

論 文

UDC 669.15'26-194.3 : 669.14-408.2 : 539.377 : 531.781.082.7

X線による爆接オーステナイトステンレスクラッド鋼
の熱応力測定*

川野 正和**・石田 毅**・蒲池 一義***

Thermal Stress Measurement of Explosive Austenitic
Stainless Clad Steel with X-ray

Masakazu KAWANO, Teyoshi ISHIDA, and Kazuyoshi KAMACHI

Synopsis:

Since the method of X-ray stress measurement can be done by non-contact and non-destructive state, we can easily perform the measurement even if the temperature is high such as a few hundreds degree.

In this paper the thermal stress on heated clad steel by X-ray was measured. The result was that we could perform good stress measurement and could find a clear thermal stress cycle at even such a high temperature as 560°C.

Experimental results are as follows:

- 1) The clad steel heated up to a temperature of 560°C showed a fine X-ray profile and gave a good correlation on $2\theta\text{-}\sin^2\phi$ diagrams, so we could perform thermal stress measurement by the usual method.
- 2) In the heating process the thermal stress explained by thermal-expansion coefficient showed thermal stress cycles, giving a temperature loop.
- 3) The stress value varied by removal of oxide film.

1. 緒 言

爆接クラッド鋼は材質の異なつた材料を高圧力で瞬時に接合した複合材料であつて、圧接面は複雑であり熱応力的に複雑な挙動を示す。合金元素の拡散、脱炭、硬さの変化等の冶金学的研究¹⁾²⁾は報告されているが高温時の熱応力挙動についてはあまり報告されていない。

近年高温時における金属材料の弾性係数の測定値³⁾や実験式⁴⁾が実用材料について報告され高温における応力測定の試みがなされている。電気抵抗線ひずみゲージ法による高温ひずみ測定⁵⁾はゲージの温度特性、接着等に高度の技術と熟練を要し、熱光弾性法や皮膜法⁶⁾は全面の応力状態を一時に観察できる利点はあるが光弾性材料の温度特性、モデル製作、皮膜法では接着するためその使用には制約があるとされている。

X線応力測定法は非接触性、非破壊性を有し被測定材料から直接情報が得られる利点があり原理的には数百度

の高温域までの応力測定が可能である。著者らはクラッド鋼を用いてX線による高温応力測定を試みた。そして560°Cの高温においても応力測定が十分可能であることを示した。また、機械的物理的に性質の異なる複合材料であるクラッド鋼が高温に加熱される際の熱膨張および弾性係数の差異に起因する熱応力を測定した結果、クラッド鋼に残留する初期応力は昇温加熱によつて著しい変化を示すがくり返し加熱によつてループを描きながらいに一定値に落ちつく熱応力サイクルを描くことが明らかとなつた。これらの測定結果について述べる。

2. 実験方法

実験に供した材料はボイラー用圧延鋼板 SB 42 とオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 316 との爆接クラッド鋼で試験片の形状と寸法を Fig. 1. および Table 1 に試験片の境界部の顕微鏡写真を Photo. 1 にそれぞれ示す。Photo. 1 の上部は SUS 316, 下部は SB 42 であ

* 昭和 54 年 3 月 12 日受付 (Received Mar. 12, 1979)

** 長崎総合科学大学 (Nagasaki Institute of Applied Science, 536 Amiba-cho Nagasaki 851-01)

*** 山口大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Yamaguchi University)

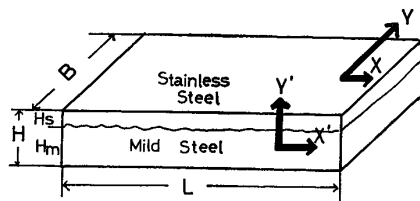


Fig. 1. Shape of specimen and direction of stress measurement.

Table 1. Demention of specimen.

	One side heating	Wholly heating
L	75.0 mm	64.0 mm
B	52.0	28.0
H	14.0	14.0
H _s	3.5	3.5
H _m	10.5	10.5

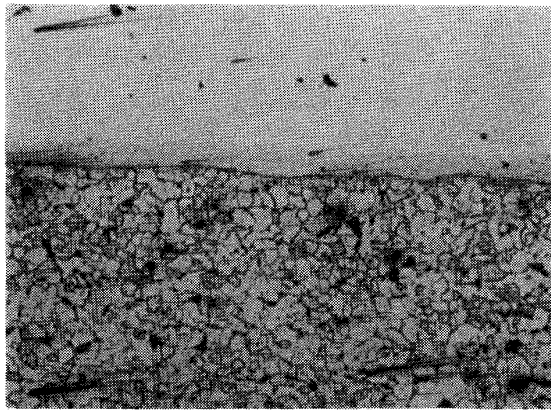


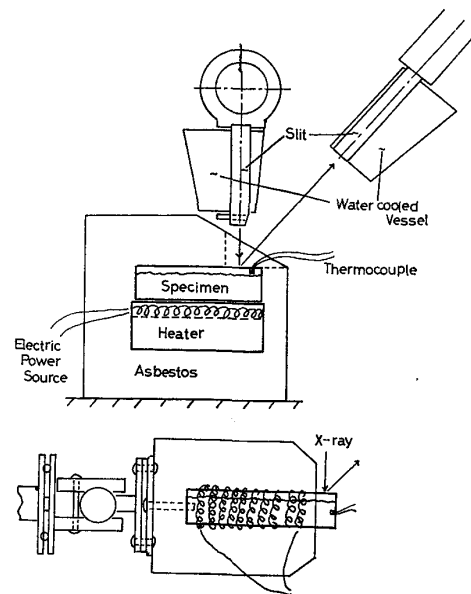
Photo. 1. As bounded micrograph of stainless clad steel (×100).

る。試験片の表面仕上げはエメリーペーパーで 800 番まで研磨したのち電解研磨を施した。X線による応力測定は Fig. 1 に示すようにステンレス表面および炭素鋼 (SB 42) 表面それぞれの爆接方向を x, これに直角な方向を y とし側面のステンレスと炭素鋼の境界部を図に示すようにそれぞれ x', y' とし, この x, y, x', y' 方向について行つた。

試験片の加熱は Fig. 2 のように両面加熱法と片面加熱法を用い, 周囲はアスベストで断熱し測定部温度を熱電対を用い温度器によつて制御した。その誤差は ±2°C 以内であつた加熱速度は 200°C/h とし, 冷却による自然放冷である。装置は高温測定を行うために応力測定装置の保護用冷却槽を作製し管球の窓部およびスリット部に装着して常時水冷した。

X線応力測定条件を Table. 2 に示す。応力の計算は Table 2 を用いた⁷⁾。

$$\sigma_x = -\frac{E \cdot \cot \theta_0}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\partial^2 \theta_\phi}{\partial \sin^2 \phi} \quad \dots \dots \dots (1)$$



- (1) One side heating
(2) Wholly heating

Fig. 2. Equipment for heating and method of stress measurement.

Table 2. X-ray condition.

X-ray target	CrK _α CrK _β
Tube voltage(kV)	30(kV)
Tube current(mA)	10(mA)
Gonio speed	2(deg/min)
Chart speed	20(mm/min)
Slit mask	4×4(mm ²)
Filter	—
Scale factor	2, 4, 8
Multipuer	0.6, 0.8, 1.0
Time constant	8, 16

ただし E: 縦弾性係数 θ_φ: 試料のX線回折角

ν: ポアソン比 θ₀: 無ひずみ試料のX線回折角

高温時には熱膨張係数 α によつて格子定数 a が変化した弾性係数 E, ポアソン比 ν も変動するので (1) 式の係数 $K = \{E \cdot \cot \theta_0 / 2(1+\nu)\}$ も各測定温度によつて変化する。

加熱時の格子定数 a_t は熱膨張係数 α から

$$a_t = a(at + 1) \quad \dots \dots \dots (2)$$

a: 常温時の格子定数

t: 加熱温度

となる。またX線回折角 θ_t は Bragg の条件式から

$$\sin^2 \theta_t = \frac{\lambda^2}{4a_t} (h^2 + k^2 + l^2) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし, λ: 特性X線の波長 h, k, l: ミラー指数となる。

熱弾性係数 E_t, およびポアソン比 ν_t は測定方法等のちがいによつて多少異なつた値が報告されているが本実験では竹内らの実験式⁷⁾を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 X線応力測定プロファイル

炭素鋼 (SB 42) とステンレス鋼 (SUS 316) の応力測定はそれぞれ $\text{CrK}\alpha$ (211) と $\text{CrK}\beta$ (311) を使用した。それらの回折プロファイルは 500°C 以上の高温においても比較的良好であり精度よい測定が期待できる。それらの 560°C における応力測定に用いたプロファイルを Fig. 3 に示す。

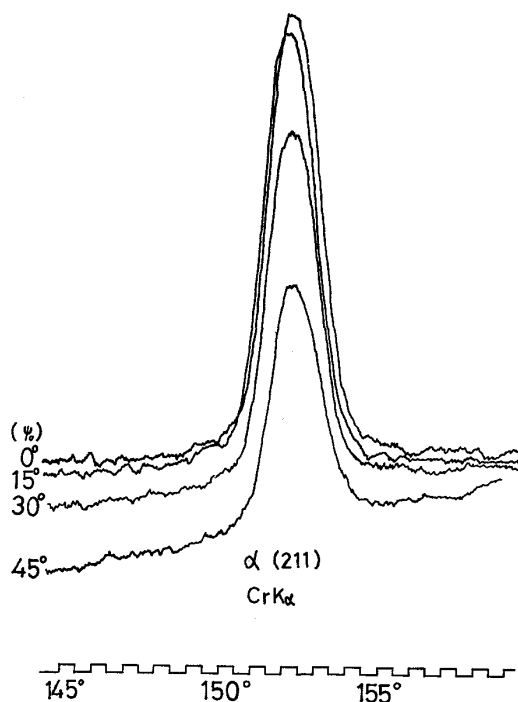


Fig. 3 (1). Profile of carbon steel at 560°C in y-direction.

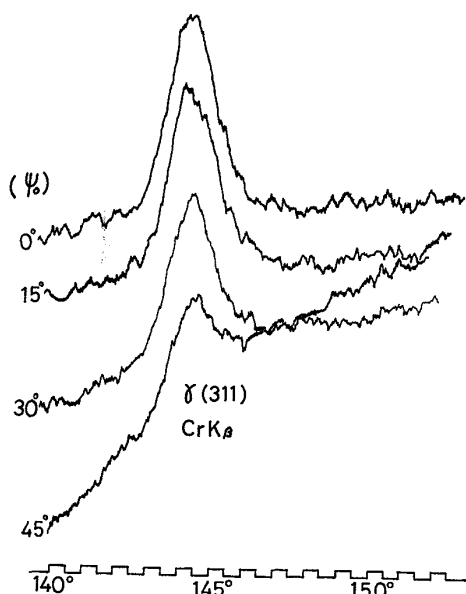
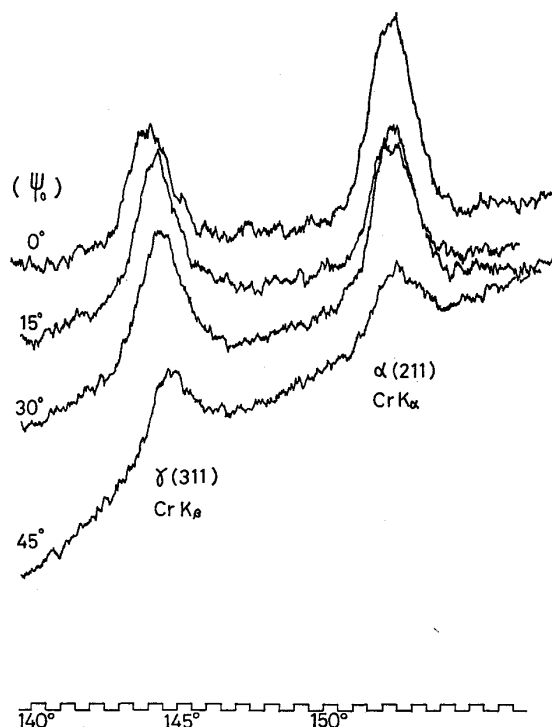


Fig. 3 (2). Profile of stainless steel at 560°C in y-direction.



(3) Profile of bonded zone at 560°C in y-direction

Fig. 3. Profiles of stress measurement at 560°C .

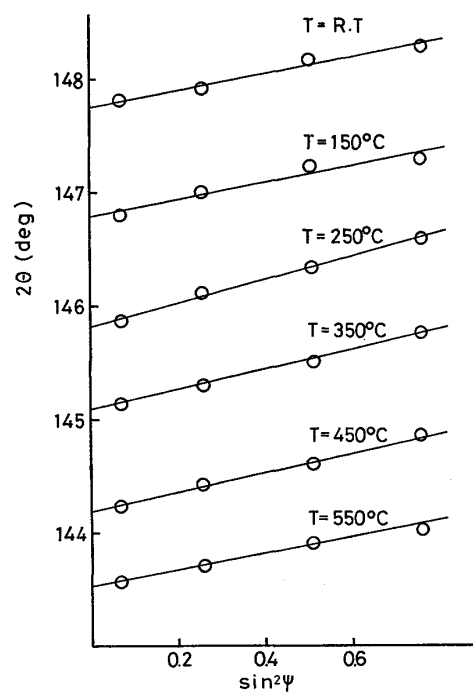
高温時の応力測定用プロファイルは $\psi_0=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ は良好であるが $\psi_0=45^\circ$ のプロファイルはややバックグラウンドの傾斜が大きい。高温時には熱振動に起因する熱散漫散乱が起こるので温度因子の補正⁸⁾をすべきであるが、今回の実験では一連のプロファイルからみてこの補正は行わなかった。炭素鋼、ステンレス鋼ともに室温から 56°C にいたるまで Fig. 4 の $2\theta-\sin^2\psi$ 線図にみられるように比較的良好な直線関係が得られ推定誤差 $\Delta\sigma$ は $\alpha=0.05, n=4$ のとき $\Delta\sigma \leq 8 \text{ kg/mm}^2$ であつた。Fig. 4 の (1) は境界部ステンレス鋼 y 方向の 3 回目の加熱時、(2) は同じ境界部の炭素鋼の場合である。

以上の結果から従来の測定法をそのまま高温測定に用いても差しつかえないと考え高温時における格子定数 a_t 、弾性係数 E_t 、ポアソン比 ν_t 、X線回折角 θ_t 、応力係数 K_t を (1) 式に用いた。

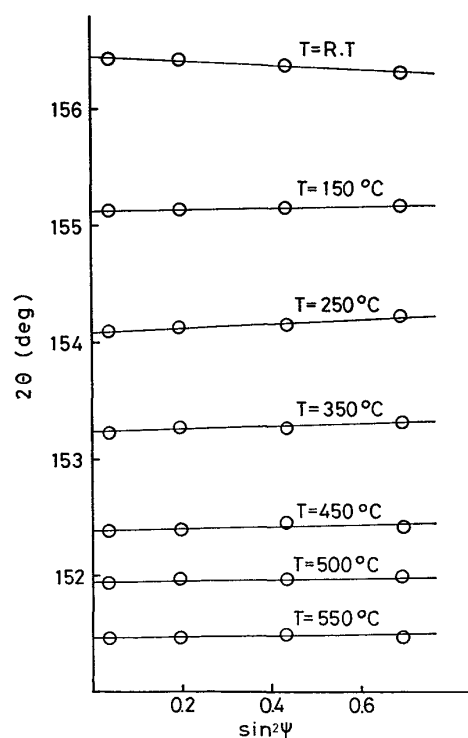
3.2 熱応力測定

加熱冷却を数回くり返した場合の x および x' 方向の測定結果を Fig. 5 に、y および y' 方向の測定結果を Fig. 6 にそれぞれ示す。○印内の数字は加熱のくり返し数を表し点線は室温までの冷却を示している。

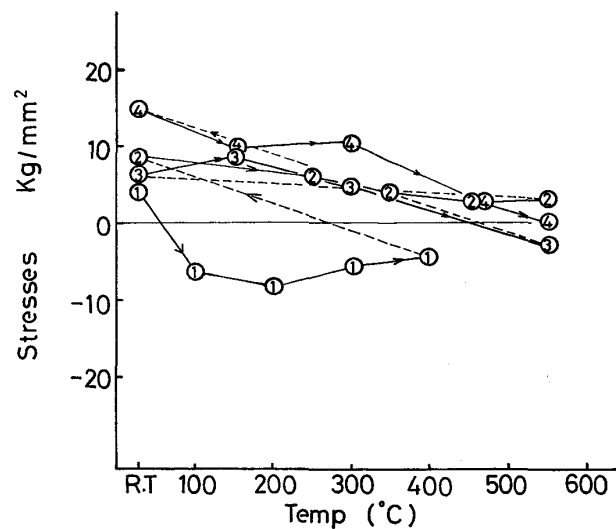
X 方向の初期応力は Fig. 5 に示すようにクラッキングによつてステンレス鋼側表面に引張り、炭素鋼側表



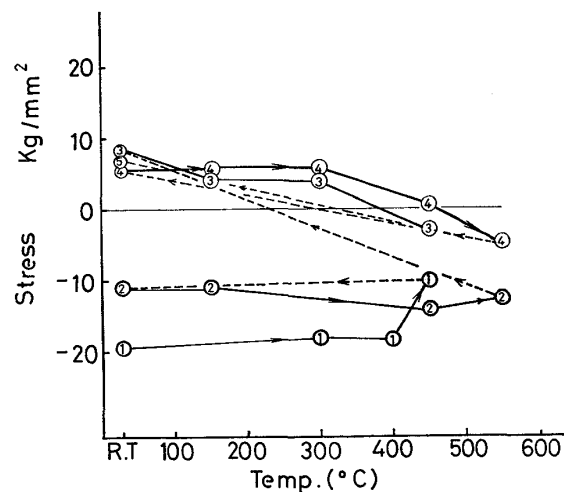
(1) Stainless steel



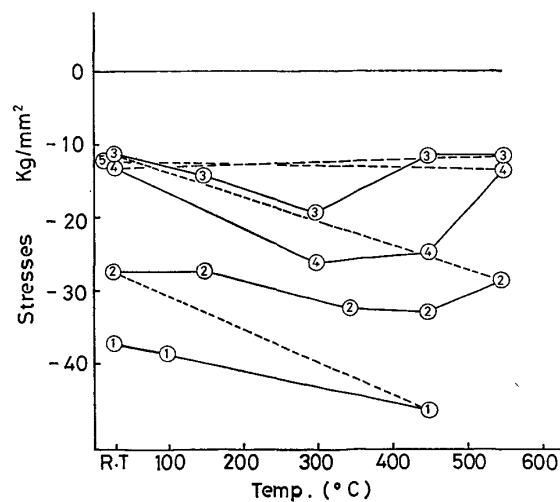
(2) Carbon steel



(1) Stainless steel surface

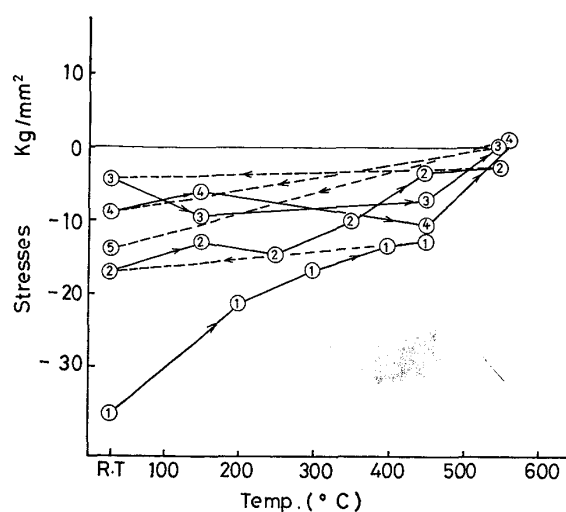


(2) Carbon steel surface



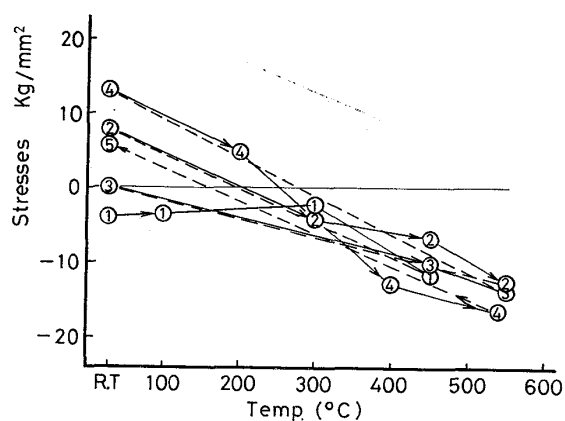
(3) Stainless steel of bonded zone

Fig. 4. 2θ - $\sin^2\psi$ diagrams by the least squares method.

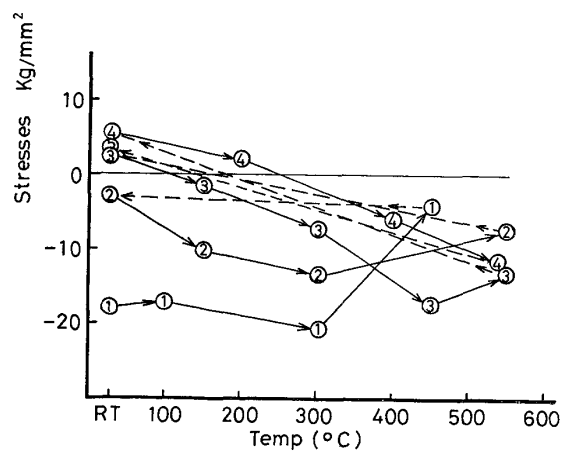


(4) Carbon steel of bonded zone

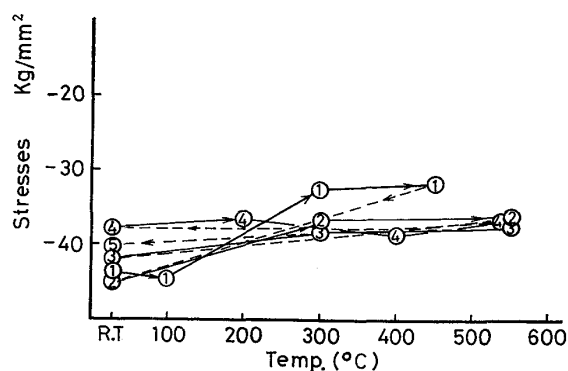
Fig. 5. Thermal stress cycles with wholly heating in x-direction.



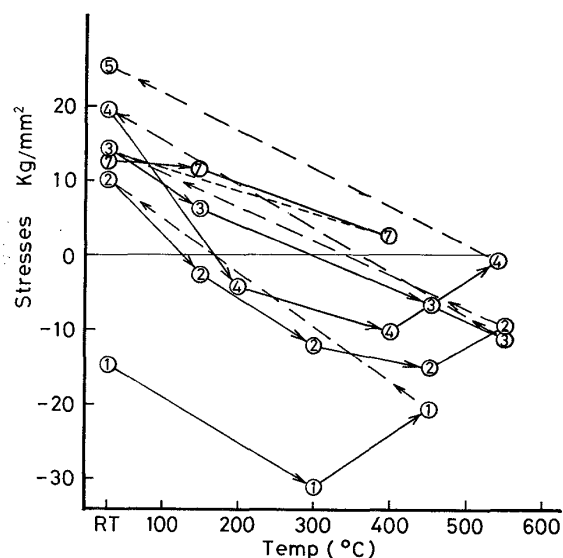
(1) Stainless steel surface



(2) Carbon steel surface



(3) Stainless steel of bonded zone



(4) Carbon steel of bonded zone

Fig. 6. Thermal stress cycles with wholly heating in y-direction.

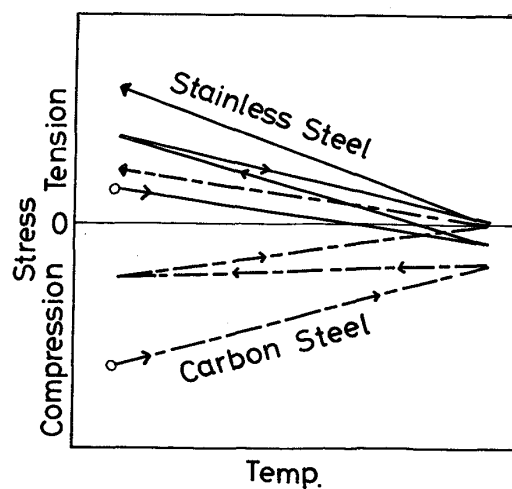


Fig. 7. Schematic diagram of thermal stress cycles.

面に圧縮、接合境界部に圧縮の応力がそれぞれ残留している。これらの応力は加熱による熱膨張係数の差によってステンレス鋼に圧縮、炭素鋼に引張りの応力を生じ、

前者は右下がり、後者は右上がりの熱応力の傾向を示す。引き続き数回の加熱冷却をくり返すと Fig. 7 に模式的に示すように、熱応力はそのループ内面積を減

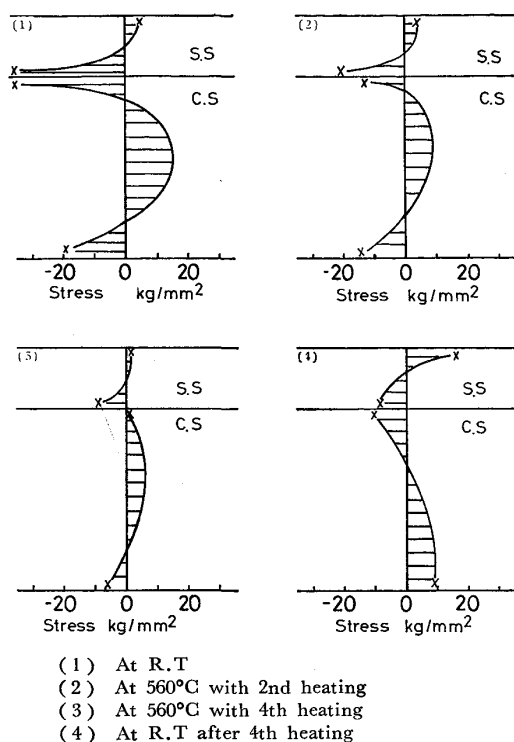


Fig. 8. Stress distribution of cross-section with wholly heating in x-direction.

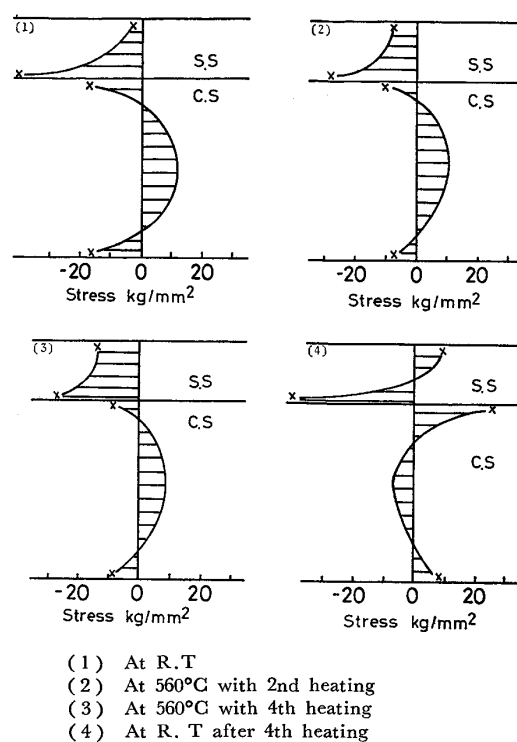


Fig. 9. Stress distribution of cross-section with wholly heating in y-direction.

じながらしだいにある定常状態に落ちつくようである。ステンレス鋼の熱応力サイクルの描く面積は比較的小さいが炭素鋼は高温における回復および再結晶のために熱応力サイクルが大きなループを描いて変化し応力解放を伴いながらしだいに小さなループとなつてステンレス鋼に近いサイクルを描くようになる。

この熱応力サイクルの縦軸は応力であり横軸は温度であるが熱による変位は $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$ で表されるから、ループ面積は仕事（ひずみ）エネルギーである。くり返し加熱によつて熱応力サイクルのループ面積がしだいに減少するのはそれだけの残留エネルギーが放出されたことになり材料としての安定度が増大するものと思われる。

y方向の熱応力サイクルもx方向と同様にステンレス鋼は比較的小さいが炭素鋼が大きく特に境界部が著しい。境界部のステンレス鋼の大きな縮残留応力は数回のくり返し加熱によつて熱応力の変化は少ない。

以上の測定結果から試験片断面のx方向、y方向の熱応力分布はそれぞれ Fig. 8, 9 のようになるものと考えられる。(1)~(4)はそれぞれ室温の初期残留応力分布、2回加熱時の 560°C における分布、4回加熱時の 560°C における分布、4回加熱後の冷却室温時の分布である。爆接クラッドと肉盛りクラッドとの接合部は本質的に異なつた機構であるが、爆接クラッド接合部の境界層には塑性流動とともに溶融層が存在し硬度が大きいと

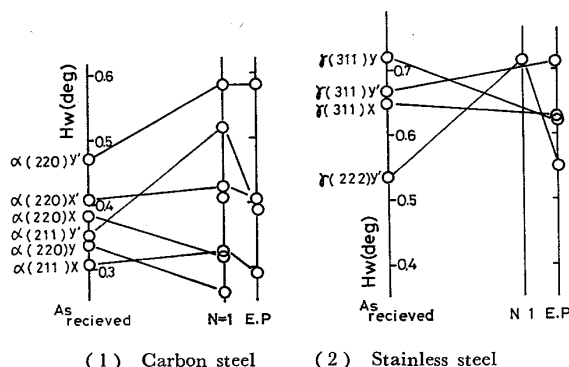


Fig. 10. Half width breadth by x-ray diffract meter.

ころから溶接ボンド部と類似の大きな圧縮応力が残留するものと考えられる。以後のくり返し加熱冷却によつてそれぞれ(2)~(4)のような分布になると考えられる。

加熱による応力解放に伴う焼なまし効果を調べる目的でX線半価幅を測定した。その結果を Fig. 10 に示す。As received は加熱前、N=1 は 560°C で1回加熱後の室温における酸化皮膜つき、E・P は電解研磨によつて酸化皮膜を除去したものである。(1)は炭素鋼、(2)はステンレス鋼でx、y等の記号は応力測定の場合と同じである。両材ともに y' 方向の半価幅は加熱後において増加を示し、y' 以外は加熱による微視的ひずみの解放に伴う焼なまし効果によつて半価幅が減少している。境界部は x' 方向と y' 方向とでは熱影響が異なり

熱応力サイクルの傾向にも差異を生ずる。

次に両面加熱による室温から 300°C までの加熱冷却のくり返しによる熱応力測定結果を Fig. 11 に示す。(1)はx方向, (2)はy方向である。S・S はステンレス側表面, C・S は炭素鋼側表面, S・b は境界部ステンレス, C・b は境界部炭素鋼である。いずれも加熱前の初期残留応力はくり返し加熱冷却によつてその変動幅は小さく応力解放が少ないことを示している。炭素鋼の方が熱応力サイクルの変動幅がやや大きく熱影響を受けやすいと考えられる。

炭素鋼側を加熱してステンレス側の応力を測定した片面加熱の場合を Fig. 12 に示す。○印内の数字はくり返し数を, ⊙印で示す1点鎖線はステンレス側を加熱した場合の炭素鋼の応力を示す。いずれもx方向である。ステンレス鋼の初期圧縮残留応力は加熱によつて漸増し 450°C を越すと加熱面の温度が 550°C を越えるため高

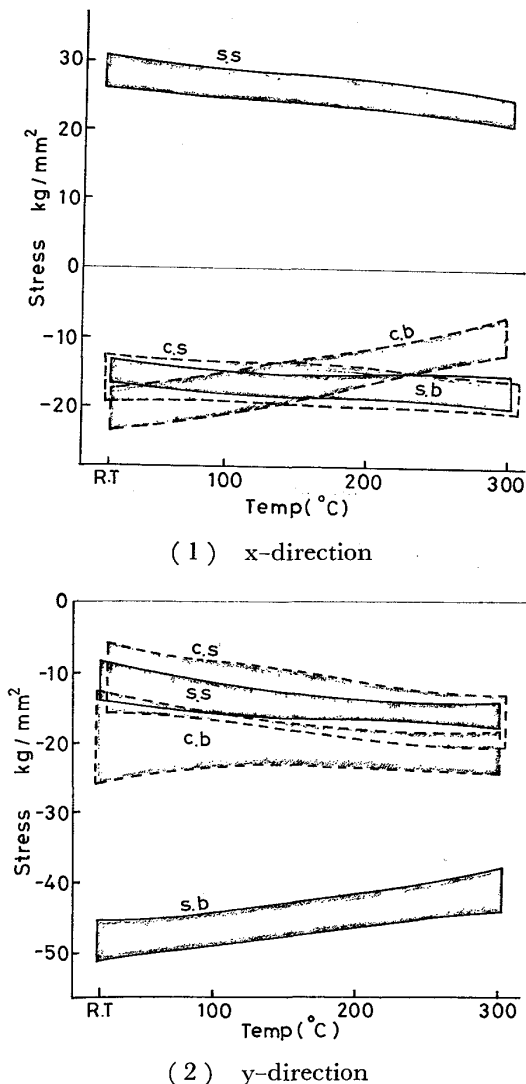


Fig. 11. Thermal stress cycles at R.T~300°C with wholly heating.

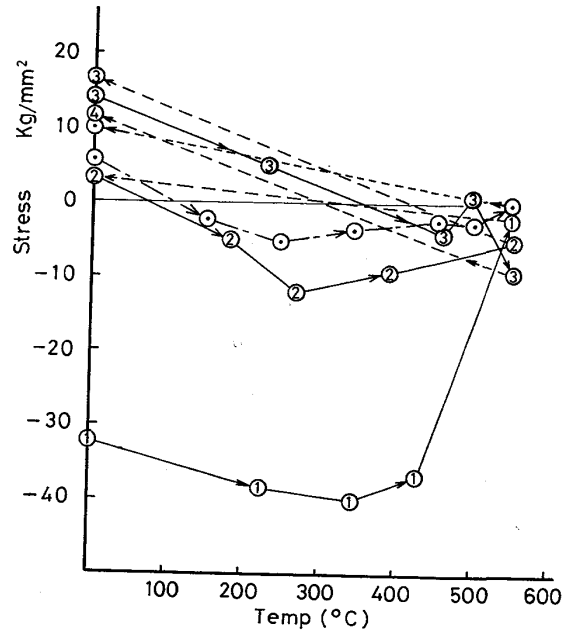


Fig. 12. Thermal stress cycles at heating temperature of clad steel with one side heating in x-direction.

温軟化を起こしその結果ステンレス鋼の応力は減少する。そしてステンレス鋼の温度が 550°C になると加熱面の温度がさらに高温の約 700°C になるためその応力は急減する。高温からの冷却による室温で引張応力となつて1回の加熱冷却で両面加熱と比較して大きな応力が解放され引き続いての加熱冷却のくり返しによつてある定常応力サイクルに落ちつくようである。ステンレス側を加熱した場合の炭素鋼の応力はステンレス鋼と比較して小さなループを描いて落ちつくようである。

熱応力は片面加熱で両材に温度差がある場合

$$\sigma_s = \frac{(\alpha_s \Delta T_s - \alpha_c \Delta T_c) E_s E_c}{E_c + E_s A_s / A_c}$$

$$\sigma_c = \frac{(\alpha_c \Delta T_c - \alpha_s \Delta T_s) E_s E_c}{E_s + E_c A_c / A_s}$$

..... (4)

ただし添字 S はステンレス鋼, C は炭素鋼である。

Fig. 12 と同様に片面加熱によつて炭素鋼を加熱したときのステンレス鋼の熱応力を(4)式によつて計算した結果が Table 3 である。Fig. 12 の1回加熱時の 450°C 付近までは計算値とその傾向はよく合っている。500°C を越える高温になると実験値は応力解放によつて急激し始め両者の値は異なってくる。

Fig. 13 は酸化皮膜つき試片の応力と電解研磨によつて皮膜を除去したときの応力である。酸化皮膜つきの残留応力は引張, 圧縮にかかわらず皮膜を除去することによつてその絶対値が減少することを示している。

Table 3. Calculation of thermal stress by one side heating.

Temp. (°C)	Side of stress measurement	89	134	180	234	275	340	389	436	486	550
	Heating side	166	221	277	340	382	453	506	546	600	692
Thermal expansion coefficient ($\times 10^{-6}$)	Stainless steel	15.8	16.1	16.3	16.4	16.6	16.8	17.0	17.3	17.4	17.8
	Mild steel	11.8	12.1	12.4	12.8	13.2	13.6	14.0	14.2	14.5	14.8
Stress (kg/mm ²)	σ_s	-8.8	-7.8	-7.5	-7.7	-7.2	-6.7	-7.1	-3.2	-3.7	-6.8
	σ_c	2.8	2.7	2.5	2.6	2.4	2.2	2.4	1.1	1.2	2.3

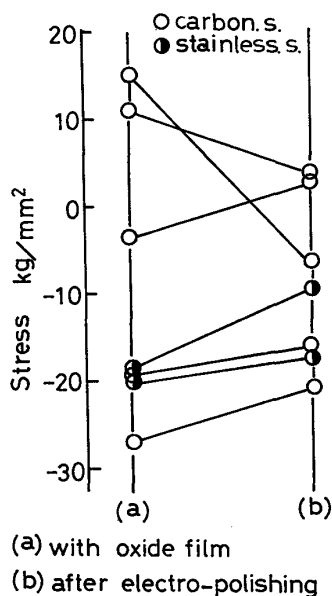


Fig. 13. Change of residual stress to delete oxide film for electro-polishing.

4. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 316 とボイラー用圧延鋼板 SB 42 の爆接クラッド鋼についてX線応力測定法によって熱応力測定を行つた結果つぎのことが明らかとなつた。

1) 試験片の加熱温度が 560°C まではX線応力測定プロファイルは良好である。X線入射角 $\phi_0=45^\circ$ におけるバックグラウンドの傾斜がやや大きいようであるが、 $2\theta-\sin^2\psi$ 線図からその推定誤差も比較的小さく、X線応力測定標準による従来法によって熱応力測定ができる。

2) クラッド鋼の接合境界部には大きな圧縮残留応力が存在し内力のつり合いからこれを補償するため炭素鋼母材内には引張応力が存在するものと考えられる。

3) 初期応力は加熱過程で熱膨張係数に起因する熱応力を発生し、あるループを示しながら熱応力サイクルを描く。そして 560°C までの加熱冷却を数回くり返した後の熱応力サイクルはある定常状態に落ちつくようである。室温時の応力と高温時の応力には変動幅があるので加熱冷却のくり返しによつて熱応力による熱疲労を起こすことも考えられる。

4) 室温から 300°C までのくり返しの場合の熱応力サイクルはそのループ面積は小さく比較的安定している。

5) 片面加熱による室温から 550°C におけるステンレス鋼の応力は、炭素鋼の高温軟化によつて初期応力が1回の加熱冷却で大きく解放され以後のくり返し加熱冷却によつてある定常サイクルに落ちつく。

本実験で得られた応力の値については妥当なものであると考えるが初期残留応力が試験片によつてやや異なっている場合があり値そのものは場合によつて一定したものではない。しかし応力の挙動は十分把握することができたと考える。

文 献

- 1) 立川逸郎, 小田 明: 溶接学会誌, 41(1972), p. 663
- 2) 村上善一, 西田 稔: 溶接学会誌, 41(1972), p. 83
- 3) 太田友弥, 土田幸雄, 竹内洋一郎, 小寺邦正, 入交 裕: 日本機械学会誌, 71(1968), p. 1496
- 4) 竹内洋一郎, 野田直剛, 小森 茂, 入交 裕, 北川俊治: 材料, 26(1977), p. 210
- 5) 江川幸一: 溶接学会誌, 40(1971), p. 184
- 6) 塚田悠治, 溶接学会誌, 40(1971), p. 198
- 7) 日本材料学会編, X線応力測定法標準
- 8) 松村源太郎訳: X線回折要論, (1961), p. 131 [アグネ]