

JAERI - M  
89-210

定応力クリープ試験によるクリープ曲線の定式化

1989年12月

加治 芳行・武藤 康

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、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute. 1989

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)原子力資料サービス

定応力クリープ試験によるクリープ曲線の定式化

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

加治 芳行・武藤 康

(1989年11月20日受理)

高温ガス炉の高温構造用部材として研究対象となっているNi基耐熱合金ハステロイXR-IIを供試材料として、応力一定のクリープ試験を行い、最小クリープひずみ速度及び3次クリープ開始点、クリープ破断時間等のパラメータと応力との関係を求めた。さらに、これらのパラメータを用い、1次+2次クリープ領域にGarofaloの式、3次クリープ領域にKachanov-Rabotnovの式を適用して、クリープ構成式を作成した。クリープ構成式を用いて算出したクリープ曲線を実験で得られたクリープ曲線と比較した結果、かなり良くクリープ挙動を表し得ることがわかった。さらにクリープ構成式とひずみ硬化則とを用いて、同一材料で行った高温低サイクル疲労試験のひずみ保持波形のリラクセーション挙動を推定し、実験結果と比較検討した結果、全体的に高めの応力を推定することがわかった。

また、ハステロイXR-IIを用いて850℃、 $\epsilon_t = 0.15\%$ の条件でリラクセーション試験を行い、その結果と2種類のクリープ構成式を用いて行ったリラクセーション解析結果との比較検討を行った。その結果、高温低サイクル疲労試験のひずみ保持波形のリラクセーション挙動を推定した場合と同様に高めの応力を推定することがわかり、クリープ構成式の精度に関してはさらに検討が必要である。

Creep Curve Formularization by Constant Stress Creep Tests

Yoshiyuki KAJI and Yasushi MUTO

Department of High Temperature Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 20, 1989)

Creep tests under constant stress were conducted on a nickel-base heat-resistant alloy, Hastelloy XR-II, which is one of the candidate alloys for applications in the process-heat high-temperature gas-cooled reactor (HTGR). In those tests relation between minimum creep strain rate, time to onset of tertiary creep, time to rupture and stress were investigated. Then, creep constitutive equation was made based on the Garofalo formula for the primary and secondary creep and the Kachanov-Rabotnov formula for the tertiary creep using these parameters. As results of the comparison between a calculated creep curve using these creep constitutive equation and an experimental creep curve, it was found that these equation could predict fairly well the creep strain behavior under the constant stress condition.

Numerical analyses of relaxation behavior under tension strain hold waves in high-temperature low-cycle fatigue tests were performed using creep constitutive equation and strain hardening law. As results of comparison with numerical analyses and experimental results, it was found that the values of calculated stress were somewhat higher than those of the test results. In addition, relaxation tests were conducted on Hastelloy XR-II at 850°C under  $\varepsilon_t = 0.15\%$  condition and comparison between experimental results and calculated results which were performed using two types of creep constitutive equations were carried out. As these results, it was found that the values of calculated stress were somewhat higher than those of the experimental

results. Therefore, it is still necessary to investigate the accuracy of creep constitutive equation.

Keywords: Hastelloy XR-II, Creep, Constant Stress, HTGR, Creep Constitutive Equation, Garofalo Formula, Kachanov-Rabotnov Formula, Strain Hardening Law, Relaxation Behavior

## 目 次

|   |   |
|---|---|
| 1. 緒 言                                  | 1 |
| 2. 実験方法                                 | 1 |
| 2.1 供試材料                                | 1 |
| 2.2 試験装置及び試験手順                          | 1 |
| 3. 実験結果及び考察                             | 2 |
| 3.1 最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{\min}$ | 2 |
| 3.2 1次クリープ曲線                            | 2 |
| 3.3 3次クリープ開始時間 $t_3$                    | 2 |
| 3.4 クリープ破断時間 $t_r$                      | 3 |
| 3.5 3次クリープ曲線                            | 3 |
| 3.6 クリープ曲線                              | 3 |
| 4. クリープ構成式を用いたリラクセーション特性の推定             | 4 |
| 4.1 解析プログラム                             | 4 |
| 4.2 解析モデル                               | 4 |
| 4.3 解析結果                                | 5 |
| 5. 結 言                                  | 5 |
| 謝 辞                                     | 6 |
| 参考文献                                    | 6 |

## Contents

|  |   |
|--|---|
| 1. Introduction .....  | 1 |
| 2. Experimental methods .....  | 1 |
| 2.1 Materials .....  | 1 |
| 2.2 Test apparatus and procedure .....   | 1 |
| 3. Results and discussion .....  | 2 |
| 3.1 Minimum creep strain rate $\dot{\epsilon}_{\min}$ .....                          | 2 |
| 3.2 Primary creep curve .....  | 2 |
| 3.3 Time to onset of tertiary creep $t_3$ .....                                      | 2 |
| 3.4 Time to rupture $t_r$ .....  | 3 |
| 3.5 Tertiary creep curve .....   | 3 |
| 3.6 Creep curve .....  | 3 |
| 4. Prediction of relaxation characteristic with creep<br>constitutive equation ..... | 4 |
| 4.1 Analysis program .....   | 4 |
| 4.2 Analysis model .....   | 4 |
| 4.3 Analysis results .....   | 5 |
| 5. Conclusions .....   | 5 |
| Acknowledgements .....   | 6 |
| References .....   | 6 |

## 1. 緒 言

従来原子炉プラントの機器が使用されきた温度領域よりも高い 800 ~ 950 °C の高温領域においては、クリープ変形が急速に進み、クリープに起因する損傷も大きくなるために、構造物の寿命はクリープに関係する損傷によって支配される。構造物の寿命評価にあたっては、時間的に応力が変化する荷重条件下において、クリープ変形がどのように進みかつ損傷が累積して破壊に至るかが問題となる。

ここでは、高温ガス炉の高温構造用部材として研究対象となっている Ni 基耐熱合金ハステロイ XR-II<sup>(1)(2)</sup> を供試材料として、応力一定のクリープ試験を行い、最小クリープひずみ速度及び 3 次クリープ開始点、クリープ破断時間等のパラメータと応力との関係を求めた。さらに、これらのパラメータを用い、1 次+2 次クリープ領域に Garofalo の式<sup>(3)</sup>、3 次クリープ領域に Kachanov-Rabotnov の式<sup>(4)</sup>を適用して、クリープ構成式を作成し、実験結果と比較した。このクリープ構成式とひずみ硬化則とを用いて、同一材料で行った高温低サイクル疲労試験のひずみ保持波形のリラクセーション挙動を推定し、実験結果と比較検討した。

また、ハステロイ XR-II を用いて 850 °C、 $\epsilon_t = 0.15\%$  の条件でリラクセーション試験を行い、その結果を行い、その結果と 2 種類のクリープ構成式を用いて行ったリラクセーション解析結果との比較検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材料

供試材料は、Ni 基耐熱合金ハステロイ XR-II で、その化学組成を Table 1 に示す。この合金は、既存合金ハステロイ X を高温ガス炉用に改良した合金であり、クリープ強度と高温ガス炉冷却材相当の不純ヘリウムガス中での耐食性が高められている。<sup>(1)(2)(5)</sup>

### 2.2 試験装置及び試験手順

応力一定のクリープ試験は、電気抵抗加熱方式の電気炉を備えたレバー式のクリープ試験機を用いて、空气中 850 °C で行った。試験片は、Fig. 1 に示すような直径 6 mm、標点間距離 30 mm の丸棒試験片である。また試験は、精度 1/1000 mm の差動トランス型変位計で測定した標点間 30 mm の軸方向伸びと分銅の重さより求められた応力が一定となるように、分銅を徐々に軽くして行った。なお、正味断面積は、標点間内の体積が一定と仮定して求めた。荷重調整分銅の最小重量は 50 g であり、荷重の誤差が最大でも 1% 以下になるようにした。



## 1. 緒 言

従来原子炉プラントの機器が使用されきた温度領域よりも高い 800 ~ 950 °C の高温領域においては、クリープ変形が急速に進み、クリープに起因する損傷も大きくなるために、構造物の寿命はクリープに関係する損傷によって支配される。構造物の寿命評価にあたっては、時間的に応力が変化する荷重条件下において、クリープ変形がどのように進みかつ損傷が累積して破壊に至るかが問題となる。

ここでは、高温ガス炉の高温構造用部材として研究対象となっている Ni 基耐熱合金ハステロイ XR-II<sup>(1)(2)</sup> を供試材料として、応力一定のクリープ試験を行い、最小クリープひずみ速度及び 3 次クリープ開始点、クリープ破断時間等のパラメータと応力との関係を求めた。さらに、これらのパラメータを用い、1 次+2 次クリープ領域に Garofalo の式<sup>(3)</sup>、3 次クリープ領域に Kachanov-Rabotnov の式<sup>(4)</sup> を適用して、クリープ構成式を作成し、実験結果と比較した。このクリープ構成式とひずみ硬化則とを用いて、同一材料で行った高温低サイクル疲労試験のひずみ保持波形のリラクセーション挙動を推定し、実験結果と比較検討した。

また、ハステロイ XR-II を用いて 850 °C、 $\epsilon_t = 0.15\%$  の条件でリラクセーション試験を行い、その結果を行い、その結果と 2 種類のクリープ構成式を用いて行ったリラクセーション解析結果との比較検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材料

供試材料は、Ni 基耐熱合金ハステロイ XR-II で、その化学組成を Table 1 に示す。この合金は、既存合金ハステロイ X を高温ガス炉用に改良した合金であり、クリープ強度と高温ガス炉冷却材相当の不純ヘリウムガス中での耐食性が高められている。<sup>(1)(2)(5)</sup>

### 2.2 試験装置及び試験手順

応力一定のクリープ試験は、電気抵抗加熱方式の電気炉を備えたレバー式のクリープ試験機を用いて、空气中 850 °C で行った。試験片は、Fig. 1 に示すような直径 6 mm、標点間距離 30 mm の丸棒試験片である。また試験は、精度 1/1000 mm の差動トランス型変位計で測定した標点間 30 mm の軸方向伸びと分銅の重さより求められた応力が一定となるように、分銅を徐々に軽くして行った。なお、正味断面積は、標点間内の体積が一定と仮定して求めた。荷重調整分銅の最小重量は 50 g であり、荷重の誤差が最大でも 1% 以下になるようにした。

リラクセーション試験は、電気抵抗加熱方式の電気炉を備えた負荷容量50 KNの電気機械式疲労試験機を用いて、空气中850℃で行った。試験片は、直径10 mm、標点間距離50 mmの丸棒試験片を用いた。試験条件は、ひずみ範囲を0.15%、立ち上げるひずみ速度を0.0025%/sとした。また、外気温度の影響をできるだけ小さくするために、試験機を恒温隔壁によって囲み、伸び計の回りの温度を±1℃の範囲で制御した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{\min}$

各応力条件における時間と真クリープひずみ及び真クリープひずみ速度の関係を Table 2 ~ Table 7 に示す。ここで、真クリープひずみ速度は、以下の式を用いて求めた。

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{\epsilon(t + \Delta t) - \epsilon(t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (1)$$

真クリープひずみ速度と時間の関係を Fig. 2 ~ Fig. 7 に示す。目視により最小クリープひずみ速度を決定すると、Table 8 のようになる。これを図示すると、Fig. 8 のようになりこれを最小自乗近似すると、次式ようになる。

$$\dot{\epsilon}_{\min} = 1.1768 \times 10^{-15} \sigma^{6.1973} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_{\min}$ : 1/h,  $\sigma$ : MPa である。

#### 3.2 1次クリープ曲線

1次+2次クリープひずみが次の Garofalo の式で表されると仮定する。

$$\epsilon = \epsilon t (1 - \exp(-rt)) + \dot{\epsilon}_{\min} * t \quad (3)$$

1次クリープひずみ速度  $\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_{\min}$  を求めると、Table 9 ~ Table 14 のようになり、これを時間に対してプロットすると Fig. 9 ~ Fig. 14 ようになる。データ点は、ほぼ直線にのり、最小自乗近似してパラメータ  $\epsilon t$ ,  $r$  を決定すると、Table 15 のようになる。

パラメータ  $\epsilon t$ ,  $r$  を応力に対してプロットすると、Fig. 16 のようになる。 $r$  はかなり直線上にのるが、 $\epsilon t$  はばらつく。 $\epsilon t$ ,  $r$  とともに直線上にあるものとして、最小自乗近似すると次式による。

$$\epsilon t = 1.8280 \times 10^{-2} \exp(0.0055\sigma) \quad (4)$$

$$r = 9.4082 \times 10^{-4} \exp(0.0384\sigma) \quad (5)$$

#### 3.3 3次クリープ開始時間 $t_3$

Fig. 2 ~ Fig. 7 より、目視で3次クリープ開始時間  $t_3$  を読み取ると、Table 8 のようにな

リラクセーション試験は、電気抵抗加熱方式の電気炉を備えた負荷容量50 KNの電気機械式疲労試験機を用いて、空气中850℃で行った。試験片は、直径10 mm、標点間距離50 mmの丸棒試験片を用いた。試験条件は、ひずみ範囲を0.15%、立ち上げるひずみ速度を0.0025%/sとした。また、外気温度の影響をできるだけ小さくするために、試験機を恒温隔壁によって囲み、伸び計の回りの温度を±1℃の範囲で制御した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{\min}$

各応力条件における時間と真クリープひずみ及び真クリープひずみ速度の関係を Table 2 ~ Table 7 に示す。ここで、真クリープひずみ速度は、以下の式を用いて求めた。

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{\epsilon(t + \Delta t) - \epsilon(t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (1)$$

真クリープひずみ速度と時間の関係を Fig. 2 ~ Fig. 7 に示す。目視により最小クリープひずみ速度を決定すると、Table 8 のようになる。これを図示すると、Fig. 8 のようになりこれを最小自乗近似すると、次式ようになる。

$$\dot{\epsilon}_{\min} = 1.1768 \times 10^{-15} \sigma^{6.1973} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_{\min}$  : 1/h,  $\sigma$  : MPa である。

#### 3.2 1次クリープ曲線

1次+2次クリープひずみが次の Garofalo の式で表されると仮定する。

$$\epsilon = \epsilon t (1 - \exp(-rt)) + \dot{\epsilon}_{\min} * t \quad (3)$$

1次クリープひずみ速度  $\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_{\min}$  を求めると、Table 9 ~ Table 14 のようになり、これを時間に対してプロットすると Fig. 9 ~ Fig. 14 による。データ点は、ほぼ直線にのり、最小自乗近似してパラメータ  $\epsilon t$ ,  $r$  を決定すると、Table 15 のようになる。

パラメータ  $\epsilon t$ ,  $r$  を応力に対してプロットすると、Fig. 16 のようになる。 $r$  はかなり直線上にのるが、 $\epsilon t$  はばらつく。 $\epsilon t$ ,  $r$  とともに直線上にあるものとして、最小自乗近似すると次式による。

$$\epsilon t = 1.8280 \times 10^{-2} \exp(0.0055\sigma) \quad (4)$$

$$r = 9.4082 \times 10^{-4} \exp(0.0384\sigma) \quad (5)$$

#### 3.3 3次クリープ開始時間 $t_3$

Fig. 2 ~ Fig. 7 より、目視で3次クリープ開始時間  $t_3$  を読み取ると、Table 8 のようにな

る。これを図示すると、Fig. 17 のようにほぼ直線上にのる。これを最小自乗近似すると次式のようになる。

$$t_3 = 8.6164 \times 10^{-12} \sigma^{-5.5323} \quad (6)$$

### 3.4 クリープ破断時間 $t_r$

クリープ破断時間と応力の関係は、Table 9 のようになる。これを図示すると、Fig. 18 のようになり良好な直線関係が得られる。これを最小自乗近似すると次式のようになる。

$$t_r = 2.6014 \times 10^{-13} \sigma^{-5.6499} \quad (7)$$

### 3.5 3次クリープ曲線

3次クリープ領域では、Kachanov-Rabotnov の式が成り立つものと仮定すると、

$$\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{\min} = ((tr - t) / (tr - t_3))^{-m} \quad (8)$$

それぞれの応力条件において  $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{\min}$  及び  $(tr - t) / (tr - t_3)$  の値を計算すると、Table 16 ~ Table 21 のようになる。これらを図示すると、Fig. 19 のようになり、応力条件に対して指数  $m$  を求めると、Table 22 のようになる。ここではその平均をとって、 $m = 0.4054$  とする。したがって、3次クリープ領域では、

$$\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{\min} = ((tr - t) / (tr - t_3))^{-0.4054} \quad (9)$$

となる。

### 3.6 クリープ曲線

以上の結果をまとめると、

$$0 \leq t \leq t_3$$

$$\epsilon = \epsilon t (1 - \exp(-rt)) + \dot{\epsilon}_{\min} \times t$$

$$\epsilon t = 1.8280 \times 10^{-2} \exp(0.0055 \sigma)$$

$$r = 9.4082 \times 10^{-4} \exp(0.0384 \sigma)$$

$$\epsilon_{\min} = 1.1768 \times 10^{-15} \sigma^{6.1973}$$

$$t_3 \leq t \leq t_r$$

$$\epsilon = \epsilon(t = t_3)$$

$$+ \dot{\epsilon}_{\min} \times \int_{t_3}^t ((tr - t) / (tr - t_3))^{-0.4054} dt$$

$$t_3 = 8.6164 \times 10^{-12} \sigma^{-5.5323}$$

$$t_r = 2.6014 \times 10^{-13} \sigma^{-5.6499}$$

となる。

各応力条件について、クリープ構成式から求めたクリープ曲線と実験結果とを比較したものを Fig. 20 ~ Fig. 25 に示す。これらの結果から、Garofalo 及び Kachanov-Rabotnov の式によりクリープ曲線をかなりよく表すことができることがわかった。

## 4. クリープ構成式を用いたリラクセーション特性の推定

### 4.1 解析プログラム

本解析には、有限要素構造解析コード"ABAQUS"<sup>(6)</sup>を用いた。"ABAQUS"は、米国Hibbit, Karlsson and sorensen, Inc. で開発されたコードであり、非線形解析における特徴の一つに時間増分の自動分割が可能な点がある。

### 4.2 解析モデル

解析モデルは、Fig. 26 に示すような内径 400 mm, 壁厚 20 mm, 長さ 100 mm の円管とする。そしてこのモデル下端の軸方向変位をゼロに拘束し、上端の軸方向変位を $\Delta u$ に拘束する。解析モデルの要素分割は、1要素分割とした。節点数は8点で、要素は、次数低減8節点軸対称四辺形を用いた。

リラクセーション解析において必要な入力は、本質的には初期応力であることから、実際の強制変位とは異なるが、強制変位 $\Delta u$ を $\Delta u = l_0 \sigma_0 / E$  ( $l_0 =$  解析モデルの原長)として与え、弾性応力解析により初期応力 $\sigma_0$ を求め、以後のステップで弾性クリープ応力解析を行った。解析では、ヤング率は $E = 127486.45 \text{ MPa}$  ( $13000 \text{ kg/mm}^2$ )とし、クリープ硬化則を用いた。(3)式から時間項を簡単に消去することができないことから、ひずみ硬化則を用いてクリープ速度を直接的に求めることは不可能である。ここでは、(3)式とその微分から数値計算(ニュートン・ラプソン法など)によって $t$ を消去することによってクリープ速度を求めた。<sup>(7)</sup>

まず、 $y(t)$  及び  $\dot{y}(t)$  を次のように定義する。

$$y(t) = \varepsilon t (1 - \exp(-rt)) + \dot{\varepsilon} \min \times t - \varepsilon = 0 \quad (10)$$

$$\dot{y}(t) = r \times \varepsilon t \times \exp(-rt) + \dot{\varepsilon} \min \quad (11)$$

ここで、

$$\varepsilon t = 1.8280 \times 10^{-2} \exp(0.0055 \sigma)$$

$$r = 9.4082 \times 10^{-4} \exp(0.0384 \sigma)$$

$$\dot{\varepsilon} \min = 1.1768 \times 10^{-15} \sigma^{6.1973}$$

である。いま $t^*$ を仮想時刻とすると、 $t^* = 0$ を初期値として(10)式を満足する $t$ を以下に示す(12)式を用いて繰り返し法で求め、これを(11)式に代入してクリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ が得られる。

$$t^* = t^* - y / (dy/dt)|_{t=t^*} \quad (12)$$

したがって、

$$\varepsilon(t + \text{delt}) = \dot{\varepsilon}(t) \times \text{delt} + \varepsilon(t)$$

となる。

このニュートン・ラプソン法を用いたクリープひずみの計算サブルーチンを Fig. 27 に示す。ただしここでは、応力の単位が $\text{kgf/mm}^2$ となっており、係数等が上式と異なっている。

### 4.3 解析結果

Fig. 28 ~ Fig. 31 にそれぞれ疲労試験の引張りひずみ保持波形の実験結果と解析結果とを比較した結果を示す。

(A) Table 23 ~ Table 26 にそれぞれの引張りひずみ保持波形リラクセーション挙動を示す。真空中で行ったものとも比較した。解析結果の初期応力は、実験で得られた初期応力を用いている。1 cycle 目のリラクセーション挙動については、若干高めに推定はしているものかなりよく表している。それに比べて、 $1/2N_f$ におけるリラクセーション挙動については、1 cycle 目に比べてひずみ保持直後のリラクセーション挙動が急激になり、実験結果とはかなりずれている。これは、繰り返しによってリラクセーション挙動が変わることによると考えられ、クリープ構成式の精度とは直接的に関係無いと考えられる。また、全体的にかなり実験結果よりも高めの応力を推定していることがわかる。これは、Garofalo の式を求めたときのパラメータのばらつきも影響しているものと考えられる。さらにリラクセーション挙動を推定するに当たっては、より広い応力範囲でのクリープ試験を行って、パラメータの応力依存性をより明確にする必要があると考えられる。

また、クリープ構成式として3節で求めた Garofalo の式と2次クリープのみを考えた Norton 則とを用いたリラクセーション解析を行いクリープ構成式による影響を検討した。Norton 則としては、(2)式を用いた。初期応力 172.6 MPa として 100 h までのリラクセーション解析結果を Table 27 と Fig. 32 に示す。この初期応力は、実際のリラクセーション試験の初期応力を用いた。ここには、ハステロイ XR-II を用いて 850 °C、 $\epsilon_t = 0.15\%$  の条件で行ったリラクセーション試験結果も示す。クリープ構成式として Garofalo の式を用いた方が Norton 則を用いた結果より低めに応力を推定している。また、Garofalo の式を用いた解析では、約 10 h 後には応力が 0 になっている。これは、時間ステップを大きくとったことやクリープ構成式の低応力側への適用範囲の問題 (Fig. 15 に示すように、クリープ試験の最小応力は 57.9 MPa であり、これより小さい応力では、1次クリープひずみ  $\epsilon_t$  を過大に見積っている可能性が大きい) 等が考えられ、この点についてはさらに検討が必要である。また、Norton 則を用いた場合でもかなり精度良くリラクセーション挙動を表しているが、実際の実験結果よりも高めの応力を推定することがわかる。評価としては安全側の評価とは言えるがより正確な評価を行うには、クリープ構成式の精度を上げることが必要でありさらに検討を要する。

## 5. 結 言

ハステロイ XR-II の 850 °C における空气中、応力一定クリープ試験を行い、その結果を用いてクリープ構成式を作成し、次の結論を得た。

(A)：疲労試験のデータは当研究室より三菱重工業(株)長崎研究所への委託試験において取得されたものである。

### 4.3 解析結果

Fig. 28 ~ Fig. 31 にそれぞれ疲労試験の引張りひずみ保持波形の実験結果と解析結果とを比較した結果を示す。

(A) Table 23 ~ Table 26 にそれぞれの引張りひずみ保持波形リラクセーション挙動を示す。真空中で行ったものとも比較した。解析結果の初期応力は、実験で得られた初期応力を用いている。1 cycle 目のリラクセーション挙動については、若干高めに推定はしているものかなりよく表している。それに比べて、 $1/2 N_f$ におけるリラクセーション挙動については、1 cycle 目に比べてひずみ保持直後のリラクセーション挙動が急激になり、実験結果とはかなりずれている。これは、繰返しによってリラクセーション挙動が変わることによると考えられ、クリープ構成式の精度とは直接的に関係無いと考えられる。また、全体的にかなり実験結果よりも高めの応力を推定していることがわかる。これは、Garofalo の式を求めたときのパラメータのばらつきも影響しているものと考えられる。さらにリラクセーション挙動を推定するに当っては、より広い応力範囲でのクリープ試験を行って、パラメータの応力依存性をより明確にする必要があると考えられる。

また、クリープ構成式として3節で求めた Garofalo の式と2次クリープのみを考えた Norton 則とを用いたリラクセーション解析を行いクリープ構成式による影響を検討した。Norton 則としては、(2)式を用いた。初期応力 172.6 MPa として 100 h までのリラクセーション解析結果を Table 27 と Fig. 32 に示す。この初期応力は、実際のリラクセーション試験の初期応力を用いた。ここには、ハステロイ XR-II を用いて 850 °C、 $\epsilon_t = 0.15\%$  の条件で行ったリラクセーション試験結果も示す。クリープ構成式として Garofalo の式を用いた方が Norton 則を用いた結果より低めに応力を推定している。また、Garofalo の式を用いた解析では、約 10 h 後には応力が 0 になっている。これは、時間ステップを大きくとったことやクリープ構成式の低応力側への適用範囲の問題 (Fig. 15 に示すように、クリープ試験の最小応力は 57.9 MPa であり、これより小さい応力では、1次クリープひずみ  $\epsilon_t$  を過大に見積っている可能性が大きい) 等が考えられ、この点についてはさらに検討が必要である。また、Norton 則を用いた場合でもかなり精度良くリラクセーション挙動を表しているが、実際の実験結果よりも高めの応力を推定することがわかる。評価としては安全側の評価とは言えるがより正確な評価を行うには、クリープ構成式の精度を上げることが必要でありさらに検討を要する。

## 5. 結 言

ハステロイ XR-II の 850 °C における空气中、応力一定クリープ試験を行い、その結果を用いてクリープ構成式を作成し、次の結論を得た。

(A) : 疲労試験のデータは当研究室より三菱重工業 (株) 長崎研究所への委託試験において取得されたものである。

- (1) 1次クリープひずみは、Garofaloの式によってよく表すことができるが、パラメータにはかなりばらつきがある。
- (2) 最小クリープひずみ速度に関してはNorton則が精度よく成り立つ。
- (3) 3次クリープ開始時間及び破断時間と応力とは両対数グラフ上で良好な直線関係にある。
- (4) 1次クリープから3次クリープまでGarofaloの式とKachonov-Rabotnovの式によりクリープ曲線をかなりよく表すことができる。
- (5) 本クリープ構成式とひずみ硬化則とを用いてリラクセーション解析を行った結果、解析結果は実験結果よりも高めの応力を推定する結果となり、クリープ構成式の精度についてはより検討が必要である。

## 謝 辞

定応力クリープ試験に際し、御協力頂いた高温試験技術開発室の橋 勝美氏並びに鎌田清史氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 近藤 達男, 渡辺 勝利, 佐藤 瓊介, 仲西 恒雄, 佐平 健彰, 辻 宏和, 倉田 有司, 塚田 隆, 小沢 賢治: JAERI-M86-003 (1986).
- (2) Y. Kurata, K. Sato, T. Nakanishi, K. Sahira, and T. Kondo: Proc. Int. Conf. on Creep, Tokyo, (1986), p.97.
- (3) F. Garofalo, "Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals", Macmillan, New York (1965)
- (4) Yu. N. Rabotnov, "Creep Problems in Structural Members", North-Holland Publishing Company, Amsterdam London (1969), pp.375
- (5) M. Shindo and T. Kondo: Proc. Conf. on Gas-Cooled Reactors Today, Bristol, (1982), Vol.2, p.179.
- (6) ABAQUS Theory Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (1982)
- (7) 宮 健三, 矢川 元基, 原子炉構造工学, 東京大学出版会, p.153



- (1) 1次クリープひずみは、Garofaloの式によってよく表すことができるが、パラメータにはかなりばらつきがある。
- (2) 最小クリープひずみ速度に関してはNorton則が精度よく成り立つ。
- (3) 3次クリープ開始時間及び破断時間と応力とは両対数グラフ上で良好な直線関係にある。
- (4) 1次クリープから3次クリープまでGarofaloの式とKachonov-Rabotnovの式によりクリープ曲線をかなりよく表すことができる。
- (5) 本クリープ構成式とひずみ硬化則とを用いてリラクセーション解析を行った結果、解析結果は実験結果よりも高めの応力を推定する結果となり、クリープ構成式の精度についてはより検討が必要である。

## 謝 辞

定応力クリープ試験に際し、御協力頂いた高温試験技術開発室の橋 勝美氏並びに鎌田清史氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 近藤 達男, 渡辺 勝利, 佐藤 瓊介, 仲西 恒雄, 佐平 健彰, 辻 宏和, 倉田 有司, 塚田 隆, 小沢 賢治: JAERI-M86-003 (1986).
- (2) Y. Kurata, K. Sato, T. Nakanishi, K. Sahira, and T. Kondo: Proc. Int. Conf. on Creep, Tokyo, (1986), p.97.
- (3) F. Garofalo, "Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals", Macmillan, New York (1965)
- (4) Yu. N. Rabotnov, "Creep Problems in Structural Members", North-Holland Publishing Company, Amsterdam London (1969), pp.375
- (5) M. Shindo and T. Kondo: Proc. Conf. on Gas-Cooled Reactors Today, Bristol, (1982), Vol.2, p.179.
- (6) ABAQUS Theory Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (1982)
- (7) 宮 健三, 矢川 元基, 原子炉構造工学, 東京大学出版会, p.153

- (1) 1次クリープひずみは、Garofaloの式によってよく表すことができるが、パラメータにはかなりばらつきがある。
- (2) 最小クリープひずみ速度に関してはNorton則が精度よく成り立つ。
- (3) 3次クリープ開始時間及び破断時間と応力とは両対数グラフ上で良好な直線関係にある。
- (4) 1次クリープから3次クリープまでGarofaloの式とKachonov-Rabotnovの式によりクリープ曲線をかなりよく表すことができる。
- (5) 本クリープ構成式とひずみ硬化則とを用いてリラクセーション解析を行った結果、解析結果は実験結果よりも高めの応力を推定する結果となり、クリープ構成式の精度についてはより検討が必要である。

## 謝 辞

定応力クリープ試験に際し、御協力頂いた高温試験技術開発室の橋 勝美氏並びに鎌田清史氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 近藤 達男, 渡辺 勝利, 佐藤 瓊介, 仲西 恒雄, 佐平 健彰, 辻 宏和, 倉田 有司, 塚田 隆, 小沢 賢治: JAERI-M86-003 (1986).
- (2) Y. Kurata, K. Sato, T. Nakanishi, K. Sahira, and T. Kondo: Proc. Int. Conf. on Creep, Tokyo, (1986), p.97.
- (3) F. Garofalo, "Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals", Macmillan, New York (1965)
- (4) Yu. N. Rabotnov, "Creep Problems in Structural Members", North-Holland Publishing Company, Amsterdam London (1969), pp.375
- (5) M. Shindo and T. Kondo: Proc. Conf. on Gas-Cooled Reactors Today, Bristol, (1982), Vol.2, p.179.
- (6) ABAQUS Theory Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (1982)
- (7) 宮 健三, 矢川 元基, 原子炉構造工学, 東京大学出版会, p.153

Table 1 Chemical composition of specimen material (wt%).

| C    | Mn   | Si   | Cr    | W    | Mo   | Fe    | Ni   | Co   | Al   | Ti   | B     | P      | S     | N     |
|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|--------|-------|-------|
| 0.07 | 0.86 | 0.32 | 21.98 | 0.51 | 8.83 | 17.70 | Bal. | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.005 | <0.005 | 0.001 | 0.002 |

Table 2 Creep strain and creep strain rate (57.9 MPa).

| 850 degree C 57.9MPa |       | tf=3196.8h   |                        |
|----------------------|-------|--------------|------------------------|
| Time(h)              | t/tf  | Creep Strain | Creep Strain Rate(1/h) |
| 50.00                | 0.016 | 0.0088       | 1.7618E-4              |
| 100.00               | 0.031 | 0.0159       | 1.3069E-4              |
| 150.00               | 0.047 | 0.0219       | 1.1034E-4              |
| 200.00               | 0.063 | 0.0270       | 1.0348E-4              |
| 250.00               | 0.078 | 0.0322       | 1.0158E-4              |
| 300.00               | 0.094 | 0.0371       | 9.9681E-5              |
| 350.00               | 0.109 | 0.0422       | 9.5112E-5              |
| 400.00               | 0.125 | 0.0466       | 8.7854E-5              |
| 450.00               | 0.141 | 0.0510       | 8.8141E-5              |
| 500.00               | 0.156 | 0.0554       | 8.9778E-5              |
| 550.00               | 0.172 | 0.0600       | 8.8042E-5              |
| 600.00               | 0.188 | 0.0642       | 8.6981E-5              |
| 650.00               | 0.203 | 0.0687       | 8.5946E-5              |
| 700.00               | 0.219 | 0.0728       | 8.4249E-5              |
| 750.00               | 0.235 | 0.0771       | 8.3898E-5              |
| 800.00               | 0.250 | 0.0812       | 8.6165E-5              |
| 850.00               | 0.266 | 0.0857       | 8.6462E-5              |
| 900.00               | 0.282 | 0.0899       | 8.2182E-5              |
| 950.00               | 0.297 | 0.0939       | 7.7959E-5              |
| 1000.00              | 0.313 | 0.0977       | 7.7646E-5              |
| 1050.00              | 0.328 | 0.1017       | 8.3132E-5              |
| 1100.00              | 0.344 | 0.1060       | 8.2162E-5              |
| 1150.00              | 0.360 | 0.1099       | 7.7354E-5              |
| 1200.00              | 0.375 | 0.1137       | 8.0860E-5              |
| 1250.00              | 0.391 | 0.1180       | 8.4340E-5              |
| 1300.00              | 0.407 | 0.1222       | 7.8322E-5              |
| 1350.00              | 0.422 | 0.1258       | 7.8625E-5              |
| 1400.00              | 0.438 | 0.1300       | 8.1459E-5              |
| 1450.00              | 0.454 | 0.1340       | 8.0497E-5              |
| 1500.00              | 0.469 | 0.1381       | 8.0801E-5              |
| 1550.00              | 0.485 | 0.1420       | 7.6154E-5              |
| 1600.00              | 0.501 | 0.1457       | 7.8311E-5              |
| 1650.00              | 0.516 | 0.1499       | 8.1698E-5              |
| 1700.00              | 0.532 | 0.1539       | 7.8921E-5              |
| 1750.00              | 0.547 | 0.1578       | 7.9823E-5              |
| 1800.00              | 0.563 | 0.1618       | 8.1326E-5              |
| 1850.00              | 0.579 | 0.1659       | 7.9190E-5              |
| 1900.00              | 0.594 | 0.1698       | 8.3668E-5              |
| 1950.00              | 0.610 | 0.1743       | 8.3347E-5              |
| 2000.00              | 0.626 | 0.1781       | 8.1785E-5              |
| 2050.00              | 0.641 | 0.1824       | 8.5619E-5              |
| 2100.00              | 0.657 | 0.1867       | 8.5837E-5              |
| 2150.00              | 0.673 | 0.1910       | 8.6065E-5              |
| 2200.00              | 0.688 | 0.1953       | 8.3938E-5              |
| 2250.00              | 0.704 | 0.1994       | 8.7659E-5              |
| 2300.00              | 0.719 | 0.2040       | 9.3667E-5              |
| 2350.00              | 0.735 | 0.2088       | 9.4968E-5              |
| 2400.00              | 0.751 | 0.2135       | 1.0198E-4              |
| 2450.00              | 0.766 | 0.2190       | 1.0720E-4              |

Table 2 (Continued)

|         |       |        |           |
|---------|-------|--------|-----------|
| 2500.00 | 0.782 | 0.2242 | 1.0605E-4 |
| 2550.00 | 0.798 | 0.2296 | 1.1001E-4 |
| 2600.00 | 0.813 | 0.2352 | 1.1223E-4 |
| 2650.00 | 0.829 | 0.2408 | 1.1550E-4 |
| 2700.00 | 0.845 | 0.2468 | 1.1819E-4 |
| 2750.00 | 0.860 | 0.2526 | 1.2465E-4 |
| 2800.00 | 0.876 | 0.2593 | 1.3323E-4 |
| 2850.00 | 0.892 | 0.2660 | 1.3942E-4 |
| 2900.00 | 0.907 | 0.2732 | 1.5197E-4 |
| 2950.00 | 0.923 | 0.2812 | 1.6584E-4 |
| 3000.00 | 0.938 | 0.2898 | 1.8201E-4 |
| 3050.00 | 0.954 | 0.2994 | 2.0717E-4 |
| 3100.00 | 0.970 | 0.3105 | 2.6412E-4 |
| 3150.00 | 0.985 | 0.3258 | 3.7262E-4 |
| 3190.00 | 0.998 | 0.3440 | 9.1888E-4 |
| 3196.80 | 1.000 | 0.3688 | 3.6367E-3 |

Table 3 Creep strain and creep strain rate (89.9 MPa).

| 850 degree C | 89.9MPa | tf=199.5h    |                        |
|--------------|---------|--------------|------------------------|
| Time(h)      | t/tf    | Creep Strain | Creep Strain Rate(1/h) |
| 5.00         | 0.025   | 0.0188       | 3.7503E-3              |
| 11.00        | 0.055   | 0.0380       | 3.0855E-3              |
| 15.00        | 0.075   | 0.0496       | 2.8138E-3              |
| 21.00        | 0.105   | 0.0661       | 2.6693E-3              |
| 25.00        | 0.125   | 0.0763       | 2.5120E-3              |
| 30.00        | 0.150   | 0.0887       | 2.4046E-3              |
| 36.00        | 0.180   | 0.1028       | 2.2620E-3              |
| 40.00        | 0.201   | 0.1114       | 2.1173E-3              |
| 46.00        | 0.231   | 0.1239       | 2.1119E-3              |
| 50.00        | 0.251   | 0.1325       | 2.0907E-3              |
| 55.00        | 0.276   | 0.1427       | 2.0621E-3              |
| 60.00        | 0.301   | 0.1531       | 1.9934E-3              |
| 66.00        | 0.331   | 0.1647       | 1.9243E-3              |
| 70.00        | 0.351   | 0.1723       | 1.9154E-3              |
| 75.00        | 0.376   | 0.1819       | 1.9410E-3              |
| 80.00        | 0.401   | 0.1917       | 1.9414E-3              |
| 84.00        | 0.421   | 0.1994       | 1.9084E-3              |
| 93.00        | 0.466   | 0.2166       | 1.9125E-3              |
| 95.17        | 0.477   | 0.2207       | 1.9505E-3              |
| 100.00       | 0.501   | 0.2302       | 1.9908E-3              |
| 105.00       | 0.526   | 0.2403       | 2.0054E-3              |
| 110.00       | 0.551   | 0.2503       | 1.9854E-3              |
| 115.00       | 0.576   | 0.2602       | 1.9932E-3              |
| 120.00       | 0.602   | 0.2702       | 2.0440E-3              |
| 125.00       | 0.627   | 0.2806       | 2.1092E-3              |
| 130.00       | 0.652   | 0.2913       | 2.1298E-3              |
| 135.00       | 0.677   | 0.3019       | 2.1336E-3              |
| 140.00       | 0.702   | 0.3126       | 2.1785E-3              |
| 145.00       | 0.727   | 0.3237       | 2.2424E-3              |
| 150.00       | 0.752   | 0.3350       | 2.3127E-3              |
| 154.00       | 0.772   | 0.3445       | 2.3410E-3              |
| 158.00       | 0.792   | 0.3538       | 2.3751E-3              |
| 165.00       | 0.827   | 0.3706       | 2.4703E-3              |
| 170.00       | 0.852   | 0.3834       | 2.6518E-3              |
| 175.00       | 0.877   | 0.3971       | 2.8040E-3              |
| 178.00       | 0.892   | 0.4058       | 3.0687E-3              |
| 185.00       | 0.927   | 0.4278       | 3.3777E-3              |
| 190.00       | 0.952   | 0.4464       | 4.3599E-3              |
| 195.00       | 0.977   | 0.4714       | 7.6296E-3              |
| 199.00       | 0.997   | 0.5150       | 1.4871E-2              |
| 199.42       | 1.000   | 0.5372       | 5.2658E-2              |

Table 4 Creep strain and creep strain rate (120.1 MPa).

| 850 degree C 120.1MPa |       | tf=45.3h     |                        |
|-----------------------|-------|--------------|------------------------|
| Time(h)               | t/tf  | Creep Strain | Creep Strain Rate(1/h) |
| 1.00                  | 0.022 | 0.0153       | 1.5305E-2              |
| 2.00                  | 0.044 | 0.0295       | 1.4348E-2              |
| 3.00                  | 0.066 | 0.0440       | 1.4318E-2              |
| 4.00                  | 0.088 | 0.0581       | 1.4014E-2              |
| 5.00                  | 0.110 | 0.0720       | 1.3657E-2              |
| 6.00                  | 0.132 | 0.0854       | 1.3115E-2              |
| 7.00                  | 0.155 | 0.0983       | 1.2783E-2              |
| 8.00                  | 0.177 | 0.1110       | 1.2464E-2              |
| 9.00                  | 0.199 | 0.1232       | 1.1934E-2              |
| 10.00                 | 0.221 | 0.1349       | 1.1390E-2              |
| 11.00                 | 0.243 | 0.1460       | 1.0954E-2              |
| 12.00                 | 0.265 | 0.1568       | 1.0714E-2              |
| 13.00                 | 0.287 | 0.1674       | 1.0570E-2              |
| 14.00                 | 0.309 | 0.1779       | 1.0341E-2              |
| 15.00                 | 0.331 | 0.1881       | 1.0146E-2              |
| 16.00                 | 0.353 | 0.1982       | 1.0045E-2              |
| 17.00                 | 0.375 | 0.2082       | 9.8870E-3              |
| 18.00                 | 0.397 | 0.2180       | 9.7899E-3              |
| 19.00                 | 0.419 | 0.2277       | 9.7234E-3              |
| 20.00                 | 0.442 | 0.2374       | 9.6577E-3              |
| 21.00                 | 0.464 | 0.2471       | 9.6484E-3              |
| 22.00                 | 0.486 | 0.2567       | 9.6661E-3              |
| 23.00                 | 0.508 | 0.2664       | 9.6012E-3              |
| 24.00                 | 0.530 | 0.2759       | 9.5902E-3              |
| 25.00                 | 0.552 | 0.2856       | 1.0217E-2              |
| 26.00                 | 0.574 | 0.2964       | 1.0672E-2              |
| 27.00                 | 0.596 | 0.3069       | 1.0481E-2              |
| 28.00                 | 0.618 | 0.3173       | 1.0475E-2              |
| 29.00                 | 0.640 | 0.3279       | 1.0647E-2              |
| 30.00                 | 0.662 | 0.3386       | 1.0915E-2              |
| 31.00                 | 0.684 | 0.3497       | 1.1247E-2              |
| 32.00                 | 0.706 | 0.3611       | 1.1592E-2              |
| 33.00                 | 0.728 | 0.3729       | 1.1875E-2              |
| 34.00                 | 0.751 | 0.3849       | 1.2146E-2              |
| 35.00                 | 0.773 | 0.3972       | 1.2548E-2              |
| 36.00                 | 0.795 | 0.4100       | 1.3145E-2              |
| 37.00                 | 0.817 | 0.4235       | 1.3995E-2              |
| 38.00                 | 0.839 | 0.4379       | 1.4878E-2              |
| 39.00                 | 0.861 | 0.4532       | 1.5896E-2              |
| 40.00                 | 0.883 | 0.4697       | 1.7284E-2              |
| 41.00                 | 0.905 | 0.4878       | 1.9158E-2              |
| 42.00                 | 0.927 | 0.5081       | 2.1894E-2              |
| 43.00                 | 0.949 | 0.5316       | 2.6990E-2              |
| 44.00                 | 0.971 | 0.5620       | 4.1029E-2              |
| 45.00                 | 0.993 | 0.6136       | 6.9187E-2              |
| 45.33                 | 1.000 | 0.6540       | 1.2248E-1              |

Table 5 Creep strain and creep strain rate (169.8 MPa).

| 850 degree C 169.8MPa |       | tf=7.6h      |                        |
|-----------------------|-------|--------------|------------------------|
| Time(h)               | t/tf  | Creep Strain | Creep Strain Rate(1/h) |
| 0.17                  | 0.022 | 0.0226       | 1.3538E-1              |
| 0.33                  | 0.044 | 0.0406       | 1.0918E-1              |
| 0.50                  | 0.066 | 0.0590       | 1.0694E-1              |
| 0.67                  | 0.088 | 0.0763       | 1.0535E-1              |
| 0.83                  | 0.110 | 0.0940       | 1.0548E-1              |
| 1.00                  | 0.132 | 0.1115       | 1.0147E-1              |
| 1.17                  | 0.154 | 0.1279       | 1.0005E-1              |
| 1.33                  | 0.175 | 0.1448       | 9.8437E-2              |
| 1.50                  | 0.197 | 0.1607       | 9.2944E-2              |
| 1.67                  | 0.219 | 0.1758       | 8.9998E-2              |
| 1.83                  | 0.241 | 0.1907       | 8.6921E-2              |
| 2.00                  | 0.263 | 0.2048       | 8.3681E-2              |
| 2.17                  | 0.285 | 0.2186       | 8.2776E-2              |
| 2.33                  | 0.307 | 0.2323       | 8.1650E-2              |
| 2.50                  | 0.329 | 0.2458       | 8.0314E-2              |
| 2.67                  | 0.351 | 0.2591       | 7.9489E-2              |
| 2.83                  | 0.373 | 0.2723       | 7.8450E-2              |
| 3.00                  | 0.395 | 0.2853       | 7.7207E-2              |
| 3.17                  | 0.417 | 0.2981       | 7.6453E-2              |
| 3.33                  | 0.439 | 0.3107       | 7.7045E-2              |
| 3.50                  | 0.461 | 0.3237       | 7.5861E-2              |
| 3.67                  | 0.483 | 0.3361       | 7.3603E-2              |
| 3.83                  | 0.504 | 0.3482       | 7.4208E-2              |
| 4.00                  | 0.526 | 0.3608       | 7.6048E-2              |
| 4.17                  | 0.548 | 0.3736       | 7.5338E-2              |
| 4.33                  | 0.570 | 0.3859       | 7.5826E-2              |
| 4.50                  | 0.592 | 0.3989       | 7.6111E-2              |
| 4.67                  | 0.614 | 0.4113       | 7.5363E-2              |
| 4.83                  | 0.636 | 0.4240       | 7.7220E-2              |
| 5.00                  | 0.658 | 0.4370       | 7.7394E-2              |
| 5.17                  | 0.680 | 0.4498       | 7.7987E-2              |
| 5.33                  | 0.702 | 0.4630       | 7.9671E-2              |
| 5.50                  | 0.724 | 0.4764       | 8.1032E-2              |
| 5.67                  | 0.746 | 0.4900       | 8.2802E-2              |
| 5.83                  | 0.768 | 0.5039       | 8.4250E-2              |
| 6.00                  | 0.789 | 0.5181       | 8.5367E-2              |
| 6.17                  | 0.811 | 0.5325       | 8.8163E-2              |
| 6.33                  | 0.833 | 0.5474       | 9.3037E-2              |
| 6.50                  | 0.855 | 0.5634       | 9.6197E-2              |
| 6.67                  | 0.877 | 0.5796       | 1.0089E-1              |
| 6.83                  | 0.899 | 0.5970       | 1.0859E-1              |
| 7.00                  | 0.921 | 0.6157       | 1.1890E-1              |
| 7.17                  | 0.943 | 0.6367       | 1.3598E-1              |
| 7.33                  | 0.965 | 0.6610       | 1.7099E-1              |
| 7.50                  | 0.987 | 0.6937       | 2.7820E-1              |
| 7.60                  | 1.000 | 0.7353       | 4.1614E-1              |



Table 6 Creep strain and creep strain rate (200.1 MPa).

| 850 degree C | 200.1MPa | tf=2.33h     |                        |
|--------------|----------|--------------|------------------------|
| Time(h)      | t/tf     | Creep Strain | Creep Strain Rate(1/h) |
| 0.03         | 0.014    | 0.0114       | 3.4485E-1              |
| 0.07         | 0.029    | 0.0226       | 3.3401E-1              |
| 0.10         | 0.043    | 0.0338       | 3.2495E-1              |
| 0.13         | 0.057    | 0.0441       | 3.1659E-1              |
| 0.17         | 0.072    | 0.0550       | 3.1338E-1              |
| 0.20         | 0.086    | 0.0651       | 3.0467E-1              |
| 0.23         | 0.100    | 0.0751       | 3.0693E-1              |
| 0.27         | 0.115    | 0.0856       | 3.0391E-1              |
| 0.30         | 0.129    | 0.0954       | 2.9555E-1              |
| 0.33         | 0.143    | 0.1051       | 2.8833E-1              |
| 0.37         | 0.158    | 0.1148       | 2.8557E-1              |
| 0.40         | 0.172    | 0.1243       | 2.8715E-1              |
| 0.43         | 0.186    | 0.1337       | 2.7095E-1              |
| 0.47         | 0.200    | 0.1424       | 2.5926E-1              |
| 0.50         | 0.215    | 0.1511       | 2.7016E-1              |
| 0.53         | 0.229    | 0.1603       | 2.6385E-1              |
| 0.57         | 0.243    | 0.1688       | 2.6146E-1              |
| 0.60         | 0.258    | 0.1778       | 2.6320E-1              |
| 0.63         | 0.272    | 0.1861       | 2.4817E-1              |
| 0.67         | 0.286    | 0.1944       | 2.3740E-1              |
| 0.70         | 0.300    | 0.2020       | 2.3903E-1              |
| 0.73         | 0.315    | 0.2102       | 2.3369E-1              |
| 0.77         | 0.329    | 0.2177       | 2.3181E-1              |
| 0.80         | 0.343    | 0.2257       | 2.4215E-1              |
| 0.83         | 0.358    | 0.2337       | 2.2826E-1              |
| 0.87         | 0.372    | 0.2410       | 2.1814E-1              |
| 0.90         | 0.386    | 0.2483       | 2.2823E-1              |
| 0.93         | 0.400    | 0.2561       | 2.2320E-1              |
| 0.97         | 0.415    | 0.2632       | 2.1334E-1              |
| 1.00         | 0.429    | 0.2704       | 2.2325E-1              |
| 1.03         | 0.443    | 0.2780       | 2.3441E-1              |
| 1.07         | 0.458    | 0.2861       | 2.4061E-1              |
| 1.10         | 0.472    | 0.2941       | 2.2627E-1              |
| 1.13         | 0.486    | 0.3010       | 2.1328E-1              |
| 1.17         | 0.501    | 0.3084       | 2.1961E-1              |
| 1.20         | 0.515    | 0.3157       | 2.2131E-1              |
| 1.23         | 0.529    | 0.3230       | 2.1643E-1              |
| 1.27         | 0.544    | 0.3302       | 2.2249E-1              |
| 1.30         | 0.558    | 0.3379       | 2.3192E-1              |
| 1.33         | 0.572    | 0.3455       | 2.1922E-1              |
| 1.37         | 0.587    | 0.3526       | 2.1756E-1              |
| 1.40         | 0.601    | 0.3601       | 2.2682E-1              |
| 1.43         | 0.615    | 0.3676       | 2.2912E-1              |
| 1.47         | 0.630    | 0.3755       | 2.2743E-1              |
| 1.50         | 0.644    | 0.3828       | 2.3640E-1              |
| 1.53         | 0.658    | 0.3911       | 2.3835E-1              |
| 1.57         | 0.673    | 0.3988       | 2.3640E-1              |
| 1.60         | 0.687    | 0.4069       | 2.3816E-1              |
| 1.63         | 0.701    | 0.4145       | 2.3971E-1              |

Table 6 (Continued)

|      |       |        |           |
|------|-------|--------|-----------|
| 1.67 | 0.715 | 0.4230 | 2.4486E-1 |
| 1.70 | 0.730 | 0.4309 | 2.3950E-1 |
| 1.73 | 0.744 | 0.4388 | 2.4090E-1 |
| 1.77 | 0.758 | 0.4470 | 2.5257E-1 |
| 1.80 | 0.773 | 0.4557 | 2.6112E-1 |
| 1.83 | 0.787 | 0.4643 | 2.6168E-1 |
| 1.87 | 0.801 | 0.4732 | 2.5946E-1 |
| 1.90 | 0.815 | 0.4816 | 2.6770E-1 |
| 1.93 | 0.830 | 0.4909 | 2.8094E-1 |
| 1.97 | 0.844 | 0.5005 | 2.8479E-1 |
| 2.00 | 0.858 | 0.5100 | 2.9282E-1 |
| 2.03 | 0.873 | 0.5198 | 3.0461E-1 |
| 2.07 | 0.887 | 0.5304 | 3.1410E-1 |
| 2.10 | 0.901 | 0.5408 | 3.2802E-1 |
| 2.13 | 0.915 | 0.5520 | 3.4412E-1 |
| 2.17 | 0.930 | 0.5639 | 3.7634E-1 |
| 2.20 | 0.944 | 0.5772 | 4.1964E-1 |
| 2.23 | 0.958 | 0.5916 | 4.6037E-1 |
| 2.27 | 0.973 | 0.6081 | 5.7379E-1 |
| 2.30 | 0.987 | 0.6300 | 1.0595E+0 |
| 2.33 | 1.000 | 0.6780 | 1.4537E+0 |

Table 7 Creep strain and creep strain rate (250.0 MPa).

| 850 degree C 250MPa |       | tf=0.77h     |                        |
|---------------------|-------|--------------|------------------------|
| Time(h)             | t/tf  | Creep Strain | Creep Strain Rate(1/h) |
| 0.02                | 0.022 | 0.0366       | 2.1506E+0              |
| 0.03                | 0.043 | 0.0537       | 1.0486E+0              |
| 0.05                | 0.065 | 0.0712       | 1.0008E+0              |
| 0.07                | 0.087 | 0.0877       | 9.7439E-1              |
| 0.08                | 0.108 | 0.1033       | 9.5867E-1              |
| 0.10                | 0.130 | 0.1193       | 9.1627E-1              |
| 0.12                | 0.152 | 0.1345       | 9.1058E-1              |
| 0.13                | 0.173 | 0.1494       | 8.9710E-1              |
| 0.15                | 0.195 | 0.1641       | 8.5802E-1              |
| 0.17                | 0.217 | 0.1786       | 8.5341E-1              |
| 0.18                | 0.238 | 0.1922       | 8.4131E-1              |
| 0.20                | 0.260 | 0.2063       | 8.2252E-1              |
| 0.22                | 0.282 | 0.2202       | 8.3576E-1              |
| 0.23                | 0.303 | 0.2339       | 8.0744E-1              |
| 0.25                | 0.325 | 0.2468       | 7.7317E-1              |
| 0.27                | 0.347 | 0.2602       | 7.8649E-1              |
| 0.28                | 0.368 | 0.2728       | 7.5989E-1              |
| 0.30                | 0.390 | 0.2853       | 7.4404E-1              |
| 0.32                | 0.412 | 0.2981       | 7.5721E-1              |
| 0.33                | 0.432 | 0.3103       | 7.3196E-1              |
| 0.35                | 0.455 | 0.3223       | 7.1702E-1              |
| 0.37                | 0.477 | 0.3346       | 7.4538E-1              |
| 0.38                | 0.497 | 0.3469       | 7.5148E-1              |
| 0.40                | 0.519 | 0.3594       | 7.3515E-1              |
| 0.42                | 0.542 | 0.3718       | 7.6285E-1              |
| 0.43                | 0.562 | 0.3846       | 7.6814E-1              |
| 0.45                | 0.584 | 0.3972       | 7.3622E-1              |
| 0.47                | 0.606 | 0.4096       | 7.4915E-1              |
| 0.48                | 0.627 | 0.4219       | 7.5406E-1              |
| 0.50                | 0.649 | 0.4345       | 7.3653E-1              |
| 0.52                | 0.671 | 0.4470       | 7.6317E-1              |
| 0.53                | 0.692 | 0.4597       | 7.8091E-1              |
| 0.55                | 0.714 | 0.4727       | 7.7439E-1              |
| 0.57                | 0.736 | 0.4860       | 8.0083E-1              |
| 0.58                | 0.757 | 0.4992       | 8.1638E-1              |
| 0.60                | 0.779 | 0.5130       | 8.1950E-1              |
| 0.62                | 0.801 | 0.5270       | 8.5817E-1              |
| 0.63                | 0.822 | 0.5413       | 8.8372E-1              |
| 0.65                | 0.844 | 0.5562       | 9.0524E-1              |
| 0.67                | 0.866 | 0.5721       | 9.7938E-1              |
| 0.68                | 0.887 | 0.5885       | 1.0353E+0              |
| 0.70                | 0.909 | 0.6062       | 1.0678E+0              |
| 0.72                | 0.931 | 0.6248       | 1.2179E+0              |
| 0.73                | 0.952 | 0.6464       | 1.5732E+0              |
| 0.75                | 0.974 | 0.6767       | 9.2894E+0              |
| 0.77                | 0.996 | 0.9623       | 1.6797E+1              |

Table 8 Minimum creep strain rate, time to onset of tertiary creep and time to rupture.

| 850 degree C |         | Stress Constant |           |
|--------------|---------|-----------------|-----------|
| Stress(MPa)  | t3(h)   | tr(h)           | ERM(1/h)  |
| 57.9         | 1800.00 | 3196.80         | 8.0000E-5 |
| 89.9         | 110.00  | 199.50          | 1.9500E-3 |
| 120.1        | 24.00   | 45.30           | 9.8500E-3 |
| 169.8        | 4.67    | 7.60            | 7.6000E-2 |
| 200.1        | 1.47    | 2.33            | 2.2500E-1 |
| 250.0        | 0.50    | 0.77            | 7.5000E-1 |

Table 9 Primary creep strain rate (57.9 MPa).

| 850 degree C |       | 57.9MPa   | tf=3196.8h  | ERM=8.0E-5 1/h |
|--------------|-------|-----------|-------------|----------------|
| Time(h)      | t/tf  | ER(1/h)   | ER-ERM(1/h) |                |
| 150.00       | 0.047 | 1.1034E-4 | 3.0344E-5   |                |
| 200.00       | 0.063 | 1.0348E-4 | 2.3477E-5   |                |
| 250.00       | 0.078 | 1.0158E-4 | 2.1580E-5   |                |
| 300.00       | 0.094 | 9.9681E-5 | 1.9681E-5   |                |
| 350.00       | 0.109 | 9.5112E-5 | 1.5112E-5   |                |
| 400.00       | 0.125 | 8.7854E-5 | 7.8539E-6   |                |
| 450.00       | 0.141 | 8.8141E-5 | 8.1412E-6   |                |
| 500.00       | 0.156 | 8.9778E-5 | 9.7781E-6   |                |
| 550.00       | 0.172 | 8.8042E-5 | 8.0418E-6   |                |
| 600.00       | 0.188 | 8.6981E-5 | 6.9805E-6   |                |
| 650.00       | 0.203 | 8.5946E-5 | 5.9457E-6   |                |
| 700.00       | 0.219 | 8.4249E-5 | 4.2485E-6   |                |
| 750.00       | 0.235 | 8.3898E-5 | 3.8979E-6   |                |
| 800.00       | 0.250 | 8.6165E-5 | 6.1645E-6   |                |
| 850.00       | 0.266 | 8.6462E-5 | 6.4616E-6   |                |
| 900.00       | 0.282 | 8.2182E-6 | 2.1819E-6   |                |

Table 10 Primary creep strain rate (89.9 MPa).

| 850 degree C |       | 89.9MPa   | tf=199.5h   | ERM=1.95E-3 1/h |
|--------------|-------|-----------|-------------|-----------------|
| Time(h)      | t/tf  | ER(1/h)   | ER-ERM(1/h) |                 |
| 5.00         | 0.025 | 3.7503E-3 | 1.8003E-3   |                 |
| 11.00        | 0.055 | 3.0855E-3 | 1.1355E-3   |                 |
| 15.00        | 0.075 | 2.8138E-3 | 8.6384E-4   |                 |
| 21.00        | 0.105 | 2.6693E-3 | 7.1933E-4   |                 |
| 25.00        | 0.125 | 2.5120E-3 | 5.6201E-4   |                 |
| 30.00        | 0.150 | 2.4046E-3 | 4.5459E-4   |                 |
| 36.00        | 0.180 | 2.2620E-3 | 3.1195E-4   |                 |
| 40.00        | 0.201 | 2.1173E-3 | 1.6729E-4   |                 |
| 46.00        | 0.231 | 2.1119E-3 | 1.6186E-4   |                 |
| 50.00        | 0.251 | 2.0907E-3 | 1.4067E-4   |                 |
| 55.00        | 0.276 | 2.0621E-3 | 1.1206E-4   |                 |

Table 11 Primary creep strain rate (120.1 MPa).

| 850 degree C |       | 120.1MPa  | tf=45.3h    | ERM=9.65E-3 1/h |
|--------------|-------|-----------|-------------|-----------------|
| Time(h)      | t/tf  | ER(1/h)   | ER-ERM(1/h) |                 |
| 1.00         | 0.022 | 1.5305E-2 | 5.6553E-3   |                 |
| 2.00         | 0.044 | 1.4348E-2 | 4.6981E-3   |                 |
| 3.00         | 0.066 | 1.4318E-2 | 4.6675E-3   |                 |
| 4.00         | 0.088 | 1.4014E-2 | 4.3642E-3   |                 |
| 5.00         | 0.110 | 1.3657E-2 | 4.0067E-3   |                 |
| 6.00         | 0.132 | 1.3115E-2 | 3.4647E-3   |                 |
| 7.00         | 0.155 | 1.2783E-2 | 3.1327E-3   |                 |
| 8.00         | 0.177 | 1.2464E-2 | 2.8139E-3   |                 |
| 9.00         | 0.199 | 1.1934E-2 | 2.2839E-3   |                 |
| 10.00        | 0.221 | 1.1390E-2 | 1.7400E-3   |                 |
| 11.00        | 0.243 | 1.0954E-2 | 1.3042E-3   |                 |
| 12.00        | 0.265 | 1.0714E-2 | 1.0638E-3   |                 |
| 13.00        | 0.287 | 1.0570E-2 | 9.2000E-4   |                 |
| 14.00        | 0.309 | 1.0341E-2 | 6.9100E-4   |                 |
| 15.00        | 0.331 | 1.0146E-2 | 4.9620E-4   |                 |
| 16.00        | 0.353 | 1.0045E-2 | 3.9450E-4   |                 |

Table 12 Primary creep strain rate (169.8 MPa).

| 850 degree C |       | 169.8MPa  | tf=7.6h     | ERM=7.6E-2 1/h |
|--------------|-------|-----------|-------------|----------------|
| Time(h)      | t/tf  | ER(1/h)   | ER-ERM(1/h) |                |
| 0.33         | 0.044 | 1.0918E-1 | 3.3175E-2   |                |
| 0.50         | 0.066 | 1.0694E-1 | 3.0940E-2   |                |
| 0.67         | 0.088 | 1.0535E-1 | 2.9345E-2   |                |
| 0.83         | 0.110 | 1.0548E-1 | 2.9482E-2   |                |
| 1.00         | 0.132 | 1.0147E-1 | 2.5469E-2   |                |
| 1.17         | 0.154 | 1.0005E-1 | 2.4046E-2   |                |
| 1.33         | 0.175 | 9.8437E-2 | 2.2437E-2   |                |
| 1.50         | 0.197 | 9.2944E-2 | 1.6944E-2   |                |
| 1.67         | 0.219 | 8.9998E-2 | 1.3998E-2   |                |
| 1.83         | 0.241 | 8.6921E-2 | 1.0921E-2   |                |
| 2.00         | 0.263 | 8.3681E-2 | 7.6808E-3   |                |
| 2.17         | 0.285 | 8.2776E-2 | 6.7756E-3   |                |
| 2.33         | 0.307 | 8.1650E-2 | 5.6499E-3   |                |

Table 13 Primary creep strain rate (200.1 MPa).

| 850 degree C | 200.1MPa | tf=2.33h  | ERM=2.25E-1 1/h |
|--------------|----------|-----------|-----------------|
| Time(h)      | t/tf     | ER(1/h)   | ER-ERM(1/h)     |
| 0.03         | 0.014    | 3.4485E-1 | 1.1985E-1       |
| 0.07         | 0.029    | 3.3401E-1 | 1.0901E-1       |
| 0.10         | 0.043    | 3.2495E-1 | 9.9949E-2       |
| 0.13         | 0.057    | 3.1659E-1 | 9.1594E-2       |
| 0.17         | 0.072    | 3.1338E-1 | 8.8379E-2       |
| 0.20         | 0.086    | 3.0467E-1 | 7.9665E-2       |
| 0.23         | 0.100    | 3.0693E-1 | 8.1933E-2       |
| 0.27         | 0.115    | 3.0391E-1 | 7.8910E-2       |
| 0.30         | 0.129    | 2.9555E-1 | 7.0554E-2       |
| 0.33         | 0.143    | 2.8833E-1 | 6.3329E-2       |
| 0.37         | 0.158    | 2.8557E-1 | 6.0571E-2       |
| 0.40         | 0.172    | 2.8715E-1 | 6.2150E-2       |
| 0.43         | 0.186    | 2.7095E-1 | 4.5952E-2       |
| 0.47         | 0.200    | 2.5926E-1 | 3.4256E-2       |
| 0.50         | 0.215    | 2.7016E-1 | 4.5155E-2       |
| 0.53         | 0.229    | 2.6385E-1 | 3.8851E-2       |
| 0.57         | 0.243    | 2.6146E-1 | 3.6461E-2       |
| 0.60         | 0.258    | 2.6320E-1 | 3.8196E-2       |

Table 14 Primary creep strain rate (250.0 MPa).

| 850 degree C | 250MPa | tf=0.77h  | ERM=7.5E-1 1/h |
|--------------|--------|-----------|----------------|
| Time(h)      | t/tf   | ER(1/h)   | ER-ERM(1/h)    |
| 0.03         | 0.043  | 1.0486E+0 | 2.9858E-1      |
| 0.05         | 0.065  | 1.0008E+0 | 2.5076E-1      |
| 0.07         | 0.087  | 9.7439E-1 | 2.2439E-1      |
| 0.08         | 0.108  | 9.5867E-1 | 2.0867E-1      |
| 0.10         | 0.130  | 9.1627E-1 | 1.6627E-1      |
| 0.12         | 0.152  | 9.1058E-1 | 1.6058E-1      |
| 0.13         | 0.173  | 8.9710E-1 | 1.4710E-1      |
| 0.15         | 0.195  | 8.5802E-1 | 1.0802E-1      |
| 0.17         | 0.217  | 8.5341E-1 | 1.0341E-1      |
| 0.18         | 0.238  | 8.4131E-1 | 9.1309E-2      |
| 0.20         | 0.260  | 8.2252E-1 | 7.2520E-2      |
| 0.22         | 0.282  | 8.3576E-1 | 8.5758E-2      |
| 0.23         | 0.303  | 8.0744E-1 | 5.7440E-2      |

Table 15 Primary creep parameter  $\epsilon_t$ , r.

| 850 degree C | Stress Constant |           |
|--------------|-----------------|-----------|
| Stress(MPa)  | $\epsilon_t$    | r         |
| 57.9         | 1.3744E-2       | 2.8101E-3 |
| 89.9         | 3.9282E-2       | 5.6126E-2 |
| 120.1        | 4.9711E-2       | 1.7695E-1 |
| 169.8        | 6.2800E-2       | 9.2643E-1 |
| 200.1        | 5.8772E-2       | 2.1854E+0 |
| 250.0        | 4.9005E-2       | 7.7769E+0 |

Table 16  $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{\min}$  and  $(t_r-t) / (t_r-t_3)$  (57.9 MPa).

| 850 degree C | 57.9MPa   | $t_f=3196.8h$ | ERM=8.0E-5 1/h      |
|--------------|-----------|---------------|---------------------|
| Time(h)      | ER(1/h)   | ER/ERM        | $(t_r-t)/(t_r-t_3)$ |
| 1800.00      | 8.1326E-5 | 1.0166E+0     | 1.0000E+0           |
| 1850.00      | 7.9190E-5 | 9.8988E-1     | 9.6420E-1           |
| 1900.00      | 8.3668E-5 | 1.0459E+0     | 9.2841E-1           |
| 1950.00      | 8.3347E-5 | 1.0418E+0     | 8.9261E-1           |
| 2000.00      | 8.1785E-5 | 1.0223E+0     | 8.5682E-1           |
| 2050.00      | 8.5619E-5 | 1.0702E+0     | 8.2102E-1           |
| 2100.00      | 8.5837E-5 | 1.0730E+0     | 7.8522E-1           |
| 2150.00      | 8.6065E-5 | 1.0758E+0     | 7.4943E-1           |
| 2200.00      | 8.3938E-5 | 1.0492E+0     | 7.1363E-1           |
| 2250.00      | 8.7659E-5 | 1.0957E+0     | 6.7784E-1           |
| 2300.00      | 9.3667E-5 | 1.1708E+0     | 6.4204E-1           |
| 2350.00      | 9.4968E-5 | 1.1871E+0     | 6.0624E-1           |
| 2400.00      | 1.0198E-4 | 1.2748E+0     | 5.7045E-1           |
| 2450.00      | 1.0720E-4 | 1.3400E+0     | 5.3465E-1           |
| 2500.00      | 1.0605E-4 | 1.3256E+0     | 4.9886E-1           |
| 2550.00      | 1.1001E-4 | 1.3751E+0     | 4.6306E-1           |
| 2600.00      | 1.1223E-4 | 1.4029E+0     | 4.2726E-1           |
| 2650.00      | 1.1550E-4 | 1.4438E+0     | 3.9147E-1           |
| 2700.00      | 1.1819E-4 | 1.4774E+0     | 3.5567E-1           |
| 2750.00      | 1.2465E-4 | 1.5581E+0     | 3.1987E-1           |
| 2800.00      | 1.3323E-4 | 1.6654E+0     | 2.8408E-1           |
| 2850.00      | 1.3942E-4 | 1.7428E+0     | 2.4828E-1           |
| 2900.00      | 1.5197E-4 | 1.8996E+0     | 2.1249E-1           |
| 2950.00      | 1.6584E-4 | 2.0730E+0     | 1.7669E-1           |
| 3000.00      | 1.8201E-4 | 2.2751E+0     | 1.4089E-1           |
| 3050.00      | 2.0717E-4 | 2.5896E+0     | 1.0510E-1           |
| 3100.00      | 2.6412E-4 | 3.3015E+0     | 6.9301E-2           |
| 3150.00      | 3.7262E-4 | 4.6578E+0     | 3.3505E-2           |
| 3190.00      | 9.1888E-4 | 1.1486E+1     | 4.8683E-3           |

Table 17  $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{\min}$  and  $(t_r-t) / (t_r-t_3)$  (89.9 MPa).

| 850 degree C | 89.9MPa   | tf=199.5h | ERM=1.95E-3 1/h |
|--------------|-----------|-----------|-----------------|
| Time(h)      | ER(1/h)   | ER/ERM    | (tr-t)/(tr-t3)  |
| 110.00       | 1.9854E-3 | 1.0182E+0 | 1.0000E+0       |
| 115.00       | 1.9932E-3 | 1.0222E+0 | 9.4413E-1       |
| 120.00       | 2.0440E-3 | 1.0482E+0 | 8.8827E-1       |
| 125.00       | 2.1092E-3 | 1.0816E+0 | 8.3240E-1       |
| 130.00       | 2.1298E-3 | 1.0922E+0 | 7.7654E-1       |
| 135.00       | 2.1336E-3 | 1.0942E+0 | 7.2067E-1       |
| 140.00       | 2.1785E-3 | 1.1172E+0 | 6.6480E-1       |
| 145.00       | 2.2424E-3 | 1.1500E+0 | 6.0894E-1       |
| 150.00       | 2.3127E-3 | 1.1860E+0 | 5.5307E-1       |
| 154.00       | 2.3410E-3 | 1.2005E+0 | 5.0838E-1       |
| 158.00       | 2.3751E-3 | 1.2180E+0 | 4.6369E-1       |
| 165.00       | 2.4703E-3 | 1.2668E+0 | 3.8548E-1       |
| 170.00       | 2.6518E-3 | 1.3599E+0 | 3.2961E-1       |
| 175.00       | 2.8040E-3 | 1.4380E+0 | 2.7374E-1       |
| 178.00       | 3.0687E-3 | 1.5737E+0 | 2.4022E-1       |
| 185.00       | 3.3777E-3 | 1.7322E+0 | 1.6201E-1       |
| 190.00       | 4.3599E-3 | 2.2359E+0 | 1.0615E-1       |
| 195.00       | 7.6296E-3 | 3.9126E+0 | 5.0279E-2       |
| 199.00       | 1.4871E-2 | 7.6262E+0 | 5.5866E-3       |

Table 18  $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{\min}$  and  $(t_r-t) / (t_r-t_3)$  (120.1 MPa).

| 850 degree C | 120.1MPa  | tf=45.3h  | ERM=9.65E-3 1/h |
|--------------|-----------|-----------|-----------------|
| Time(h)      | ER(1/h)   | ER/ERM    | (tr-t)/(tr-t3)  |
| 24.00        | 9.5902E-3 | 9.9380E-1 | 1.0000E+0       |
| 25.00        | 1.0217E-2 | 1.0588E+0 | 9.5305E-1       |
| 26.00        | 1.0672E-2 | 1.1059E+0 | 9.0610E-1       |
| 27.00        | 1.0481E-2 | 1.0861E+0 | 8.5916E-1       |
| 28.00        | 1.0475E-2 | 1.0855E+0 | 8.1221E-1       |
| 29.00        | 1.0647E-2 | 1.1033E+0 | 7.6526E-1       |
| 30.00        | 1.0915E-2 | 1.1311E+0 | 7.1831E-1       |
| 31.00        | 1.1247E-2 | 1.1655E+0 | 6.7136E-1       |
| 32.00        | 1.1592E-2 | 1.2012E+0 | 6.2441E-1       |
| 33.00        | 1.1875E-2 | 1.2306E+0 | 5.7747E-1       |
| 34.00        | 1.2146E-2 | 1.2587E+0 | 5.3052E-1       |
| 35.00        | 1.2548E-2 | 1.3003E+0 | 4.8357E-1       |
| 36.00        | 1.3145E-2 | 1.3622E+0 | 4.3662E-1       |
| 37.00        | 1.3995E-2 | 1.4503E+0 | 3.8967E-1       |
| 38.00        | 1.4878E-2 | 1.5418E+0 | 3.4272E-1       |
| 39.00        | 1.5896E-2 | 1.6473E+0 | 2.9578E-1       |
| 40.00        | 1.7284E-2 | 1.7911E+0 | 2.4883E-1       |
| 41.00        | 1.9158E-2 | 1.9853E+0 | 2.0188E-1       |
| 42.00        | 2.1894E-2 | 2.2688E+0 | 1.5493E-1       |
| 43.00        | 2.6990E-2 | 2.7969E+0 | 1.0798E-1       |
| 44.00        | 4.1029E-2 | 4.2517E+0 | 6.1033E-2       |
| 45.00        | 6.9187E-2 | 7.1696E+0 | 1.4085E-2       |



Table 19  $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{\min}$  and  $(t_r-t) / (t_r-t_3)$  (169.8 MPa).

| 850 degree C | 169.8MPa  | tf=7.6h   | ERM=7.6E-2 1/h      |
|--------------|-----------|-----------|---------------------|
| Time(h)      | ER(1/h)   | ER/ERM    | $(t_r-t)/(t_r-t_3)$ |
| 4.67         | 7.5363E-2 | 9.9162E-1 | 1.0000E+0           |
| 4.83         | 7.7220E-2 | 1.0161E+0 | 9.4539E-1           |
| 5.00         | 7.7394E-2 | 1.0183E+0 | 8.8737E-1           |
| 5.17         | 7.7987E-2 | 1.0261E+0 | 8.2935E-1           |
| 5.33         | 7.9671E-2 | 1.0483E+0 | 7.7474E-1           |
| 5.50         | 8.1032E-2 | 1.0662E+0 | 7.1672E-1           |
| 5.67         | 8.2802E-2 | 1.0895E+0 | 6.5870E-1           |
| 5.83         | 8.4250E-2 | 1.1086E+0 | 6.0410E-1           |
| 6.00         | 8.5367E-2 | 1.1233E+0 | 5.4608E-1           |
| 6.17         | 8.8163E-2 | 1.1600E+0 | 4.8806E-1           |
| 6.33         | 9.3037E-2 | 1.2242E+0 | 4.3345E-1           |
| 6.50         | 9.6197E-2 | 1.2658E+0 | 3.7543E-1           |
| 6.67         | 1.0089E-1 | 1.3275E+0 | 3.1741E-1           |
| 6.83         | 1.0859E-1 | 1.4288E+0 | 2.6280E-1           |
| 7.00         | 1.1890E-1 | 1.5645E+0 | 2.0478E-1           |
| 7.17         | 1.3598E-1 | 1.7892E+0 | 1.4676E-1           |
| 7.33         | 1.7099E-1 | 2.2499E+0 | 9.2150E-2           |
| 7.50         | 2.7820E-1 | 3.6605E+0 | 3.4130E-2           |

Table 20  $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{\min}$  and  $(t_r-t) / (t_r-t_3)$  (200.1 MPa).

| 850 degree C | 200.1MPa  | tf=2.33h  | ERM=2.25E-1 1/h     |
|--------------|-----------|-----------|---------------------|
| Time(h)      | ER(1/h)   | ER/ERM    | $(t_r-t)/(t_r-t_3)$ |
| 1.47         | 2.2743E-1 | 1.0108E+0 | 1.0000E+0           |
| 1.50         | 2.3640E-1 | 1.0507E+0 | 9.6512E-1           |
| 1.53         | 2.3835E-1 | 1.0593E+0 | 9.3023E-1           |
| 1.57         | 2.3640E-1 | 1.0507E+0 | 8.8372E-1           |
| 1.60         | 2.3816E-1 | 1.0585E+0 | 8.4884E-1           |
| 1.63         | 2.3971E-1 | 1.0654E+0 | 8.1395E-1           |
| 1.67         | 2.4486E-1 | 1.0883E+0 | 7.6744E-1           |
| 1.70         | 2.3950E-1 | 1.0644E+0 | 7.3256E-1           |
| 1.73         | 2.4090E-1 | 1.0707E+0 | 6.9767E-1           |
| 1.77         | 2.5257E-1 | 1.1225E+0 | 6.5116E-1           |
| 1.80         | 2.6112E-1 | 1.1605E+0 | 6.1628E-1           |
| 1.83         | 2.6168E-1 | 1.1630E+0 | 5.8140E-1           |
| 1.87         | 2.5946E-1 | 1.1532E+0 | 5.3488E-1           |
| 1.90         | 2.6770E-1 | 1.1898E+0 | 5.0000E-1           |
| 1.93         | 2.8094E-1 | 1.2486E+0 | 4.6512E-1           |
| 1.97         | 2.8479E-1 | 1.2657E+0 | 4.1861E-1           |
| 2.00         | 2.9282E-1 | 1.3014E+0 | 3.8372E-1           |
| 2.03         | 3.0461E-1 | 1.3538E+0 | 3.4884E-1           |
| 2.07         | 3.1410E-1 | 1.3960E+0 | 3.0233E-1           |
| 2.10         | 3.2802E-1 | 1.4579E+0 | 2.6744E-1           |
| 2.13         | 3.4412E-1 | 1.5294E+0 | 2.3256E-1           |
| 2.17         | 3.7634E-1 | 1.6726E+0 | 1.8605E-1           |
| 2.20         | 4.1964E-1 | 1.8651E+0 | 1.5116E-1           |
| 2.23         | 4.6037E-1 | 2.0461E+0 | 1.1628E-1           |
| 2.27         | 5.7379E-1 | 2.5502E+0 | 6.9767E-2           |
| 2.30         | 1.0595E+0 | 4.7089E+0 | 3.4884E-2           |

Table 21  $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{\min}$  and  $(t_r-t) / (t_r-t_3)$  (250.0 MPa).

| 850 degree C | 250MPa    | tf=0.77h  | ERM=7.5E-1 1/h |
|--------------|-----------|-----------|----------------|
| Time(h)      | ER(1/h)   | ER/ERM    | (tr-t)/(tr-t3) |
| 0.50         | 7.3653E-1 | 9.8204E-1 | 1.0000E+0      |
| 0.52         | 7.6317E-1 | 1.0176E+0 | 9.2593E-1      |
| 0.53         | 7.8091E-1 | 1.0412E+0 | 8.8889E-1      |
| 0.55         | 7.7439E-1 | 1.0325E+0 | 8.1482E-1      |
| 0.57         | 8.0083E-1 | 1.0678E+0 | 7.4074E-1      |
| 0.58         | 8.1638E-1 | 1.0885E+0 | 7.0370E-1      |
| 0.60         | 8.1950E-1 | 1.0927E+0 | 6.2963E-1      |
| 0.62         | 8.5817E-1 | 1.1442E+0 | 5.5556E-1      |
| 0.63         | 8.8372E-1 | 1.1783E+0 | 5.1852E-1      |
| 0.65         | 9.0524E-1 | 1.2070E+0 | 4.4445E-1      |
| 0.67         | 9.7938E-1 | 1.3058E+0 | 3.7037E-1      |
| 0.68         | 1.0353E+0 | 1.3804E+0 | 3.3333E-1      |
| 0.70         | 1.0678E+0 | 1.4237E+0 | 2.5926E-1      |
| 0.72         | 1.2179E+0 | 1.6239E+0 | 1.8519E-1      |
| 0.73         | 1.5732E+0 | 2.0976E+0 | 1.4815E-1      |

Table 22 Tertiary creep parameter m.

| 850 degree C | Stress Constant |
|--------------|-----------------|
| Stress(MPa)  | m               |
| 57.9         | 0.4591          |
| 89.9         | 0.4020          |
| 120.1        | 0.4730          |
| 169.8        | 0.3684          |
| 200.1        | 0.3905          |
| 250.0        | 0.3396          |

Ave.=0.4054

Table 23 Relaxation behavior for tension strain hold duration  
 ( $\Delta\epsilon_t=0.503\%$ , Air, N=1cycle).

| Hastelloy XR2 850degree C<br>E=0.503% Tension hold |                      | Air<br>N=1cycle |
|--|----------------------|-----------------|
| Time(s)  | Residual Stress(MPa) |                 |
| 0.0  | 157.99               |                 |
| 0.6  | 157.00               |                 |
| 1.2  | 152.20               |                 |
| 1.8  | 149.26               |                 |
| 2.4  | 145.33               |                 |
| 3.0  | 142.39               |                 |
| 3.6  | 139.45               |                 |
| 4.2  | 136.61               |                 |
| 4.8  | 135.63               |                 |
| 5.4  | 133.66               |                 |
| 6.0  | 131.70               |                 |
| 12.0   | 121.90               |                 |
| 18.0   | 117.58               |                 |
| 24.0   | 112.19               |                 |
| 30.0   | 109.25               |                 |
| 36.0   | 105.32               |                 |
| 42.0   | 102.38               |                 |
| 48.0   | 99.54                |                 |
| 54.0   | 97.58                |                 |
| 60.0   | 95.61                |                 |
| 120.0  | 81.00                |                 |
| 180.0  | 71.20                |                 |
| 240.0  | 66.29                |                 |
| 300.0  | 59.53                |                 |

Table 24 Relaxation behavior for tension strain hold duration  
 ( $\Delta\epsilon_t=1.0\%$ , Vacuum,  $N=450$ cycle).

| Hastelloy XR2 850degree C<br>E=1.0% Tension hold |                      | Vacuum<br>N=450cycle |
|--|----------------------|----------------------|
| Time(s)  | Residual Stress(MPa) |                      |
| 0.0  | 209.86               |                      |
| 0.1  | 198.09               |                      |
| 0.2  | 189.27               |                      |
| 0.3  | 181.42               |                      |
| 0.4  | 175.54               |                      |
| 0.5  | 168.67               |                      |
| 0.6  | 164.75               |                      |
| 0.7  | 158.87               |                      |
| 0.8  | 155.93               |                      |
| 0.9  | 152.98               |                      |
| 1.0  | 150.04               |                      |
| 2.0  | 129.45               |                      |
| 3.0  | 119.64               |                      |
| 4.0  | 111.80               |                      |
| 5.0  | 106.89               |                      |
| 6.0  | 102.97               |                      |
| 7.0  | 100.03               |                      |
| 8.0  | 97.09                |                      |
| 9.0  | 96.11                |                      |
| 10.0   | 95.12                |                      |
| 20.0   | 80.41                |                      |
| 30.0   | 74.53                |                      |
| 40.0   | 70.61                |                      |
| 50.0   | 66.69                |                      |
| 60.0   | 64.72                |                      |
| 120.0  | 55.90                |                      |
| 180.0  | 50.99                |                      |
| 240.0  | 47.07                |                      |
| 300.0  | 43.15                |                      |

Table 25 Relaxation behavior for tension strain hold duration  
 ( $\Delta\epsilon_t=0.688\%$ , Vacuum, N=1cycle).

| Hastelloy XR2 850degree C |                      | Vacuum   |
|---------------------------|----------------------|----------|
| E=0.688%                  |                      | N=1cycle |
| Tension hold              |                      |          |
| Time(s)                   | Residual Stress(MPa) |          |
| 0.0                       | 189.27               |          |
| 0.6                       | 174.56               |          |
| 1.2                       | 166.71               |          |
| 1.8                       | 161.81               |          |
| 2.4                       | 157.89               |          |
| 3.0                       | 153.96               |          |
| 3.6                       | 151.02               |          |
| 4.2                       | 147.10               |          |
| 4.8                       | 145.14               |          |
| 5.4                       | 144.16               |          |
| 6.0                       | 142.20               |          |
| 12.0                      | 128.47               |          |
| 18.0                      | 122.58               |          |
| 24.0                      | 113.76               |          |
| 30.0                      | 107.87               |          |
| 36.0                      | 103.95               |          |
| 42.0                      | 101.01               |          |
| 48.0                      | 98.07                |          |
| 54.0                      | 95.12                |          |
| 60.0                      | 92.18                |          |
| 120.0                     | 80.41                |          |
| 180.0                     | 73.55                |          |
| 240.0                     | 69.63                |          |
| 300.0                     | 66.69                |          |

Table 26 Relaxation behavior for tension strain hold duration  
 ( $\Delta\epsilon_t=0.5\%$ , Vacuum,  $N=1100$ cycle).

| Hastelloy XR2 850degree C<br>E=0.5% Tension hold |                      | Vacuum<br>N=1100cycle |
|--|----------------------|-----------------------|
| Time(s)  | Residual Stress(MPa) |                       |
| 0.0  | 226.53               |                       |
| 0.1  | 207.90               |                       |
| 0.2  | 197.11               |                       |
| 0.3  | 188.29               |                       |
| 0.4  | 182.40               |                       |
| 0.5  | 176.52               |                       |
| 0.6  | 173.58               |                       |
| 0.7  | 169.66               |                       |
| 0.8  | 166.71               |                       |
| 0.9  | 164.75               |                       |
| 1.0  | 162.79               |                       |
| 2.0  | 146.12               |                       |
| 3.0  | 137.29               |                       |
| 4.0  | 130.43               |                       |
| 5.0  | 125.53               |                       |
| 6.0  | 120.62               |                       |
| 7.0  | 117.68               |                       |
| 8.0  | 115.72               |                       |
| 9.0  | 111.80               |                       |
| 10.0   | 109.83               |                       |
| 20.0   | 97.09                |                       |
| 30.0   | 87.28                |                       |
| 40.0   | 82.38                |                       |
| 50.0   | 76.49                |                       |
| 60.0   | 71.59                |                       |
| 70.0   | 68.65                |                       |
| 80.0   | 65.70                |                       |
| 90.0   | 62.76                |                       |
| 100.0  | 60.80                |                       |
| 200.0  | 52.96                |                       |
| 300.0  | 50.01                |                       |

Table 27 Effects of creep constitutive equation on relaxation behavior.

| 850 degreeC |                                 | E=127486.45 MPa                   |  |
|-------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Time , h    | Residual Stress , MPa<br>Norton | Residual Stress , MPa<br>Garofalo |  |
| 0           | 172.11                          | 172.11                            |  |
| 0.0001      | 171.03                          | 170.64                            |  |
| 0.0005      | 167.20                          | 165.63                            |  |
| 0.001       | 163.08                          | 160.44                            |  |
| 0.005       | 143.67                          | 138.57                            |  |
| 0.01        | 131.11                          | 125.43                            |  |
| 0.05        | 98.16                           | 94.63                             |  |
| 0.1         | 87.38                           | 81.91                             |  |
| 0.5         | 65.43                           | 55.63                             |  |
| 1           | 57.29                           | 44.40                             |  |
| 5           | 42.31                           | 16.14                             |  |
| 10          | 36.89                           | 1.87                              |  |
| 15          | 34.04                           |                                   |  |
| 20          | 32.15                           |                                   |  |
| 25          | 30.75                           |                                   |  |
| 30          | 29.67                           |                                   |  |
| 35          | 28.77                           |                                   |  |
| 40          | 28.03                           |                                   |  |
| 45          | 27.38                           |                                   |  |
| 50          | 26.82                           |                                   |  |
| 55          | 26.32                           |                                   |  |
| 60          | 25.88                           |                                   |  |
| 65          | 25.47                           |                                   |  |
| 70          | 25.11                           |                                   |  |
| 75          | 24.77                           |                                   |  |
| 80          | 24.46                           |                                   |  |
| 85          | 24.17                           |                                   |  |
| 90          | 23.90                           |                                   |  |
| 95          | 23.65                           |                                   |  |
| 100         | 23.42                           |                                   |  |

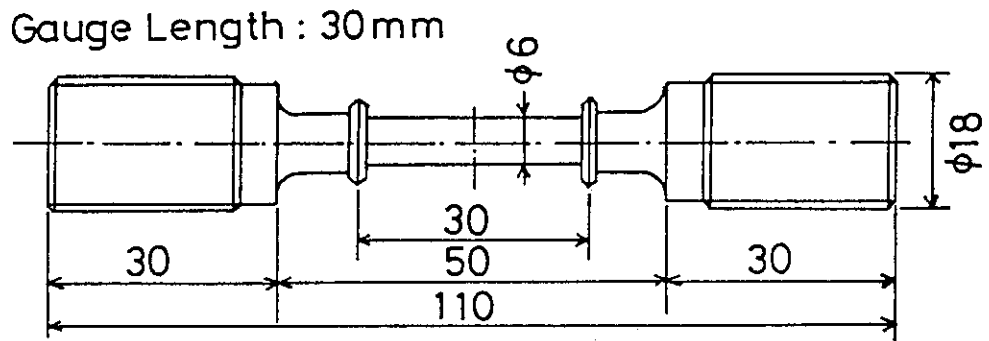


Fig. 1 Geometry of specimen (mm).



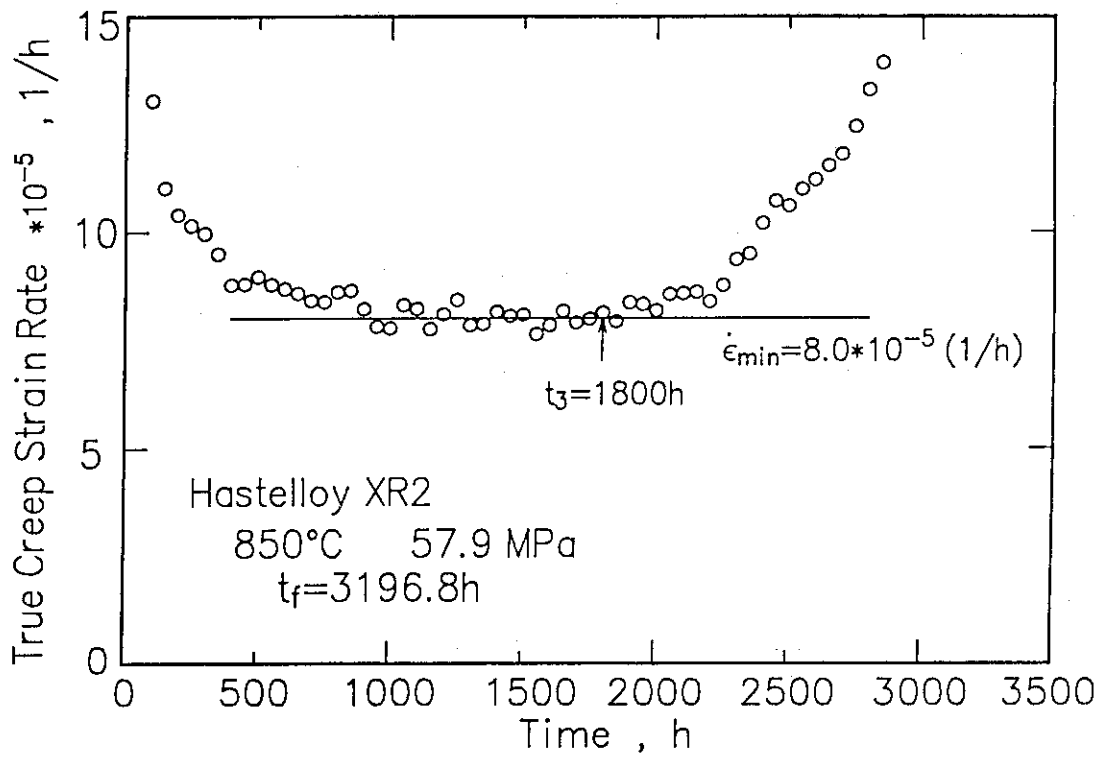


Fig. 2 Relation between creep strain rate and time (57.9 MPa).

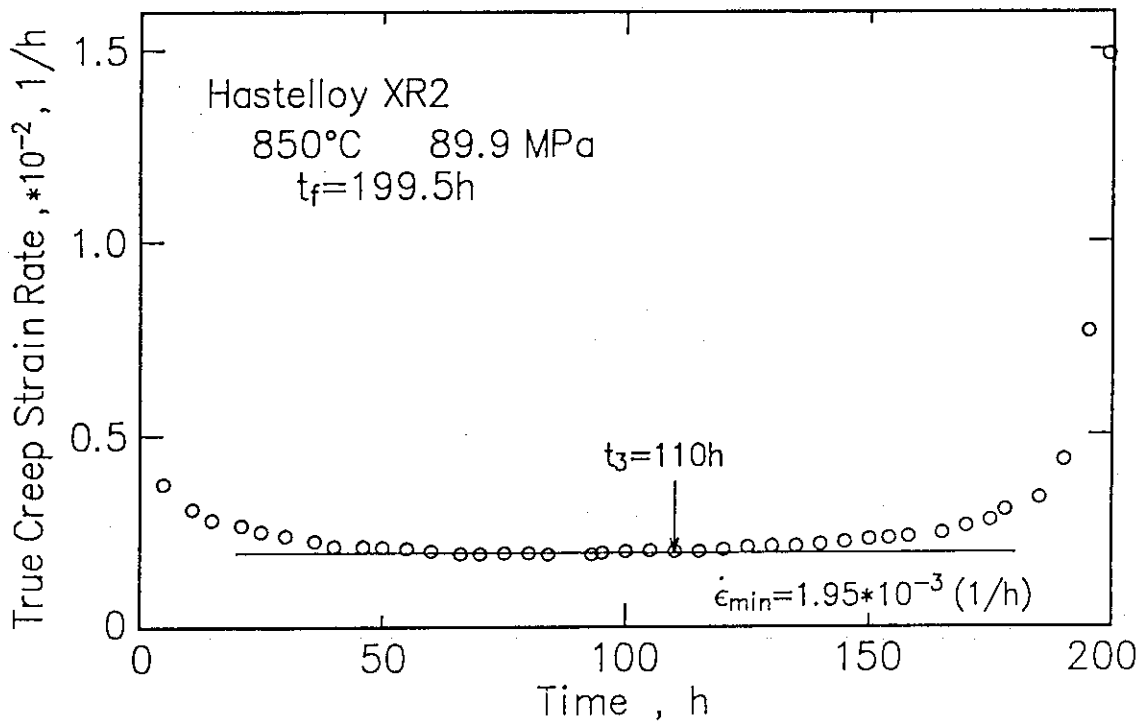


Fig. 3 Relation between creep strain rate and time (89.9 MPa).

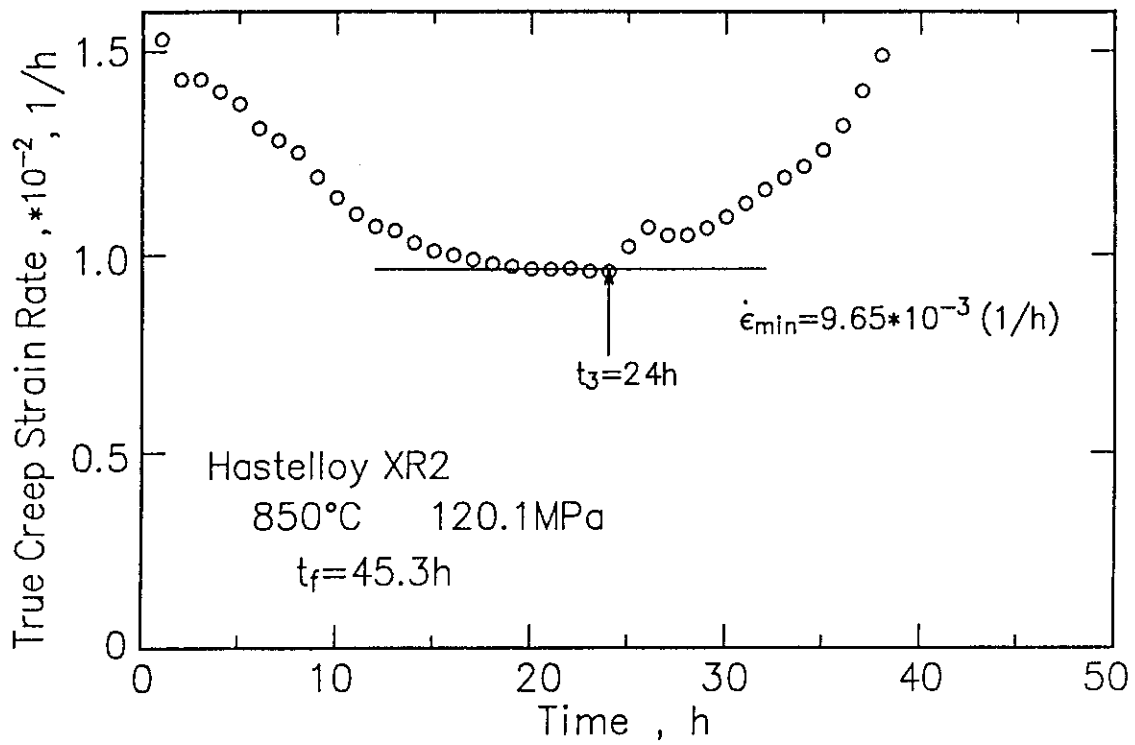


Fig. 4 Relation between creep strain rate and time (120.1 MPa).

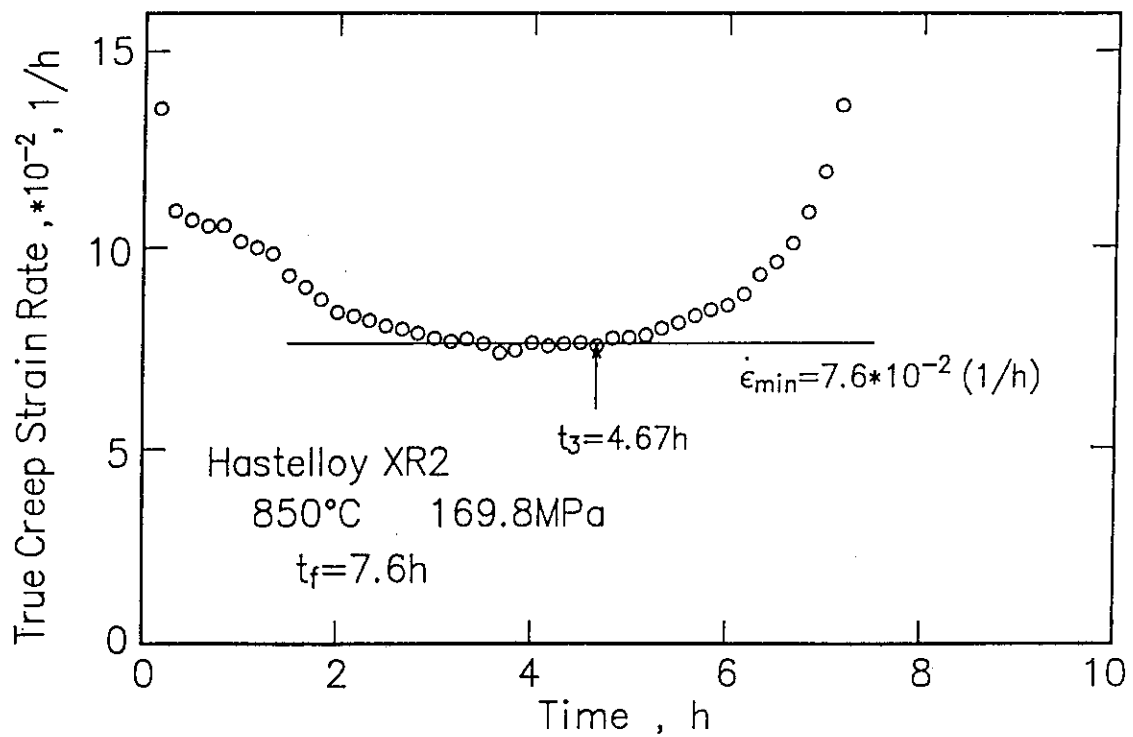


Fig. 5 Relation between creep strain rate and time (169.8 MPa).

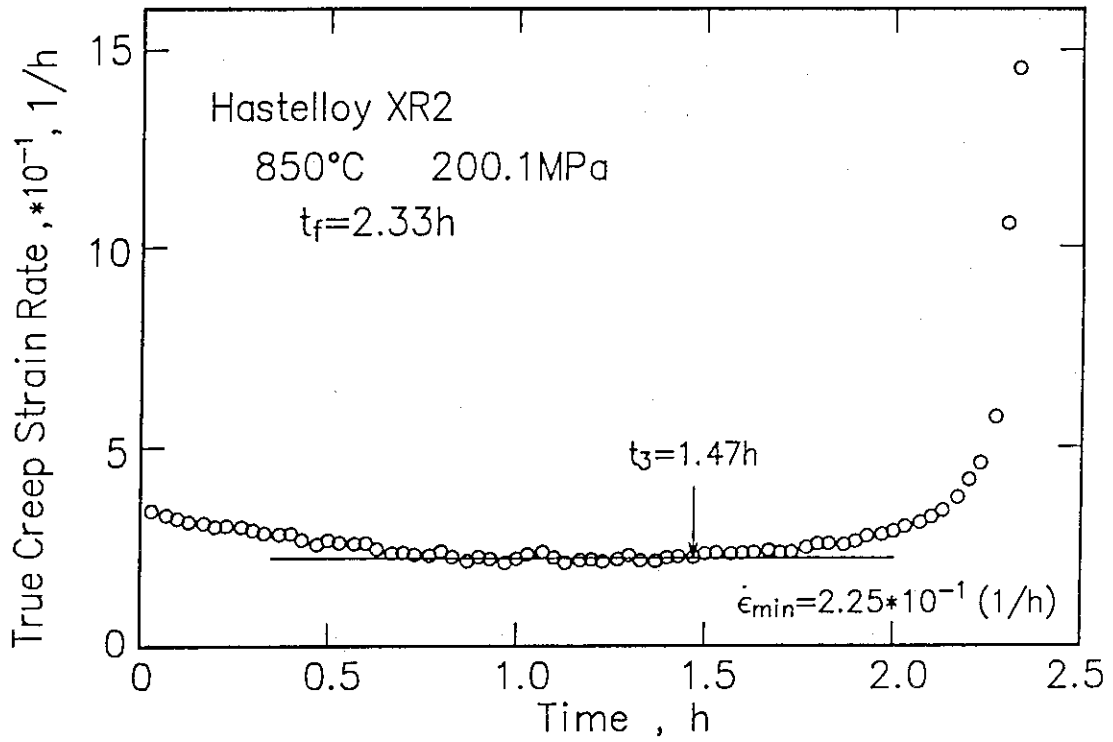


Fig. 6 Relation between creep strain rate and time (200.1 MPa).

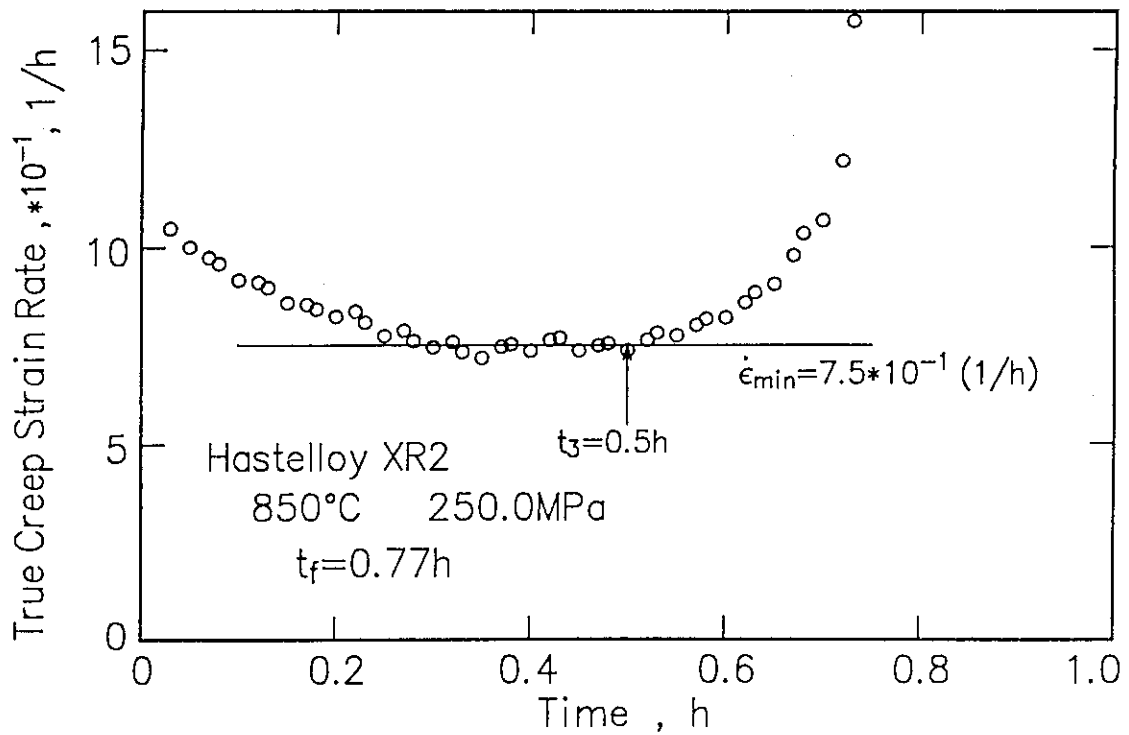


Fig. 7 Relation between creep strain rate and time (250.0 MPa).

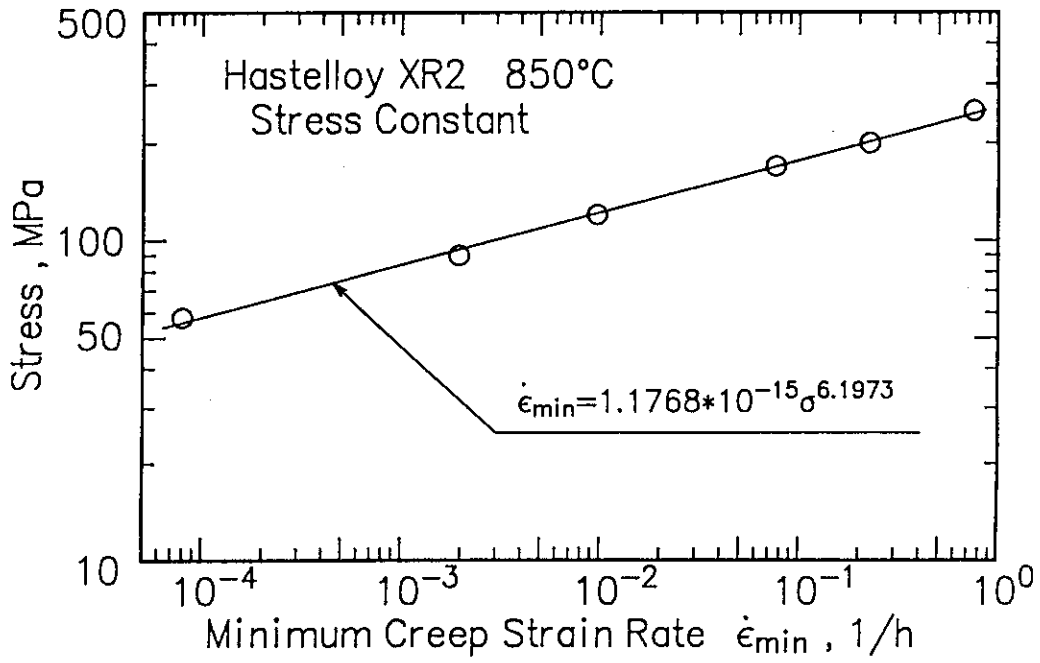


Fig. 8 Relation between minimum creep strain rate and stress.

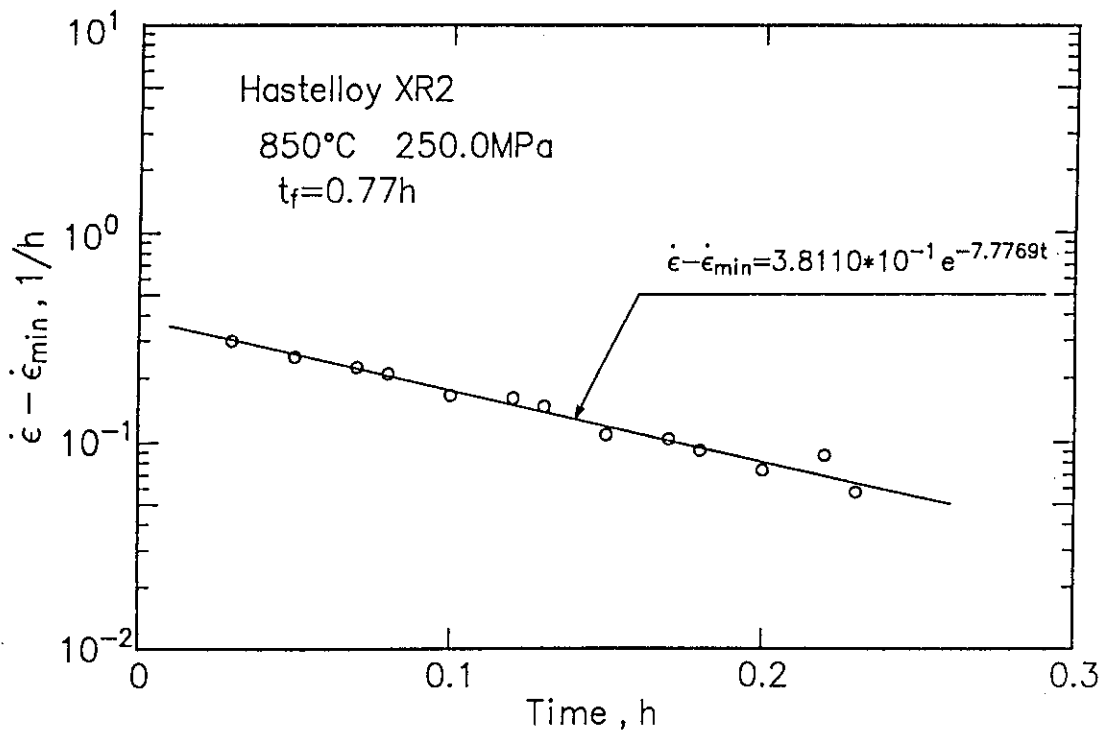


Fig. 9 Relation between primary creep strain rate and time (57.9 MPa).

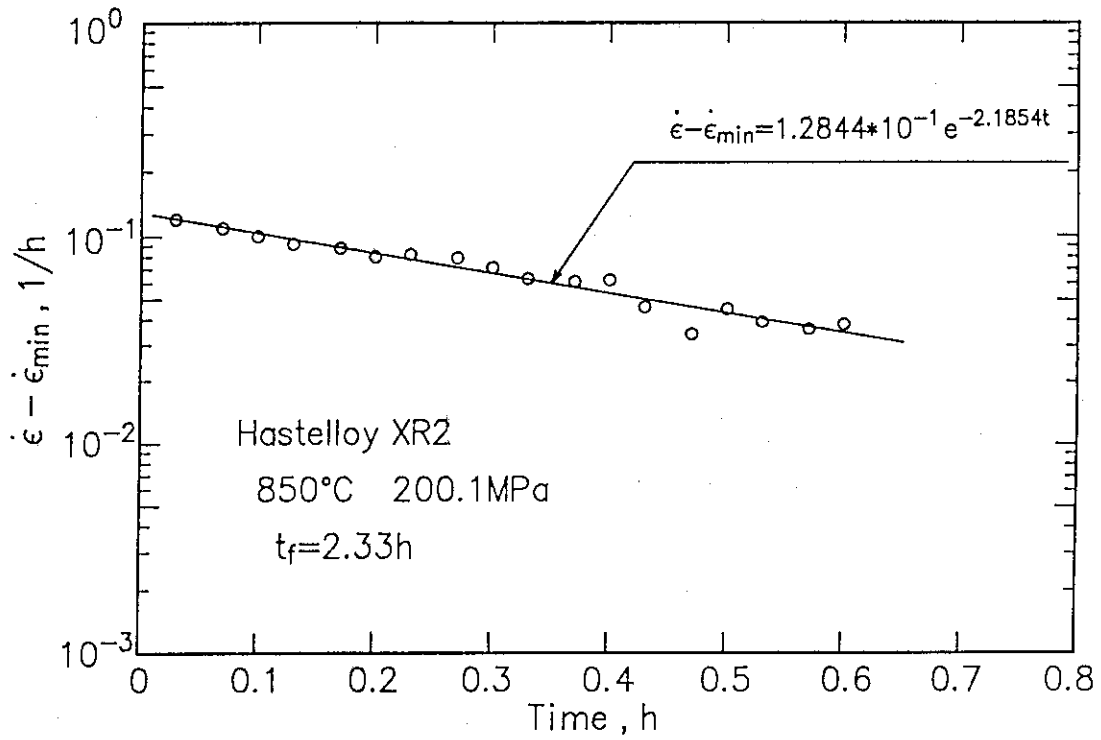


Fig. 10 Relation between primary creep strain rate and time (89.9 MPa).

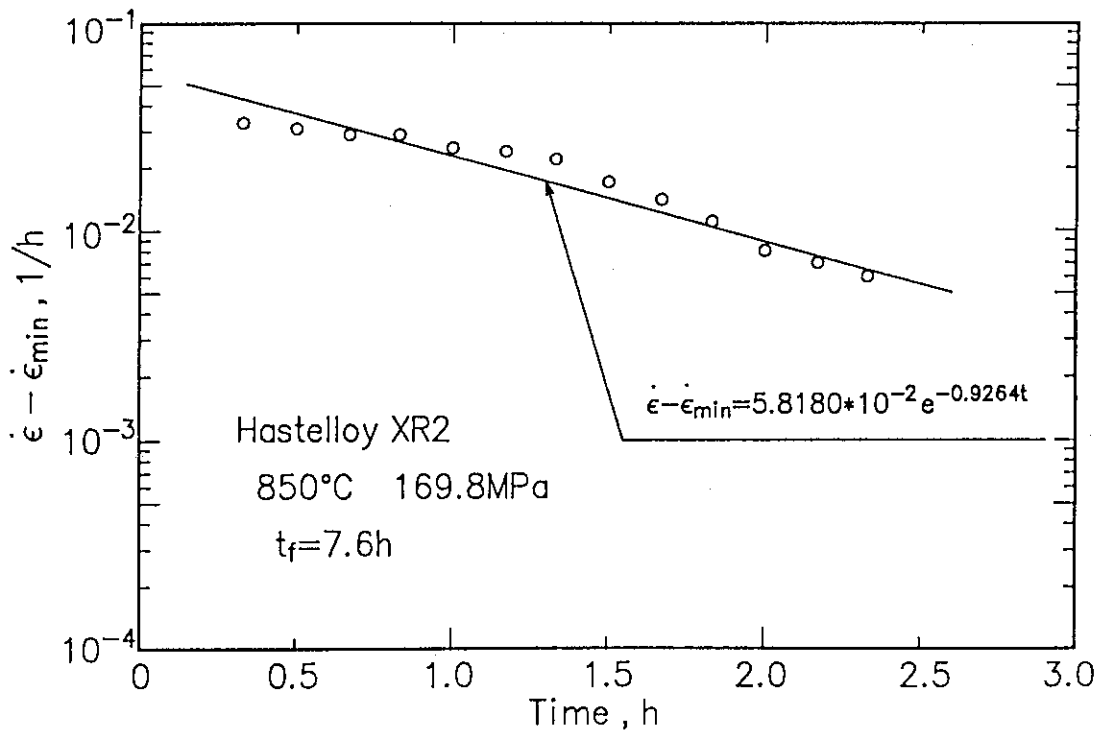


Fig. 11 Relation between primary creep strain rate and time (120.1 MPa).

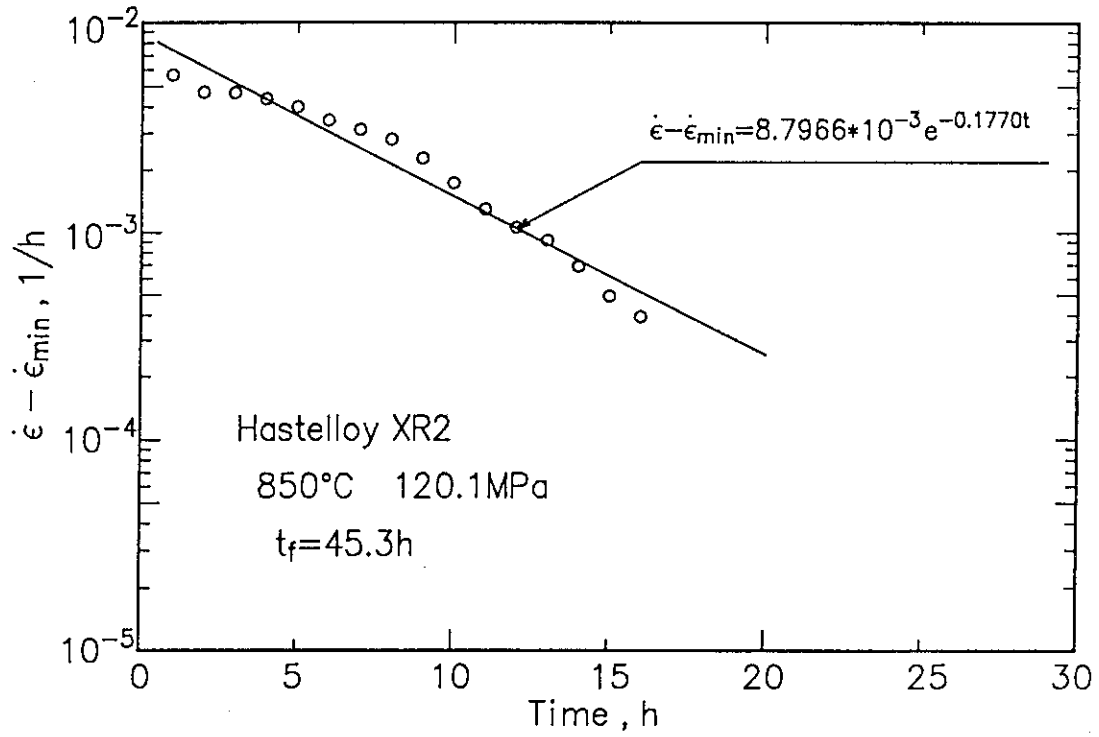


Fig. 12 Relation between primary creep strain rate and time (169.8 MPa).

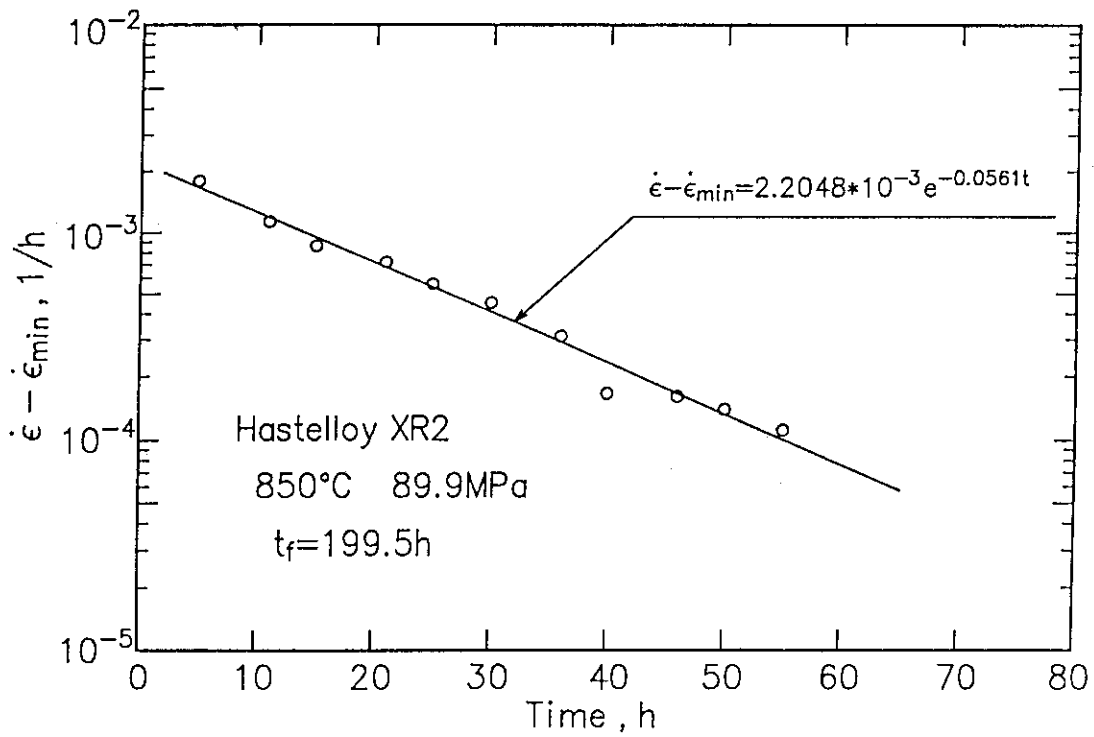


Fig. 13 Relation between primary creep strain rate and time (200.1 MPa).

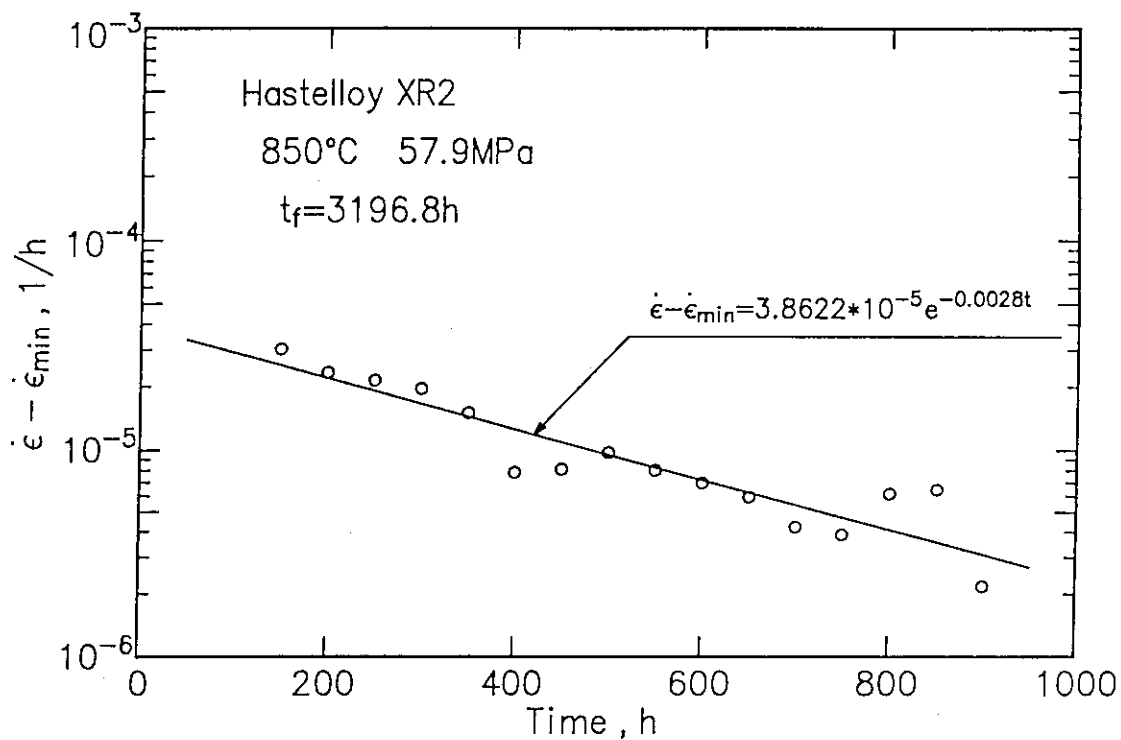


Fig. 14 Relation between primary creep strain rate and time (250.0 MPa).

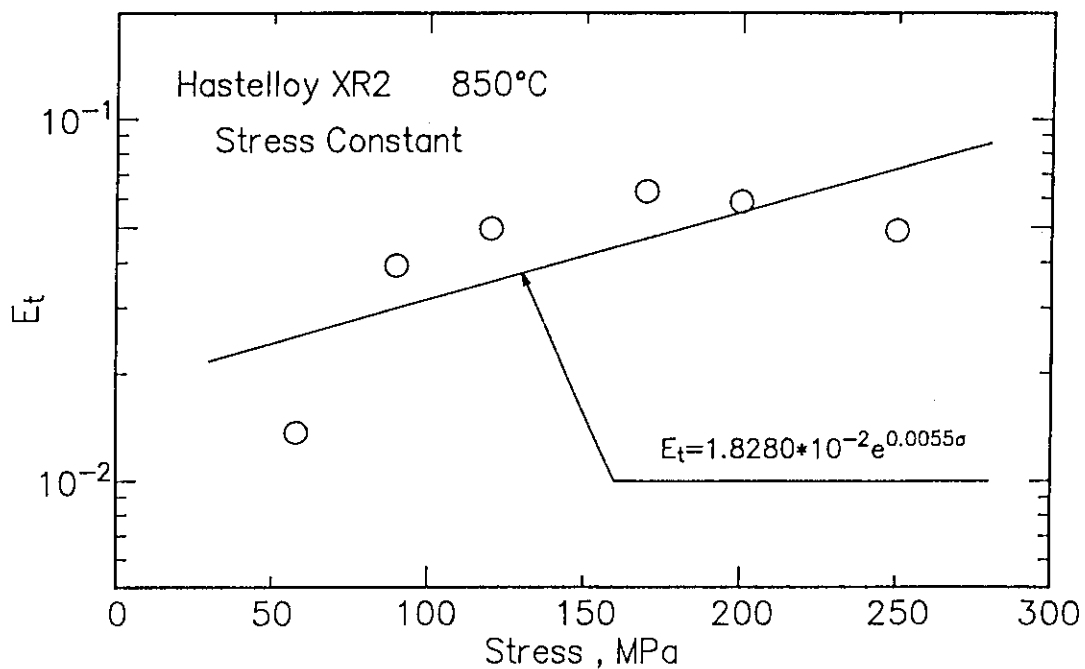


Fig. 15 Relation between primary creep parameter  $\epsilon_t$  and stress.

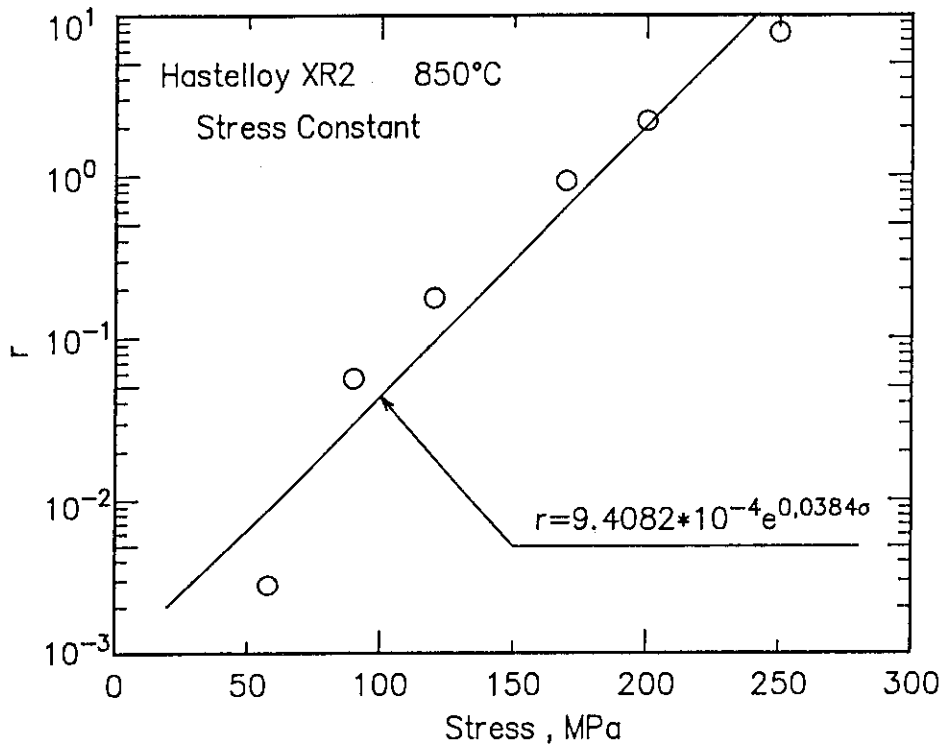


Fig. 16 Relation between primary creep parameter  $r$  and stress.

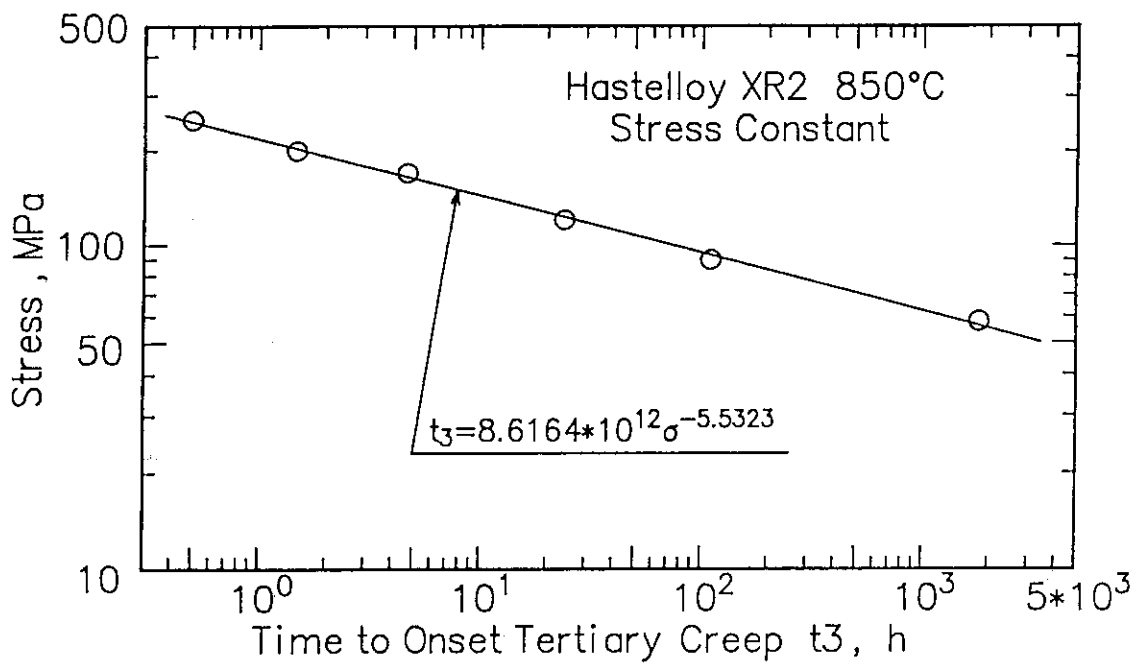


Fig. 17 Relation between time to onset of tertiary creep and stress.



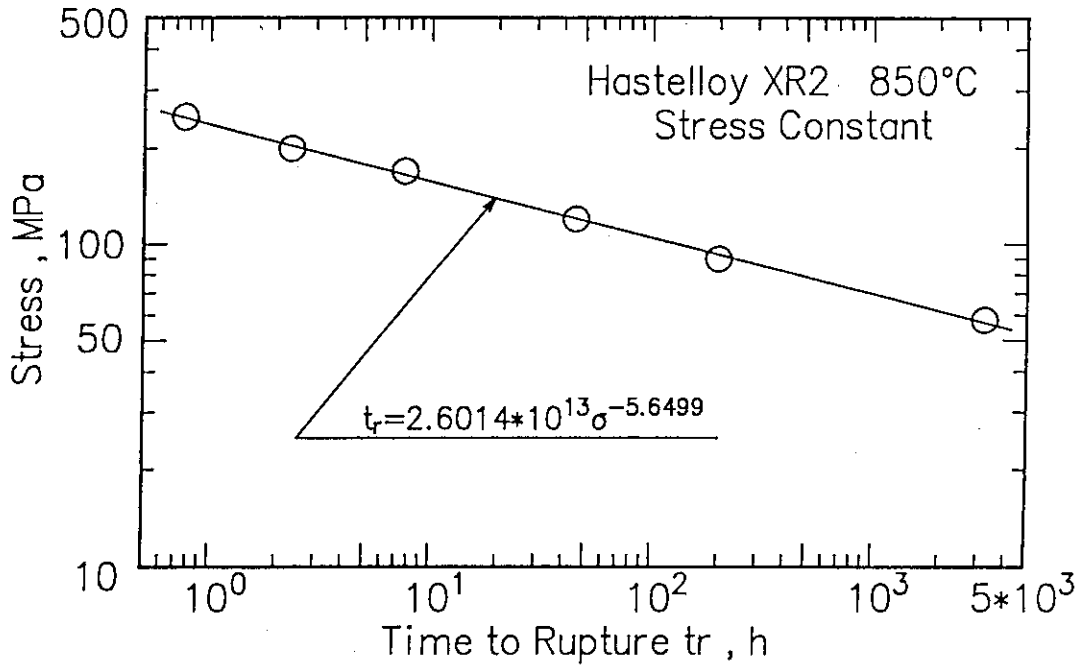


Fig. 18 Relation between time to rupture and stress.

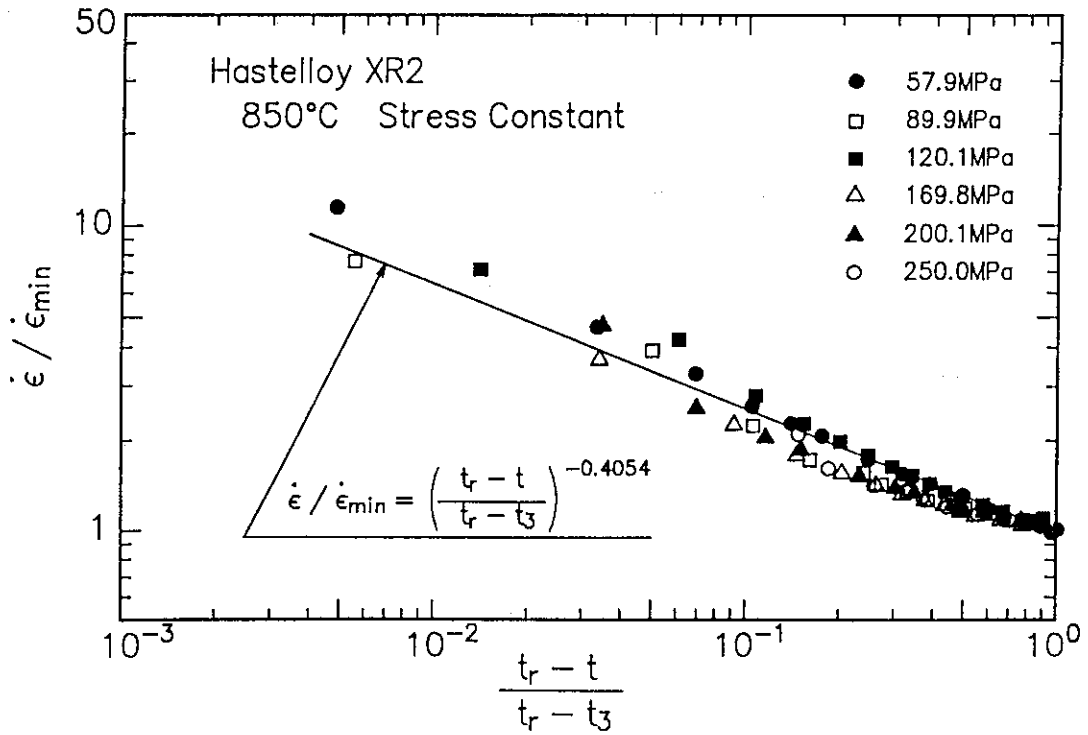


Fig. 19 Relation between  $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{min}$  and  $(t_r - t) / (t_r - t_3)$ .

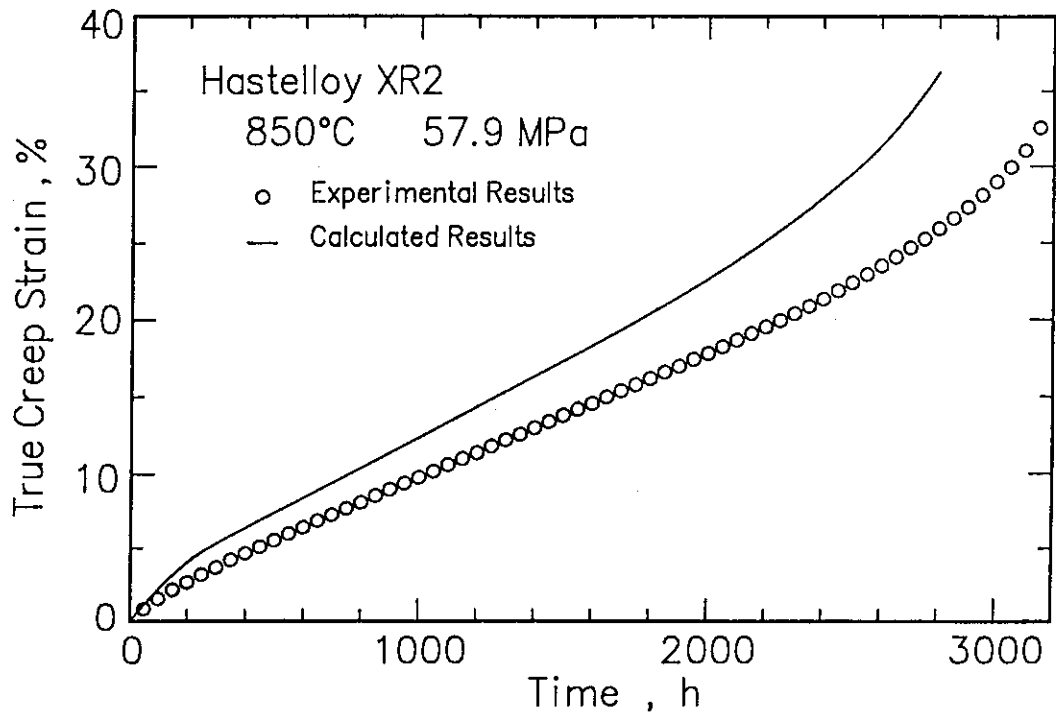


Fig. 20 Creep curve (57.9 MPa).

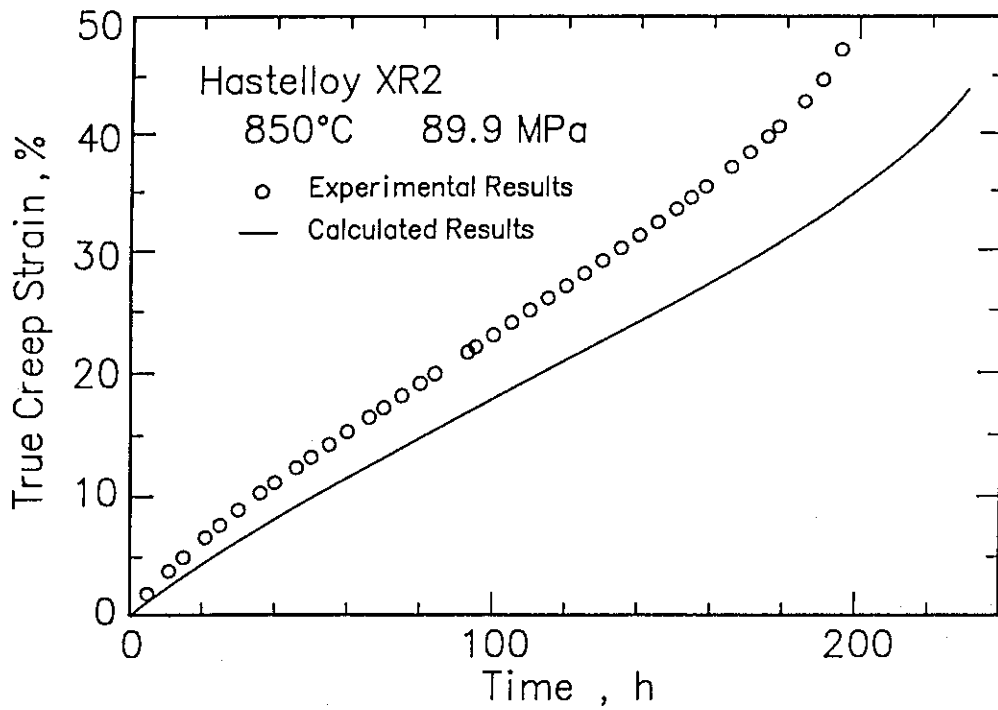


Fig. 21 Creep curve (89.9 MPa).

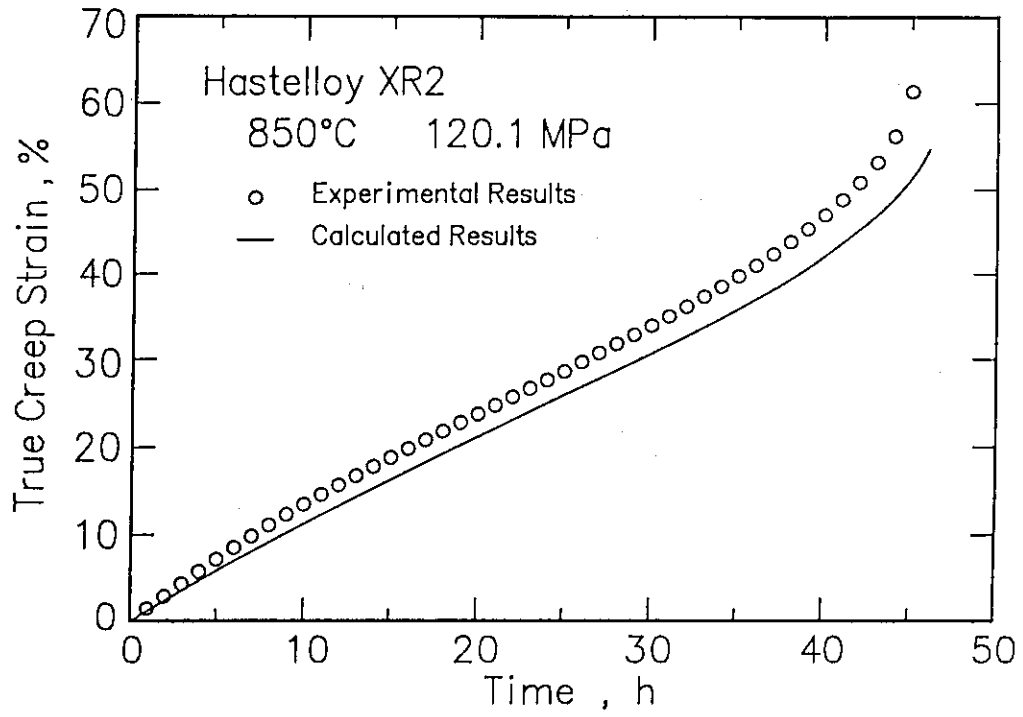


Fig. 22 Creep curve (120.1 MPa).

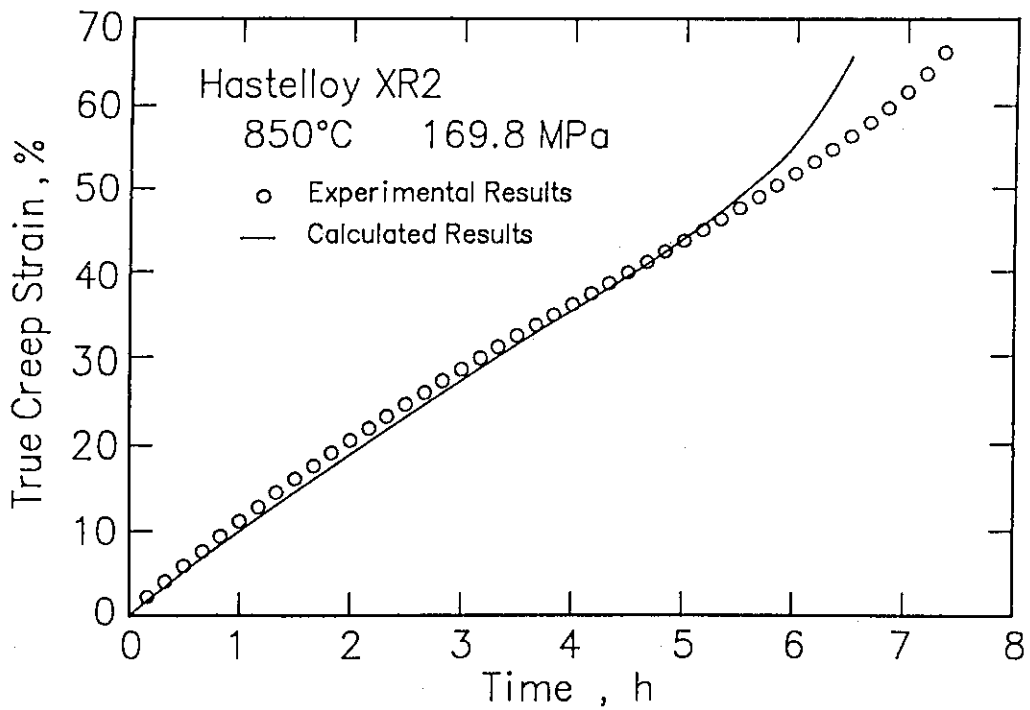


Fig. 23 Creep curve (169.8 MPa).

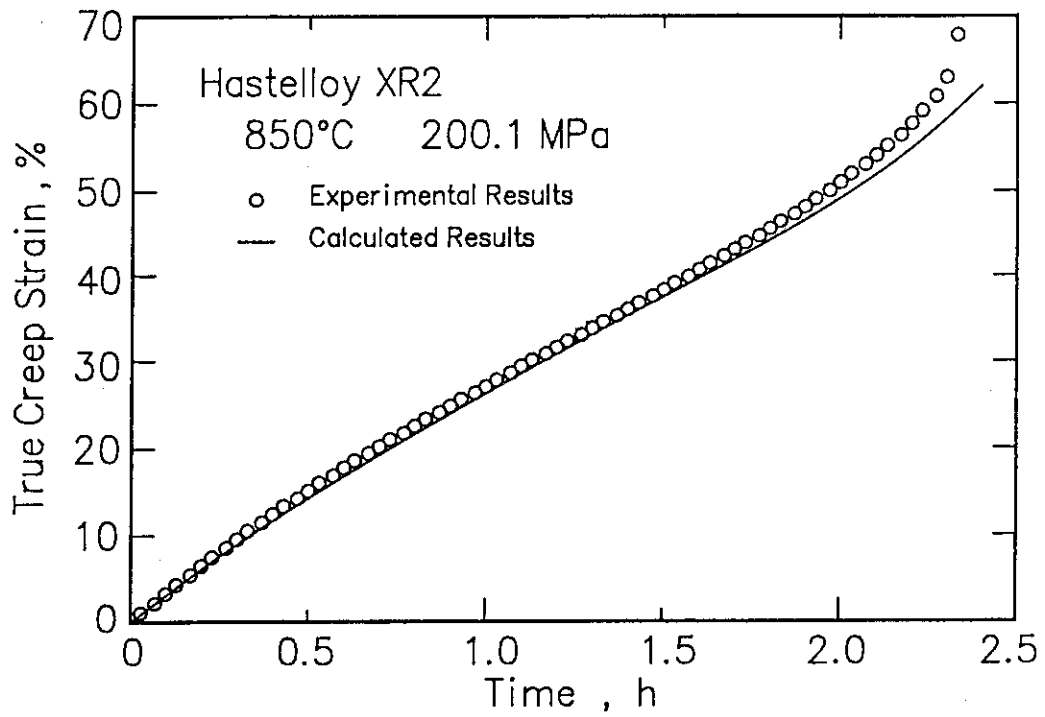


Fig. 24 Creep curve (200.1 MPa).

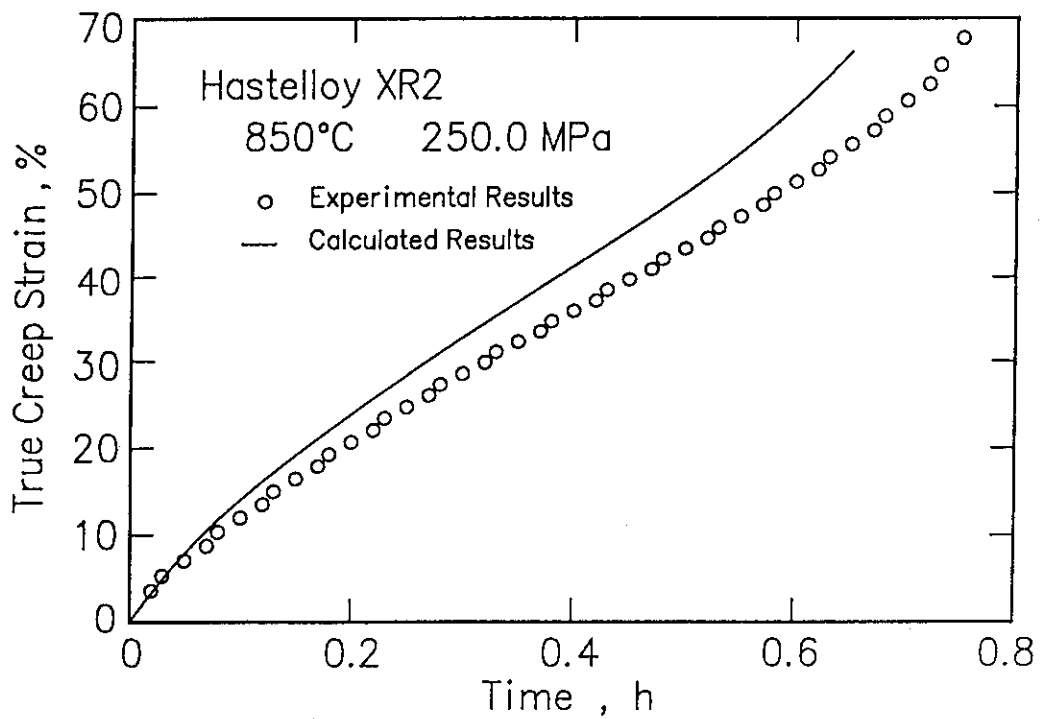


Fig. 25 Creep curve (250.0 MPa).

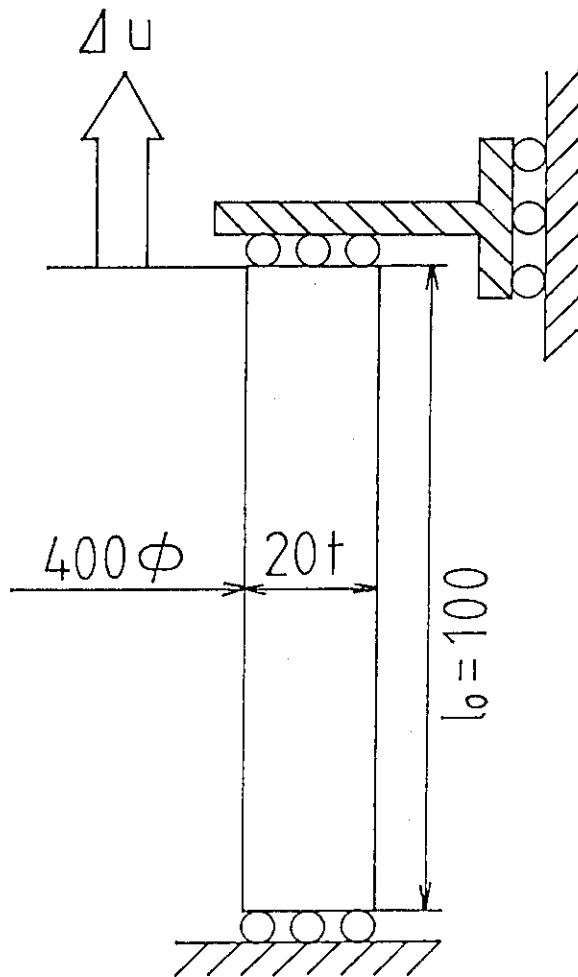


Fig. 26 Analysis model.

```

*****
*USER SUBROUTINE
C
  SUBROUTINE CREEP(DECRA,DESWA,ECO,ESWO,P,QTILD,TEMP,DTEMP,
  1 PREDEF,DPRED,TIMEO,DTIME,STATEV,CMNAME,LEXIMP)
C
C FOR THE DOUBLE PRECISION VERSION,ADD
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
C
  CHARACTER*8 CMNAME
C
  DIMENSION DECRA(5),DESWA(5),PREDEF(1),DPRED(1),STATEV(1)
C *****
C *** STRAIN HARDENING RULE (NEWTON-RAPHSON'S METHOD) *****
C *****
  E0=1.0D-15
  ET=1.8297D-2*DEXP(0.0537*QTILD)
  RR=9.4330D-4*DEXP(0.3764*QTILD)
  EMRATE=1.6334D-9*QTILD**6.2001
C
  I=0
  T0=1.0D-15

  T1=T0
C
1000 FFF=E0+ET*(1.0-DEXP(-RR*T1))+EMRATE*T1-ECO
  DFF=ET*RR*DEXP(-RR*T1)+EMRATE
  T2=T1-FFF/DFF
  ERR=DABS((T2-T1)/T2)
  IF(ERR.LE.1.0D-3) GO TO 1100
  I=I+1
  T1=T2
  IF(I.LE.100) GO TO 1000
  WRITE(6,6001) I
6001 FORMAT(' ITERATION=',I4,' TIME IS NOT CONVERGE. ')
  STOP
1100 CONTINUE
  DECRA(1)=(ET*RR*DEXP(-RR*T2)+EMRATE)*DTIME
  RETURN
  END
*****

```

Fig. 27 Calculation subroutine of creep strain using Newton-Raphson method.

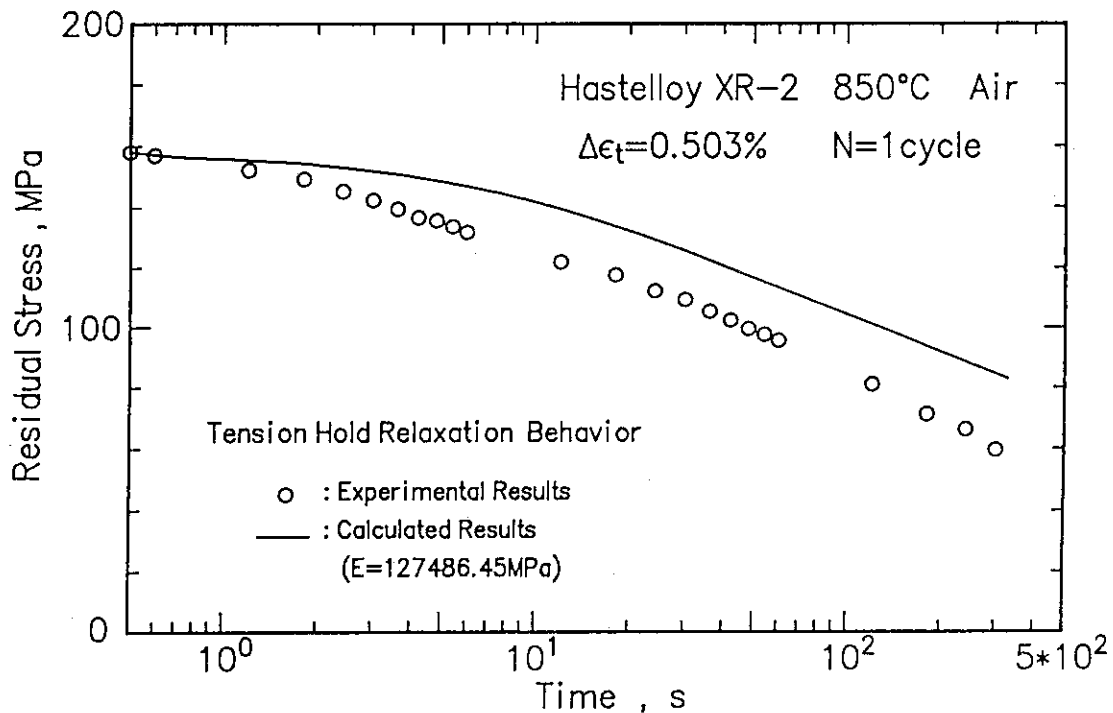


Fig. 28 Relaxation behavior ( $\Delta\epsilon_t=0.503\%$ , Air, N=1cycle).

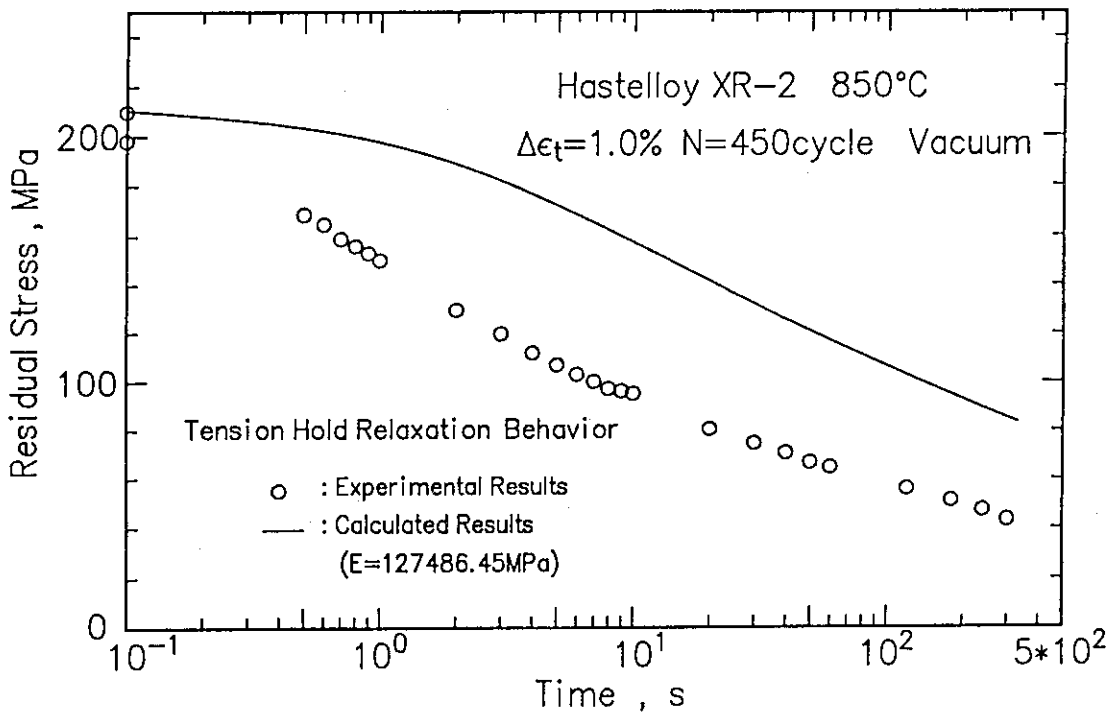


Fig. 29 Relaxation behavior ( $\Delta\epsilon_t=1.0\%$ , Vacuum, N=450cycle).

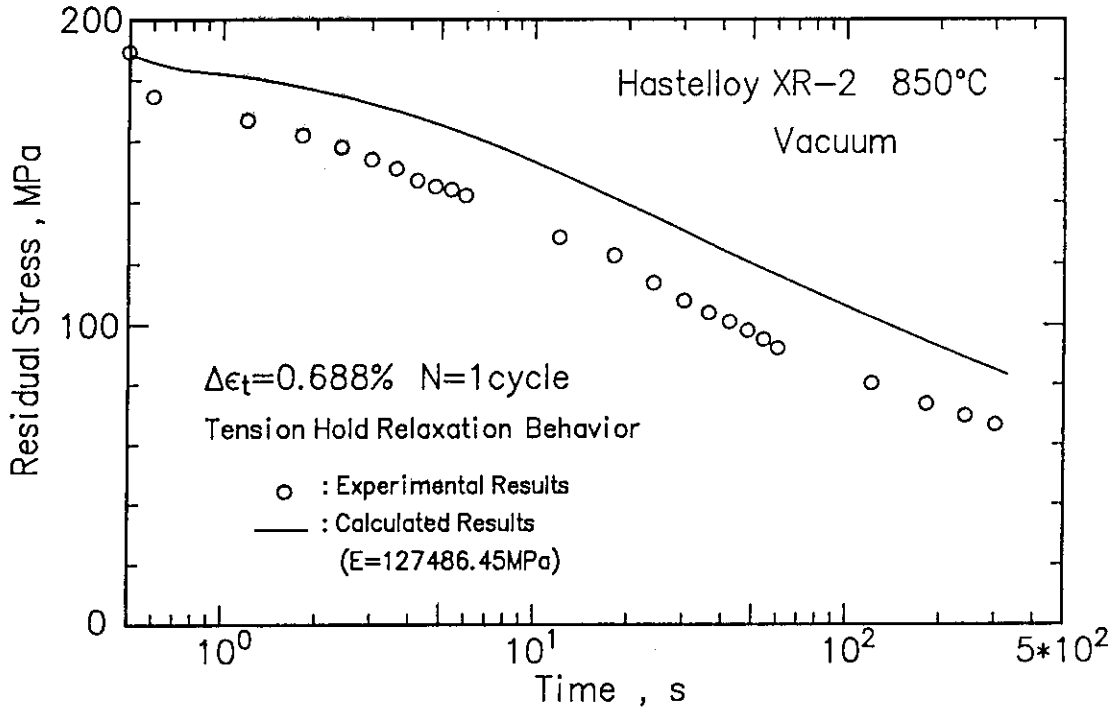


Fig. 30 Relaxation behavior ( $\Delta\epsilon_t=0.688\%$ , Vacuum, N=1cycle).

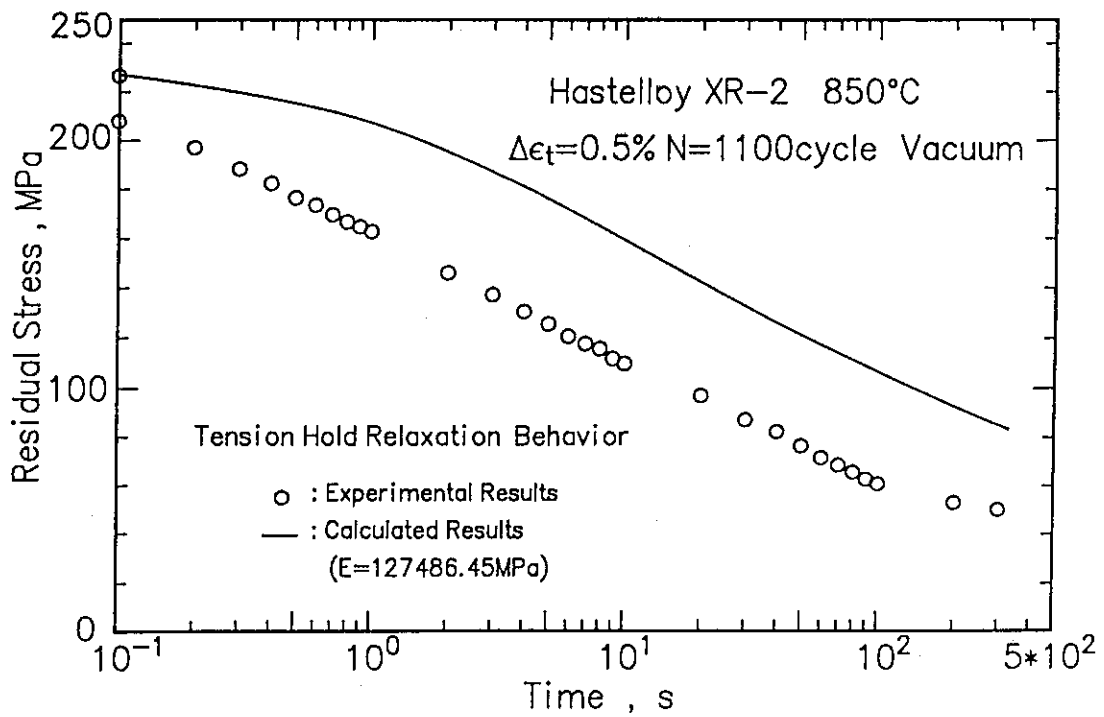


Fig. 31 Relaxation behavior ( $\Delta\epsilon_t=0.5\%$ , Vacuum, N=1100cycle).



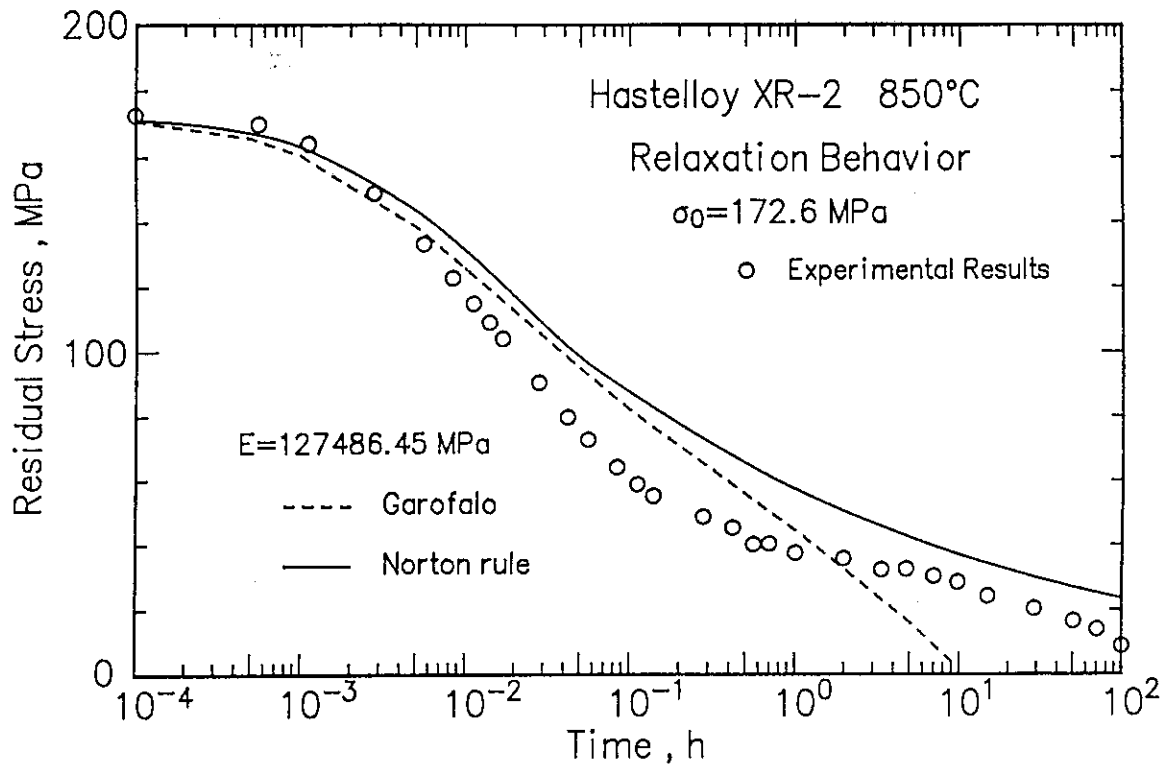


Fig. 32 Relaxation curve (Effect of creep constitutive equation).