

J A E R I - M
94-022

20%冷間加工したハステロイXRの
クリープ特性

1994年2月

倉田 有司・中島 甫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、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、お申し込みください。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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

20%冷間加工した Hastelloy XR のクリープ特性

日本原子力研究所東海研究所材料研究部

倉田 有司・中島 甫

(1994年1月28日受理)

20%冷間加工及び固溶化熱処理を行った Hastelloy XR それぞれについて、800、900 及び 1000℃でクリープ試験を行い、クリープ特性に及ぼす20%冷間加工の影響を検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 20%冷間加工材のクリープ破断時間は、固溶化熱処理材に比べ、800℃では長くなり、900℃ではほぼ同程度、1000℃では逆に短くなる。
- (2) 破断伸び及び破断絞りは、固溶化熱処理材に比べ20%冷間加工材の方が小さくなる。20%冷間加工材についてこれらの値は900℃で最も小さくなるが、1000℃ではかなり回復する。
- (3) 固溶化熱処理材及び20%冷間加工材ともに高温で初期に低いクリープ速度の領域を持つ非古典的なクリープ曲線が観察された。
- (4) 800 及び 900℃では20%冷間加工材の最小クリープ速度 ($\dot{\epsilon}_m$) は固溶化熱処理材の 1/20 ~ 1/50 となるが、1000℃では逆に20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の2倍程度に上昇する。
- (5) 20%の冷間加工は、800 及び 900℃ではクリープ変形に対する大きな抵抗となるが、1000℃では動的再結晶を引き起こしクリープ強度の著しい劣化をもたらす。

Creep Properties of 20% Cold Worked Hastelloy XR

Yuji KURATA and Hajime NAKAJIMA

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

(Received January 28, 1994)

Creep properties of Hastelloy XR, in 20% cold worked or solution treated condition, were studied at 800, 900 and 1000°C. The results obtained are as follows:

- (1) At 800°C, creep rupture time of 20% cold worked Hastelloy XR is longer than that of solution treated one. However, the effect disappears above 900°C. At 1000°C, it becomes shorter than that of solution treated Hastelloy XR.
- (2) Rupture elongation and reduction of area of 20% cold worked Hastelloy XR are smaller than those of solution treated one. While these values of 20% cold worked Hastelloy XR are lowest at 900°C, they recover considerably at 1000°C.
- (3) Nonclassical creep curves which have the region with low creep rate at an early stage of creep were observed at high temperatures for Hastelloy XR, in 20% cold worked or solution treated condition.
- (4) Minimum creep rate, $\dot{\epsilon}_m$, of 20% cold worked Hastelloy XR is decreased by as much as a factor of 20 to 50 at 800 and 900°C. On the other hand, $\dot{\epsilon}_m$ of 20% cold worked Hastelloy XR is increased by as much as a factor of 2 at 1000°C.

- (5) Although 20% cold work enhances creep resistance of Hastelloy XR at 800 and 900°C, the effect becomes detrimental at 1000°C where dynamic recrystallization occurs during creep.

Keywords: Creep, Cold Work, Solution Treatment, Hastelloy XR, Rupture Time, Minimum Creep Rate, Rupture Elongation, Reduction of Area, Classical Creep Curve, Nonclassical Creep Curve, Recrystallization

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	2
2.1 供試材	2
2.2 クリープ試験	2
3. 実験結果及び考察	3
3.1 クリープ曲線	3
3.2 20%冷間加工材と固溶化熱処理材のクリープ特性の比較	4
3.3 クリープ特性の応力依存性	5
3.4 20%冷間加工によるクリープ曲線の変化	6
4. 結 言	7
謝 辞	7
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedure	2
2.1 Material	2
2.2 Creep Test	2
3. Experimental Results and Discussion	3
3.1 Creep Curve	3
3.2 Comparison of Creep Properties for 20% Cold Worked and Solution Treated Materials	4
3.3 Stress Dependence of Creep Properties	5
3.4 Change in Creep Curve Caused by 20% Cold Work	6
4. Conclusions	7
Acknowledgements	7
References	8

1 . 結 言

高温ガス炉等の高温機器は使用温度が高く、その設計には材料のクリープ特性を考慮した高温構造設計方針を必要とするため^{1, 2)}、使用する材料のクリープ特性を把握することが重要である。日本原子力研究所(原研)で建設を進めている高温工学試験研究炉(HTTR)^{3, 4)}では、中間熱交換器等の高温機器について、高温部構造用耐熱合金としてハステロイXRを使用し、このような高温構造設計指針¹⁾及び材料強度基準⁵⁾を用いて設計している。

ハステロイXRの材料強度基準⁵⁾の作成にあたっては数多くのクリープ試験データが使用されたが、その多くは固溶化熱処理を受けた状態の材料のデータである。中間熱交換器等の高温機器を製作する際には、材料に曲げ等の冷間加工を施す部分がある。一般に冷間加工の程度により機械的性質は変化するが、通常、冷間加工の程度は、冷間加工材の短時間及び長時間強度が固溶化熱処理材の強度水準を下回らないように設定されている。材料の機械的性質に及ぼす冷間加工の影響は一般にかなり大きいので、これまでの設計手法に基づいて高温構造物を設計する場合だけでなく、さらに設計を高度化することを考えた場合でも、冷間加工材のクリープ特性を調べておくことは重要である。

また、冷間加工材のクリープ特性を詳細に調べることには、実用的観点から及び基礎的観点から次のような意義がある。実用的な観点からは先にも述べたように、高温機器ではしばしば冷間加工を受けた材料が使用されるため、使用条件におけるその特性を知っておく必要があり、さらに固溶化熱処理材に比べ特性が劣化する条件があれば、そのような点を明らかにする必要がある。また、基礎的な観点からは高温における強化機構あるいはクリープ変形機構を理解する上で冷間加工材のクリープ特性を詳細に調べることが役に立つ。

前者の実用的な観点からは、冷間加工したType 347⁶⁾、301、305及び310ステンレス鋼⁷⁾、冷間加工と炭化物析出処理を行ったType316ステンレス鋼⁸⁾及び冷間加工したインコネル617合金⁹⁾のクリープ特性が報告されている。これらの実験結果からは広範な再結晶が起こらない範囲では、冷間加工によりクリープ抵抗は改善されるが、クリープ中に著しい再結晶が起こると、逆にクリープ抵抗は固溶化熱処理材より低くなることが示されている。後者の基礎的な観点からは、クリープ曲線型に及ぼす冷間加工と回復処理の影響が、Ni^{10, 11, 12)}、Al^{13, 14)}、Cu¹⁵⁾及びAl-Mg合金¹⁴⁾について調べられ、クリープ変形機構との関連が検討されてきた。

本研究においては、HTTRの高温部構造用耐熱合金であるハステロイXRを対象とし、固溶化熱処理材と20%冷間加工材のクリープ特性の比較を行う。両材料のクリープ試験を800、900及び1000℃で実施し、主に実用的な観点から20%冷間加工材のクリープ特性を検討する。

2. 実験方法

2.1 供試材

実験に用いた素材は、HTTRの高温部構造用材料として開発されたハステロイXRである。ハステロイXRはハステロイXの規格¹⁶⁾を基に、高温ガス炉の冷却材であるヘリウム中における耐食性を改良するためMn及びSi量の調整を行うとともにAl及びTi量を低くし、誘導放射エネルギーを低くするためCo量を低減したものである¹⁷⁾。素材としては、ハステロイXRの15mm厚の板材を使用した。化学組成をTable 1に、受け入れ状態での光学顕微鏡写真をPhoto. 1に示す。受け入れ材は、1190℃、60分の加熱後、水冷の固溶化熱処理を受けているが、一部に未固溶の析出物が残っている。

この板材を用いて、20%冷間加工材を作成した。冷間加工度が20%と低く、冷間圧延では均一な変形組織が得られないおそれがあったため、この板材より丸棒型の引張試験片を切り出し、引張試験機により所定の塑性変形量に達するまで室温で負荷をかけた。標点間での軸方向及び径方向の寸法測定により、このようにして作成した予ひずみ材は、均一な冷間ひずみ量を与えられたことが確かめられた。Photo. 2には20%冷間加工した状態の光学顕微鏡写真を示す。

固溶化熱処理材及び20%冷間加工材からFig. 1に示したφ6(mm)x30GL(mm)のつば付きクリープ試験片を作成し、試験に供した。

2.2 クリープ試験

容量1ton及び3tonのレバー式の単式クリープ試験機を用いて定荷重のクリープ試験を実施した。全てのクリープ試験について、試験片標点間の伸びを連続的に測定し、クリープ変形過程の全域にわたる時間-ひずみデータを求めた。試験片標点間の伸びは、伸び計を介して電気出力付きのダイヤルゲージにより測定した。荷重負荷時から破断に至るまで詳細な時間-ひずみデータを取得するため、通常、データの測定間隔は荷重負荷後のクリープ速度の変化が速い領域では短く、定常クリープ域では長くするようにし、コンピュータによりデータを集録した。

試験温度は800, 900及び1000℃とし、各温度で2応力水準のクリープ試験を実施した。室温からクリープ試験温度までは約3時間で昇温し、所定温度に到達してから1~2時間後に、荷重を負荷した。温度の監視及び制御には試験片に取り付けた3本のR熱電対を使用した。

3. 実験結果及び考察

3.1 クリープ曲線

Fig. 2(a)~4(b)に固溶化熱処理材のクリープ曲線を、Fig. 5(a)~7(b)に20%冷間加工材のクリープ曲線を示す。Fig. 2(a)及び2(b)に示した800°Cにおける固溶化熱処理材のクリープ曲線は、遷移、定常、加速クリープの領域からなる通常の古典的なクリープ曲線である。この古典的なクリープ曲線は、クリープ速度が時間とともに減少していく遷移クリープ、クリープ速度がほぼ一定となる定常クリープ及びクリープ速度が増加していく加速クリープからなっている。なお、Fig. 2(a)及び2(b)で示されたクリープ曲線は、遷移クリープ域の短いクリープ曲線である。クリープ試験温度が900°C、1000°Cと高くなると、クリープ曲線の形はこのような古典的なクリープ曲線から、Fig. 3(a)~4(b)に示されているように2段の定常クリープ速度を持つ非古典的なクリープ曲線¹⁸⁾を示すようになる。ハステロイXRの高温・低応力のクリープ試験において、このような挙動がみとめられることは、既に報告されている^{19)・20)}。また、2 1/4Cr-1Mo鋼¹⁸⁾及びインコネル617合金²¹⁾においてもこのような非古典的なクリープ曲線が認められている。

古典的なクリープ曲線と非古典的なクリープ曲線の形状の違いは、Fig. 8及び9に示されたクリープ速度-時間曲線によって明確に表される。Fig. 9の1000°Cにおけるクリープ速度-時間曲線はこの合金で得られた典型的な非古典的クリープ挙動を示す例である。この曲線では、初期に低いクリープ速度の領域があり、クリープ速度が上昇し、引き続いてかなり長い期間の一定のクリープ速度を示す領域が認められ、その後クリープ速度は加速し破断に至る。ハステロイXRのクリープ曲線が高温においてこのような非古典的なクリープ曲線を示すことについては、種々の理由が考えられるが、現在その点を検討する実験及び解析を進めている。

Fig. 5(a)~7(b)に示された20%冷間加工材のクリープ曲線においては、固溶化熱処理材に比べ、クリープ速度、破断時間等は異なっているが、800及び900°Cでは古典的なクリープ曲線、1000°Cでは非古典的なクリープ曲線が観察される。

Fig. 2(a)~7(b)に示されたクリープ曲線を基に20%冷間加工材と固溶化熱処理材について、クリープ破断時間、破断伸び、最小クリープ速度等のクリープ特性の比較を以下に行う。なお、最小クリープ速度については初期に低いクリープ速度が現れる場合それを $\dot{\epsilon}_m'$ 、その後に現れるほぼ定常クリープ域とみなせる領域のクリープ速度及び通常の古典的なクリープ曲線における最小クリープ速度を $\dot{\epsilon}_m$ として整理する。

3.2 20%冷間加工材と固溶化熱処理材のクリープ特性の比較

Fig. 10(a)及び(b)では、クリープ破断時間について固溶化熱処理材と20%冷間加工材の比較を行っている。本研究で行った800, 900及び1000℃の実験のうち、Fig. 10(a)は短時間試験の結果を、Fig. 10(b)は長時間試験の結果を示している。短時間側の試験結果では20%冷間加工材の破断時間は、固溶化熱処理材と比べ800及び900℃で長くなっているが、1000℃では逆に短くなっている (Fig. 10(a))。長時間側の試験結果では、800℃でやはり20%冷間加工材の方が破断時間が長くなっているが、900℃ではほぼ同程度となり、1000℃では20%冷間加工材の破断時間は固溶化熱処理材の1/4程度に減少している (Fig. 10(b))。

Fig. 11(a)及び(b)は、破断伸びについて同様の比較を行ったものである。これらの図より20%冷間加工材の破断伸びは固溶化熱処理材に比べ小さくなっていることがわかる。20%冷間加工材の破断伸びは800℃及び900℃で小さくなり、特に900℃では10%以下となっている。1000℃ではこの値は30~40%となり、固溶化熱処理材よりやや小さいが、かなり回復している。Fig. 12(a)及び(b)は、破断絞りについての固溶化熱処理材と20%冷間加工材の比較である。破断伸びの場合と同様に、20%冷間加工材の破断絞りは、900℃で最も小さく、1000℃ではかなり回復している。

最小クリープ速度($\dot{\epsilon}_m$)についての固溶化熱処理材と20%冷間加工材の比較をFig. 13(a)及び(b)に示す。20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は、固溶化熱処理材に比べ800及び900℃では極端に小さくなっているが、1000℃では逆に2倍程度に大きくなっている。これらの図より、ハステロイXRに20%の冷間加工を施すことにより、800及び900℃におけるクリープ変形抵抗が著しく増加することがわかる。また、1000℃においてはこのような効果は消失し、冷間加工ひずみの導入によって、逆に変形抵抗が減少するような内部組織の変化が起こっていることが示唆される。

Table 2及び3にそれぞれ固溶化熱処理材及び20%冷間加工材について、この実験で得られた破断時間、破断伸び、最小クリープ速度等のクリープ特性をまとめて示す。破断時間には、最小クリープ速度や破断伸びだけでなく、各時間でのクリープ速度といったクリープ曲線の形全体が影響しているが、以下に20%の冷間加工を施すことにより $\dot{\epsilon}_m$ 及び破断伸びがどのように変化し、それと破断時間がどのように関係したかを検討する。

Fig. 14(a)及び(b)は、破断時間、破断伸び、最小クリープ速度($\dot{\epsilon}_m$)について、20%冷間加工材の値と固溶化熱処理材の値の比をとって、温度/応力の各試験条件に対してプロットしたものである。800及び900℃では、20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固

溶化熱処理材の1/20~1/50となっているが、20%冷間加工材の破断伸びも1/5程度に減少している。800℃では20%冷間加工材の破断時間は固溶化熱処理材の約3倍である。20%冷間加工材では $\dot{\epsilon}_m$ は極端に小さくなっているが、破断伸びも減少しているため、破断時間の増加は3倍程度にとどまっている。900℃では20%冷間加工材の破断時間は固溶化熱処理材よりやや長いかほぼ同程度である。Fig.14(b)に示した長時間側の結果のうち、900℃では20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の1/20程度で800℃の場合の約1/50に比べ、冷間加工による $\dot{\epsilon}_m$ の低下の割合はやや小さくなっている。破断伸びは約1/5に低下したままであり、結果として、破断時間は20%冷間加工材と固溶化熱処理材ではほぼ同程度となっている。1000℃では、20%冷間加工材の破断伸びは固溶化熱処理材の60~80%に回復しているが、 $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の2倍程度と大きくなっている。これらの結果より、1000℃では破断時間は固溶化熱処理材の25~40%に低下している。ハステロイXRに20%の冷間加工を施した後クリープ試験を行うと、各温度でのクリープ特性は、固溶化熱処理材と比べ定性的には次のように変化する。800℃では $\dot{\epsilon}_m$ 及び破断伸びは小さくなり、破断時間は増加する。900℃では $\dot{\epsilon}_m$ 及び破断伸びは小さくなるが、破断時間はあまり変化しない。1000℃では $\dot{\epsilon}_m$ は逆に大きくなり、破断伸びはやや回復するものの、破断時間は短くなる。

3.3 クリープ特性の応力依存性

次に破断時間、最小クリープ速度等の応力依存性について検討する。Fig.15は応力と破断時間の関係を示している。20%冷間加工材と固溶化熱処理材の破断時間について、先に述べた関係がこの図からも読みとれる。すなわち、クリープ破断時間は800℃では20%冷間加工材の方が固溶化熱処理材より長く、900℃ではほぼ同程度、1000℃では20%冷間加工材の方が固溶化熱処理材より短くなっている。Fig.15を詳細にみると、20%冷間加工材の応力-破断時間曲線の傾きは、800℃では固溶化熱処理材と同程度であるが、900℃、1000℃と温度が高くなるに従い、この傾きは急となっている。900℃では20%冷間加工材の応力-破断時間曲線は800ks付近で固溶化熱処理材の応力-破断時間曲線と交差し、これより低応力側では20%冷間加工材の破断時間が固溶化熱処理材より短くなる傾向がある。Fig.16及び17は、それぞれ破断伸びと破断時間及び破断絞りと破断時間の関係を示している。900℃において、20%冷間加工材の破断伸び及び破断絞りの低下が著しいことがわかる。

最小クリープ速度については、3.1で述べたように、初期に低いクリープ速度が現れる非古典的なクリープ曲線の場合それを $\dot{\epsilon}_m'$ 、その後現れるほぼ定常クリープ域とみなせる領域のクリープ速度及び通常の古典的なクリープ曲線における最小クリープ速度を $\dot{\epsilon}_m$ として整理した。Fig.18(a)は固溶化熱処理材についての

$\dot{\epsilon}_m$ 及び $\dot{\epsilon}_m'$ を応力に対してプロットしたものである。900及び1000°Cでは非古典的なクリープ曲線となり、 $\dot{\epsilon}_m'$ は $\dot{\epsilon}_m$ に比べ1桁ほど低い値となっている。Fig. 18(b)は20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ 及び $\dot{\epsilon}_m'$ の応力依存性を示している。20%冷間加工材は1000°Cで非古典的なクリープ曲線を示し、 $\dot{\epsilon}_m'$ は $\dot{\epsilon}_m$ に比べ1桁ほど低い値となっている。Fig. 18(c)はFig. 18(a)及び(b)のデータを合わせてプロットしたものである。800°C及び900°Cでは、20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材に比べ著しく小さくなっているが、1000°Cでは逆に20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ の方が大きくなっていることがわかる。 $\dot{\epsilon}_m$ の応力依存性については応力条件に対するデータがまだ不十分のため、定量的な記述はできないが、最小クリープ速度 $\dot{\epsilon}_m$ と応力の関係を表す直線の傾きは、900°Cの20%冷間加工材を除くとあまり変化していないようである。

3.4 20%冷間加工によるクリープ曲線の変化

これまで20%冷間加工材と固溶化熱処理材について、最小クリープ速度、破断伸び、破断時間等の比較を行ってきたが、これらの特性は時間とともに変化するクリープ曲線の一部を表したものであり、クリープ曲線自身が20%の冷間加工を施すことによりどのように変化しているかを見ることも必要である。以下にはこのような観点から、代表的なクリープ曲線及びクリープ速度-時間曲線の比較を行う。Fig. 19及び20は、それぞれ800°C、107.9MPa及び1000°C、20.6MPaの条件での20%冷間加工材と固溶化熱処理材のクリープ曲線の比較である。Fig. 19の800°Cの結果では、20%冷間加工材は固溶化熱処理材に比べクリープ速度が小さくなり、破断時間が長くなっていることがわかる。Fig. 20の1000°Cの結果は、逆に20%冷間加工材ではクリープ速度が時間とともに加速し、固溶化熱処理材より破断時間が短くなっている。このような変化は、Fig. 21及び22に示されたクリープ速度-時間曲線の比較により一層明瞭となる。Fig. 21では20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の約1/40となり、しかもかなり長い時間にわたってそのクリープ速度が保たれている。このことから、20%の冷間加工によって導入された転位が800°Cではクリープ変形に対する大きな抵抗となっていることが示唆される。1000°Cでは固溶化熱処理材、20%冷間加工材とも非古典的なクリープ曲線が観察されたが、Fig. 22に示されているように、20%冷間加工材では初期に現れる低いクリープ速度の期間が短く、またその後現れる $\dot{\epsilon}_m$ の値も固溶化熱処理材に比べ大きくなっている。20%冷間加工材の1000°Cのクリープにおいて、固溶化熱処理材に比べこのようにクリープ速度が速くなり、破断時間も著しく短くなるのは、20%の冷間加工中に導入された高い転位密度の組織が1000°Cでのクリープ中にさらに蓄積エネルギーを増

し、動的再結晶を引き起こすためであると考えられる。なお、著者らはハステロイXRの20%冷間加工材では1000℃、1時間の加熱で結晶粒界3重点等に微細な再結晶粒を観察している。

4 . 結 言

20%冷間加工及び固溶化熱処理を行ったハステロイXRそれぞれについて、800、900及び1000℃でクリープ試験を行い、詳細なクリープデータを取得して、クリープ特性に及ぼす20%冷間加工の影響を検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1)20%冷間加工材のクリープ破断時間は、固溶化熱処理材に比べ、800℃では長くなり、900℃ではほぼ同程度、1000℃では逆に短くなる。

(2)破断伸び及び破断絞りは、固溶化熱処理材に比べ20%冷間加工材の方が小さくなる。20%冷間加工材についてこれらの値は900℃で最も小さくなるが、1000℃ではかなり回復する。

(3)固溶化熱処理材では800℃で、20%冷間加工材では800及び900℃で遷移、定常、加速クリープからなる通常の古典的なクリープ曲線が観察されたが、その他の条件では初期に低いクリープ速度の領域を持つ非古典的なクリープ曲線が観察された。

(4)非古典的なクリープ曲線における初期の低クリープ速度の領域を除いた最小クリープ速度($\dot{\epsilon}_m$)を比較すると、800及び900℃では20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の1/20~1/50となるが、1000℃では逆に20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の2倍程度に上昇する。

(5)20%の冷間加工は、800及び900℃ではクリープ変形に対する大きな抵抗となるが、1000℃では動的再結晶を引き起こしクリープ強度の著しい劣化をもたらす。

謝 辞

本実験に用いた材料を準備する上でお世話になった三菱マテリアル(株)、佐平健彰氏に感謝致します。

し、動的再結晶を引き起こすためであると考えられる。なお、著者らはハステロイXRの20%冷間加工材では1000℃、1時間の加熱で結晶粒界3重点等に微細な再結晶粒を観察している。

4 . 結 言

20%冷間加工及び固溶化熱処理を行ったハステロイXRそれぞれについて、800、900及び1000℃でクリープ試験を行い、詳細なクリープデータを取得して、クリープ特性に及ぼす20%冷間加工の影響を検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1)20%冷間加工材のクリープ破断時間は、固溶化熱処理材に比べ、800℃では長くなり、900℃ではほぼ同程度、1000℃では逆に短くなる。

(2)破断伸び及び破断絞りは、固溶化熱処理材に比べ20%冷間加工材の方が小さくなる。20%冷間加工材についてこれらの値は900℃で最も小さくなるが、1000℃ではかなり回復する。

(3)固溶化熱処理材では800℃で、20%冷間加工材では800及び900℃で遷移、定常、加速クリープからなる通常の古典的なクリープ曲線が観察されたが、その他の条件では初期に低いクリープ速度の領域を持つ非古典的なクリープ曲線が観察された。

(4)非古典的なクリープ曲線における初期の低クリープ速度の領域を除いた最小クリープ速度($\dot{\epsilon}_m$)を比較すると、800及び900℃では20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の1/20~1/50となるが、1000℃では逆に20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の2倍程度に上昇する。

(5)20%の冷間加工は、800及び900℃ではクリープ変形に対する大きな抵抗となるが、1000℃では動的再結晶を引き起こしクリープ強度の著しい劣化をもたらす。

謝 辞

本実験に用いた材料を準備する上でお世話になった三菱マテリアル(株)、佐平健彰氏に感謝致します。

し、動的再結晶を引き起こすためであると考えられる。なお、著者らはハステロイXRの20%冷間加工材では1000℃、1時間の加熱で結晶粒界3重点等に微細な再結晶粒を観察している。

4 . 結 言

20%冷間加工及び固溶化熱処理を行ったハステロイXRそれぞれについて、800、900及び1000℃でクリープ試験を行い、詳細なクリープデータを取得して、クリープ特性に及ぼす20%冷間加工の影響を検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1)20%冷間加工材のクリープ破断時間は、固溶化熱処理材に比べ、800℃では長くなり、900℃ではほぼ同程度、1000℃では逆に短くなる。

(2)破断伸び及び破断絞りは、固溶化熱処理材に比べ20%冷間加工材の方が小さくなる。20%冷間加工材についてこれらの値は900℃で最も小さくなるが、1000℃ではかなり回復する。

(3)固溶化熱処理材では800℃で、20%冷間加工材では800及び900℃で遷移、定常、加速クリープからなる通常の古典的なクリープ曲線が観察されたが、その他の条件では初期に低いクリープ速度の領域を持つ非古典的なクリープ曲線が観察された。

(4)非古典的なクリープ曲線における初期の低クリープ速度の領域を除いた最小クリープ速度($\dot{\epsilon}_m$)を比較すると、800及び900℃では20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の1/20~1/50となるが、1000℃では逆に20%冷間加工材の $\dot{\epsilon}_m$ は固溶化熱処理材の2倍程度に上昇する。

(5)20%の冷間加工は、800及び900℃ではクリープ変形に対する大きな抵抗となるが、1000℃では動的再結晶を引き起こしクリープ強度の著しい劣化をもたらす。

謝 辞

本実験に用いた材料を準備する上でお世話になった三菱マテリアル(株)、佐平健彰氏に感謝致します。

参考文献

- 1)大洗研究所高温工学試験研究炉設計室、東海研究所燃料・材料工学部、東海研究所高温工学部：日本原子力研究所レポート JAERI-M 89-005(1989).
- 2)Case N-47-17, Class 1 Component in Elevated Temperature Service, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1.
- 3)日本原子力研究所：高温工学試験研究の現状(1993).
- 4)Japan Atomic Energy Research Institute: Present Status of HTGR Research & Development(1992).
- 5)羽田一彦、元木保男、馬場治：日本原子力研究所レポート、JAERI-M 90-148 (1990).
- 6)N. J. Grant, A. G. Bucklin and W. Rowland: Trans. ASM 48(1956)446.
- 7)R. A. Lula, A. J. Lena and H. M. Johnson: Trans. ASME 79(1957)921.
- 8)F. Garofalo, F. von Gemmingen and W. F. Domis: Trans. ASM 54(1961)430.
- 9)美野和明、大友暁、雑賀喜規：鉄と鋼 63(1977)2372.
- 10)T. H. Hazlett and R. D. Hansen: Trans. ASM 47(1955)508.
- 11)W. M. Yim and N. J. Grant: Trans. AIME 227(1963)868.
- 12)P. W. Davies, J. D. Richards and B. Wilshire: J. Inst. Metals 90(1961-62) 431.
- 13)O. D. Sherby, R. Frenkel, J. Nadeau and J. E. Dorn: Trans. AIME 200(1954) 275.
- 14)R. W. Evans and B. Wilshire: Creep of Metals and Alloys, The Institute of Metals, London (1985).
- 15)J. D. Parker and B. Wilshire: Mater. Sci. Eng. 43(1980)271.
- 16)Society of Automotive Engineers: Aerospace Material Specification (AMS) 5754H (1984).
- 17)M. Shindo and T. Kondo; in Proc. Conf. on Gas-Cooled Reactors Today, Bristol/UK, 1982(British Nuclear Energy Society) Vol. 2, p.179.
- 18)R. L. Klueh: Journal of Nuclear Materials 79(1979)363.
- 19)横井信、門馬義雄、近藤達男、小川豊、倉田有司：日本原子力研究所レポート JAERI-M 83-138(1983).
- 20)芳須弘、門馬義雄、馬場栄次、倉田有司、中島甫、鈴木富男：日本原子力研究所レポート JAERI-M 93-231(1993).
- 21)K. Schneider and W. Hartnagel: Nucl. Technol. 66(1984)289.

Table 1 Chemical composition of Hastelloy XR (mass %).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Fe	Ni	B	Al	Ti
0.08	0.89	0.31	<0.005	0.002	21.56	0.06	9.06	0.48	18.31	Rem.	<0.001	0.02	<0.01

Rem.; Remainder

Table 2 Creep properties of solution treated Hastelloy XR

Temperature (°C)	Stress (MPa)	Time to rupture (ks)	Rupture elongation (%)	Reduction of area (%)	Minimum creep rate (/s)	
					$\dot{\epsilon}_m'$	$\dot{\epsilon}_m$
800	117.7	187.92	92.2	69.4	—	1.12E-6
	107.9	303.84	80.3	65.2	—	6.40E-7
900	53.9	400.32	64.3	52.1	1.08E-7	5.83E-7
	44.1	1042.20	41.3	36.3	2.19E-8	2.28E-7
1000	27.5	292.32	55.3	41.1	8.61E-8	8.48E-7
	20.6	937.47	51.3	36.5	1.51E-8	2.75E-7

Table 3 Creep properties of 20% cold worked Hastelloy XR

Temperature (°C)	Stress (MPa)	Time to rupture (ks)	Rupture elongation (%)	Reduction of area (%)	Minimum creep rate (/s)	
					$\dot{\epsilon}_m'$	$\dot{\epsilon}_m$
800	117.7	585.00	17.0	17.6	—	2.90E-8
	107.9	935.39	15.7	13.7	—	1.14E-8
900	53.9	574.56	9.0	4.6	—	1.60E-8
	44.1	917.46	7.8	4.9	—	1.21E-8
1000	27.5	120.33	40.0	24.5	8.94E-8	1.49E-6
	20.6	242.28	29.2	23.7	6.75E-8	5.83E-7

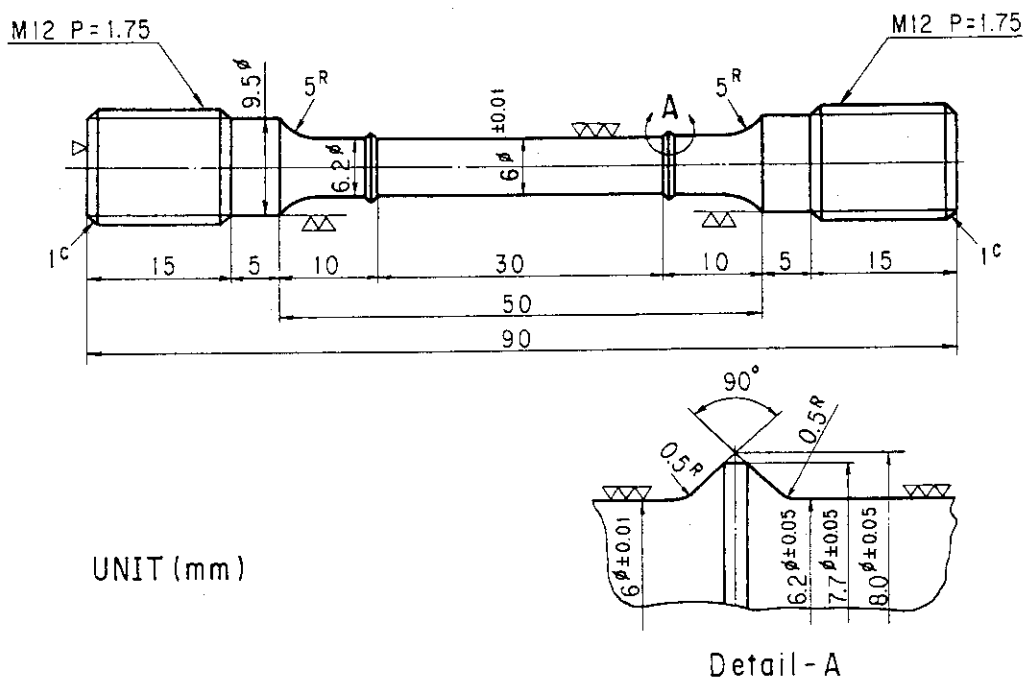


Fig.1 Geometry of specimen for creep tests.

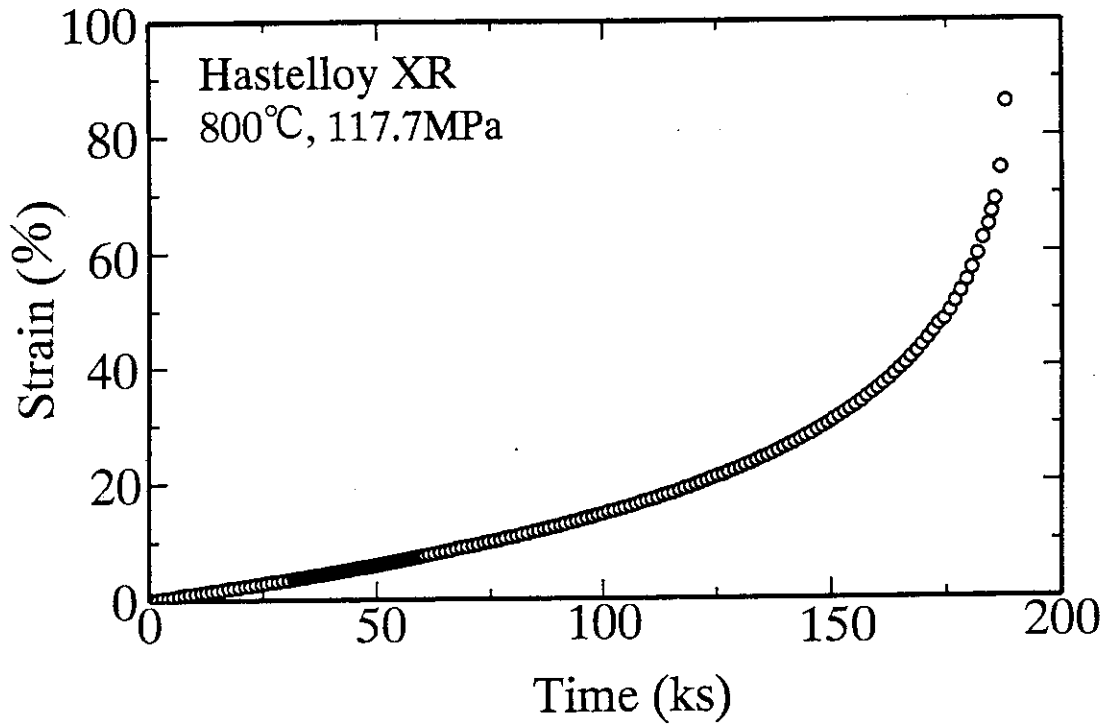


Fig.2(a) Creep curve for solution treated Hastelloy XR tested at 800°C and 117.7MPa.

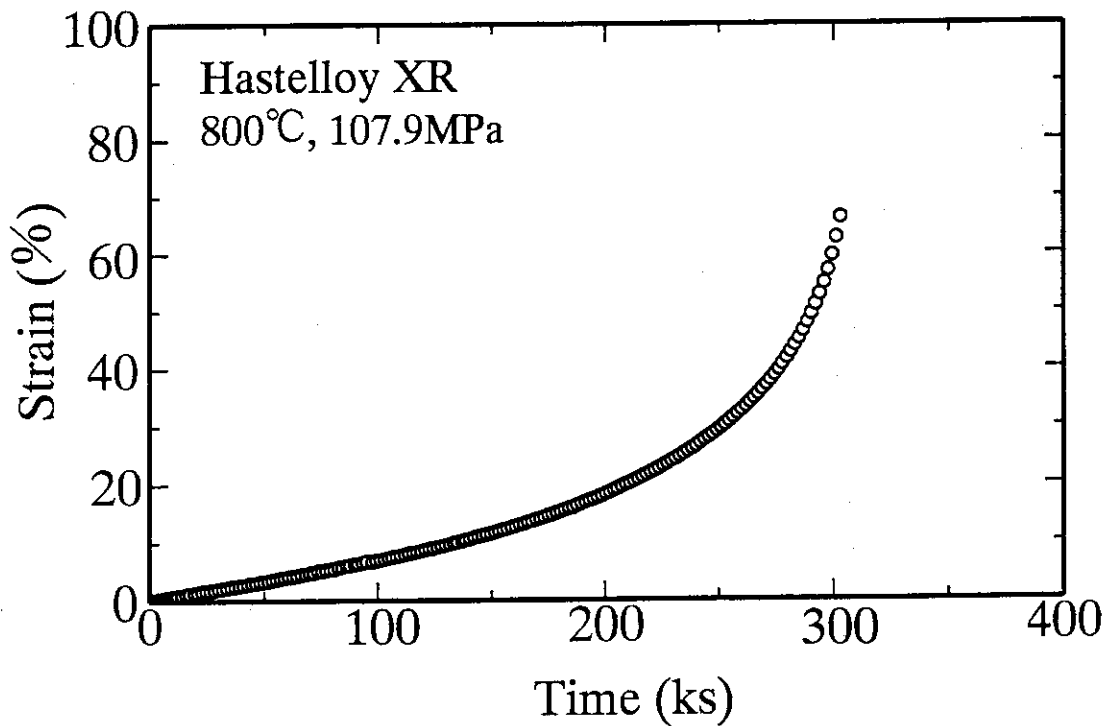


Fig.2(b) Creep curve for solution treated Hastelloy XR tested at 800°C and 107.9MPa.

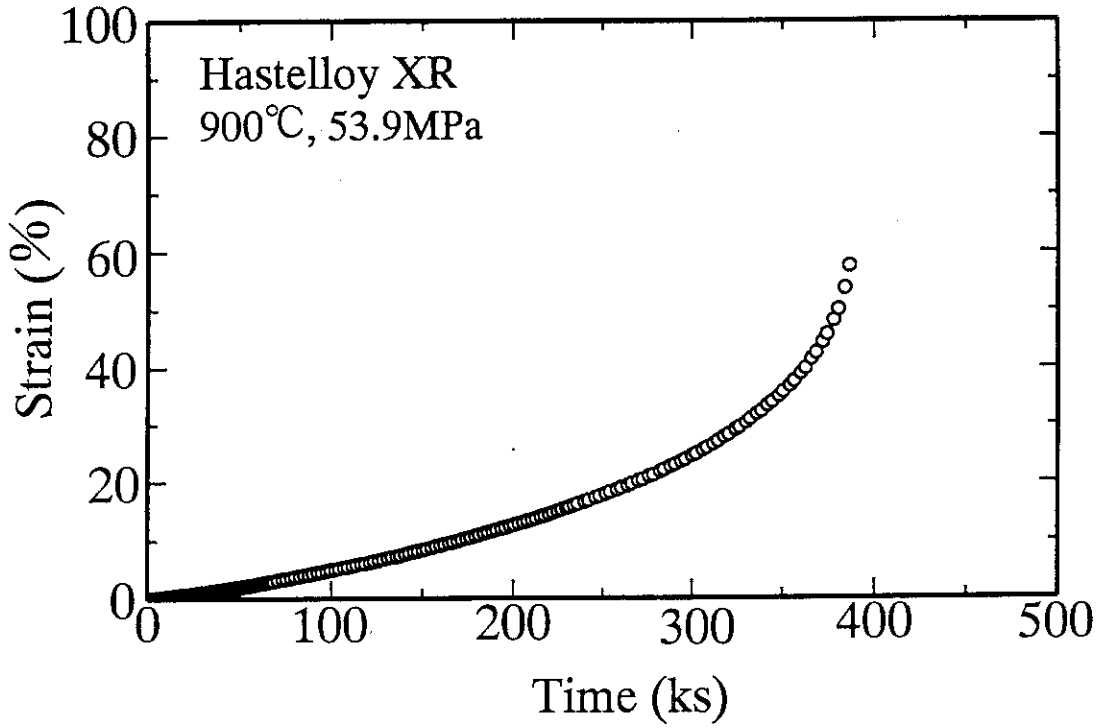


Fig. 3(a) Creep curve for solution treated Hastelloy XR tested at 900°C and 53.9MPa.

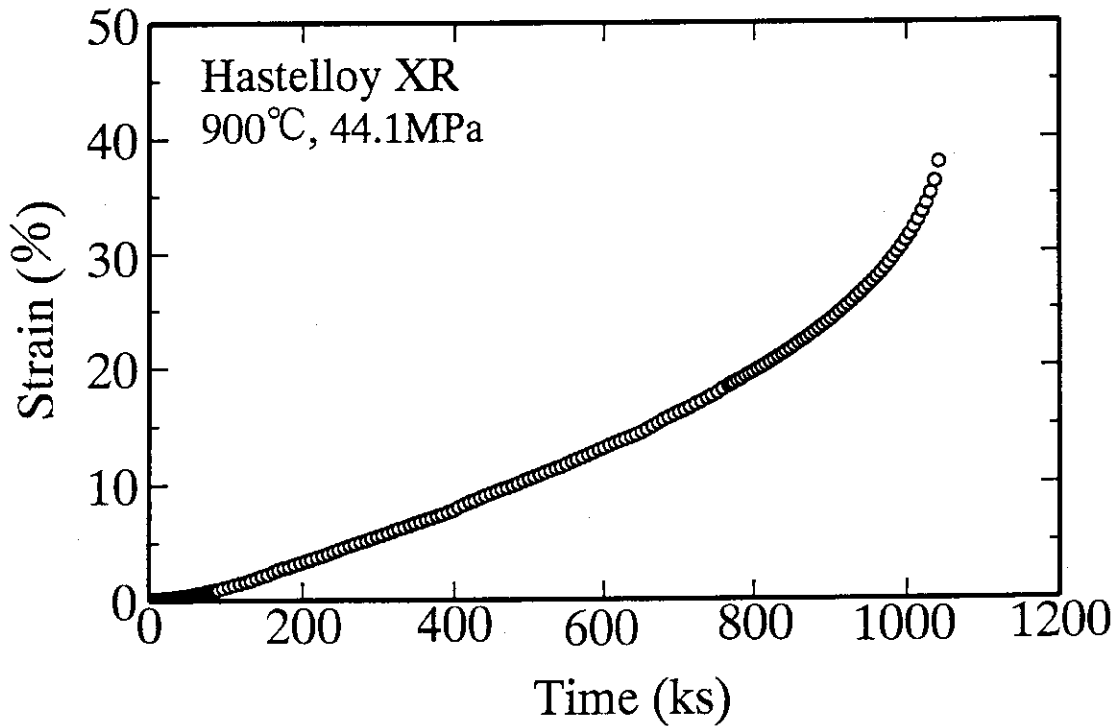


Fig. 3(b) Creep curve for solution treated Hastelloy XR tested at 900°C and 44.1MPa.

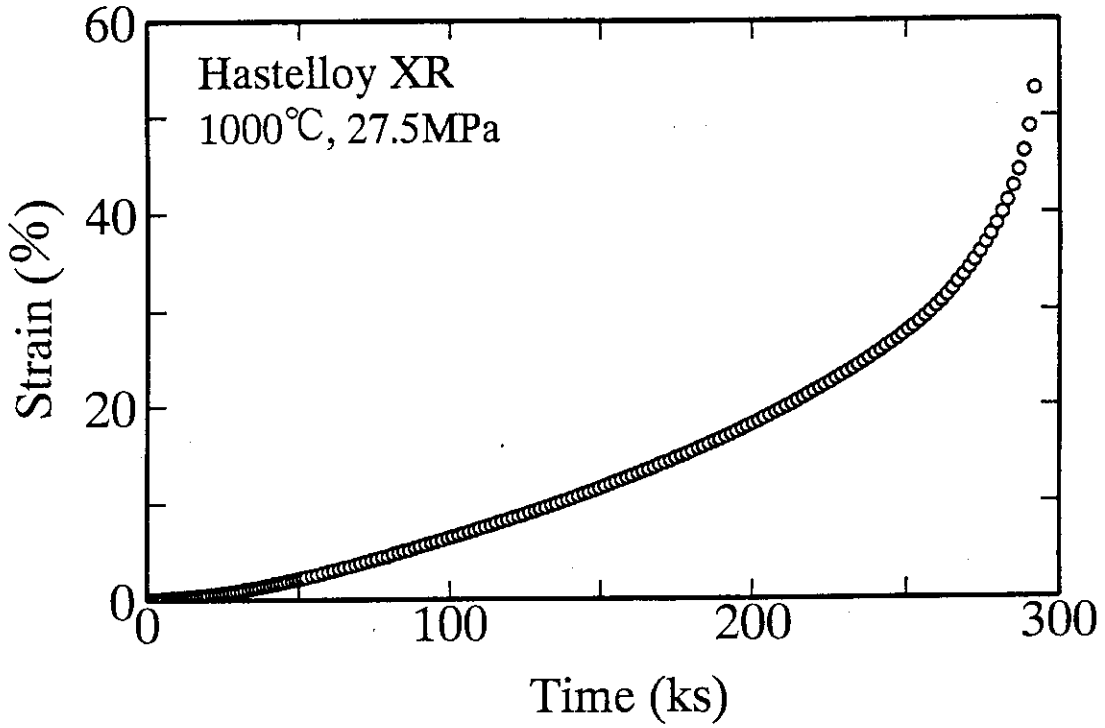


Fig.4(a) Creep curve for solution treated Hastelloy XR tested at 1000°C and 27.5MPa.

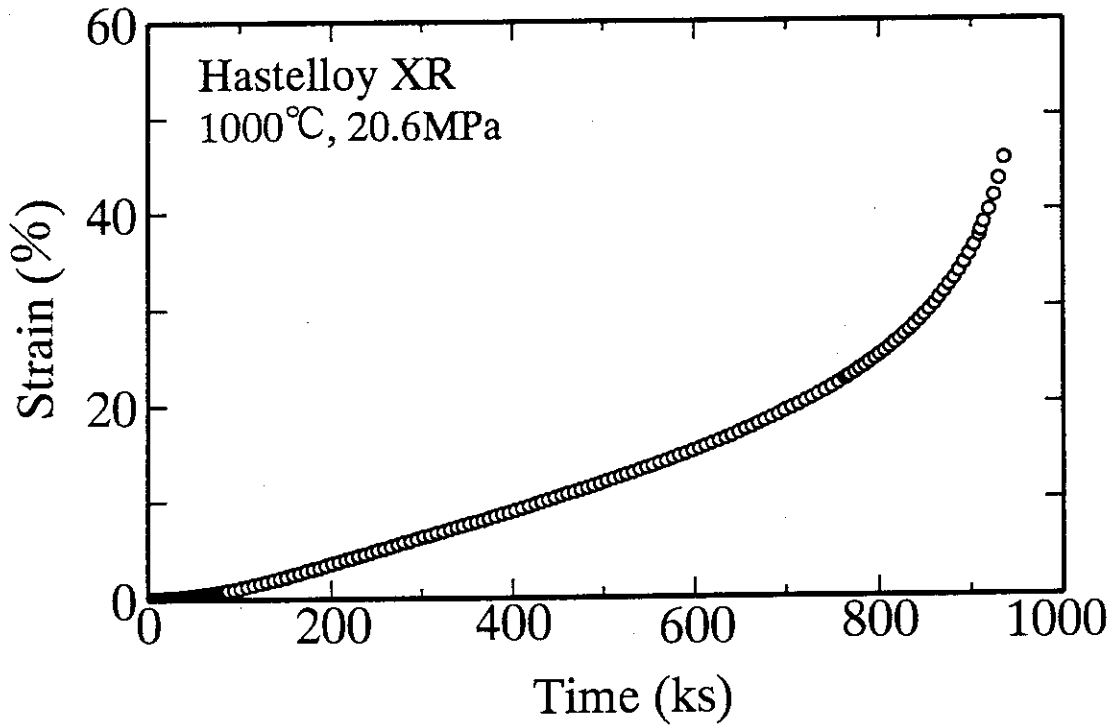


Fig.4(b) Creep curve for solution treated Hastelloy XR tested at 1000°C and 20.6MPa.

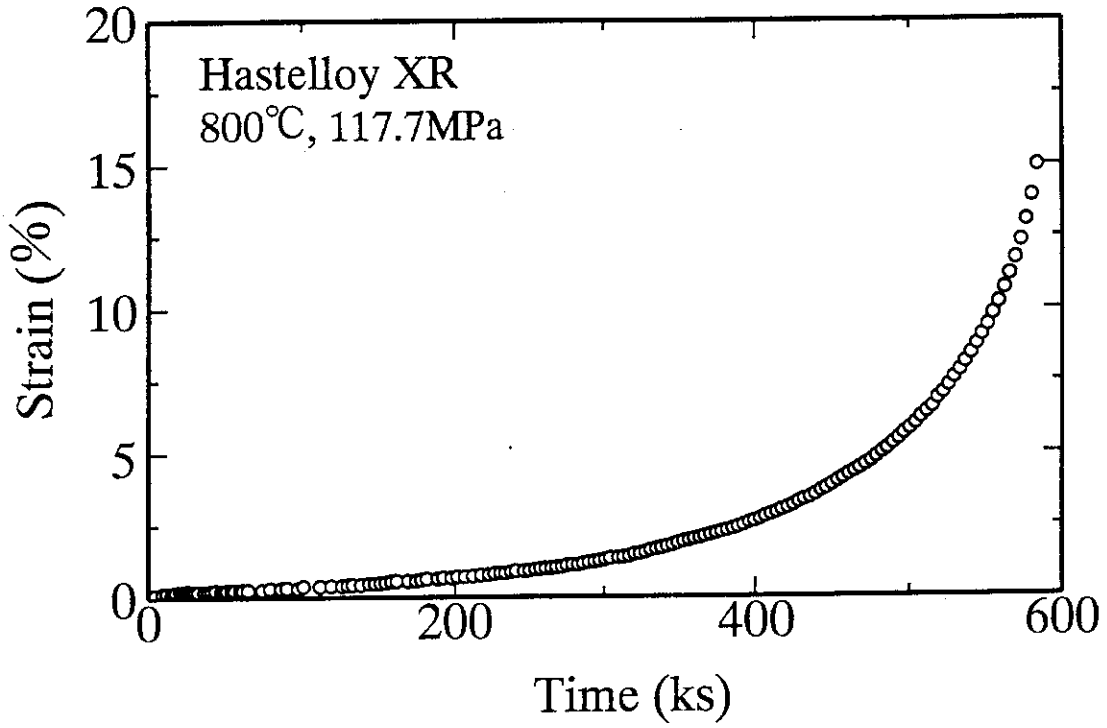


Fig.5(a) Creep curve for 20% cold worked Hastelloy XR tested at 800°C and 117.7MPa.

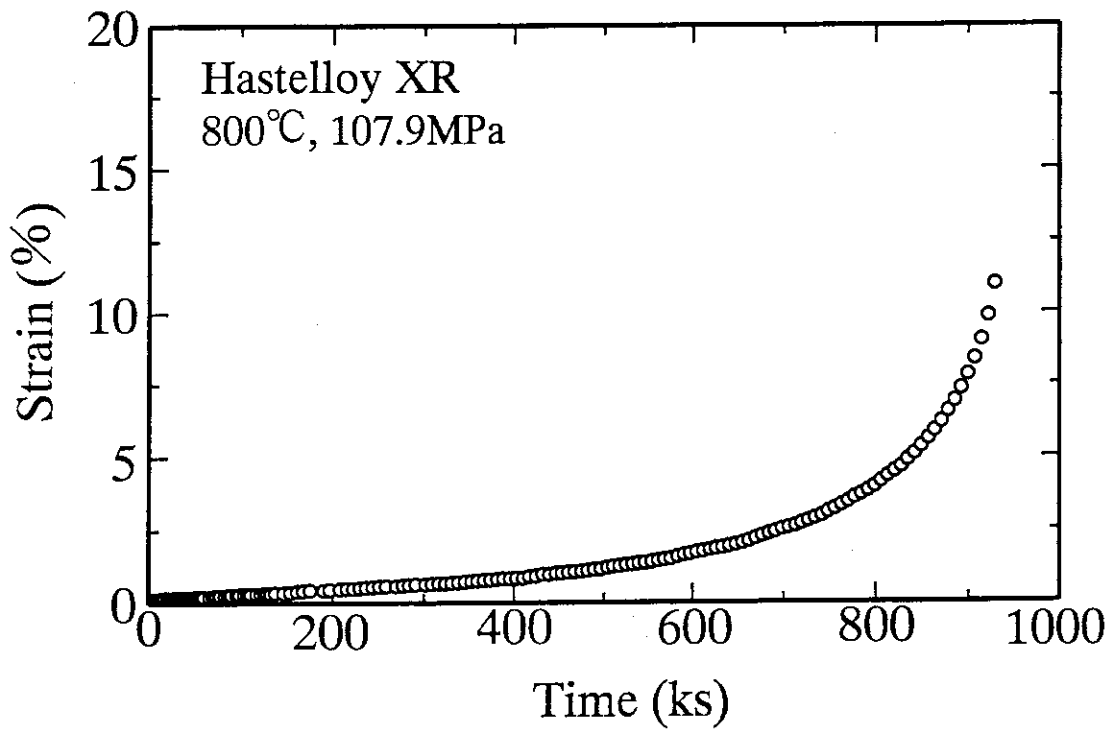


Fig.5(b) Creep curve for 20% cold worked Hastelloy XR tested at 800°C and 107.9MPa.

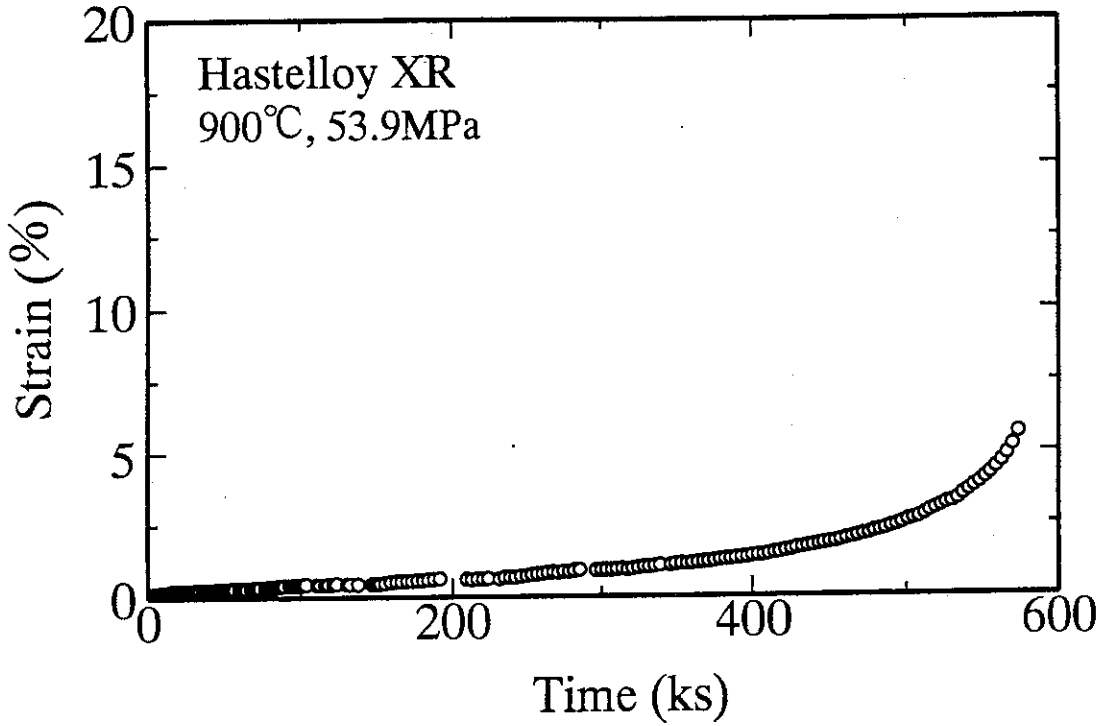


Fig. 6(a) Creep curve for 20% cold worked Hastelloy XR tested at 900°C and 53.9MPa.

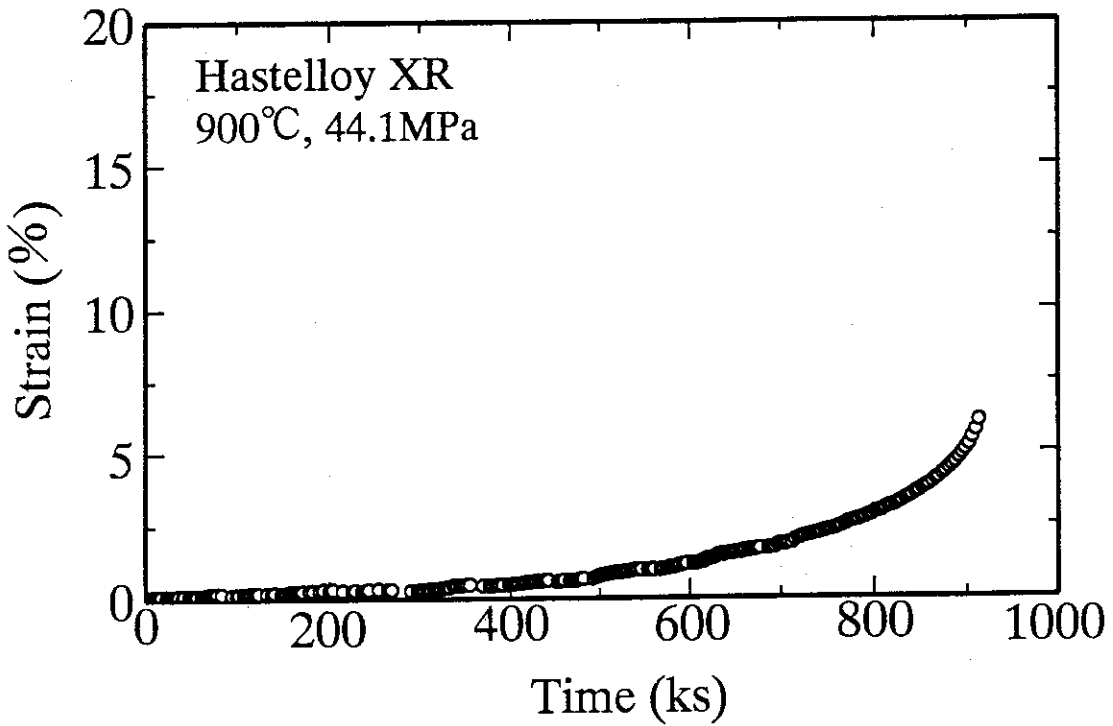


Fig. 6(b) Creep curve for 20% cold worked Hastelloy XR tested at 900°C and 44.1MPa.

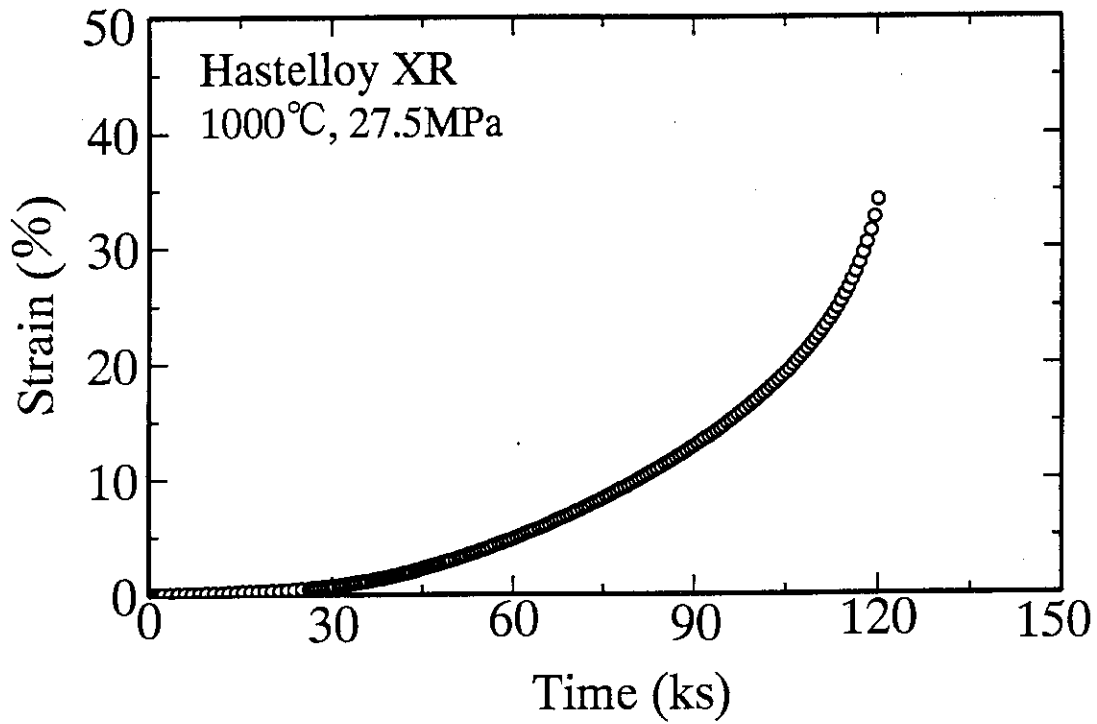


Fig.7(a) Creep curve for 20% cold worked Hastelloy XR tested at 1000°C and 27.5MPa.

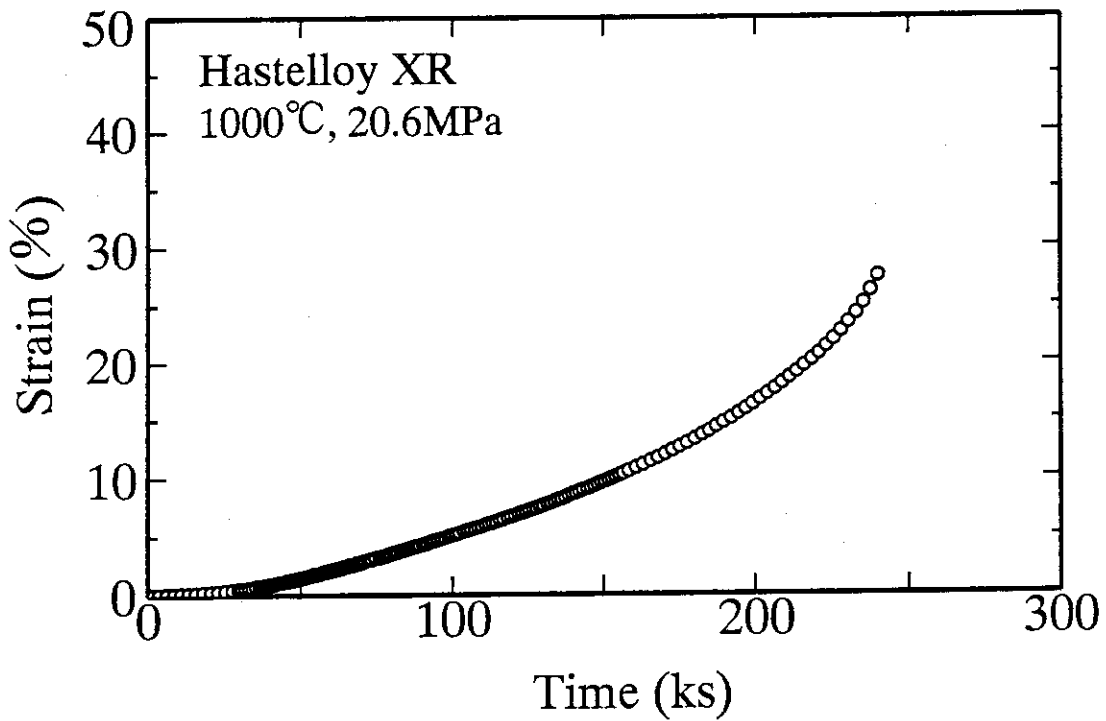


Fig.7(b) Creep curve for 20% cold worked Hastelloy XR tested at 1000°C and 20.6MPa.

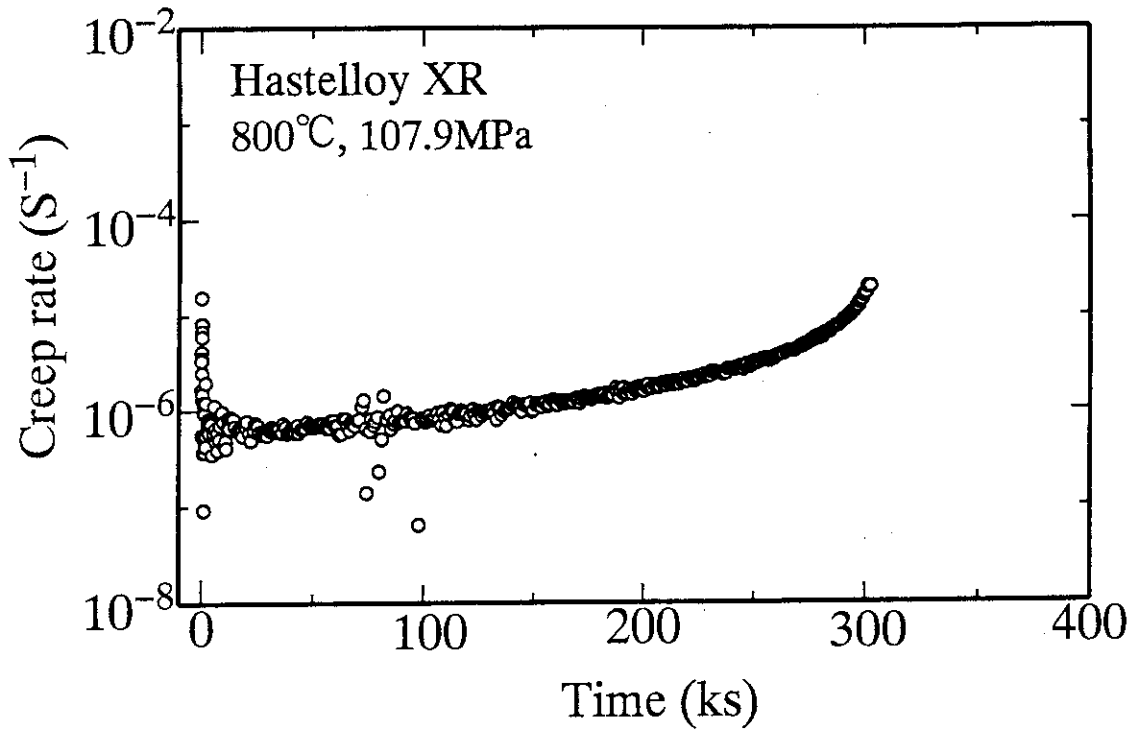


Fig.8 Creep rate/time curve for solution treated Hastelloy XR tested at 800°C and 107.9MPa.

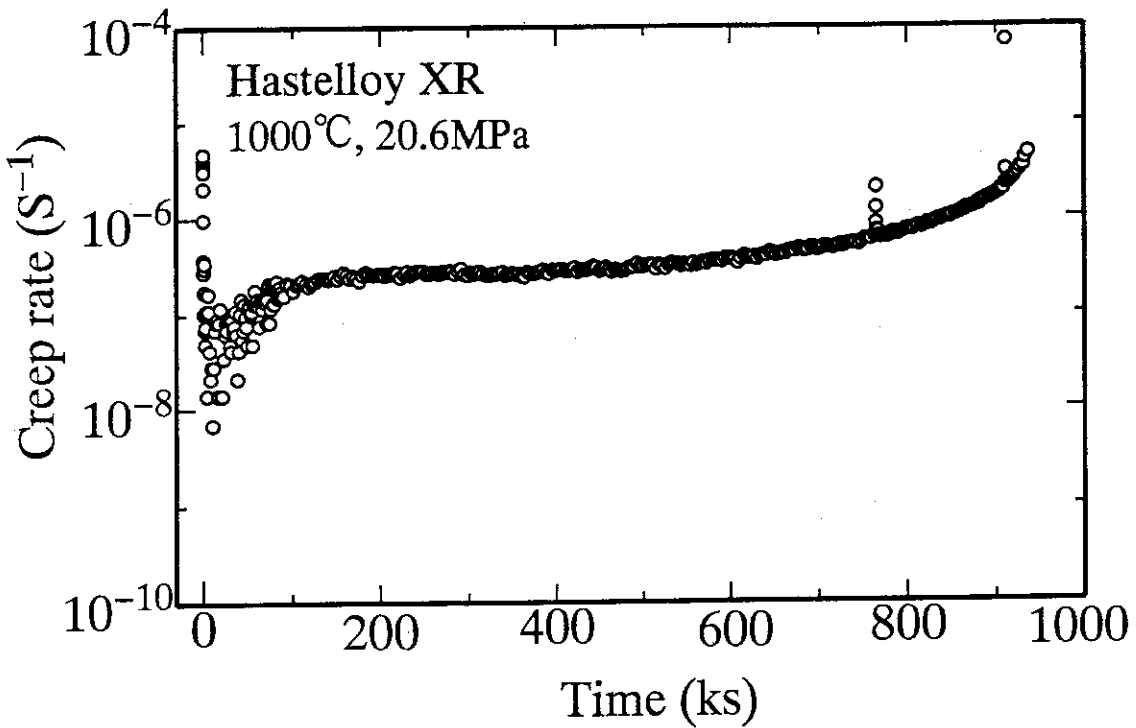


Fig.9 Creep rate/time curve for solution treated Hastelloy XR tested at 1000°C and 20.6MPa.

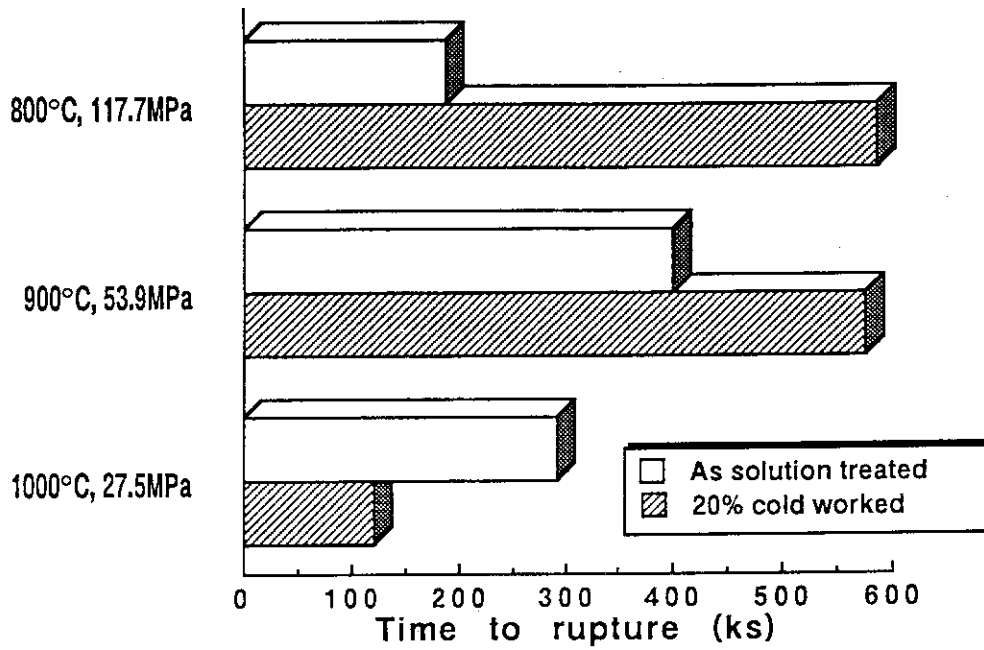


Fig.10(a) Effect of 20% cold work on time to rupture of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000°C.

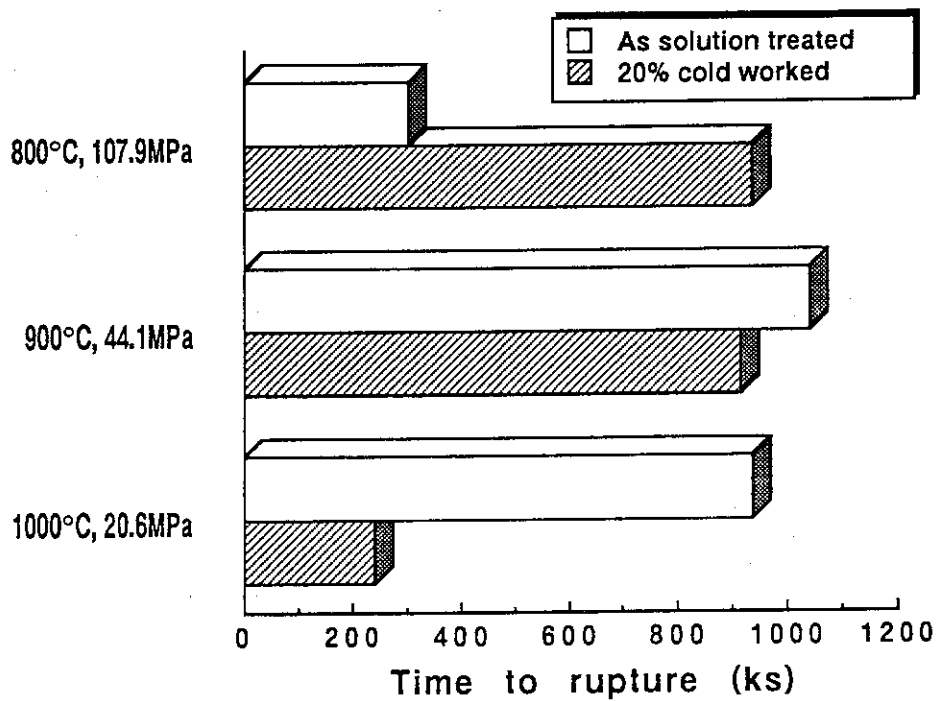


Fig.10(b) Effect of 20% cold work on time to rupture of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000°C.

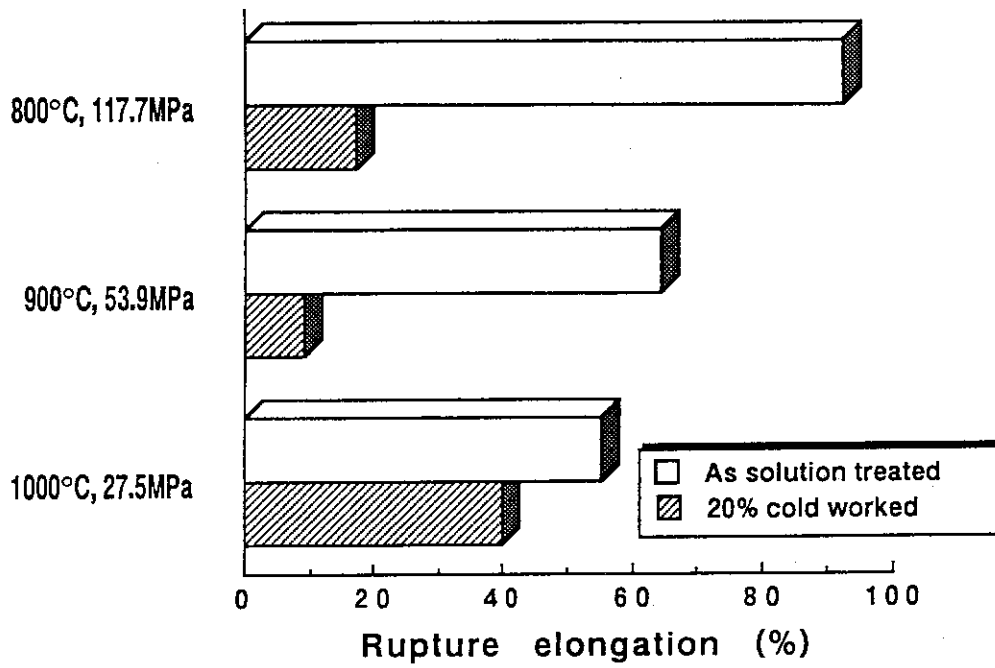


Fig.11(a) Effect of 20% cold work on rupture elongation of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000 °C.

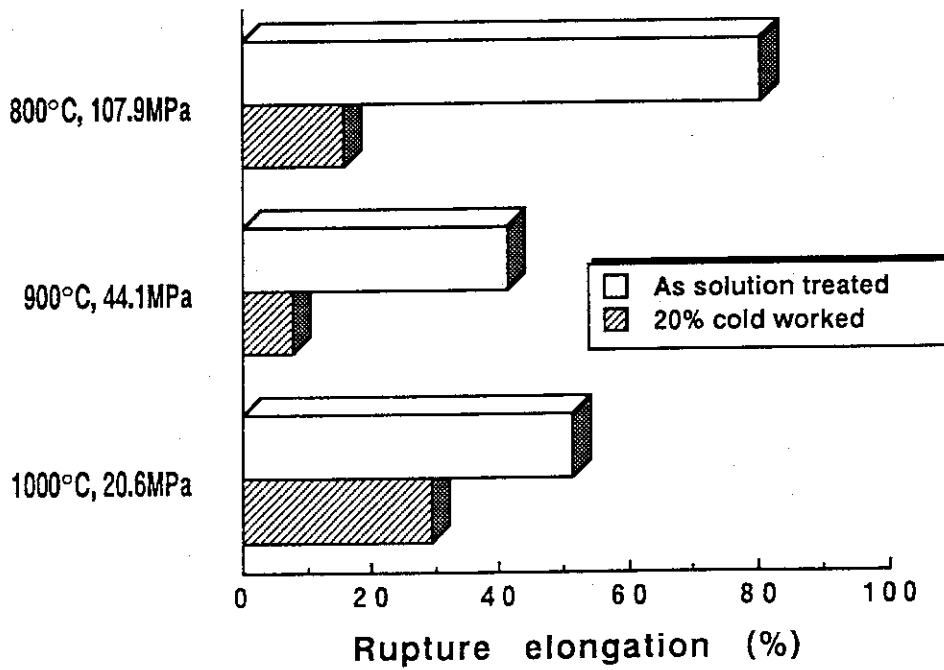


Fig.11(b) Effect of 20% cold work on rupture elongation of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000 °C.

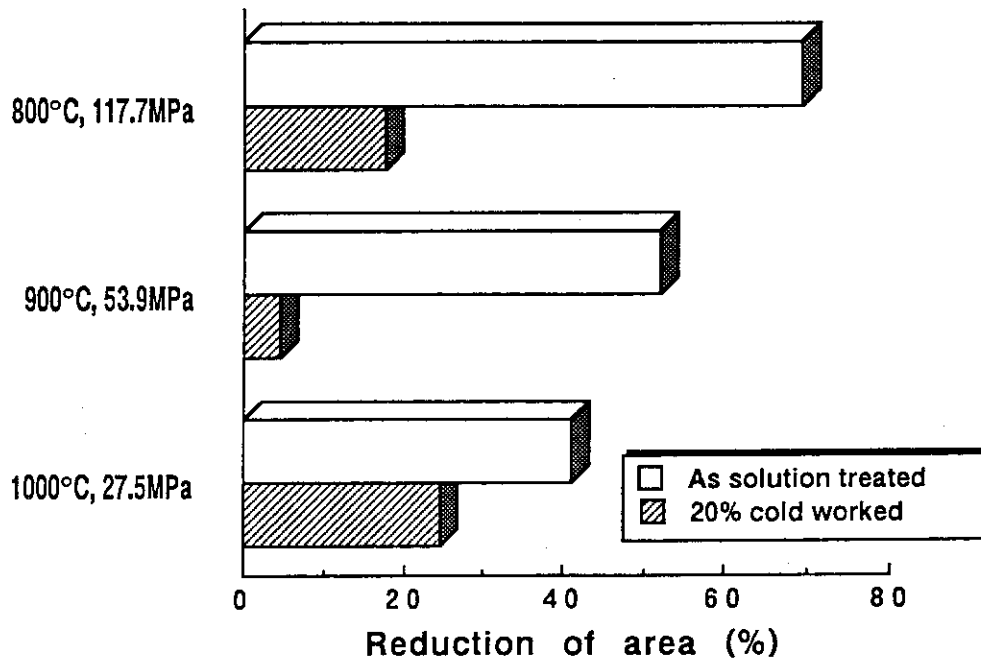


Fig.12(a) Effect of 20% cold work on reduction of area of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000 °C.

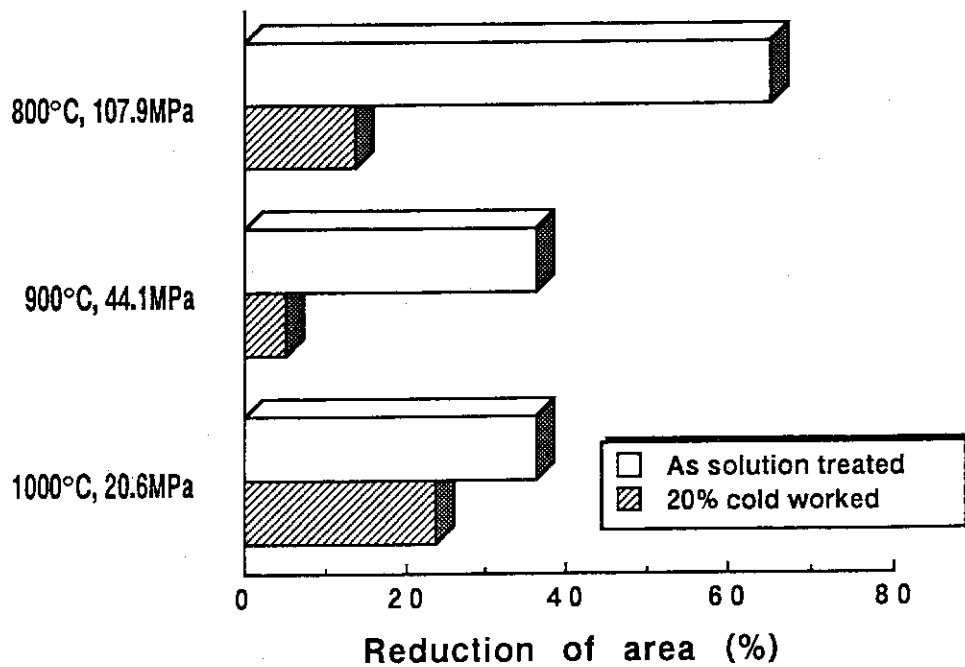


Fig.12(b) Effect of 20% cold work on reduction of area of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000 °C.

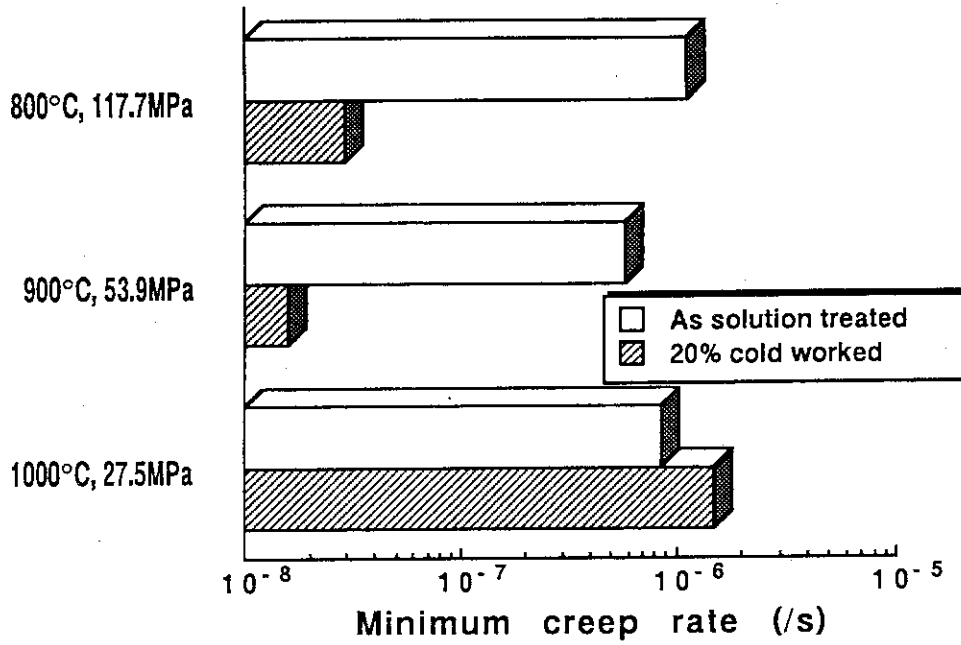


Fig. 13(a) Effect of 20% cold work on minimum creep rate, $\dot{\epsilon}_m$, of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000°C

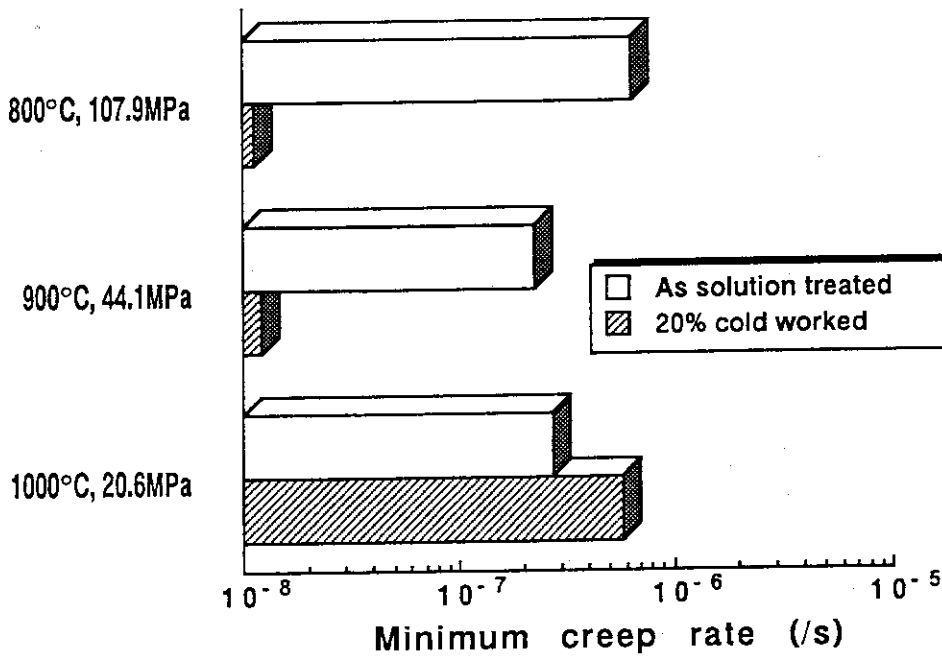


Fig. 13(b) Effect of 20% cold work on minimum creep rate, $\dot{\epsilon}_m$, of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000°C.

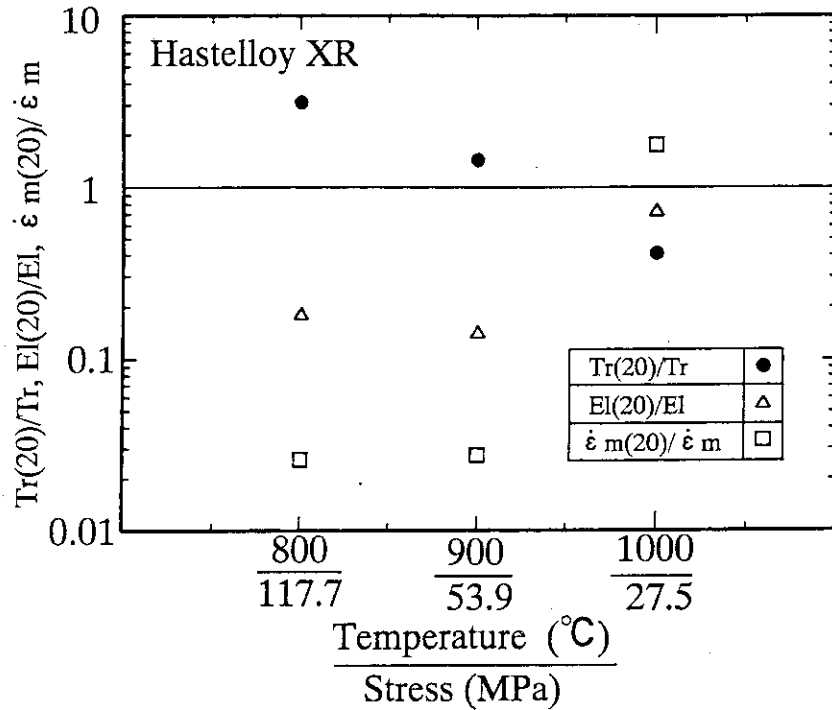


Fig.14(a) Effect of 20% cold work on time to rupture, Tr , rupture elongation, El , and minimum creep rate, $\dot{\epsilon}_m$, of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000°C. $Tr(20)$, $El(20)$ and $\dot{\epsilon}_m(20)$ are results of 20% cold worked Hastelloy XR. Tr , El and $\dot{\epsilon}_m$ are results of solution treated Hastelloy XR.

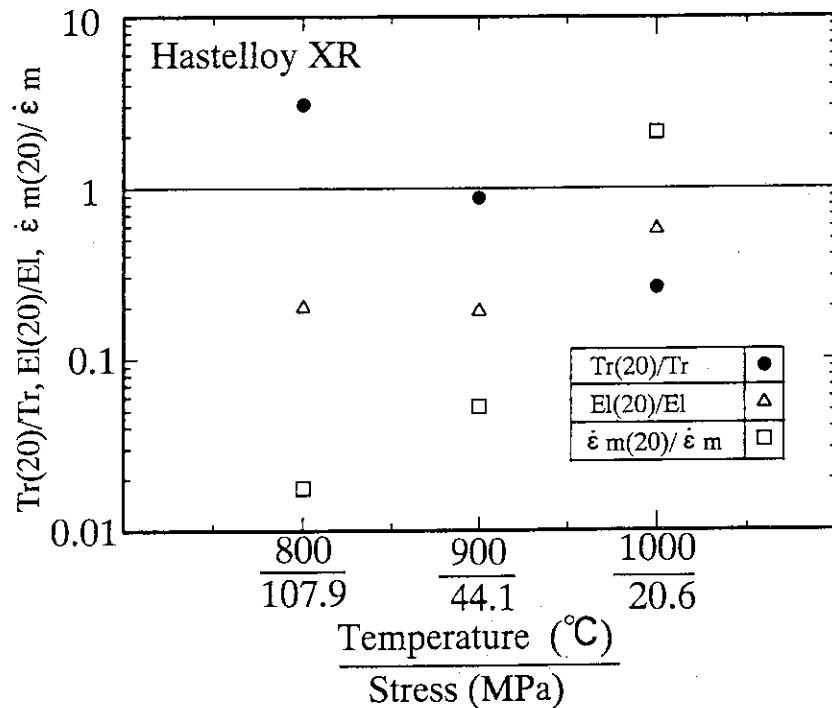


Fig.14(b) Effect of 20% cold work on time to rupture, Tr , rupture elongation, El , and minimum creep rate, $\dot{\epsilon}_m$, of Hastelloy XR at 800, 900 and 1000°C. $Tr(20)$, $El(20)$ and $\dot{\epsilon}_m(20)$ are results of 20% cold worked Hastelloy XR. Tr , El and $\dot{\epsilon}_m$ are results of solution treated Hastelloy XR.

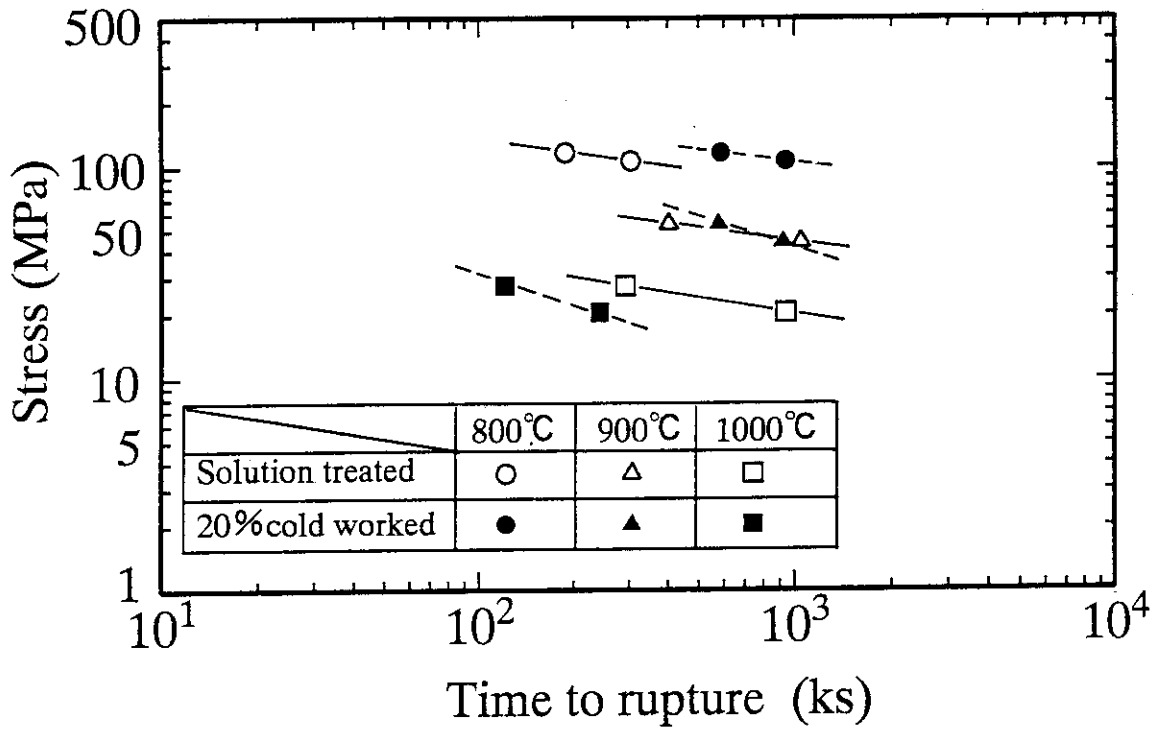


Fig.15 Stress dependence of time to rupture for solution treated Hastelloy XR and 20% cold worked Hastelloy XR.

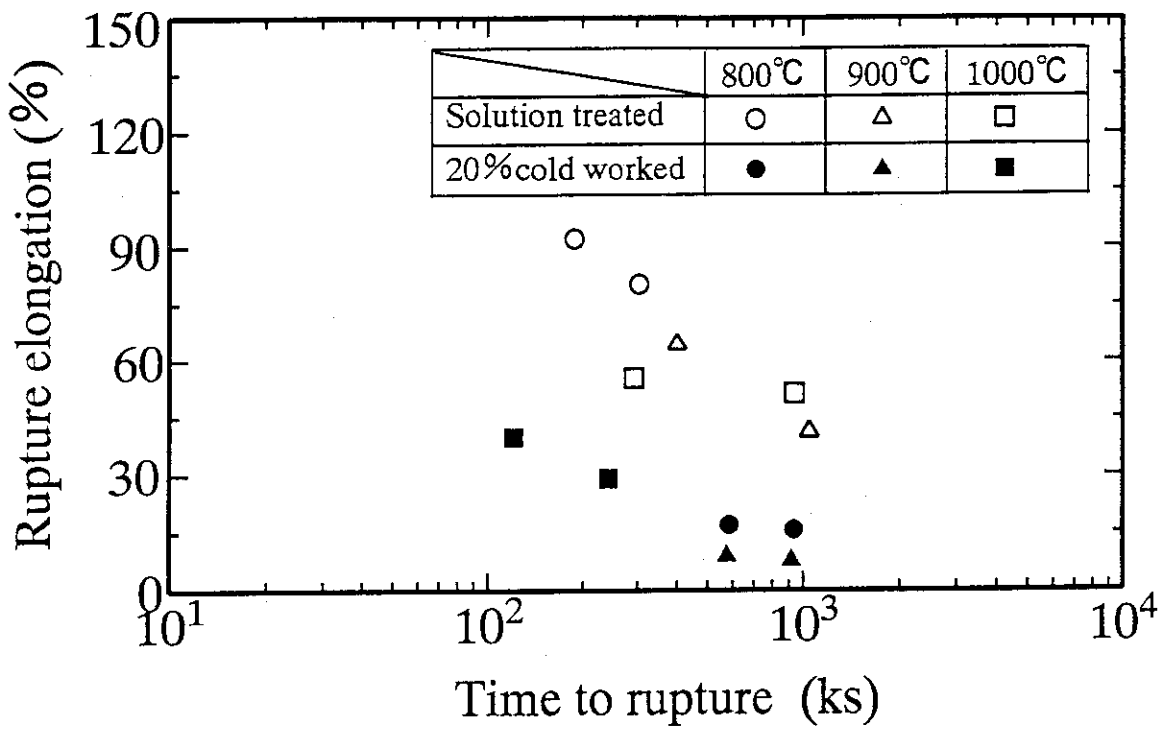


Fig.16 Rupture elongation versus time to rupture for solution treated Hastelloy XR and 20% cold worked Hastelloy XR.

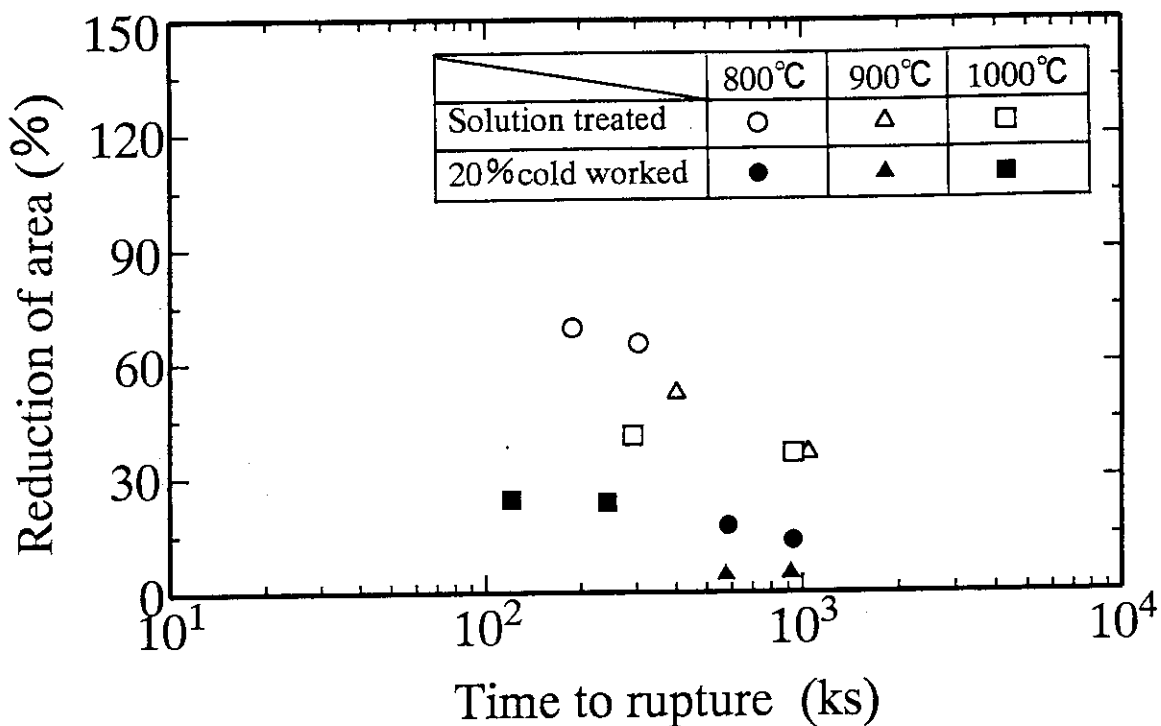


Fig.17 Reduction of area versus time to rupture for solution treated Hastelloy XR and 20% cold worked Hastelloy XR.

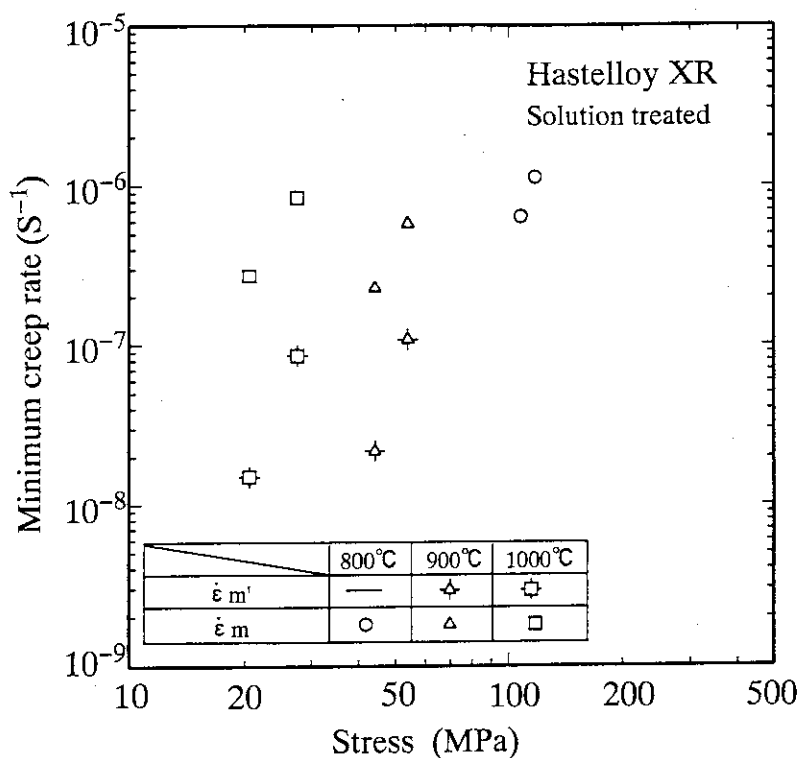


Fig.18(a) Stress dependence of minimum creep rate for solution treated Hastelloy XR.

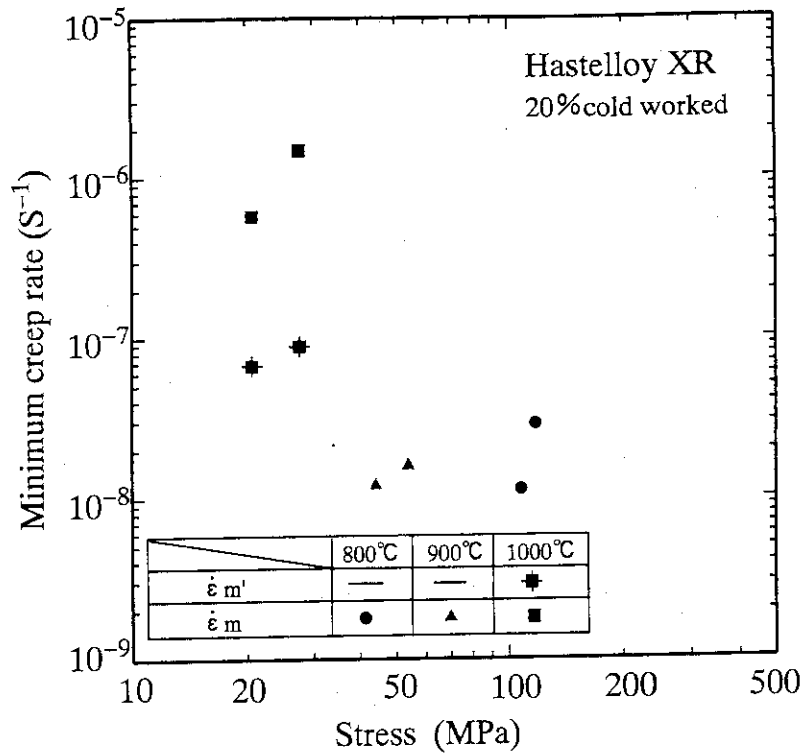


Fig.18(b) Stress dependence of minimum creep rate for 20% cold worked Hastelloy XR.

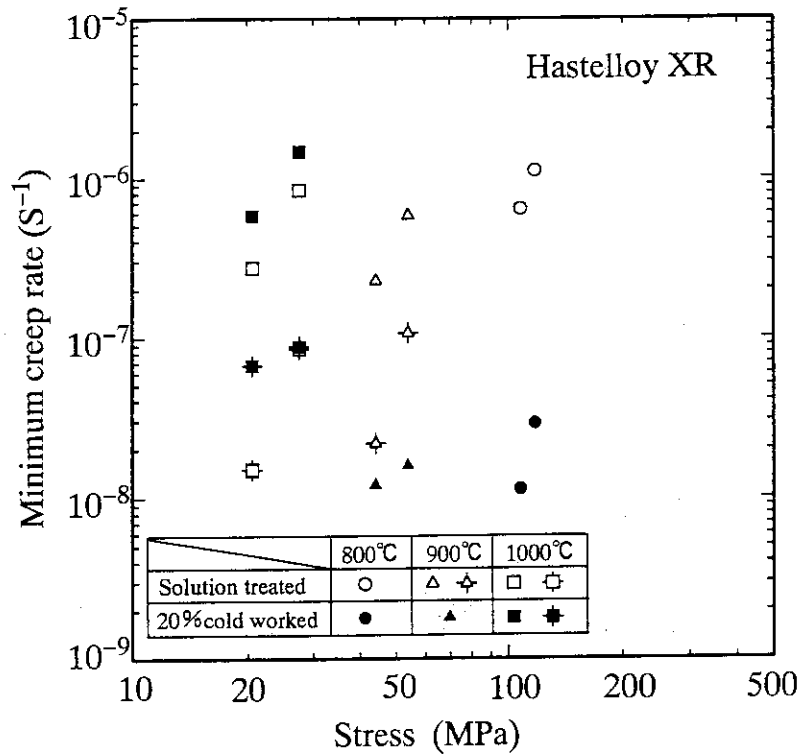


Fig.18(c) Stress dependence of minimum creep rate for solution treated Hastelloy XR and 20% cold worked Hastelloy XR.

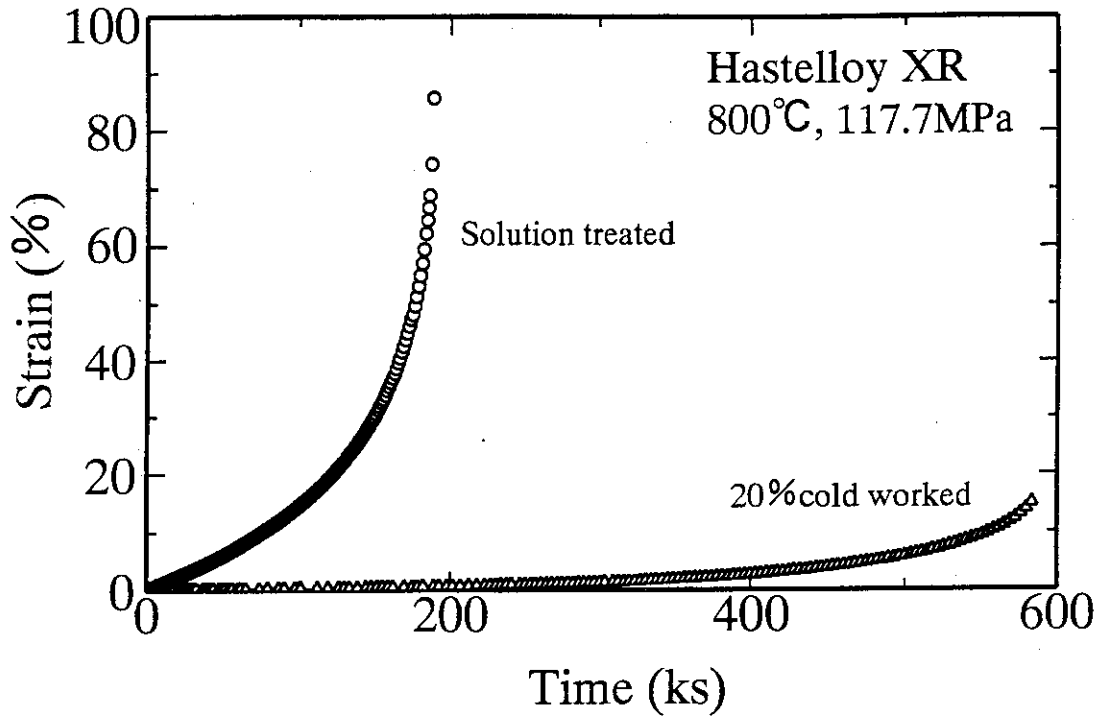


Fig.19 Effect of 20% cold work on creep curves of Hastelloy XR at 800°C and 107.9MPa.

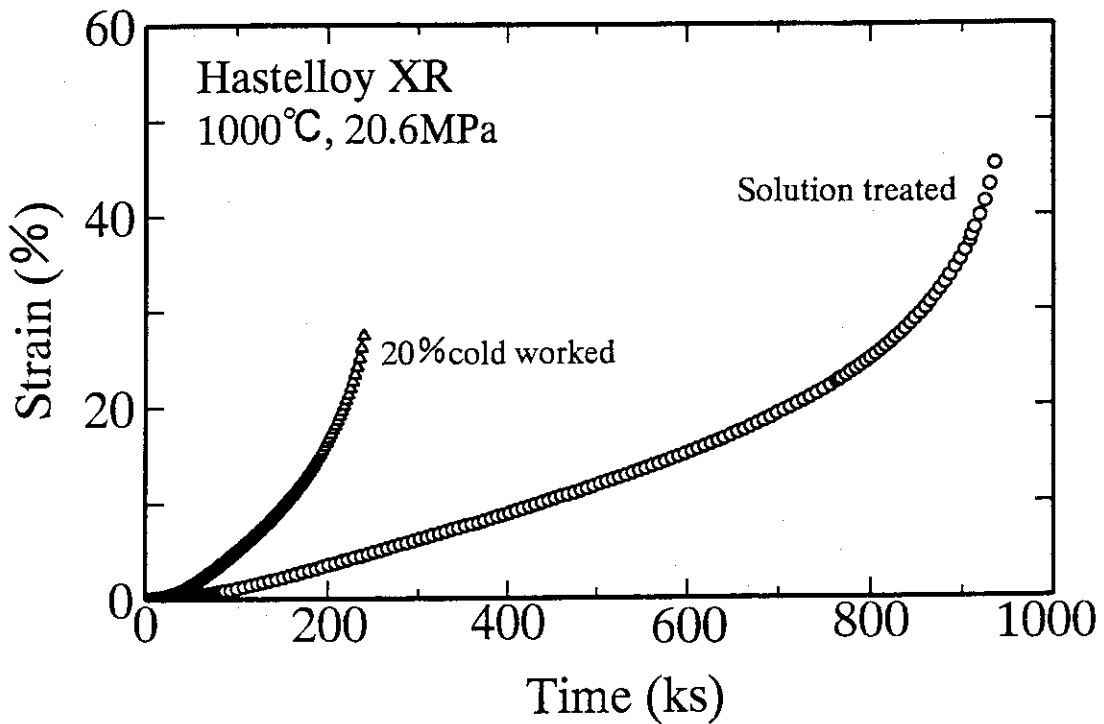


Fig.20 Effect of 20% cold work on creep curves of Hastelloy XR at 1000°C and 20.6MPa.

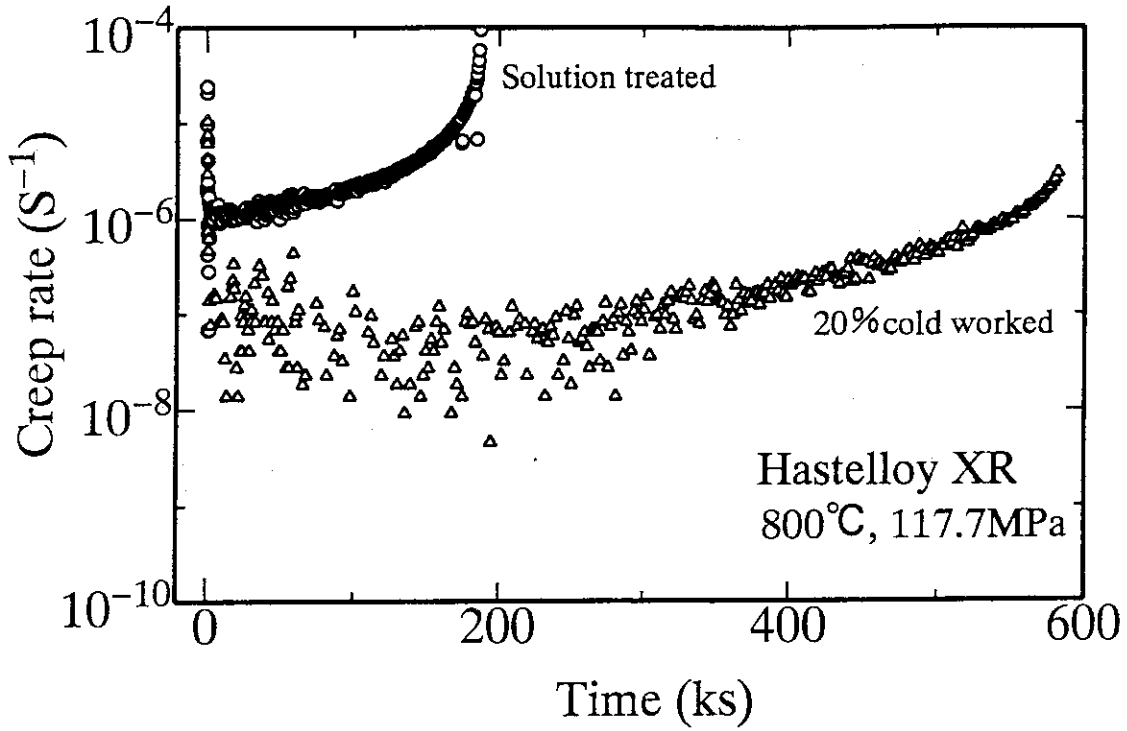


Fig.21 Effect of 20% cold work on creep rate/time curves of Hastelloy XR at 800°C and 117.7MPa.

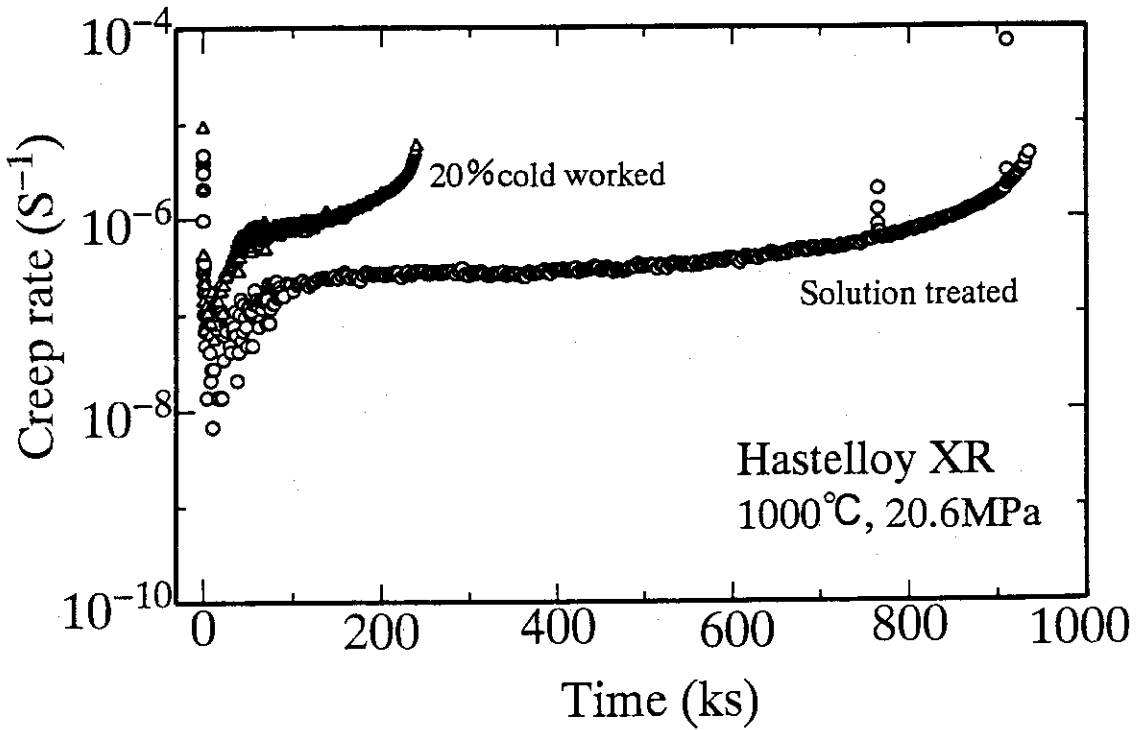


Fig.22 Effect of 20% cold work on creep rate/time curves of Hastelloy XR at 1000°C and 20.6MPa.

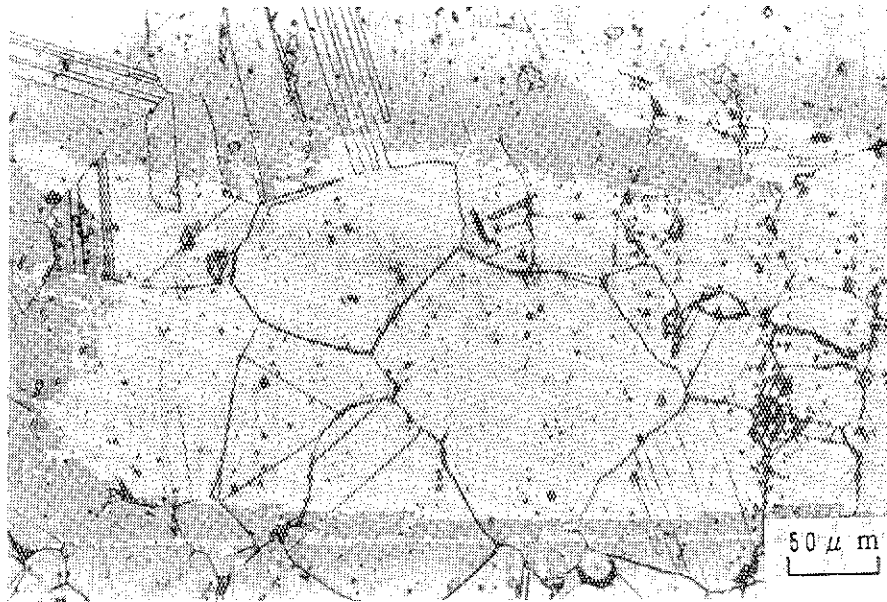


Photo.1 Optical micrograph of solution treated Hastelloy XR.

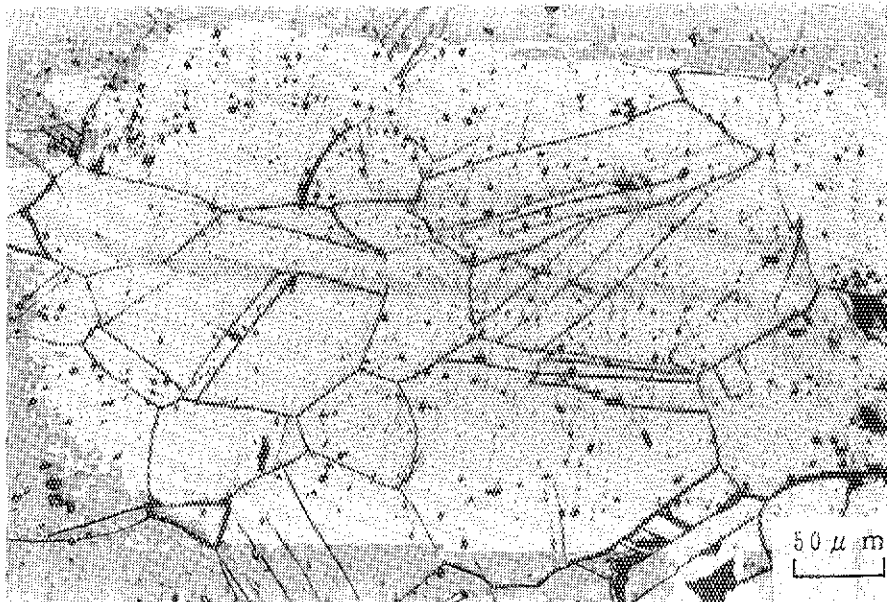


Photo.2 Optical micrograph of 20% cold worked Hastelloy XR.
An arrow shows a tensile direction of cold work.