(昭和 29 年 5 月・造船協会春季講演会に於て講演)

鋼材に及ぼす溶接と冷間加工の重疊効果

正員 工学博士 木 原 博

正員 工 学 士 安 藤 良 夫

正員 工 学 士 山 口 勇 男

正員 工 学 士 飯 田 國 廣

正員 工 学 士 今 井 保 穂

Abstract.

The Effect of Prestrain superposed on Welding.

By Hiroshi Kihara, *Kogakuhakushi, Member,*Yoshio Ando, *Kogakushi, Member,*Isao Yamaguchi, *Kogakushi, Member,*Kunihiro Iida, *Kogakushi, Member*and Yasuho Imai, *Kogakushi, Member.*

In the recent construction of steel ships, riveting has been largely replaced by welding. In welding ships, steels are frequently required to be welded in prestrained condition after cold working. One of the most important examples may be the joining of a gusset plate to the margin plate. In such a case it is usually recommended by Ship Classification Societies that the prestrained area should not be welded in order to avoid deleterious effect of cold working upon welding. It is generally considered that welding of a cold worked steel reduces impact strength and corrosion resistance of the steel.

To investigate the problem, various kinds of tests were performed, that is, tensile, bending, fatigue, and corrosion tests as well as notch brittleness test.

A rimmed steel, 13 mm thick and with the manganese-to-carbon ratio > 2.5 , was employed. After a stress relief heat treatment at 700°C for one hour, specimens were prestrained in a 300 tons tensile testing machine to various amounts of cold working, 0, 2.5, 5, 10%. Specimens were then bead welded with the submerged-arc welding process, and the following results were obtained.

No effect of cold working upon welding was observed in the tensile and the bending tests. In the V-Charpy notch brittleness test, transition temperature seems to be raised with increasing prestrains.

The fatigue test with repeated bending specimens in Schenk's fatigue testing machines, showed that the fatigue strength was increased with prestraining and welding.

In the corrosion test, the steel was made less resistance to corrosion when it had mill scale unremoved, coldworked, while the effect of prestraining-and-welding seemed to be favourable to increase the corrosion resistance.

Summarizing the test results, it may be concluded, that the effect of welding on a prestrained steel is not so deleterious as to be observable in tensile, bending, or fatigue tests, but rather effective to increase corrosion resistance. Therefore the said recommendation does not seem reasonable, and the gussets may be welded to the margin plate on cold worked corners.

1. ま え が き

溶接船の建造に当つては冷間加工によつて塑性歪を与えられた板に溶接を行わなければならない場合が多々ある。その内 Margin Plate と Gusset Plate の溶接を考えて見るのに船級協会によつては工作上困難ではあるが、Margin Plate の R 止りの間は溶接はしないで、その上又は下に避けることを指示しているところもある。これは冷間加工を行うとその部分が歪硬化するので機械的性質特に衝撃値が低下し、また腐蝕に対する性質等も劣化するし、一方溶接を行うと通常溶接部の近くには悪い影響を与えられるわけでこれら両者の悪影響が重畳するものと考えられているからである。

この問題を究明するために塑性歪と溶接との重畳効果を受けた鋼材について引張り、曲げ、切欠脆性、疲労及び腐蝕に関する実験を行った。

2. 試験片の製作及び計測

2.1. 使用材料及び応力焼鈍

実験に使用した材料は厚さ 13 mm 同一チャージの Special Rimmed Steel である。一般のリムド鋼は切欠感度が比較的高いが、この材料は $Mn/C > 2.5$ として切欠感度を低くしたもので材料の化学成分は Table 1 に示す通りである。

鋼板は普通圧延によつて Prestrain が若干残っているので 700°C で一時間応力焼鈍を行うこととし、この作業は播磨造船所鍛鉄工場の長炉に於て行われた。

2.2. Prestrain

冷間に於ける曲げ加工によつて塑性歪を与える代りに腐蝕試験を除いては引張りに依つて Prestrain を与えた。試験片の形状は Fig. 1 に示すように試験用材を 1800×300×13 mm の大きさにガスで切断し、その両端にチャックを溶接した。この様な試験片を計 6 枚作り運研船舶構造部の 30 トン試験機によつて引張った。Prestrain の量は 2.5%、5%、10% の 3 種で、おのおの 2 本ずつ行つた。Prestrain の計測は両面にあらかじめゲージ長 1,000 mm の標点を印し、与えるべき塑性歪の量の他に約 1.2 mm 程度の弾性歪を見越して引張荷重を加えた。

このように試験片が大きいと小型引張り試験の場合に見られる上下の降伏点は現われず、はじめて降伏した後もそれ以下の荷重には下らない。試験片のリュエーダース線の模様から判断すれば、降伏点の荷重において全面的に同時に降伏するのではなく局部的に降伏がおり次第に全面に及ぶと考えられる。その頃 Prestrain は 1% 以上になつており、Prestrain 1% というような均質な試験片を得ることは困難の様に思われる。

各試験片に予定通りの Prestrain を与え計測した処、試験片は両端のチャックをつけた隅肉溶接から 10 mm 離れた位置の間、すなわち試験片の大部分は均一な断面収縮をしており、試験片の両端に近い部分を除けば一様の Prestrain が与えられたと考えて差支えない。

2.3. 溶接条件

各 Prestrain を加えた試験片に、全く Prestrain を加えない試験片 2 枚を加え、幅の中央、長さ方向に自動溶接によつてビードをおいた。溶接条件を Table 2 に示す。

2.4. 温度計測

温度変化が材質に及ぼす影響を考慮してビード中心より 10, 15, 20, 30 mm の各点の溶接時の温度変化を計測した。10, 15 mm についてはアルメル・クロメル；20, 30 mm については銅-コンスタンタンの熱電対を使用した。ビード中心からの距離による温度の変化は Fig. 2 の如くなる。後述するようにビード中心より 12 mm 離れた附近の脆化が甚しいが、この附近の温度は変態点に達していない。計測は裏面から行つたので、もつと表面のビードに近い部分は高い温度をうけた可能性はあるが、後述の顕微鏡写真からも変態点以下であることは

Table 1. Chemical Composition and Mechanical Prop. of Plate

C	Si	Mn	P	S
.22	.011	.60	.011	.036

Tensile strength	44.5	kg/cm ²
Elongation	30.0	%
Bending	Good

Fig. 1 Specimen prestrained

Table 2. Details of Welding Procedure.

Welder	Brown Boveri Uni-welder
Electrode	Oxweld No. 43, 3/16 in. φ
Flux	Grade 50
Current	D.C. 580 ± 20A
Voltage	31 ± 1 V
Speed	600 mm/min. (24 in./min.)

Fig. 2 Weld, thermal curves

明らかである。

2.5. 硬度測定

硬度はロックウェルBスケールを用い板の表面から2 mmの所を計測した。その結果の1例をFig. 3に示す。母材部の硬度とPrestrainに対する関係および熱影響部と母材の硬度の差のPrestrainに対する関係は

Fig. 3 Hardness distribution (Prestrain 10%)

Fig. 4 The relation between hardness and prestrain

Fig. 5 Microstructure of 10% prestrained plates (x260)

(a) Distance (from fusion center) 12 mm
(b) " " 80 mm

Fig. 4 に示した通りで一般に Prestrain の増加と共に硬度が増しているが、溶着金属は殆んど変りなく、最高硬度も殆んど変化がない。

2.6. 顕微鏡写真

Prestrain 及び溶接に依る組織の変化をたしかめるために各 Prestrain の試験片について顕微鏡写真を撮った。その代表的なものとして Prestrain 10% のものにつき、溶接の影響のない部分と後述する脆化の甚しい部分の顕微鏡写真をFig. 5に示す。これによつてもいわゆる脆化領域の部分の達した温度は変態点以下であることがわかる。

3. 各種試験

3.1. 引張り試験

通常造船用鋼材は標点距離 200 mm の1号試験片について引張り試験を行うのであるが、本試験の場合は小さい試験片しかとれないので標点距離が 50 mm のものを用いた。試験片は 0, 25, 5, 10% の4種の Prestrain について、溶接部を含んで縦、横及び溶接の影響のない部分から Prestrain の方向に対し平行と直角に各2本合計 32 本を採つて、常温における引張り強さと伸びとを求めた。

引張り試験の結果をFig. 6に示す。引張り強さは溶接を行わないものはいずれも Prestrain の増加と共に大きくなっている。これは Prestrain により板の厚さが減少したが、その板から同一断面積の試験片を切り出して行つたために当然起る結果で、引張り強さの増加量はほぼ Prestrain の量に比例している。これに反して溶

Fig. 6

亀裂を生ずることなく曲つた。このような切欠のない試験片で脆性破壊をさせるには遙かに低い温度とする必要があり、Prestrain の差をみるにはオーストリヤ試験片の如く大型とするかリーハイ試験片のように人工的切欠を入れなければならないものと考えられる。

次に常温で 180° 曲がつた試験片を更に圧縮したところ Table 3 に示すように溶接の影響のないものはいずれも両端が密着しても亀裂を生ぜず、溶接部を含むものは Prestrain の大きいものほど小さい荷重で亀裂を生じた。

3.3. 切欠脆性試験

本実験ではシャルピー衝撃試験に依つて切欠脆性を調べた。試験片は Fig. 7 の如き V ノッチシャルピー試験片で図の如く破断面がビードに平行になるように試験片を採取したが、ビード中心とノッチの距離 d は 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 22, 28, 36, 50, 80 mm の 12 種類に変え同一条件のものを各 10 本採つた。Prestrain の種類は 0, 2.5, 5, 10% の 4 種類であるから試験片の総数は $4 \times 12 \times 10 = 480$ 本となる。

試験温度は -40° , 20° , 0° , 20° , 40° , 60° , 80° , 100° , 130°C の 9 段階に変えて行い、1 組を予備とした。又同一温度で行う試験は乱数表によつてえらび位置による誤差をとり除いた。試験片は各温度とも少くとも 10 分間一定に保ち、取出して 5 秒以内に試験を完了し、衝撃値を求めた。破断後断面の剪断破面率 (Percent shear) 及び断面の横収縮 (Contraction) を求めた。

衝撃値と Prestrain, 温度, 距離の 3 つの Factor について cross curve を描いて実験値を整理したがここには Prestrain 10% のみについて示すこととした。距離-衝撃値 (温度一定) 曲線を Fig. 8 に示す。ビード中心から 12 mm の附近が脆化が甚しくこれは他の研究者の実験結果とも一致している。温度-衝撃値 (距離一定) 曲線は Fig. 9 に示す。Prestrain の増加は衝撃値を低下せしめているがその程度は脆化部において特に甚だしい。またビード中心は Prestrain に余り影響されない。この状況を知るために常温に近い一つの例として

接を行つたものは如何なる Prestrain を与えたものもほぼ同一強さを示したが、これは熱により焼鈍されたためと考えられる。

伸びはゲージ長 50 mm に対してとつたので 1 号試験片を採用した場合に較べれば遙かに大きな値を示している。Prestrain の増加と共に伸びが減少するのは常識的である。溶接のないものの横引張においては Prestrain 0 の場合は焼鈍の效果に依り略々同一の伸びを有するが、Prestrain の増加に伴う伸びの減少率は縦引張りの場合よりも大きい。また溶接を行うことは僅かに伸びを減少させる傾向にある。

3.2. 曲げ試験

曲げ試験片の採取位置は引張り試験片とはほぼ同様に溶接部を含んで縦、横及び溶接の影響のない部分より各々 2 本ずつ計 24 本を採つた。

試験は板厚 10 mm として JIS の型曲げ試験より曲げ半径を小さくした表曲げ試験で、板厚の 2 倍の直径の雄型で曲げた。各種 2 本のうち 1 本は室温 15°C で曲げ、1 本はドライアイスとアルコールを混ぜて温度を -40°C まで下げて行つた。

何れの温度においても全ての試験片は 180 度まで何ら

Table 3.

Specimen	Prestrain	Weld	Cracking Load
B1A	0	Unwelded	Perfect *
B2A	2.5	"	"
B3A	5	"	"
B4A	10	"	"
BL1W	0	Welded (Parallel to direction)	10 ⁵
BL2W	2.5	"	8.7
BL3W	5	"	8.4
BL4W	10	"	7.2
BT1W	0	Welded (Perpendicular to direction)	9.3
BT2W	2.5	"	8.1
BT3W	5	"	8.0
BT4W	10	"	2.6

* Both sides of plate were touched with no cracks.

Fig. 7 V-notch Charpy Specimen and its notch direction

+20°C の場合を Fig. 10 に示す。

温度—Percent shear 曲線を Fig. 11 に示す。-20°C 以下では殆んど Cleavage Type Fracture で +130°C では殆んど Shear Type Fracture に移行している。また Prestrain は Percent shear を低下せしめており特に脆化部においてこの傾向は強いが、溶着部ではそ

の影響は殆んどないものと考えられる。この状況を Fig. 12 に示す。次に温度—Contraction 曲線を Fig. 13 に示す。衝撃値, Percent shear と同じ傾向がここにも現われている。Prestrain との関係は距離 0, 12, 80 mm の三種類について Fig. 14 に示したが、脆化部に於ては特に Prestrain による差が顕著である。

Fig. 13 The relation between temperature and contraction at various distances

Fig. 14 The relation between prestrain and contraction

遷位温度として次の4種類をとって比較してみた。

- (1) 50% Shear による遷移温度 T_{rs}
- (2) 15 ft-lbs による遷移温度 T_{r15}
- (3) 1/2 max Energy による遷移温度 T_{rE}
- (4) 1/2 max Contraction による遷移温度 $T_{r\phi}$

T_{rs} , T_{r15} , T_{rE} , $T_{r\phi}$ を夫々 Fig. 15, 16, 17, 18 に示す。* 何れの場合もビード中心では遷移温度が下がるが 12 mm の附近では急激に上昇していることを示している。次に溶接による遷移温度の上昇と Prestrain の関係をとれば Fig. 19 の如くなる。この場合 $T_{r\phi}$ の増加が最も多く現れている。次に遷移温度 T_r と溶接による脆化領域におけるその上昇 $4T_r$ の関係をとれば Fig. 20 の如くなり、溶接前の遷移温度の高いものほど脆化領域の遷移温度の上昇が大きい傾向にある。

以上の結果を総合すると切欠脆性については Prestrain は一般に切欠感度を高めるが、溶接を行うとビード中心附近では切欠感度が下り、中心より約 12 mm 離れた脆化部では幾分上昇する。

Fig. 15 Distance vs. transition temperature under various prestrains (T_{rs})

Fig. 16 Distance vs. transition temperature under various prestrains (T_{r15})

* 理論上溶着部は一定で Prestrain による差異はない筈である、が実際には遷移温度等にも Prestrain の影響があらわれている。これはビードが小さいために Prestrain をうけた母材を含んでいるので、その影響が入っているためと考えられる。

Fig. 17 Distance vs. transition temperature under various prestrains (T_{rE})

Fig. 18 Distance vs. transition temperature under various prestrains ($T_{r\phi}$)

Fig. 19 The relation between prestrain and rise of transition temperature caused by welding

Fig. 20 The relation between transition temperature and its rise caused by welding

3.4. 疲労試験

疲労試験はシェンクの繰返し曲げ試験機で行った。試験片はビードを含むものと溶接の影響のない部分から各10本ずつとった。試験片の総数は4種のPrestrainについて $4 \times 2 \times 10 = 80$ 本である。

代表例として10% Prestrain についてS-N曲線をFig. 21に示す。疲労強さの一番高いものは10% Prestrain でビードを含むもの、一番低いものは0% Prestrain でビードを含まないものであった。この2曲線の間にその他の各種条件の6本のS-N曲線が挟まれていた。

これらの間の関係を明らかにするため夫々 1×10^5 回及 1×10^7 回で截り、各曲線との交点を取りplotして見るとFig. 22の如くなる。即ちPrestrainを加えると降伏点の上るために疲労強度はむしろ高くなるものと思われる。また溶接ビードを含むものの方が含まないものよりも一般に疲労強度は優れている。

Fig. 21 N-S curves (Prestrain 10%)

Fig. 22 The relation between prestrain and fatigue stress

るが、これは冷間加工と溶接の重畳効果は疲労に関してはむしろ良い影響を与えることを示している。

なお各S-N曲線の傾斜 k の値は殆んど同じであった。

3.5. 腐蝕試験

この試験については冷間加工の方法がこれまでと異り、同じ材料の鋼板を $1800 \times 300 \times 13$ mmに切り、これを冷間で幅の中央を20 mmの内径で90°曲げる。しかる後約700°Cで一時間応力焼鈍を行い再び冷間に於て平に戻せば鋼板は平であるけれども中央に塑性歪を残した板となる。これより 300×300 mmの板4枚を切り、そのうち2枚は黒皮のついたままとし、2枚はシエーパーにより黒皮を取り除いた。各2枚のうち1枚は引張りの塑性歪をうけた側、他方は圧縮の塑性歪を受けた側を表とし、塑性歪の線と直交して中央に溶接ビードをおいた。溶接方法ならびに溶接条件はすべて前掲のものと同じである。

また板の周辺はガス切断の影響を見るために一部ガス切断のままとして、大部分の周辺は機械仕上げをした。10% HCl液に50日間浸し取出した結果、板は一樣に平均0.02 mm程度薄くなつたほか塑性歪のある部分にPitting corrosionが多く起り、深さ1 mm程度の穴が多数現われた。故にここではこのPitting corrosionの分布について調査した。分布のとり方として面積を30 mmの幅の縦横の線で区切り、その四角形内の孔の面積の百分率を計測した。これらの分布について要因として(1) Mill scaleの有無、(2) ビード面が引張側か圧縮側か(3) ビードよりの距離、(4) 塑性歪、(5) ビード面の表裏の5つの主効果と、それらの相互作用(10ヶ)計15個考えて要因分析をした結果次の様な結論を得た。

- (1) Mill scaleがあると腐蝕を受け易い。
- (2) Prestrainがあると腐蝕を受け易い。ただしビードより30 mm位の間は却つて腐蝕され難い。
- (3) (1)(2)両者の重畳した時は最も腐蝕が大きい。
- (4) Prestrainの圧縮側と引張側では余り大差はないがどちらかといえば圧縮側の方が腐蝕が大きい。
- (5) ガス切断の縁は腐蝕が甚だしい。

4. 結 論

塑性歪のある板に溶接を行つたとき一般に悪影響が重畳されると考えられているが、われわれの実験結果は次の通りであった。

- 1) 引張試験の結果によれば、Prestrain の増加と共に引張り強さは増し、伸びは減少する。また溶接を行うことは僅かに伸びを減少させる傾向にある。
- 2) 曲げ試験は板厚の 2 倍の直径の雄型で曲げたが、常温でも低温 (-40°C) でも 180 度完全に曲つた。
- 3) 切欠試験の結果によれば Prestrain は遷移温度を高め、特にビード中心から 12 mm 離れた附近に脆化部があるが、溶着部附近の遷移温度は下つている。
- 4) 疲労試験では Prestrain を加えると疲労強度が高くなり、溶接部を含んだものは幾分疲労強度を増している。
- 5) 腐蝕試験の結果によれば Prestrain は腐蝕を助長するが、溶接を行うとその附近はかえつて腐蝕され難くなる。

Margin plate と Gusset plate の溶接の問題については引張り、曲げ、疲労、腐蝕については全く悪影響がないし、切欠脆性については Margin Plate の R 止り附近に溶接することと角に溶接することは本質的に大差なく、設計並に工作上都合の良い場所を選んで差支えないであろう。

5. あ と が き

本研究は播磨造船所の船舶溶接研究会において採り上げられた題目であり試験片の製作も同造船所において行つたものである。なお実験の実施に際しては日本鋼管鶴見造船所、石川島造船所及び運研構造部から種々御世話を頂きました研究費については日本造船研究協会の補助を受けたものであることを記して、ここに深く感謝する次第である。