

5. 疲労強度の改善方法

5.1 概 要

鋼管継手の疲労強度を論ずる場合、溶接ビードの形状、残留応力の大小、そして表面欠陥は疲労強度に大きな影響を与えるため、それらを改善する。疲労強度の改善方法は重要な要素の1つである。

しかし、疲労強度の改善方法は、鋼管継手特有の問題ではなく、調査の範囲を広げると膨大な作業となり本分科会の範囲を越える。

したがって、ここでは鋼管構造物に適用可能な方法にまず範囲を限定した。

また、最近ECSC (European Coal and Steel Community) の共同研究の成果が1981年8月の“International Conference Steel in Marine Structures ”に発表された。その中には、疲労強度の改善方法についての新しい成果が含まれており、その概要を紹介することは有意義なものと考え、ECSCの成果のを主体に疲労強度の改善方法を概説した。

日本では、この分野において溶接棒の改良により疲労強度を改善する独特の開発が行われ、実際に使用されているので、その成果についても紹介してある。

さらに、疲労強度改善方法の適用の限界と改善法とコストについてECSCの考え方を紹介してある。

最後に実構造での具体例として国内で製作された大型ジャケット等の鋼管構造での格点部の溶接の仕上げ方法について紹介し、疲労強度の改善方法の現状について述べている。

5.2 疲労強度改善方法の概要と効果

疲労強度の改善方法を原理を基に分類すると以下の2つになる。

- 1) 溶接止端部の形状の修正
- 2) 残留応力分布の修正

また、施工法別に主要な改善方法を表5.1 に示す。

表5.1 疲労強度の改善方法一覧

| | 工 法 | 修 正 の 内 容 | 引用文献 |
|---|--------------------|-----------------------------------|------------|
| 1 | グラインダー仕上げ | 溶接止端部の部分的な改善が最も効率的である。 | 6, 7, 30 |
| 2 | TIGドレッシング | 溶接止端部をTIGトーチで再溶融する。 | 6, 7, 28 |
| 3 | プラズマ・アーク ドレッシング | 同上の要領でTIGトーチの代わりにプラズマ・アークを使用する。 | |
| 4 | ハンマーピーニング | 動力工具により溶接ビード表面に残留応力を導入する。 | 6, 7 |
| 5 | 溶接法の改良 | 最終層を溶接ビード形状をなめらかにする特殊化粧盛溶接棒で施工する。 | 13, 31, 32 |
| 6 | 熱による応力除去 | 溶接中に入る局所的な引張り応力の除去を目的としている。 | |

(1) グライNDER仕上げ

この方法は、グライNDERにより溶接止端部を加工して形状をなめらかにすることである。

溶接ビードを完全に仕上げるには、多大の労力と時間を要し、経済的ではなく加工量が少なくても効果のある方法が試みられている。

グライNDERによる溶接止端部の仕上げ形状については、多くの研究成果は一致しており、その形状を図5.1 に示す。

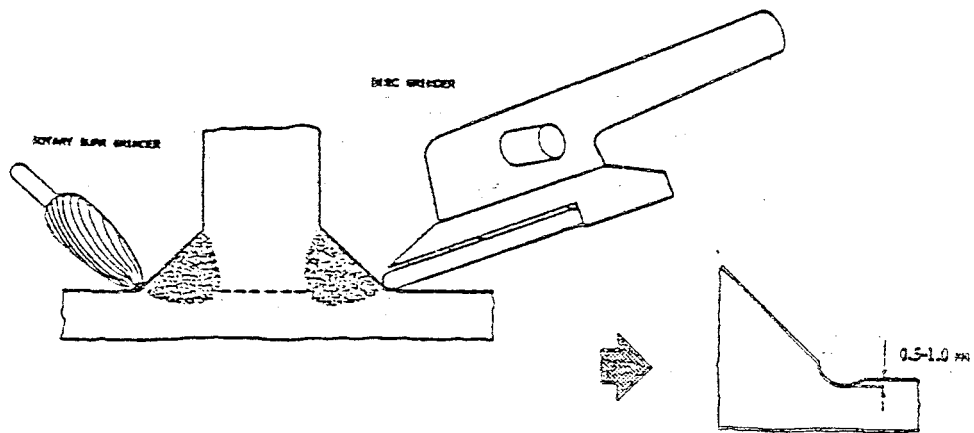


Figure 2. Two weld toe grinding techniques; grinding must extend to some depth below the plate surface

図5.1

グライNDER仕上げの効果は、継手形状等によりバラツキはあるが、疲労強度で67～220 %、平均的に 150%の向上が報告されている。

図5.2 , 図5.3 にECSC (European Coal and Steel Community) での成果を示す。同図から他の改善方法の効果と比較することができるが、最も効果のある方法の1つであることが分かる。

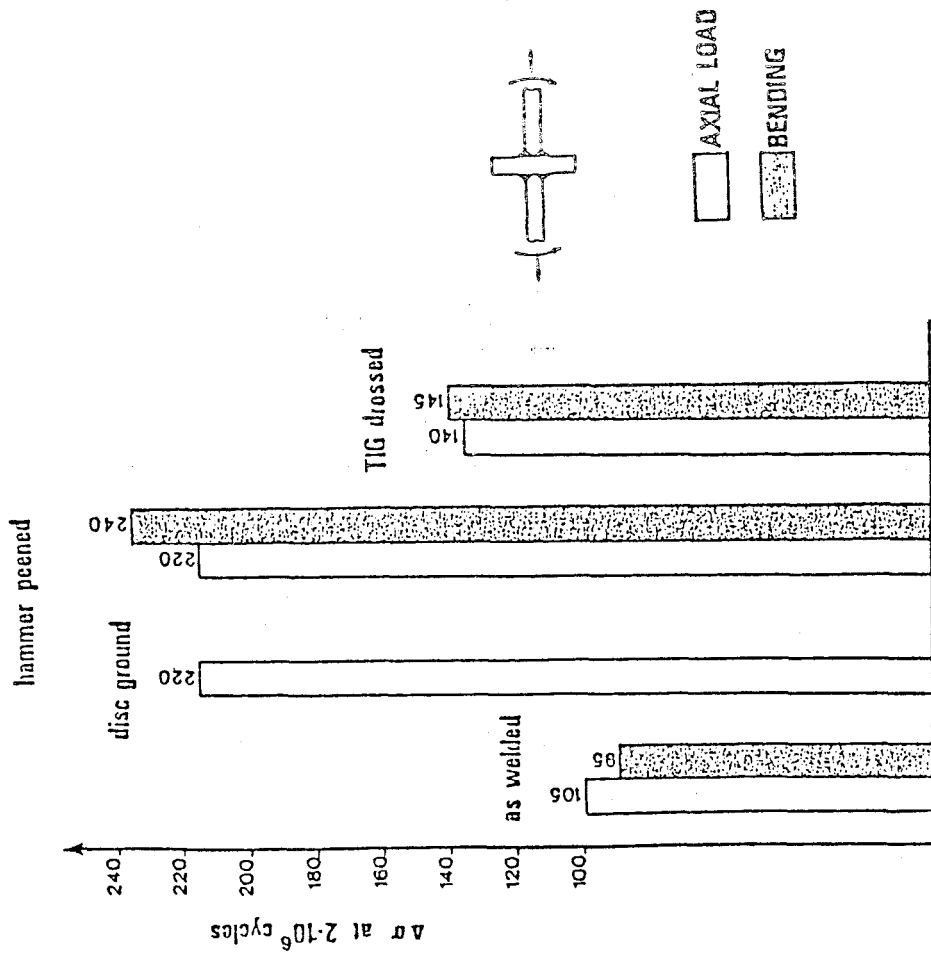


Figure 12. Results from British program; degree of improvement obtained under axial and bending loads, cruciform joints in air

5. 2

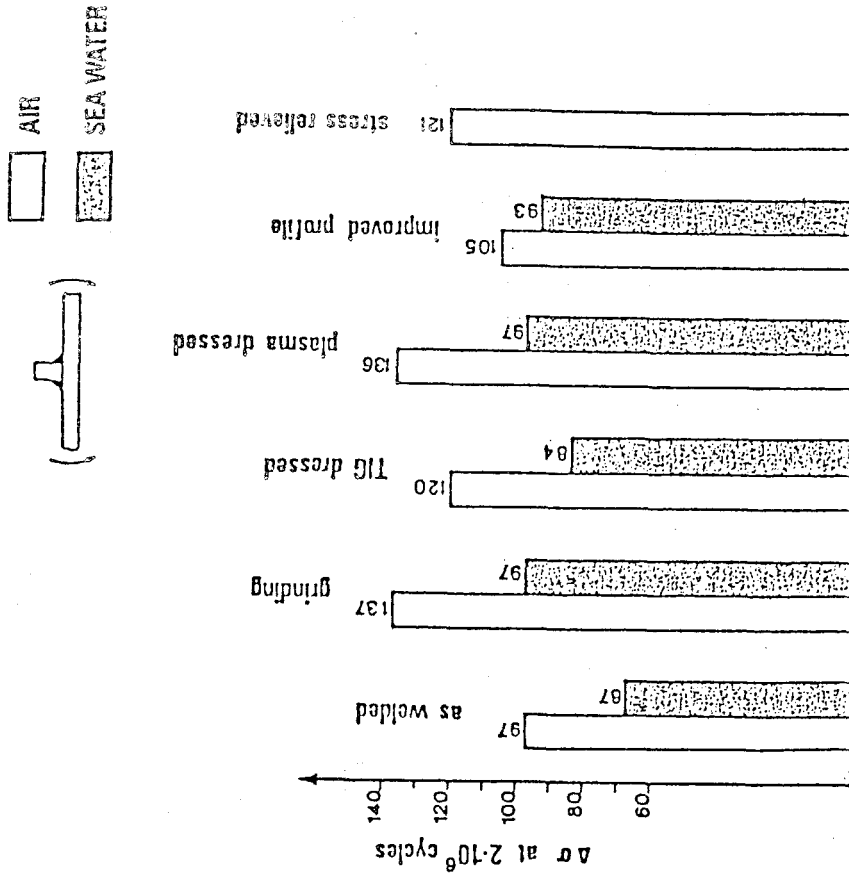


Figure 13. Results from Dutch program; effect of various improvement techniques on the fatigue strength at 2×10^6 cycles, air and sea water; 40 mm thick T-joints

5. 3

(2) TIG ドレッシング

TIG ドレッシングは、図 5.4に示すように溶接金属のないトーチを $90^\circ \sim 60^\circ$ の角度で溶接止端部を再溶接し、溶接止端部の形状を改良する方法である。

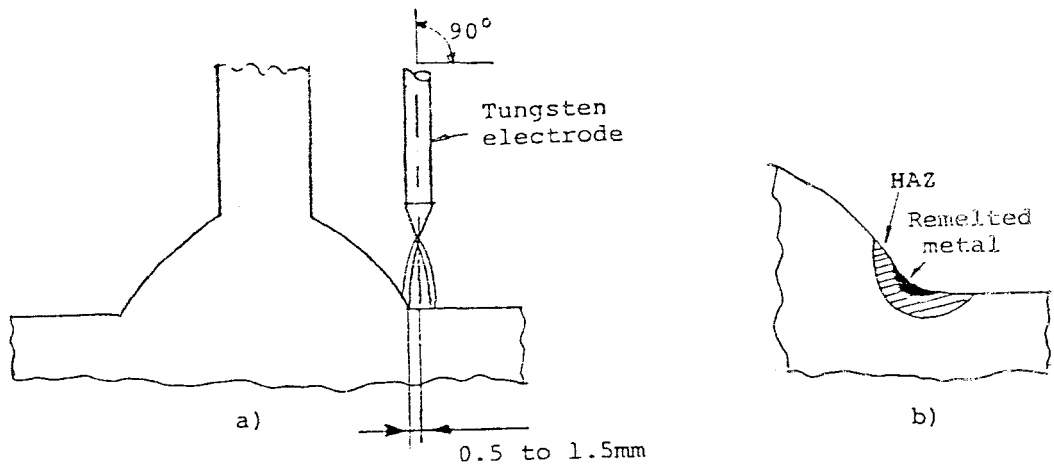


Fig. 4 - TIG dressing: a) position of electrode relative to the weld, and b) resulting bead profile, schematic.

図 5.4

この方法には①施工費が安い、②作業条件が良い、③検査が容易である、の3つの利点がある。

また、欠点として処理部の硬度が高くなることがある。この欠点をカバーする方法として①入熱量を制限する ($< 0.1 \text{ KJ/mm}$)、②ダブルランとする、の2つが提案されている。

図 5.5にダブルランの施工要領を示す。

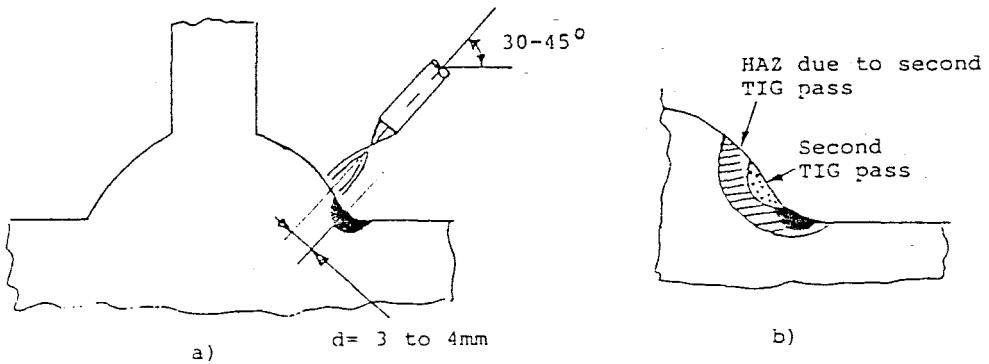


Fig. 8 - Modified TIG dressing technique: a) position of electrode relative to the weld, and b) resulting bead profile, schematic.

図 5.5

改善の効果は、ECSCの成果で図 5.2に英国、図 5.3にオランダ、図 5.6,7にドイツ図 5.8にECSC共同研究 (ベルギー) 図 5.9にノルウェーの結果を示す。

改善効果は、試験により大きな差があり17%~136 %である。

平均的にはバット溶接に対し57%、十字継手溶接に対し107 %の増加率である。

塩水中でのTIG ドレッシングの改善効果を図 5.3, 図 5.9, 図 5.10 に示す。その効果は気中に比べて減少するが、A.W (as weld) よりは依然、高い改善効果があることが分かる。電気防食の効果は図 5.10 に示すが、A.W.(as weld) の場合とTIG ドレッシングの場合と差はあるものの、疲労強度の向上にはいずれも期待できないことが分かる。

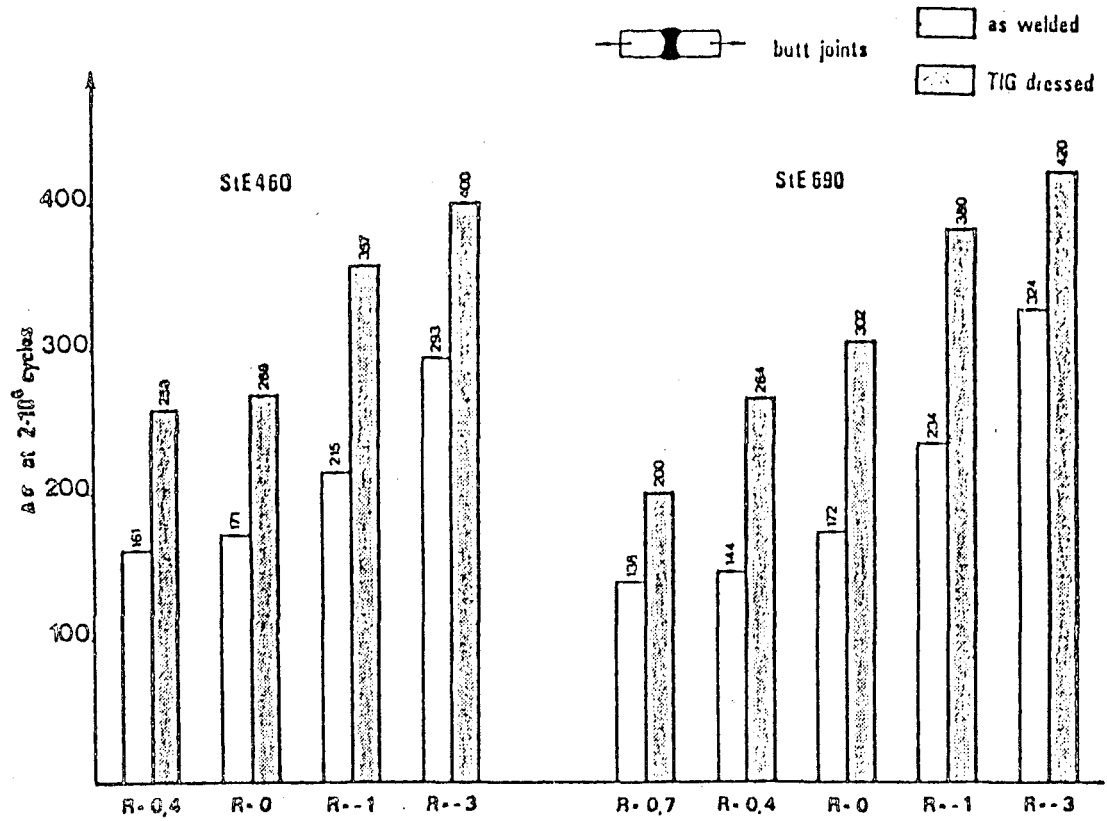


Figure 9. Results from German program (TH Darmstadt), improvement in fatigue strength at 2×10^6 cycles due to TIG dressing, 12 mm butt joints

5.6

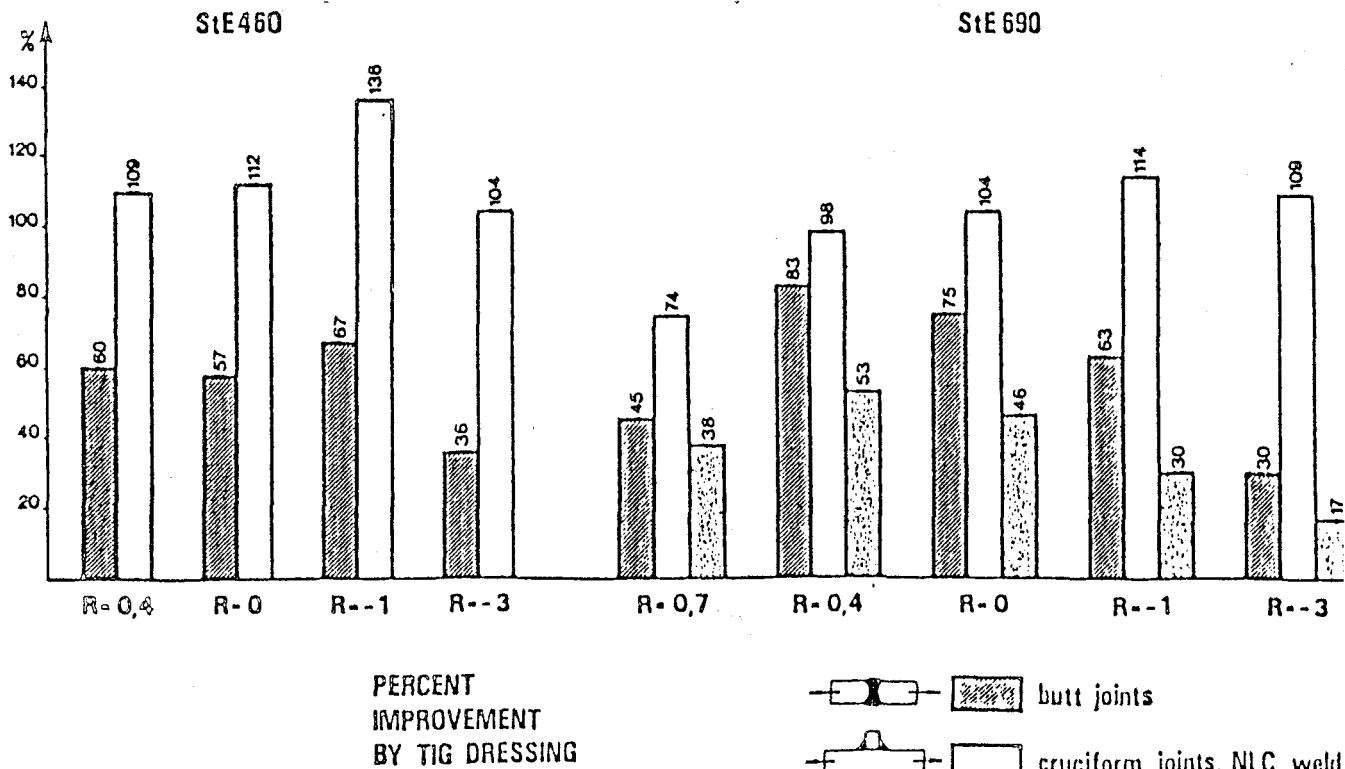


Figure 10. Percentage increase in fatigue strength due to TIG dressing, German program

5.7

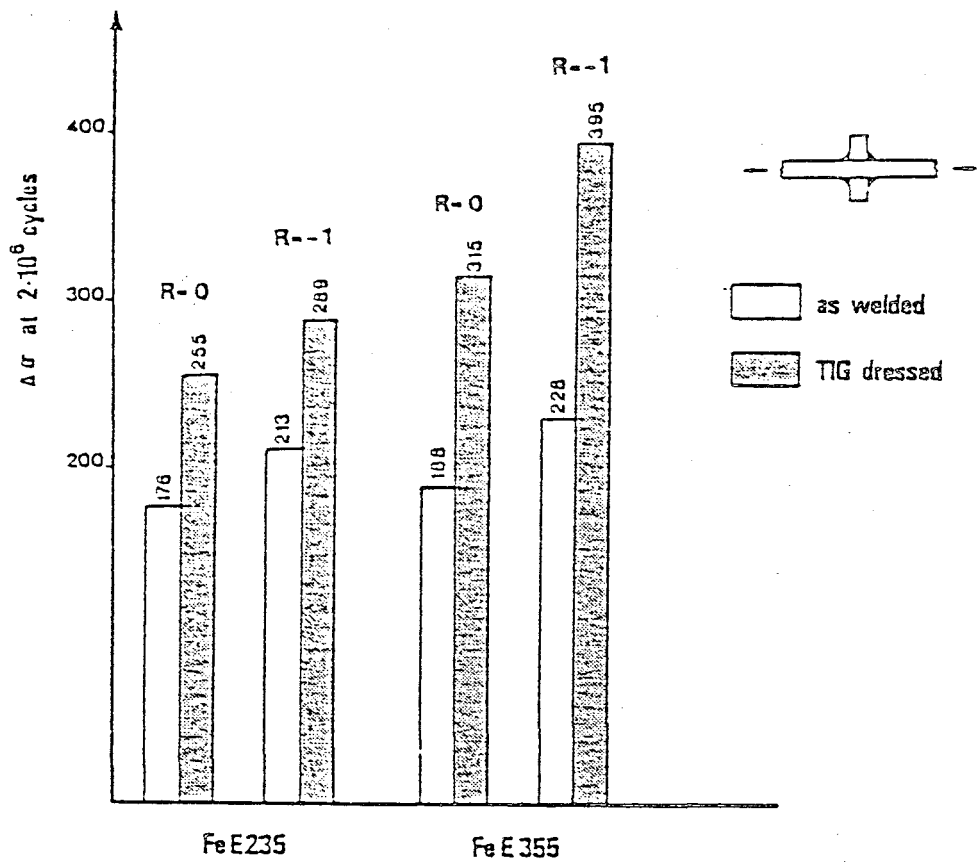


Figure 11. Improvement in fatigue life due to TIG dressing, joint ECSC program (at CMR), 8 mm thick cruciform joints

5.8

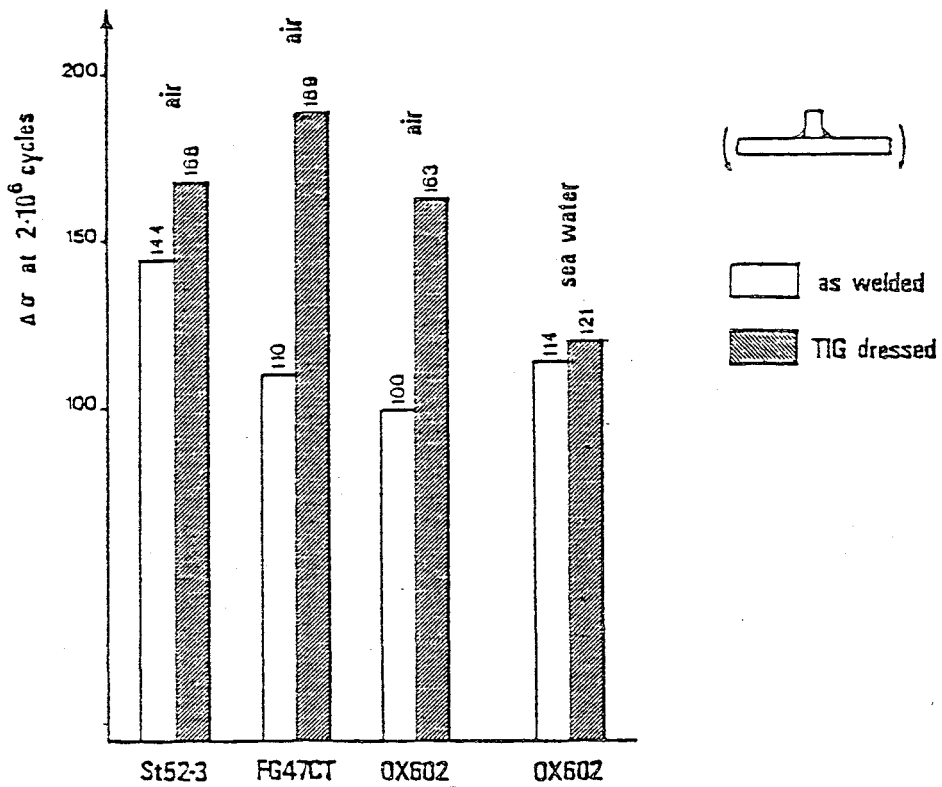


Figure 16. Improvement in fatigue strength obtained in Norwegian program, T-joints, 27-30 mm plate thickness

5.9

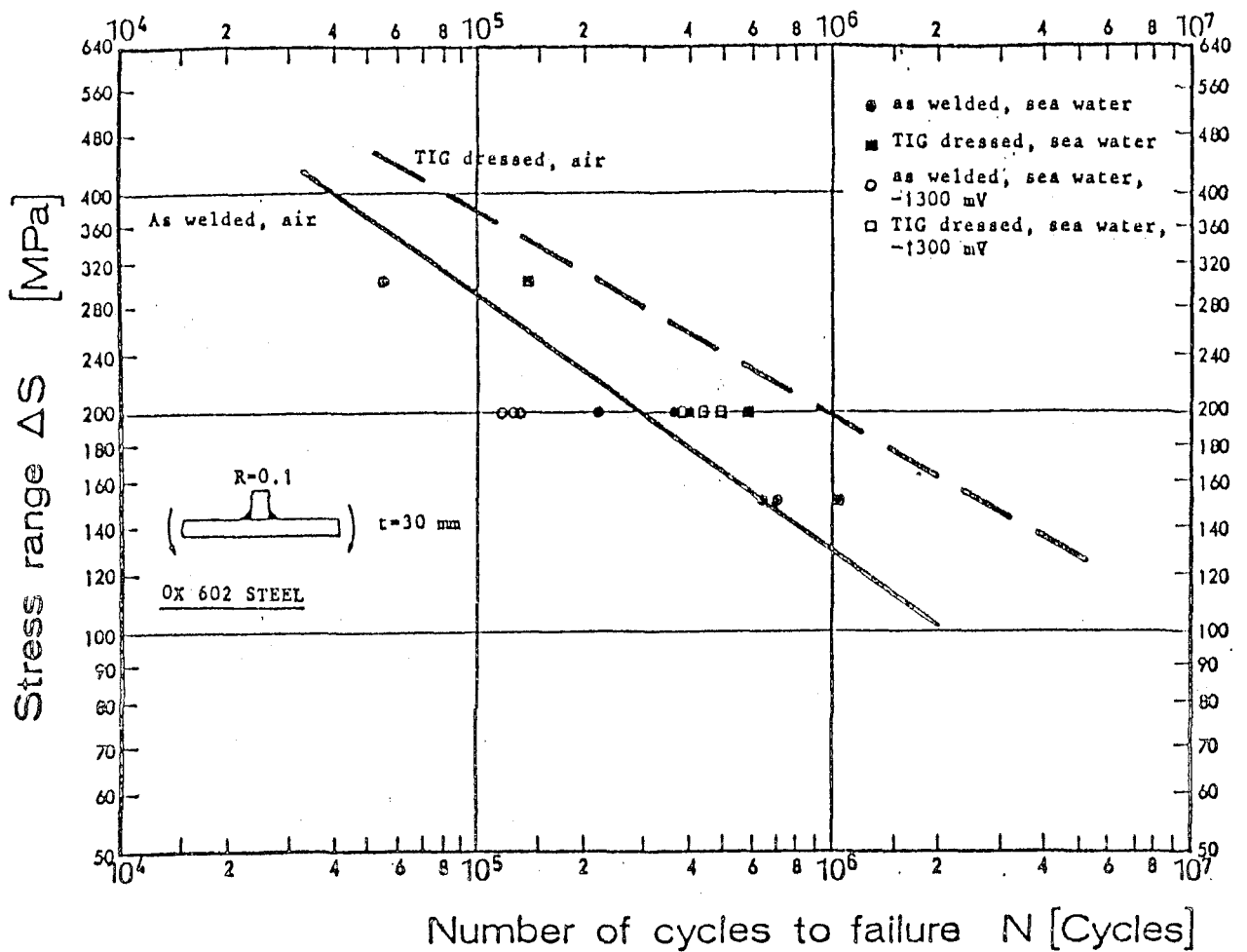


Fig. 17. Effect of free corrosion and cathodic overprotection on A.W. and TIG dressed specimens.

☒ 5.10

(3) プラズマ・アークドレッシング

この方法の原理は、TIG ドレッシングとまったく同じであり、主にオランダと英国で研究が行われている。

TIG ドレッシングとの相異は、入熱量が標準で 2 kJ/mm と高いことである。

このため、金属を溶かす量を増大させ、その結果、TIG ドレッシングより良い溶接形状が得られ、しかもTIG ドレッシングより低い硬度とすることができると報告されている。

プラズマ・アークドレッシングの効果を図 5.3, 図 5.11 および図 5.12 に示す。

図 5.12 は海水中の試験結果であるが、この結果は図 5.11 の空気中と同じとなっている。

プラズマ・アークドレッシングは、平均的に約40%の疲労強度の増加の効果が認められる。

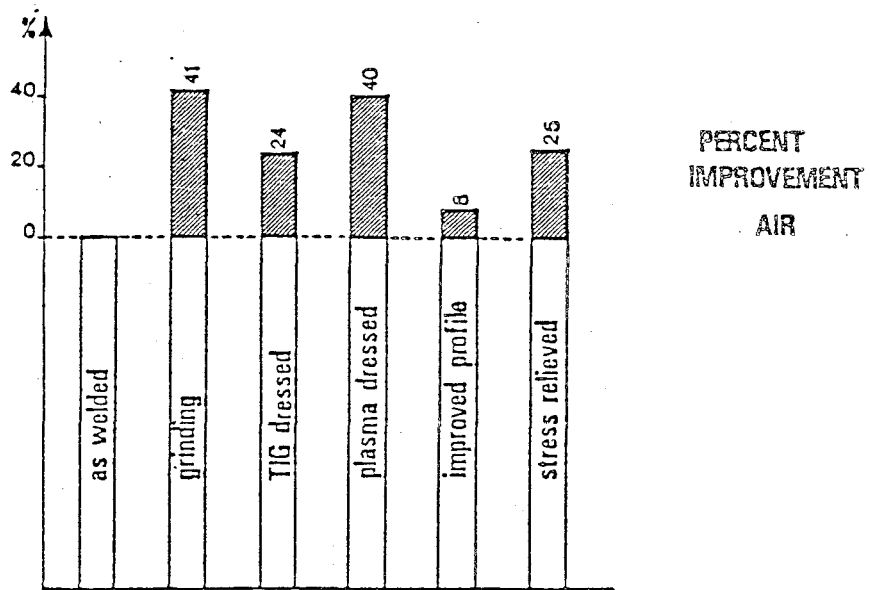


Figure 14. Improvement in air; Dutch program

☒ 5. 1 1

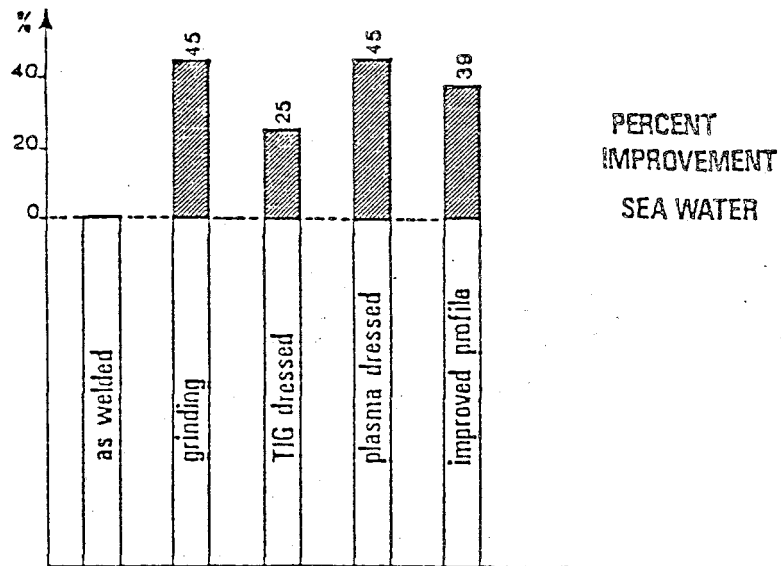


Figure 15. Improvement in sea water; Dutch program

☒ 5. 1 2

(4) ハンマーピング

この方法は、半球のチップの付いたエアハンマーにより溶接止端部の表面に塑性変形を与え、圧縮の残留応力を導入するものである。

図 5.2に英国で行われた試験結果を示すが、ハンマーピングの効果は非常に大きく120 %となっている。

しかしピーニング法は一般にいられているが、過度の施工は溶接表面にくぼみや割れを生じさせ疲労強度を低下させるので、施工上、十分に注意する必要がある。

ECSCの共同研究では、腐食環境下でのハンマピーニングの効果については試験を行っていない。

(5) 溶接法の改良

池田、出納らによれば、開発した水平すみ肉専用被覆アーク溶接棒 (LBF62) によると、溶接止端部をゆるやかに改善することができ (表 5.2, 表 5.3) HT-80鋼リブ十字継手は従来の溶接棒 (LB62F) によるものと比較し、 2×10^6 回疲れ強さは応力比 $R=0.6$ の場合 2.3kg/mm^2 (10.7→13.0), 応力比 $R=-1$ の場合 5.7kg/mm^2 (15.4→21.1) 向上していることを報告している。

また、西岡らはHT80リブ十字すみ肉継手において低水素溶接棒L-80で溶接した上に試作ライムチタニア系溶接棒 F60で化粧盛すると、両振曲げで17%、片振引張で29%疲れ限度を向上させたと報告している。

表 5.2 溶着金属の化学成分と機械的性質

| 溶接棒 | 化 学 成 分 (%) | | | | | | | 機 械 的 性 質 | | |
|-------|-------------|------|------|-------|-------|------|------|----------------------------------|-------------------------------------|----|
| | C | Si | Mn | P | S | Mo | Ni | σ_s kg/mm ² | σ_B 伸び kg/mm ² | % |
| LBF62 | 0.055 | 0.24 | 1.42 | 0.015 | 0.010 | 0.38 | — | 54 | 62 | 29 |
| LB62F | 0.089 | 0.52 | 1.01 | 0.011 | 0.007 | 0.30 | 0.71 | 55 | 67 | 28 |

表 5.3 止端部形状測定結果

| 溶接棒 | 止端半径 (mm) | | | | フランク角 (°) | | |
|-------|--------------------------------|--------------|---------------------|--|----------------|-----------------------|--|
| | $\rho_{\min} \sim \rho_{\max}$ | $\bar{\rho}$ | $\bar{\rho}_{\min}$ | $\bar{\theta}_{\min} \sim \bar{\theta}_{\max}$ | $\bar{\theta}$ | $\bar{\theta}_{\max}$ | |
| LBF62 | 0.7 ~ 9.0 | 4.4 | 2.3 | 20 ~ 46 | 32 | 37 | |
| LB62F | 0.2 ~ 3.0 | 1.1 | 0.5 | 32 ~ 80 | 52 | 62 | |

最近、国内の溶接棒メーカーが相次いで同種の溶接棒の開発を行っており、実構造においても相当使用されて来ている。

しかし、この方法は、溶接姿勢が下向きの場合にしか使用できないという制限がある。

(6) 熱による応力除去

溶接後の熱処理による応力除去は、溶接中に入る局所的な引張り応力の除去による有益な効果を期待して行われる。

しかし、この方法は、繰り返し荷重が溶接部に全引張り応力が生じる場合にしか疲労強度を増加することができない。

溶接継手の応力除去の効果について ECSC の共同研究の中で英国、オランダとドイツで試験が行われており、その結果を図 5.3、図 5.11 に示す。

試験内容には、多くのバリエーションがあったが、気中の疲労挙動に応力除去が明らかに有益な効果と認められるのは、変動荷重が圧縮となる部分のみである。

$R = -1$ で応力除去の効果は 20～30% で $R = 0$ でかなりの増加が認められる。

しかし、海中の試験では、 $R = 0$ で大巾に効果が消え、 $R = -1$ ではバラツキが大きく、いくつかのケースでは AW (as weld) の試験結果より疲労寿命が低下している。

したがって、海洋構造物に、この方法を適用するには疑問が残る。

5.3 疲労強度改善方法の適用と限界

多くの試験結果から、幾くつかの方法は、疲労強度の改善に大きな効果があることが明らかになった。しかし、これらの方法の実行にまったく問題のない分けでもない。

第一の問題は装置である。大部分の装置は大きく、使用の妨げになる可能性がある。したがって、使いやすいか否かが使用上の制限となる。

また、野丁場での作業ということも付加的な問題となろう。

例えば、すき間風は TIG または プラズマドレッシング を用いる場合には適当なガスシールドの条件を保持するのを困難とする等。

第 2 の問題点は検査方法である。既に指摘したようにグラインダー仕上げ深さ (0.5 ~ 1.0 mm) は検査規準として適当である。しかし、TIG や プラズマドレッシング 法においては、入熱量が制御すべきファクターとなる。

入熱量を確認する方法としては、溶接施工試験と同様に“再融溶施工試験”というようなものが必要となろう。

施工費に関連し、溶接後の改善は以下の 2 つの条件を考慮し、その採用を考えるべきである。

1) 疲労寿命を延すことは、経験的に溶接の補修があることも含め初め仮定したより、かなり高い応力が発生することを考慮する必要がある。

2) 高張力鋼の疲労強度の増加率。

5.4 改善方法のコスト

疲労強度改善方法を選定する場合、投資効率を比較検討する必要がある。

ECSCの研究の中でベルギーの CMR (Centre de Recherches Metallurgiques) がこの問題を担当しており、その結果は表 5.4に示す。

表 5.4

Table 8. Relative costs of improvement methods (22):

| Improvement technique | Relative cost | Work rate m of weld/hour |
|----------------------------|---------------|--------------------------|
| TIG dressing | 1 | 2.5 |
| Light toe grinding | 3 | 2.5 |
| Peening | 3 | 2.5 |
| Full profile burr grinding | 15 | 0.5 |

この問題について Harrison は、既に試算結果を報告しているが上表と良く一致している。

しかし、最近、Knight. と Boothの研究成果によれば、ディスクグライダーとバーグラインダー仕上げは同程度の疲労強度の改善効果であるが、ディスクグライダー仕上げは、バーグラインダー仕上げの1 / 6の時間で施工できること明らかにしている。したがって、ディスクグライダー仕上げは、ピーニングと同程度の投資効率となる。

5.5 実構造での具体例

国内で製作された大型のジャケットの格点部の溶接詳細について紹介し、現状での静的および疲労の強度改善方法について述べる。

大型ジャケットの例として以下の2つをあげる。

1) North Rankin`A` Jacket

2) elf Aquitaine norge AS

図 5.13 にNorth Rankin`A` Jacketの標準溶接詳細を示す。

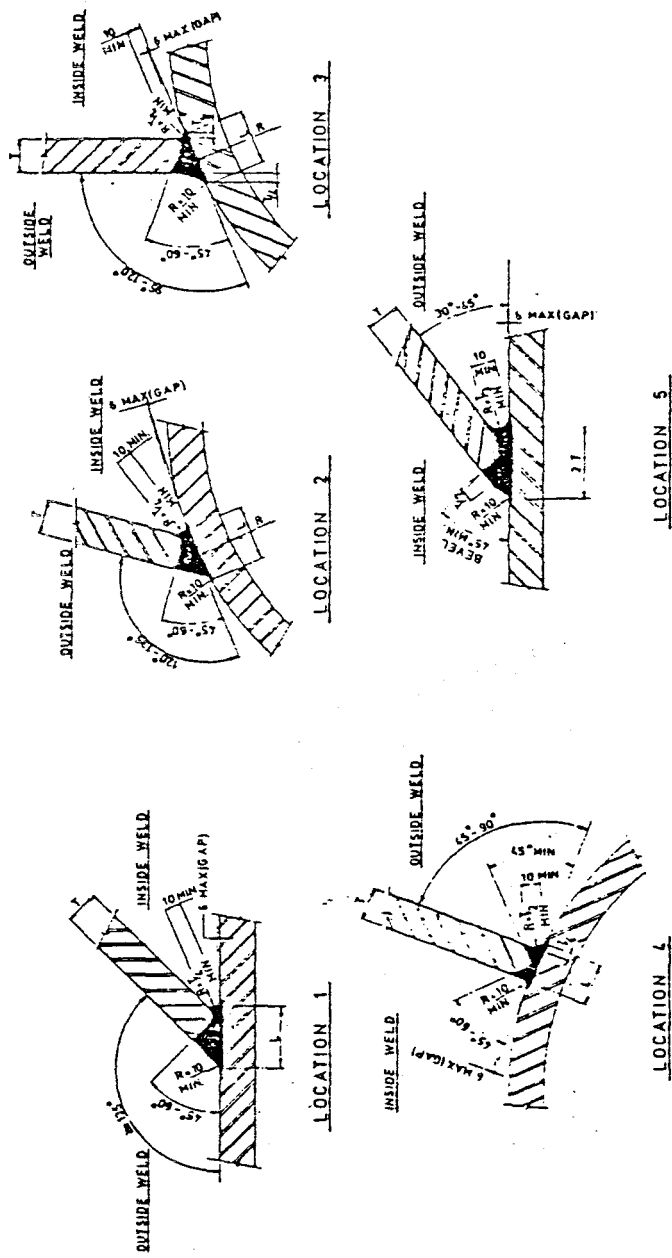
また、図 5.14 にelf Aquitaine norge ASの標準溶接詳細を示す。

2つの具体例から主要な格点部は、溶接ビードは全体がなめらかにグラインダー仕上げされていることが分る。

また、溶接ビードの仕上げ形状は、16mmφ又は20mmφのデスクを当て1mmφのワイヤが通ってはならないという厳しいものである。

図 5.15 はテンションレグの実例である。Conoco Hutonの隅肉溶接の仕上げ要領を示す。一部には、溶接の止端部を仕上げる方法も採用されている。

以上の事例から実構造での静的強度および疲労強度の改善方法としては、グラインダー仕上げが主であり、しかも溶接ビード全体をなめらかに仕上げるもので、これは改善効果の確実性と検査の容易さからきているものと考えられる。

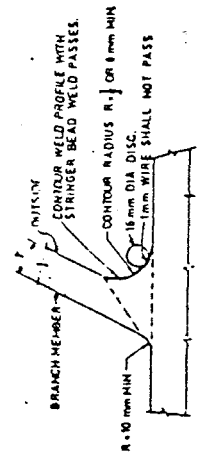


EDGE PREPARATION FOR WELDING DIAGONALS TO CAN WHERE JOINT IS ACCESSIBLE FROM BOTH SIDES

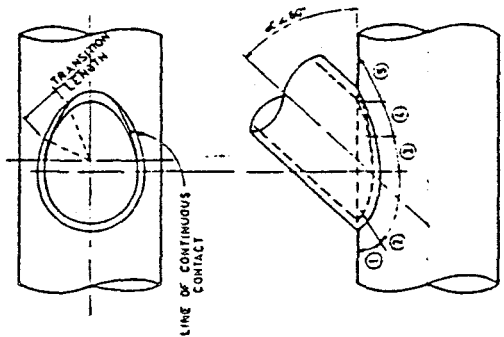
FIG. 34-9

WELD PROFILE REQUIREMENTS

- 1. TYPE B CONTOUR SHOWN THIS DWG.
- 2. TYPE I CONTOUR PROFILE IS SATISFACTORY WHEN ONE 11mm WIRE WILL NOT PASS UNDER IT.



TYPE III CONTOUR PER D11-79.



JOINT ELEVATION (TYP)

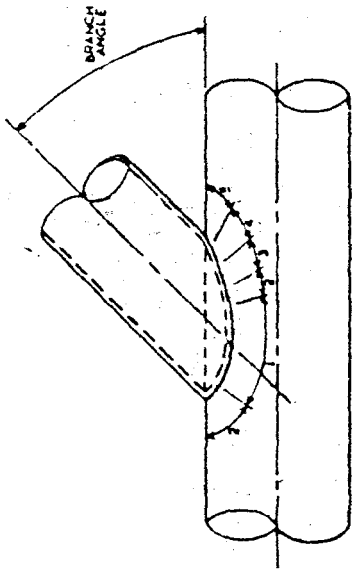
NOTES: 1. TRANSITION FROM ONE DETAIL TO ANOTHER TO BE BY A GRADUAL UNIFORM BEVEL PREPARATION AND WELD SURFACE PROFILE

2. DIMENSIONS REQUIRED

CRITICAL AREAS FOR UNDERCUT
 GIVEN FULL CIRCUM
 TO SMOOTH PROFILE
 WHERE SPECIFIED

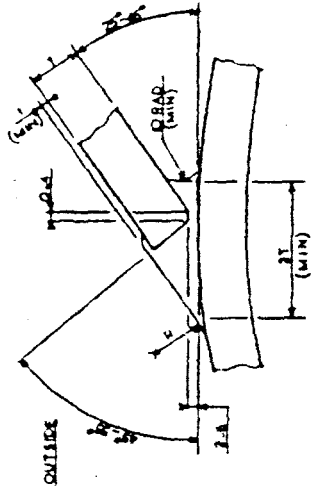


3. FOR 30°-45° SEE LOCATIONS 1, 2 & 3



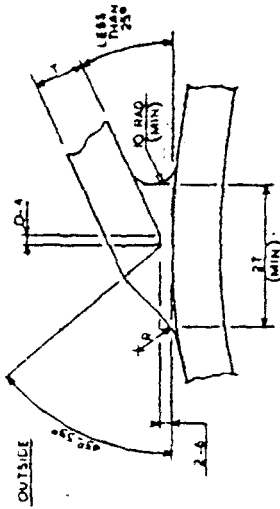
DETAIL 1

EXAMPLE SHOWING LOCATIONS WHERE NUMBERED WELD DETAIL TYPES MAY BE USED (TRANSITIONS BETWEEN TYPES SHALL BE GRADUAL)



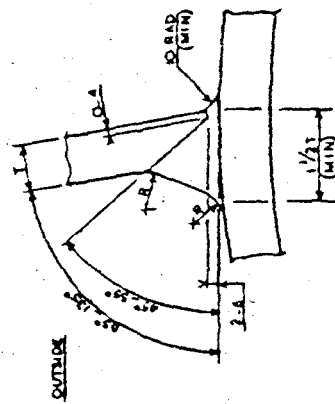
TYPE 2

LOCAL DIHEDRAL $\phi = 125^\circ - 155^\circ$



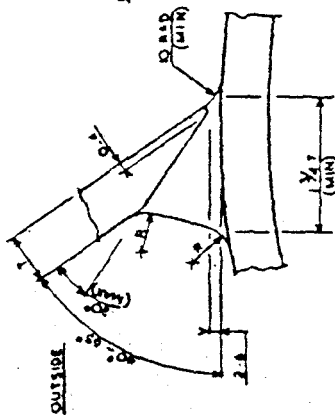
TYPE 1

LOCAL DIHEDRAL $\phi = 155^\circ - 180^\circ$



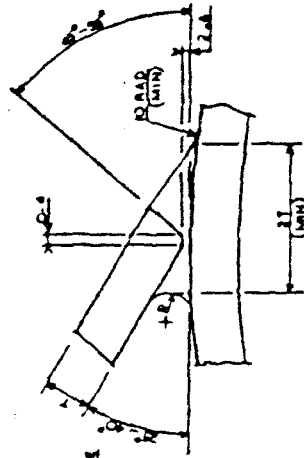
TYPE 3

LOCAL DIHEDRAL $\phi = 85^\circ - 135^\circ$



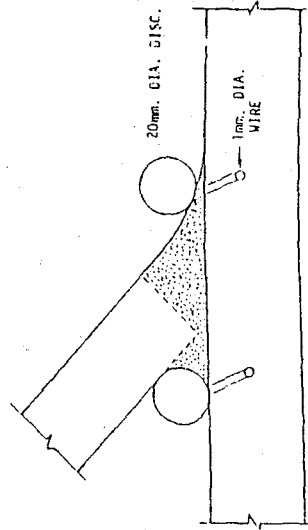
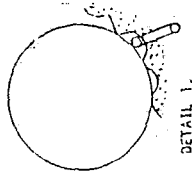
TYPE 4

LOCAL DIHEDRAL $\phi = 40^\circ - 85^\circ$



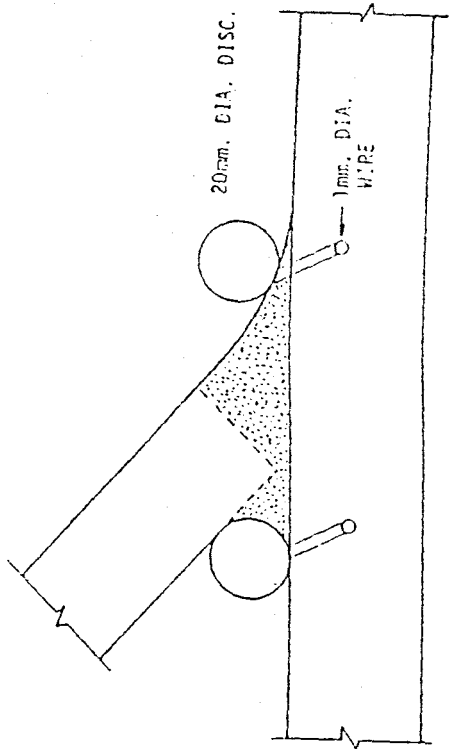
TYPE 5

LOCAL DIHEDRAL $\phi = 35^\circ - 40^\circ$



MEASURE WELD PROFILE WITH A 20mm DIAMETER METAL DISC. CHECK WITH A WIRE OF 1mm. DIAMETER. IF THE WIRE EASILY PASSES UNDER THE METAL DISC. REPAIR BY GRINDING OR ADDING WELD METAL.

R = 1/2 MIN



MEASURE WELD PROFILE WITH A 20mm DIAMETER METAL DISC. CHECK WITH A WIRE OF 1mm. DIAMETER. IF THE WIRE EASILY PASSES UNDER THE METAL DISC- REPAIR BY GRINDING OR ADDING WELD METAL.

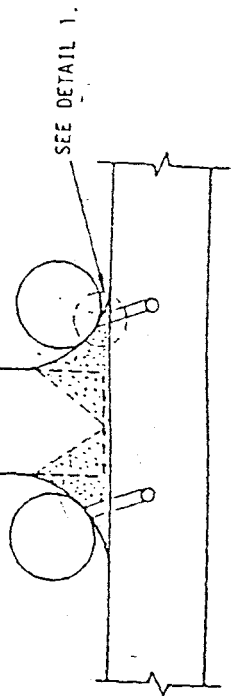
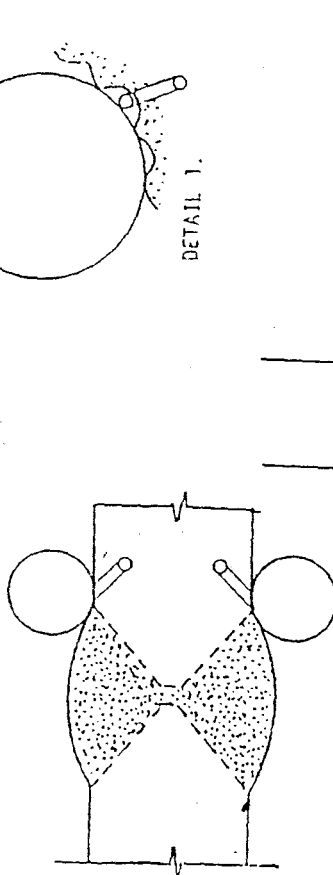
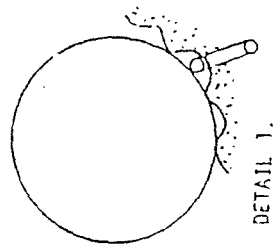
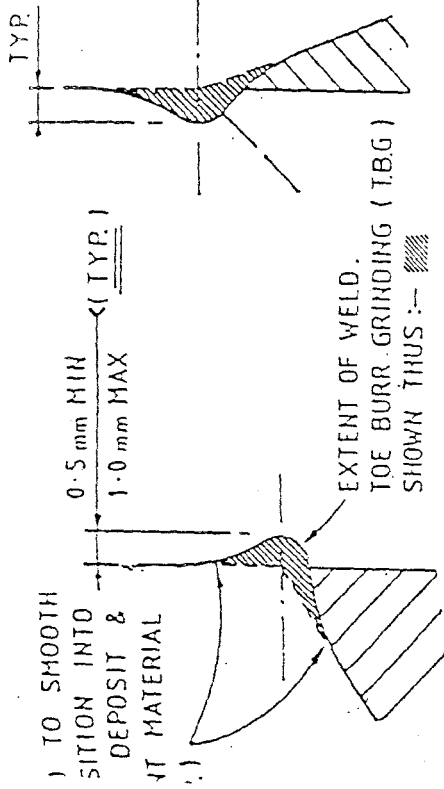
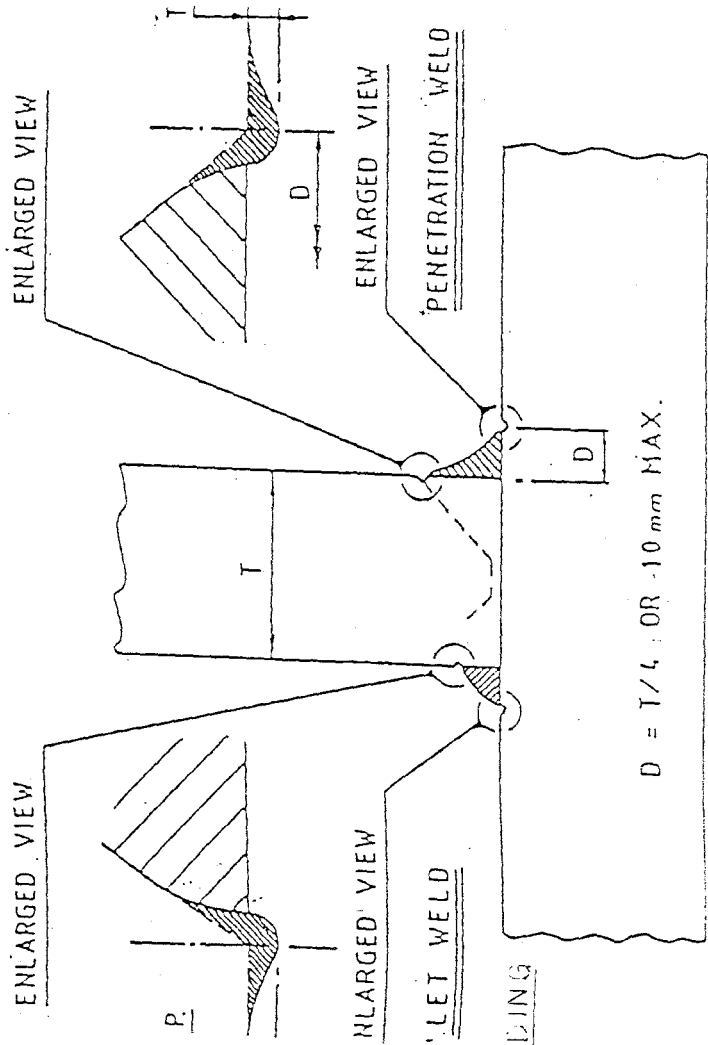


FIGURE 6 WELD PROFILE MEASUREMENT

5.15 CONOCO Huton (ペンションリグ) 隅肉溶接の仕上げ



EXTENT OF WELD TOE BURR GRINDING (T.B.G) SHOWN THUS :- [hatched area]



WELD TOE GRINDING REQUIREMENT

$$D = T/4 \text{ OR } 10 \text{ mm MAX.}$$

NOTES:

1. MINIMUM GRINDING DEPTH INTO THE PARENT PLATE IS TO BE 0.5mm. THE MAXIMUM GRINDING DEPTH SHALL BE 1.0mm. THE BASE MATERIAL SHALL NOT BE OVERGROUND.
2. SPECIFIC WELDS, AS DETAILED ON THE CONSTRUCTION DRGS, SHALL REQUIRE GRINDING OF ALL WELD TOES.

REFERENCE

1. Gurney, T. R. : Fatigue of welded structures, 2nd edition, Cambridge University Press, 1979.
2. Signes, E. G. et al. : Factors affecting the strength of welded high strength steels. Brit. Weld. J., Vol. 14, No. 3, pp. 108-116, March 1967.
3. Maddox, S. J. : Fatigue crack propagation data obtained from parent plate, weld metal and HAZ in structural steels. Weld. Res. Int., Vol. No. 1, 1974.
4. Maddox, S. J. : An analysis of fatigue cracks in fillet welded joints. Int. J. Frac., Vol. 11, No. 2, pp. 221-243, April 1975.
5. Knight, J. W. : Improving the fatigue strength of fillet welded joints by grinding and peening. Weld. Inst. Rep. 8/1976/E.
6. Harrison, J. D. : Techniques for improving the fatigue strength of welded high strength steels. Weld. Inst. Rep. C 215/7/1968.
7. Harrison, J. D., and Hale, N. P. : A summary of techniques for improving the fatigue strength of welded structures and an estimate of their costs. The welding Institute Contract Report C215/12/69. September 1969.
8. Kado et al. : Influence of the conditions in TIG dressing on fatigue strength in welded high tensile strength steels. IIW Doc.XIII-771-1975.
9. Hanzawa, M., Yokota, H., Ishiguro, T., Takashima, H., Kado, S., Tanigaki, T. and Hashida, Y. : Improvement of fatigue strength in welded high tensile strength steels by toe treatment. IIW-Document XIII-829-77.
10. Haagensen, P. J. : Effect of TIG dressing on fatigue performance and hardness of steel weldments. ASTM Symp. on Fatigue Testing of Weldments, Toronto, May 1977.

11. Haagensen, P. J. : TIG dressing of steel weldments for improved fatigue performance. OTC Paper 3466, April 1979.
12. Kado, S. et al. : The improvement of fatigue strength in welded high tensile strength steels by additional weld run with coated electrodes. IIW Doc. XIII-772-75.
13. Ikeda, K. et al. : Improvement of fatigue strength of fillet welded joint for 80kg/mm high strength steel. Trans. Jap. Weld. Soc. Vol. 7, No. 2, Sept. 1976.
14. Kobayashi, K., Matsumoto, S., Tanaka, M., Funakoshi, T. : Sakamoto, N. and Shinkawa, K., Improvement in the fatigue strength of fillet welded joint by use of the new welding electrode. IIW Document XIII-828-77.
15. Booth, G. S. : The effect of mean stress on the fatigue lives of ground or peened fillet welded steel joints. Weld. Inst. Rep. 34/1977/E.
16. Booth, G. S. : Constant amplitude fatigue tests performed on welded steel joints in air. Paper 4, Select Seminar on European Offshore Steels Research. The Welding Institute, Abington Hall, Cambridge U. K. 27-29 Nov. 1978.
17. Booth, G. S. : Constant amplitude fatigue tests performed on welded steel joints in sea water. Ibid., Paper 9.
18. deBack, J., Vaessen, G., et al. : Fatigue and corrosion fatigue behaviour of offshore steel structures. 7210-KB/6/602 (J. 7. 1f/76) Final report (incomplete draft) Oct. 1980.
19. Olivier, R. and Buxbaum, O. : Abschlussbetrag, Vertrag Nr. 7210-KB/1/102. Untersuchungen zur Korrosionsermudung an Offshore-Konstruktionen, Sept. 1980.
20. Minner, H. H., Seeger, T. : Investigations on the fatigue strength of welded and TIG dressed high strength steels. IIW-Document No. XIII-912-79.

21. Minner, H. H. and Seeger, T. : Fatigue strength of welded beams of high strength steels. Interim report. IIW Doc. XIII-951-80.
22. Simon, P. and Bragard, A. : Fatigue strength of structural steel and its improvement. CMR report, Convention No. 6210-45/2/202, 1978.
23. Haagensen, P. J., d'Erasmus, P. and Pettersen, B. : Fatigue performance in air and sea water and fracture toughness on TIG dressed steel weldments. Offshore steels research seminar, Cambridge, Nov. 1978.
24. Haagensen, P. J. : Fatigue strength TIG dressed welded steel joints. Steels in Marine Structures, ECSC Conf., Paris, Oct. 5-8, 1981.
25. Haibach, E. : Die Schwingfestigkeit von Schweissverbindungen aus der Sicht einer örtlichen Beanspruchungsmessung. Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, Report No. FB-77, 1968.
26. Orjasater O. et al. : Planning and statistical analysis of fatigue tests. SINTEF Tech. Note, 1979-10-24 (in Norwegian) .
27. Frank, M. and Fisher, W. : The fatigue strength of welded cover plated beams. Fritz Engineering Laboratory, Rep. 334. 1, Mar. 1969.
28. Anon. : The method of TIG dressing Welding in the World, Vol. 14, No. 3/4, 1978.
29. Munch, O., Stress concentration factors of TIG, dressed welds, SINTEF Technical Note, May 1978.
30. 溶接継手の止端研削による疲れ強さ向上法, JSSC VOL. 12 No. 126, 1976-6.
31. Welding Research International, Vol. 8, No. 1, 1978.
32. 西岡邦夫, 山川純雄 : 高張力鋼溶接継手の疲労強度向上法に関する一試み, FS-239-46.