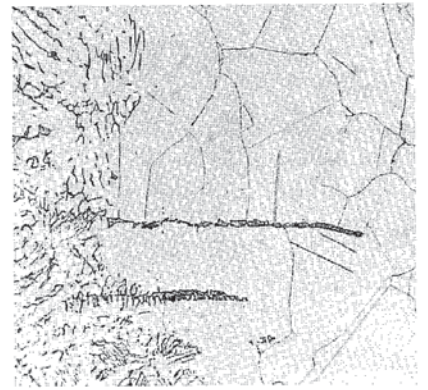
Fig. 17 Micrographs of base metal after thermal aging



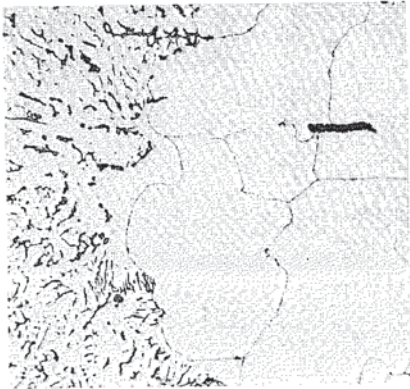
550°C x 2,000 hr



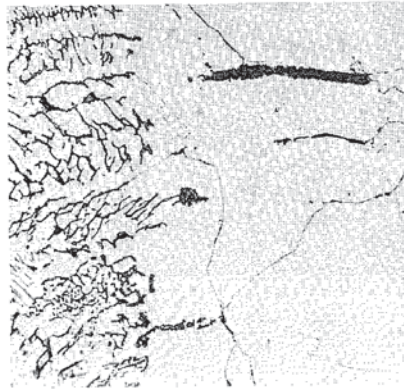
550°C x 5,000 hr



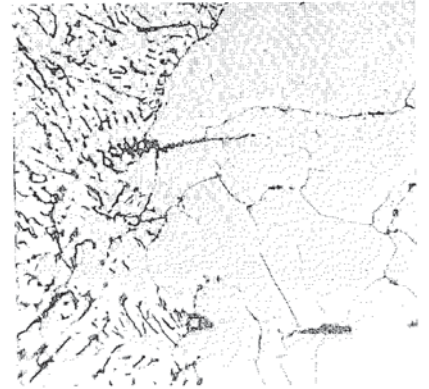
550°C x 10,000 hr



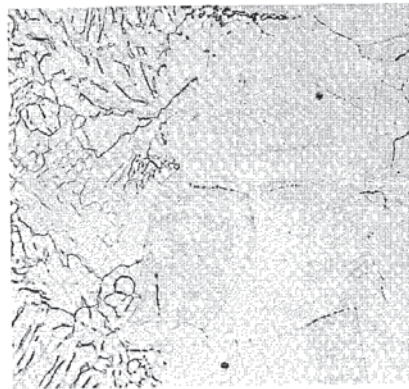
500°C x 2,000 hr



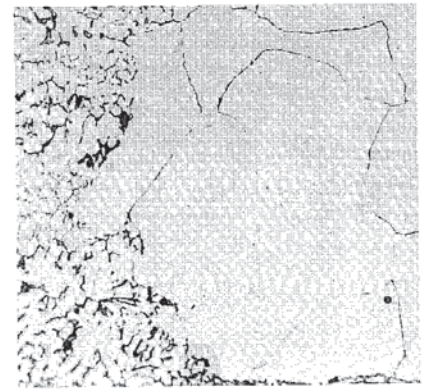
500°C x 5,000 hr



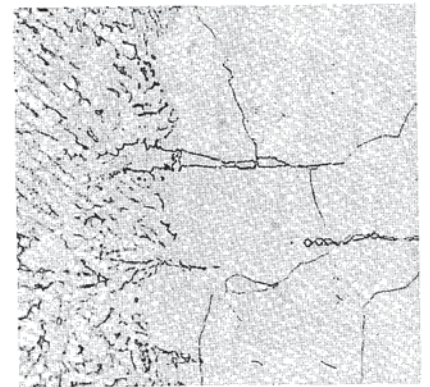
500°C x 10,000 hr



As recieved



450°C x 10,000 hr



400°C x 10,000 hr

Fig. 18 Micrographs of welded joint after thermal aging

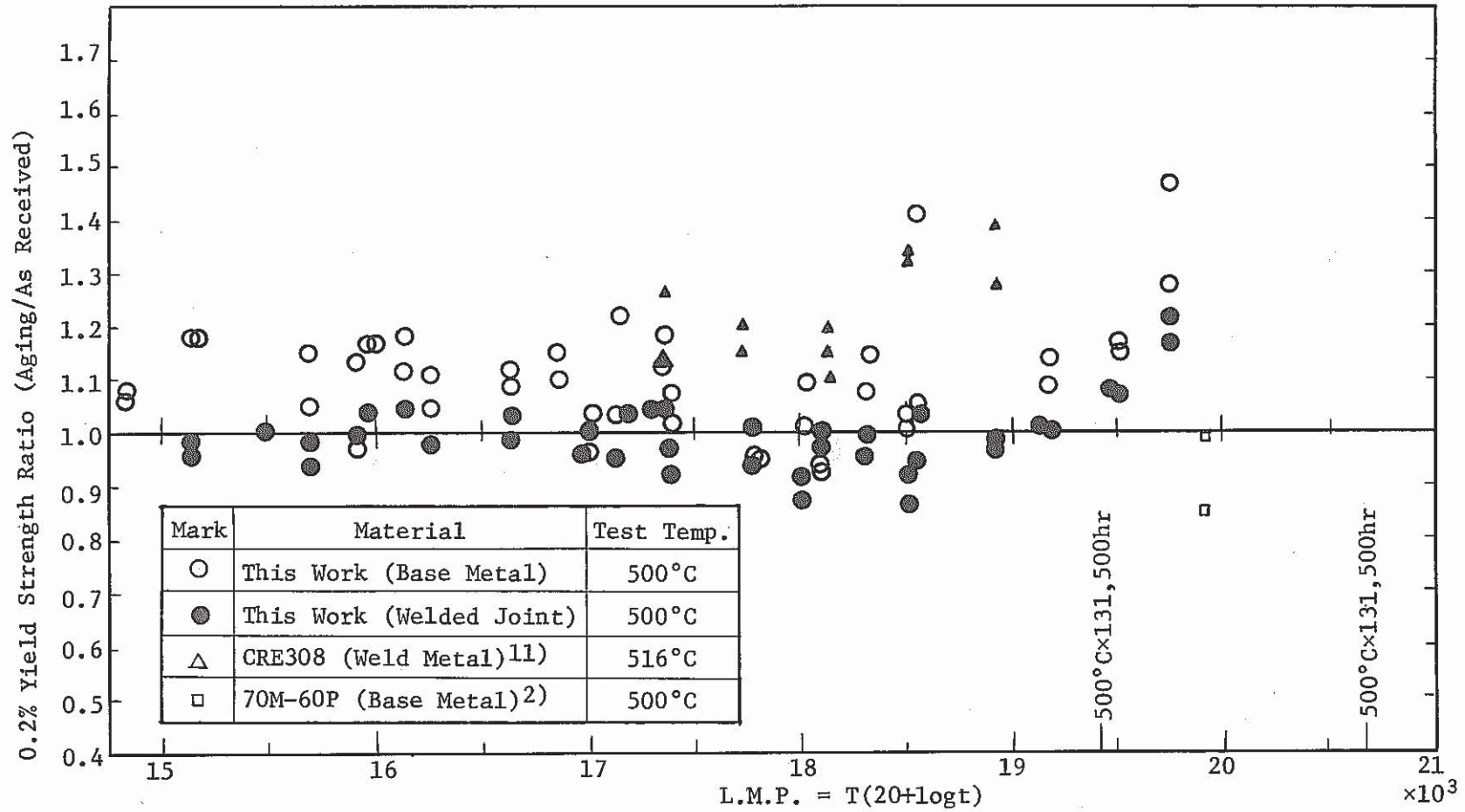


Fig. 19 Comparison of 0.2% yield strength ratio between this work and others as a function of L.M.P.

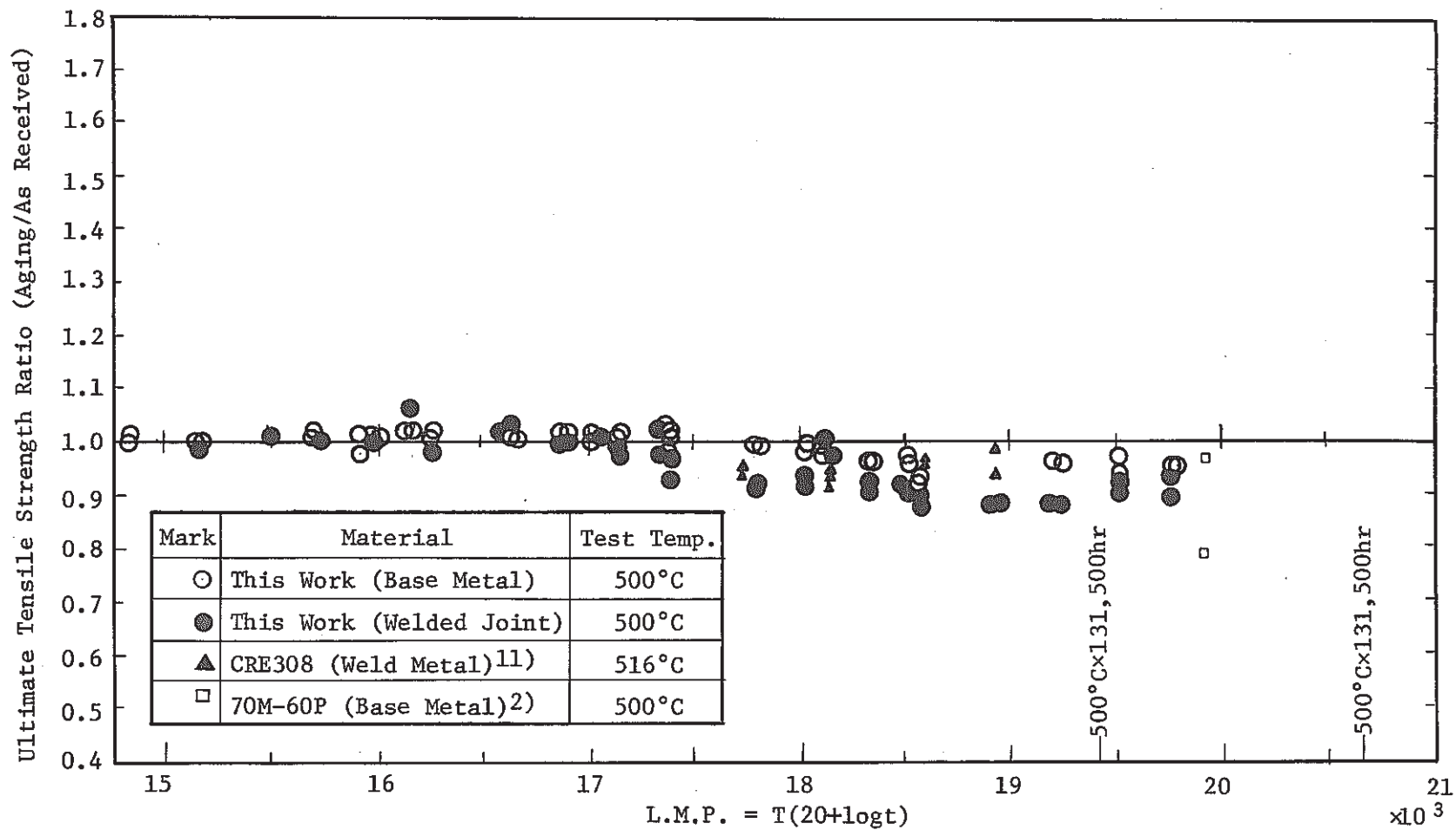


Fig. 20 Comparison of ultimate tensile strength ratio between this work and others as a function of L.M.P.

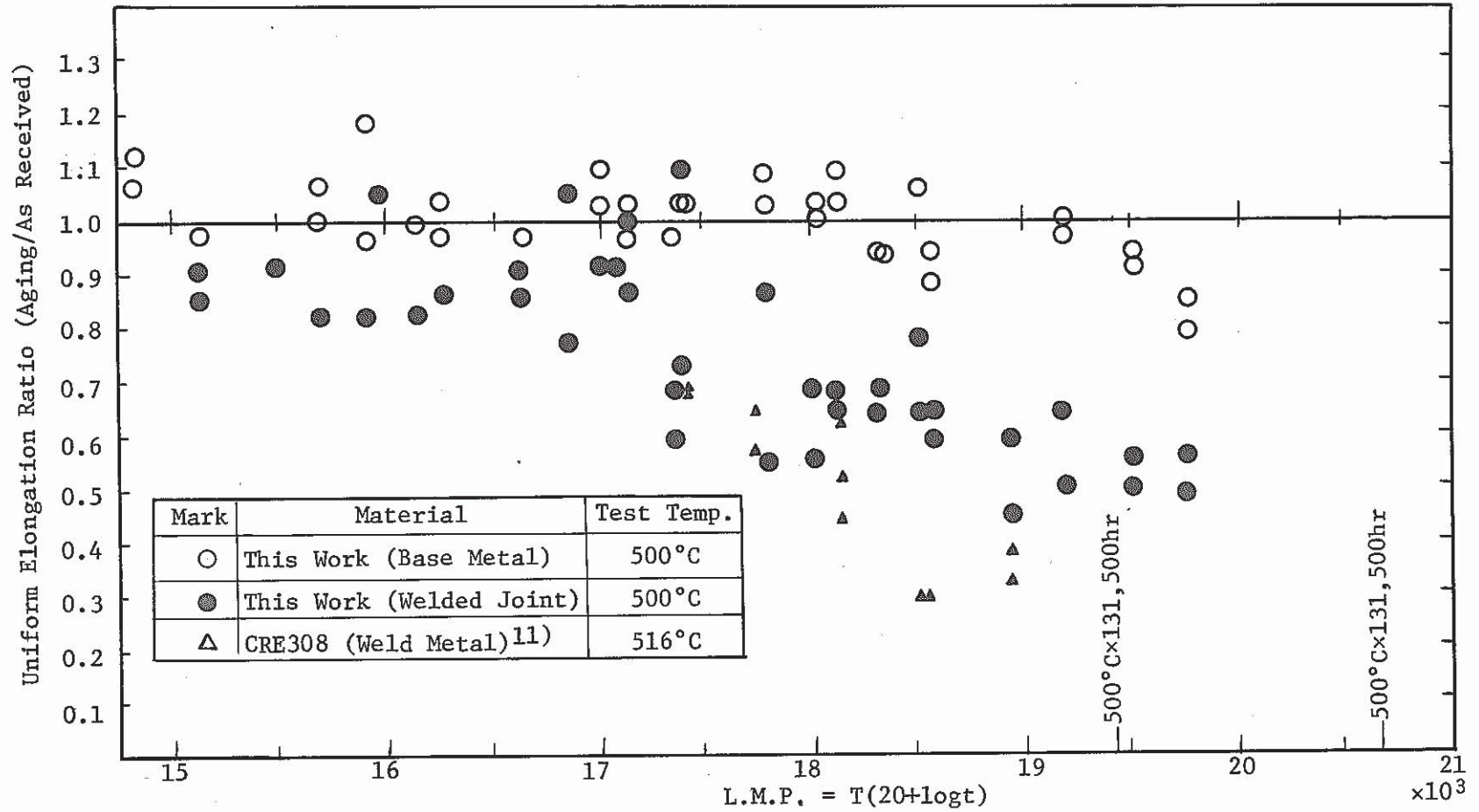


Fig. 21 Comparison of uniform elongation ratio between this work and others as a function of L.M.P.

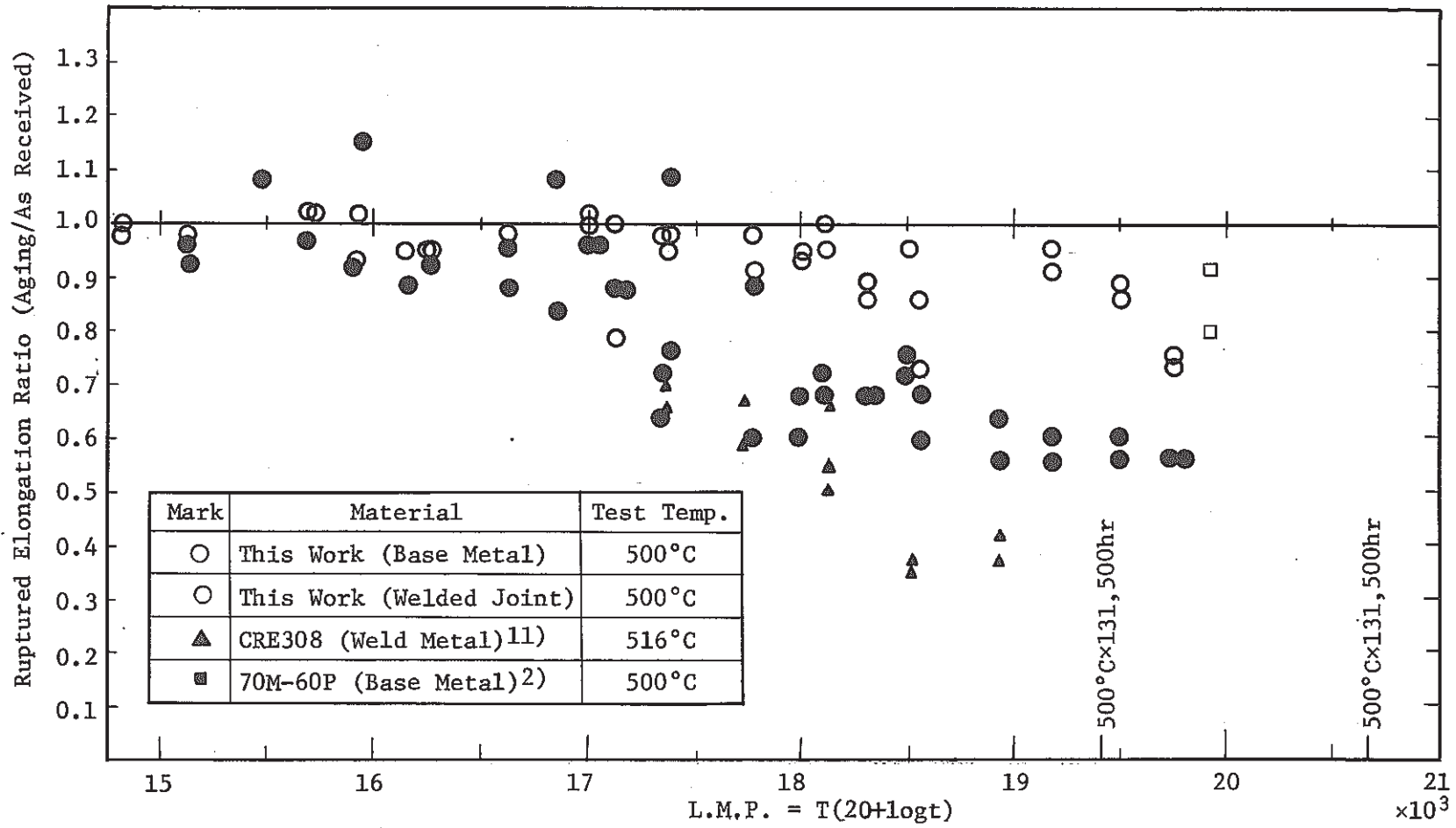


Fig. 22 Comparison of ruptured elongation ratio between this work and others as a function of L.M.P.

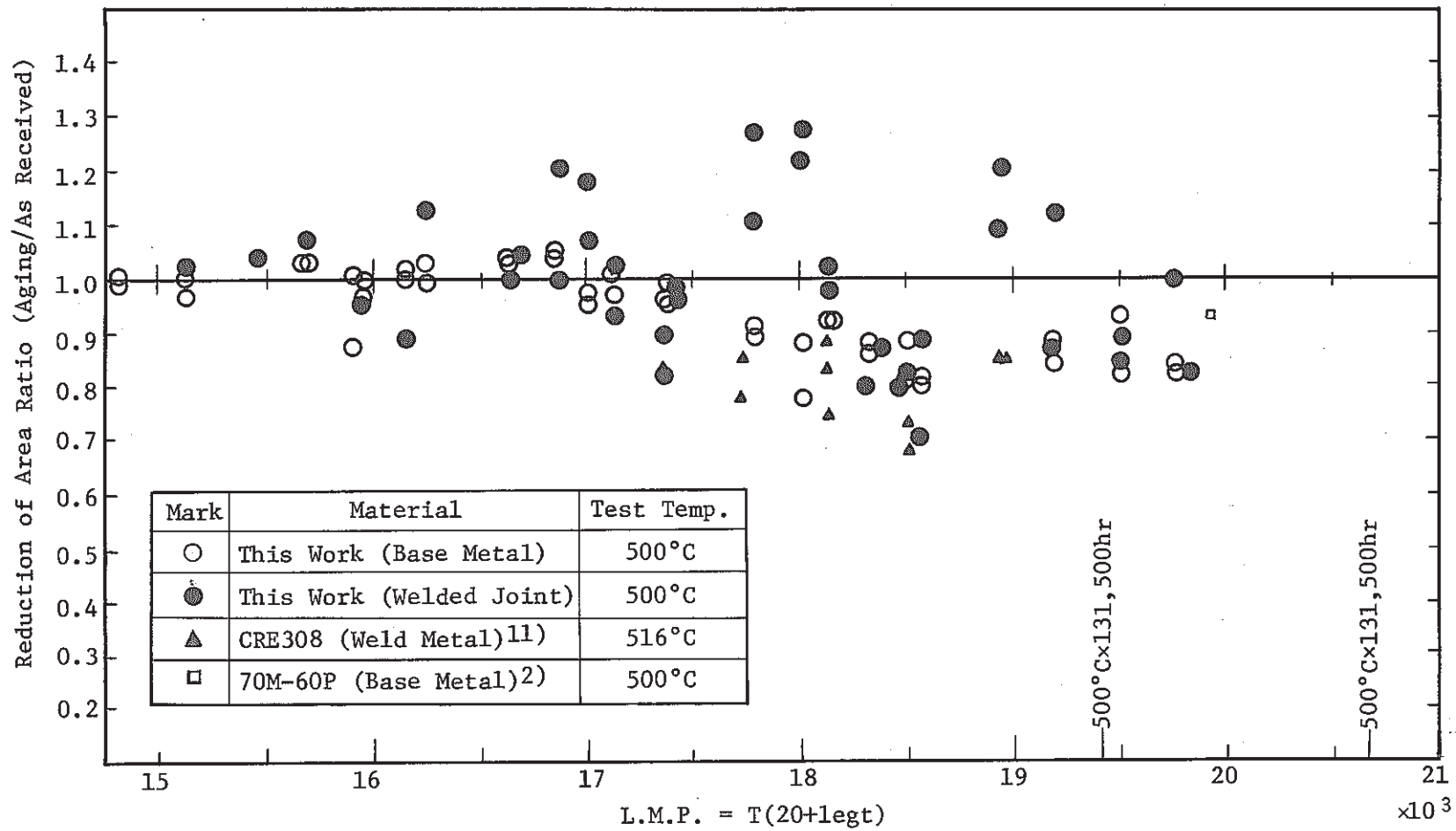


Fig. 23 Comparison of reduction of area ratio between this work and others as a function of L.M.P.

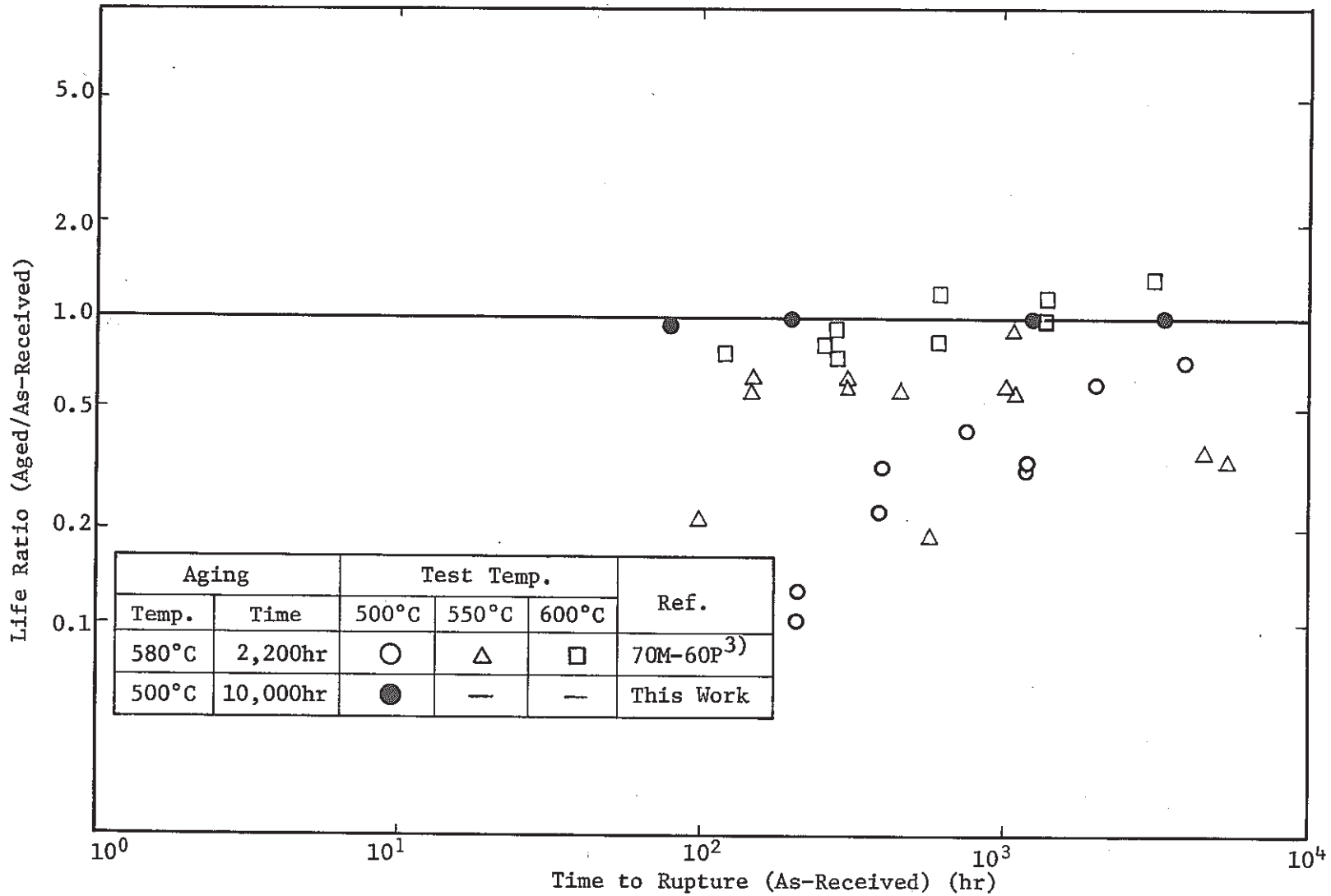


Fig. 24 Effect of thermal aging on creep rupture life of type 304 stainless steel (base metal)

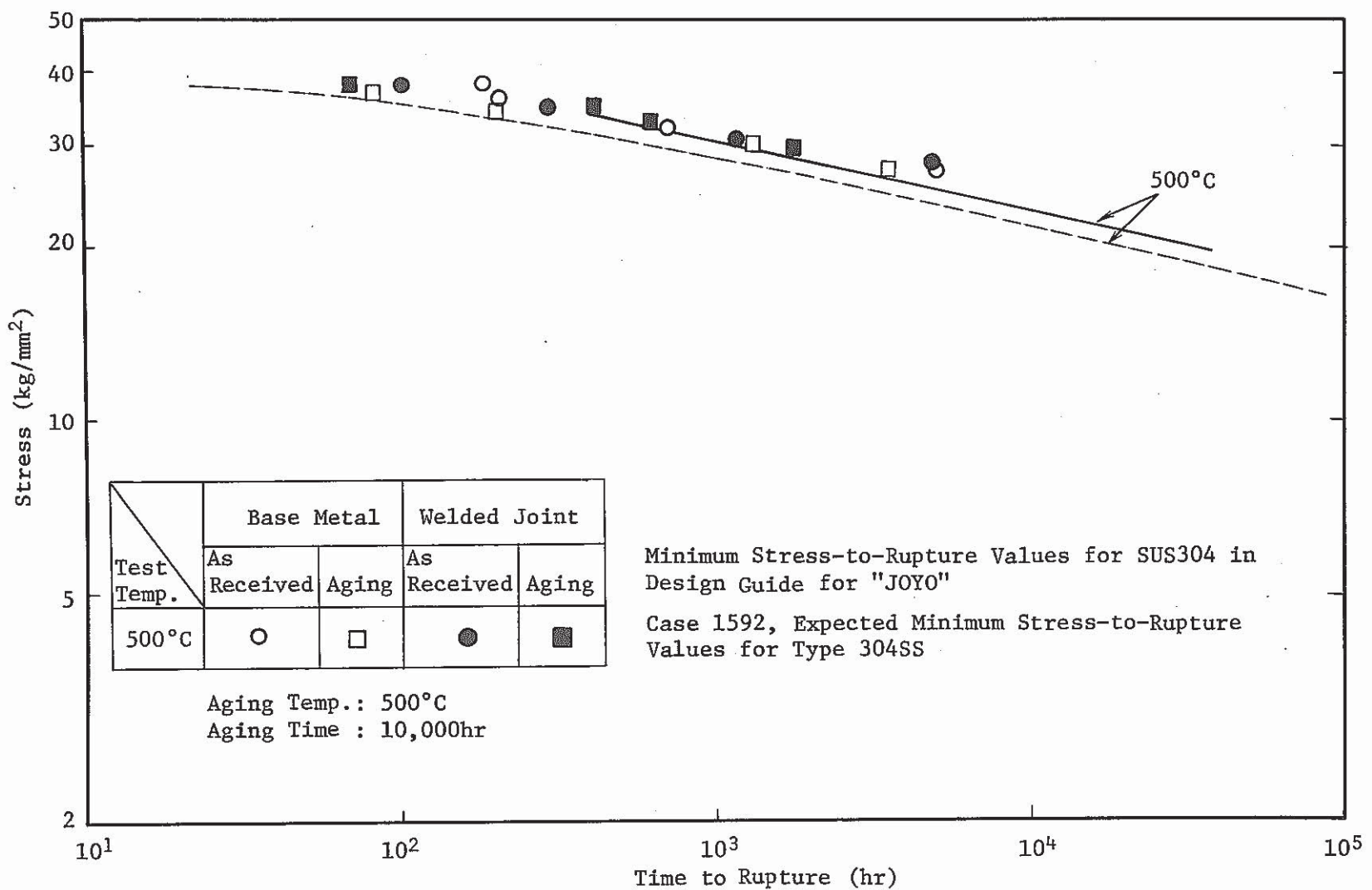


Fig. 25 Comparison of creep rupture strength among this work, the design guide for "JOYO" and design curve ASME Code Case 1592