

JAERI-M
88-150

摩擦圧接法によるニオブ合金／
ステンレス鋼異材継手の開発（1）

1988年8月

菊地 泰二・河村 弘

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

摩擦圧接法によるニオブ合金／ステンレス鋼異材継手の開発(1)

日本原子力研究所東海研究所技術部

菊地 泰二・河村 弘⁺

(1988年7月20日受理)

ニオブ合金とステンレス鋼を繋ぐ場合、従来はニクロブレージング法により行なっていたが、接合部の強度は、母材の強度に比べて劣る。そこで、摩擦圧接法を利用してニオブ合金(Nb-1%Zr)とステンレス鋼(SUS304)との異種金属継手材(以下、異材継手という。)の試作開発を行った。

摩擦圧接箇所の各種強度試験(常温、300°C、500°Cおよび700°Cの各温度における引張試験、ねじり疲労試験、バースト試験)、金相観察およびXMA観察を実施した。

その結果、この摩擦圧接継手材の機械的強度は、ブレージングによる接合部の強度よりも強く、ほぼ接合母材に匹敵する値が得られ、異材継手としての使用に耐えうる特性を有していることが明らかになった。

Development of Niobium Alloy/Stainless Steel Joint
by Friction Welding (1)

Taiji KIKUCHI and Hiroshi KAWAMURA⁺

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

(Received July 20, 1988)

The niobium alloy and stainless steel have been jointed by the micro-brazing method generally. However the strength of the jointed part is weaker than that of the mother material. Therefore we developed the niobium alloy(Nb-1%Zr)/stainless steel(SUS304) transition joint by the friction welding method. As the tests for the development. We conducted the mechanical tests (tensile test at room temperature, 300°C, 500°C and 700°C, torsion fatigue test and burst test), metallographical observation and electron prove X-ray microanalysis observation.

Those tests proved jointed part by the friction welding had enough properties for general uses.

Keywords: Friction Welding, Nb1%Zr/SUS304, Tensile Test, Torsion Fatigue Test, Burst Test, Metallographical Observation, XMA Observation

⁺ Department of JMTR Project, Oarai Research Establishment

目 次

1. 序 論	1
2. 摩擦圧接法	3
2.1 原 理	3
2.2 條 件	3
3. 性能評価	8
3.1 引張試験	8
3.2 ねじり疲労試験	9
3.3 バースト試験	10
3.4 金相観察	11
3.5 XMA 観察	11
4. 結 論	28
5. あとがき	29
謝 辞	29
参考文献	30

C o n t e n t s

1. Introduction	1
2. Method of friction welding	3
2.1 Principle	3
2.2 Conditions	3
3. Evaluation of properties	8
3.1 Tensile test	8
3.2 Torsion fatigue test	9
3.3 Burst test	10
3.4 Metallographical observation	11
3.5 XMA observation	11
4. Conclusion	28
5. Concluding remarks	29
Acknowledgements	29
References	30

List of Tables

- Table 1 Materials combination of friction welding
Table 2 Chemical compositions of Nb-1%Zr and SUS304
Table 3 Physical properties of Nb-1%Zr and SUS304
Table 4 Results of tensile test of transition joints (type A & B)
at 20°C
Table 5 Results of tensile test of transition joints (type C & D)
at 700°C
Table 6 Results of tensile test of transition joints (type E) at 20°C
Table 7 Results of tensile test of transition joints (type E) at 300°C
Table 8 Results of tensile test of transition joints (type E) at 500°C
Table 9 Results of torsion fatigue test
Table 10 Results of burst test

List of Figures

- Fig. 1 Jointing methods between Nb-alloy tube and stainless steel tube
Fig. 2 Shapes of Nb-1%Zr and SUS304 for friction welding
Fig. 3 Rodlike Specimens of tensile test at 20°C (type A)
Fig. 4 Tubal specimens of tensile test at 20°C (type B)
Fig. 5 Rodlike specimens of tensile test at 700°C (type C)
Fig. 6 Tubular specimens of tensile test at 700°C (type D)
Fig. 7 Appearance of type A before tensile test
Fig. 8 Appearance of type A after tensile test
Fig. 9 Appearance of type B before tensile test
Fig. 10 Appearance of type B after tensile test
Fig. 11 Appearance of type C before tensile test
Fig. 12 Appearance of type C after tensile test
Fig. 13 Appearance of type D before tensile test
Fig. 14 Appearance of type D after tensile test
Fig. 15 Rodlike specimens of tensile test at 20°C, 300°C and 500°C (type E)
Fig. 16 Appearance of type E before tensile test (1)
Fig. 17 Appearance of type E before tensile test (2)
Fig. 18 Appearance of type D after tensile test at 20°C
Fig. 19 Appearance of type D after tensile test at 300°C
Fig. 20 Appearance of type D after tensile test at 500°C
Fig. 21 Tensile Test Results of Transition Joint
Fig. 22 Shape of specimen for torsion fatigue test
Fig. 23 S-N curve of torsion fatigue test
Fig. 24 Appearance of specimens before torsion fatigue test (mother material)
Fig. 25 Appearance of specimens before torsion fatigue test (transition joint)
Fig. 26 Appearance of specimens after torsion fatigue test (mother material)
Fig. 27 Appearance of specimens after torsion fatigue test (transition joint)
Fig. 28 Shape of specimen for burst test
Fig. 29 Appearance of specimens before burst test
Fig. 30 Appearance of specimens after burst test

- Fig. 31 Metallographic photograph of transition joints (whole view)
- Fig. 32 Metallographic photograph of transition joints (part of center : A point)
- Fig. 33 Metallographic photograph of transition joints (part of taper : B point)
- Fig. 34 Metallographic photograph of transition joints (part of taper : C point)
- Fig. 35 XMA photograph of transition joints (A point)
- Fig. 36 XMA photograph of transition joints (B point)

1. 序 論

原子炉等の照射試験における各部の構造材において、溶接性等の向上という観点から、各種の異種金属接合材が継手材として開発されてきた。

アルミニウム合金（A1050）／ステンレス鋼（SUS304）¹⁾・ジルコニウム合金（Zry-4）／ステンレス鋼²⁾の異材継手が、摩擦圧接法を利用して、各種の照射研究のために実用化されつつある。

一方、高温工学試験研究炉用被覆粒子燃料の照射挙動研究の一環として、J M T Rでは昭和44年以来ガススイープキャップセルが照射実験に供されてきた。高温工学試験研究炉の原子炉出口冷却材（Heガス）温度は950°C（但し、初期は850°Cである。）を目指しており、被覆粒子燃料コンパクトの温度は最高1,350°C～1,550°Cに達するので、J M T Rにおける照射実験も燃料中心温度1,400°C～1,600°Cを目途としている。

この時の、照射試験用キャップセルの内筒表面温度は1,000°Cとなるが、その温度においても十分な強度を有し、加工性も良く、放射化断面積の小さいNb-1%Zr合金が使用されている³⁾。

しかし、キャップセルの外筒用構造材としては、SUS304ステンレス鋼が一般的に使用されているため、内筒内側から出るスイープを行うガスの給・排気用のNb-1%Zr細管を内筒と外筒の間でSUS304ステンレス鋼細管に接続する必要がある。接続は溶接で行うことが望ましいが、両者の接合はNb-1%Zr合金が活性金属であり、かなり困難である。したがって、現在はFig.1(A)に示すNb-1%Zr製の接管を使い口一接(NICRO BRAZ)により接続を行っている。

近年、長期間照射や高温照射が多く、耐熱性（継手部温度：500～700°C）を考慮すると、口一接継手では強度不足となることも考えられるので、Fig.1(B)に示すようなNb-1%Zr合金をステンレス鋼と圧接した異材継手が必要である。

異種金属の接合方法としては、常温圧接^{4),5)}・拡散接合⁶⁾・摩擦圧接^{7),8)}・爆発圧接^{9),10)}などがある。しかし、今までに摩擦圧接を利用したNb-1%Zr合金とステンレス鋼の圧接例は見当たらない。そのため、Nb-1%Zr合金とステンレス鋼の摩擦圧接での接合継手の試作を実施した。

本報告書は、Nb-1%Zr合金とステンレス鋼の摩擦圧接方法および試作した接合継手材の各種評価試験の結果をまとめたものである。

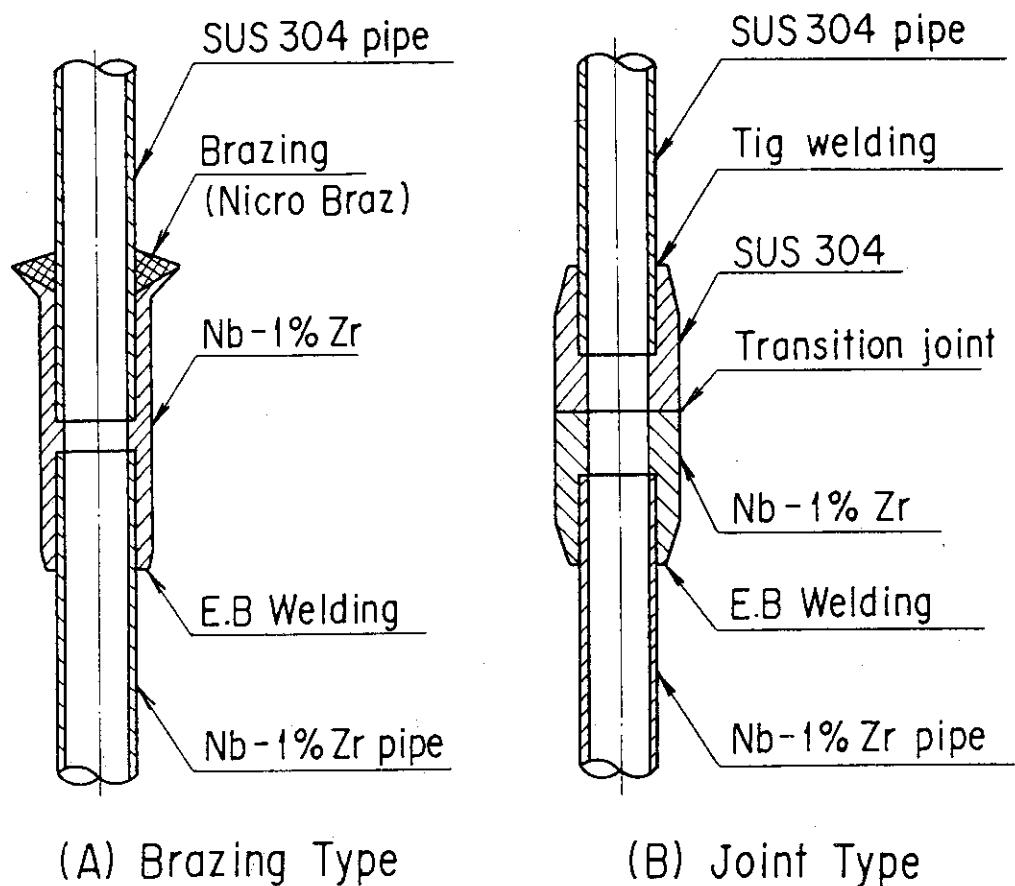


Fig. 1 Jointing methods between Nb-alloy tube and stainless steel tube

2. 摩擦圧接法

2.1 原 理

二つの金属を結合させるのには、両者の表面原子同士を原子間引力の強く作用する距離よりも近接させる方法がある。軟質の塑性変形しやすい金属ならば、常温でも金属表面を強く押し合い、圧縮して結合させる常温圧接法がある。しかし、塑性変形抵抗の大きな金属の表面同士を上述のように原子寸法の程度にまで近接させて結合するには、莫大な力を要するので、材料の変形抵抗を低下させるために、高温に加熱することが必要である。この加熱源として材料間の摩擦熱を利用したものが摩擦圧接法である。

摩擦圧接法は、高速回転下にある金属と静止状態にある異種金属の圧接面に圧力をかけ、接合部を摩擦熱で適当な温度まで上昇させた後、急停止させて相対的な回転をゼロにしてから、圧力を加えて接合する方法である。

摩擦圧接法の長所を以下に示す。

- (1) 接合面は常に閉ざされており、酸化・窒化などのおそれがない。
- (2) 広い範囲の異種金属の圧接が可能である。
- (3) 圧接時間が短かく、作業能率が高いと共に他の部分への熱影響が少ない。
- (4) 圧接条件を選定すれば、一定条件で自動運転が出来るため熟練を要しない。
- (5) 同径および異径断面の接合ができる。

また、摩擦圧接法の短所を以下に示す。

- (1) 両素材の組立て位置の定められている形状のものは、圧接が困難である。
- (2) きわめて薄肉のパイプは接合困難である。
- (3) 圧接後、バリの除去及び切削加工が必要である。

Table 1 は摩擦圧接による各種金属組み合せの適用範囲を示すが、ニオブ合金とステンレス鋼の摩擦圧接については、未実験となっている。摩擦圧接は、アーク溶接や電子ビーム溶接などの溶接法では接合困難な異種金属の組み合せでも接合が可能である。これは、摩擦圧接では塑性流動と固相接合という二つの現象のために、接合温度が低く、金属間化合物が生じにくいためである。

2.2 条 件

ニオブ合金 (Nb-1% Zr) とステンレス鋼 (SUS304) の接合方法としては、40トンプレーキ式摩擦圧接機 (型式: WF-40) により行った。使用した母材及び圧接条件などを以下に示す。

母材の化学成分および物理的性質を Table 2 及び Table 3 に示す。

- (1) 使用母材

ニオブ合金 : Nb-1% Zr (ϕ 15mm)

ステンレス鋼：SUS304（ $\phi 15\text{ mm}$ ）

(2) 圧接条件

ブレーキ法における圧接条件因子は、回転数・摩擦圧力（摩擦推力を素材断面積で除したもの）とアプセット圧力（停止後の推力を素材断面積で除したもの）及びアプセット量（圧接後の寸法と原寸法との差）である。

試作にあたり、予備圧接試験により最適と思われる圧接条件を求め、次いで本圧接を行うことにした。

最適な圧接条件は、予備圧接品について、圧接時に生ずるバリの状態、圧接面の形状及び室温における引張試験の結果より定めることにした。

予備圧接品の引張試験の結果は、母材強度（ 26.6 kg/mm^2 ）に近い値の結果が得られたので、ニオブ合金とステンレス鋼の摩擦圧接は、圧接可能と判断して本圧接に取りかかった。

摩擦圧接の各種条件を以下に示す。

- ① 摩擦圧接法：ブレーキ式
- ② 回 転 数：2,000 rpm
- ③ 摩 擦 圧 力： $15 \sim 20\text{ kgf/cm}^2$
- ④ 圧 接 時 間：0.1 sec
- ⑤ 圧接面寸法： $15\text{ mm } \phi$ 丸棒
- ⑥ 圧接面形状：110度円錐状

また、圧接時の試料形状をFig.2に示す。

Table 1 Materials combination of friction welding

	Aluminium	Aluminium Alloy	Brass	Copper	Iron	Cast Iron	Lead	Molybdenum	Nickel	Nickel Alloy	Niobium	Niobium Alloy	Silver	Silver Alloy	Carbon Steel	Alloy Steel	Stainless Steel	Titanium	Tungsten	Vanadium	Zirconium Alloy	Ceramics
Aluminium	G	G	G	G				G							G	G	G	G		G	G	
Aluminium Alloy	G	G													B		G					G
Brass	G		G	G																		
Copper	G		G	G									G			G	G					
Iron															G							
Cast Iron														G								
Lead							G															
Molybdenum								I										I				
Nickel	G																					
Nickel Alloy										G												
Niobium																	I		I			
Niobium Alloy											G											
Silver			G															I				
Silver Alloy																						
Carbon Steel	G	B		G	G	G									G	G	G	G				
Alloy Steel	G															G	G	G				
Stainless Steel	G	G		G							I				G	G	G	B	I	B		
Titanium	G		G				I					I		G		B	G					
Tungsten																			G			
Vanadium																I						
Zirconium Alloy	G								I								B					
Ceramics	G	G																				

G : Good Welding

B : Brittle Welding

I : Impossible

Table 2 Chemical compositions of Nb-1%Zr and SUS304

[Nb - 1% Zr]

(in wt%)

Element	C	N	O	H	Zr	Fe	Ta	Ti	Si	W
Spec.	<0.01	<0.03	<0.03	<0.002	0.8~1.2	<0.05	<0.1	<0.05	<0.03	<0.05
Results	0.007	0.002	0.009	0.0004	1.02	0.001	0.070	0.001	0.001	0.007
Element	Mo	Ni	Nb	Remarks						
Spec.	<0.1	<0.02	>98.5	ASTM B392-64						
Results	0.003	0.001	Balance	1, 350°C × 90min. Annealed						

[SUS304]

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Spec.	<0.08	<1.00	<2.00	<0.045	<0.030	18~20	8~10.5
Results	0.068	0.48	1.23	0.023	0.023	18.34	8.28
Element	Mo	Ni	Cr	Ni	Cr	Ni	Ni

Table 3 Physical properties of Nb-1%Zr and SUS304

Property \ alloy	Nb-1%Zr	SUS304
tensile strength (kg/mm ²)	26.6	64.0
0.2% yield strength (kg/mm ²)	16.3	32.5
elongation (%)	34.0	62.8
hardness	※ Hv 102	H _B 152
density (gr/cm ³)	8.66	7.82
melting point (°C)	~2,410	~1,410
thermal conductivity (cal/cm ² /sec/°C)	0.10	0.039
coefficient of thermal expansion (°C ⁻¹)	7.3×10 ⁻⁶	16.7×10 ⁻⁶

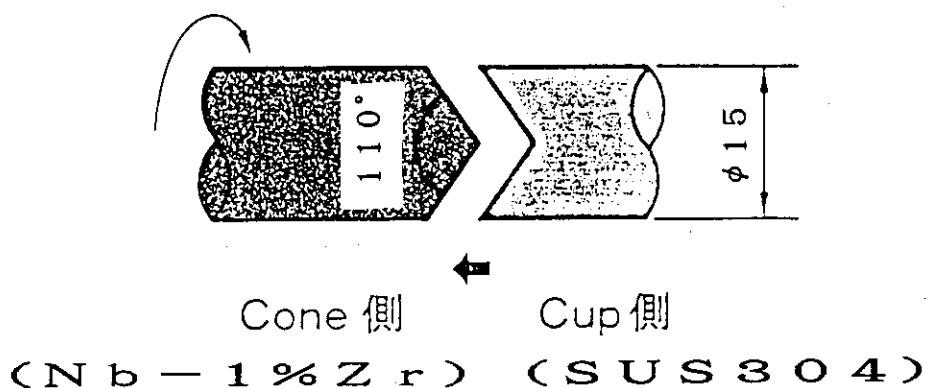
※ Hv 102 ≈ H_B 90

Fig. 2 Shapes of Nb-1%Zr and SUS304 for friction welding

3. 性能評価

今回試作したNb-1%Zr合金とSUS304ステンレス鋼の異材継手は、主として高温照射試験用でNb-1%Zr内筒を使用するキャップセルを利用する予定である。

このため、異材継手が炉内での実用に供し得るかどうかを確認するため、以下に示すような各種の性能評価試験を実施した。

- (1) 引張試験
- (2) ねじり疲労試験
- (3) バースト試験
- (4) 金相試験
- (5) XMA観察

これらの試験結果について以下に示す

3.1 引張試験

引張試験は、5種類(type A~E)の試験片の内いずれかの試験片を用いて、室温・300°C・500°C及び700°Cの各温度について実施した。まず、Type A及びBを用いて室温で、Type C及びDを用いて700°Cで引張試験を行った。室温と700°Cでそれぞれ2タイプの試験片を用いた理由は、実際には管状で使用することが多く、棒状(bar)と管状(pipe)による強度の比較を行うためである。

Type A及びType Bの試験片形状を各々Fig.3及びFig.4に、またType C及びType Dの形状を各々Fig.5及びFig.6に示す。

使用した引張試験機の仕様は下表のとおりである。

項目	室温	700°C
(1) 試験機	アムスラー式油圧堅形	島津オートグラフ
(2) 最大荷重	50トン	10トン
(3) 試験方法	J I S Z 2241	J I S Z 0567

引張試験の結果をTable 4及びTable 5に示す。また、室温引張試験前・後の外観写真は、棒状試験片(Type A)をFig.7と8に、管状試験片(Type B)をFig.9と10に示す。700°C高温引張試験前・後の外観写真は、棒状試験片(Type C)をFig.11と12に、管状試験片(Type D)をFig.13と14に示す。

室温引張試験では、すべての試験片が圧接面から破断している。また引張強さは、棒状試験片で22.12~29.15kg/mm²であり、管状試験片で23.26~26.13kg/mm²である。

棒状試験片と管状試験片における有意な差は認められなかった。また引張強さについては、Nb-1%Zr合金母材強度(26.6kg/mm²)と比べ、平均値で91%~95%であり、母材強度とは

ば同様なデータが得られた。

一方、700°Cでの高温引張試験では、棒状試験片の場合の破断位置はすべて圧接面であるが、管状試験片の場合は、3本のうち2本がNb-1%Zr合金部で破断が生じている。また、引張強さは、棒状試験で12~16 kg/mm²であり、管状試験で21~23 kg/mm²である。通常、継手部の中心を穴ぐりして使用する形状に近い管状試験片は、棒状試験片に比べて約4割高い引張強さが得られた。さらに、引張強さの結果からも判るように、破断位置についても、管状試験はNb-1%Zr合金材部で破断するケースが多いと思われる。

次に、室温と300°C及び500°Cにおける引張試験を実施した。試験片は、いずれの温度条件でもFig.15に示すように平行部の寸法を6 mm φ、つかみ部M12、長さ100 mmのType Eを用い、圧接部は平行部の中央となるような形状とした。

引張試験の条件は、次のとおりである。

- (1) 型 式：インストロン万能試験機（1125型）
- (2) 最大荷重：10ton
- (3) 荷重測定精度：表示荷重の±0.5%
- (4) 速度範囲：クロスヘッド（0.05~500 mm/min）
- (5) 速度精度：±0.1%

引張試験の結果をTable 6からTable 8に示す。また、室温・300°C及び500°Cの各引張試験前・後の外観写真をFig.16から20に示す。

室温引張試験では、すべてNb合金側から破断した。また引張強さは、28.3~31.3 kg/mm²であり、伸びは17.3~18.0%であった。引張強さを母材強度と比較すると、破断箇所からも判るようにほぼ同程度の強度を有している。

300°Cと500°Cの温度における引張試験では、300°Cで3本のうち1本が、圧接箇所から破断している。しかし、300°Cの残り2本と500°C2本は、すべてNb合金側で破断した。また引張強さは、300°Cは18.93（圧接部破断したもの）~21.05 kg/mm²であり、伸びは圧接部で破断したもの除いて18.3%であった。一方500°Cにおいては、引張強さは21.15~21.25 kg/mm²であり、伸びは16.8~17.0%であった。

今まで述べてきた引張強さと温度の関係を示したものを、Fig.21に示す。図より、700°Cにおける棒状引張試験のデータを除くと、Nb-1%Zr合金母材とほぼ同等な引張強さが得られた。

3.2 ねじり疲労試験

ねじり疲労試験片の形状をFig.22に示す。本試験は、夫々の負荷応力を変化させて、疲れ破壊に至るまでの繰返しの回数を実測したものである。また、Nb-1%Zr合金母材（試料No.1~3）と異材継手（試料No.4~6）との比較を行うため、各試験片での試験を行った。

試験片の寸法は平行部を外径8 mmとし、圧接位置は平行部の中央とした。さらに両端部の形状は、試験機に取り付けるために、つかみ部の一部を平滑に加工した。

ねじり疲労試験の方法は以下のとおりである。

(1) 試験機 : シェンク型ねじり疲れ試験機

(2) 繰返しひれ速度 : 3,000 rpm

(3) 負荷応力 : 7.5 kgf/mm²

10.0 kgf/mm²

12.5 kgf/mm²

ねじり疲労試験の結果をTable 9に示す。またFig.23に、ねじり負荷応力(S)と破壊までの繰返し数(N)の関係を示すS-N曲線を示す。

本試験に供せられた試験片の試験前・後の写真を、Fig.24からFig.27に示す。

異材継手の試験結果において、試料No.4は圧接部より疲労破壊したが、試料No.5はNb-1%Zr合金の母材に於いて疲労破壊が生じている。Fig.23のS-N曲線から、圧接継手部の疲労強度は、Nb-1%Zr強度とほぼ同等の強度を有しているといえる。

3.3 バースト試験

バースト試験片の形状・寸法をFig.28に示す。試験片は、Nb-1%Zr合金側に水圧ポンプと接続するネジ加工を行い、SUS304ステンレス鋼側に盲端栓を溶接する構造とした。また、試験片の寸法は内径11mmφ、外径13mmφとし、さらに圧接部位置は試験片平行部の中央になるような形状とした。

バースト試験の方法は以下のとおりである。

(1) バースト試験機：手動水圧ポンプ

(2) 圧力計：ブルドン管式、1.5級

(3) 試験温度：室温

(4) 試験方法：圧力上昇速度は、300kg/cm²までは任意の速度とし、300kg/cm²以上から破壊するまでは10kg/cm²ステップで各ステップ5秒間保持する。

バースト試験の結果をTable 10に示す。

結果から、すべての試験片は圧接部でなくNb-1%Zr合金側で破壊した。破壊応力を一般の薄肉円筒の応力計算式

$$\sigma = P \cdot D / 200t$$

で計算すると、円周方向の応力は34.65~36.85kgf/mm²となり、常温で行った引張試験の結果（Max:29.15kgf/mm²）およびミルシートの値（26.6kgf/mm²）と比べても良好な値となっている。

Fig.29及びFig.30にはバースト試験前・後の試験片の外観写真を示したが、大きな変形は圧接部よりNb-1%Zr合金側に12mmぐらい離れた所から始まり、バーストによる切欠きは10mm程度に達している。

これらの結果より、バースト試験はNb-1%Zr合金からの母材破壊であり、しかも円周方向の破壊応力はNb-1%Zr合金母材の引張強さと同等以上であった。従って、常温における圧接部は十分な強度を有しているといえる。

3.4 金相観察

金相観察は、最終の摩擦圧接条件により製作した供試体について実施した。なお、供試体の表面処理は以下の順番により行った。

(1) アルミナ（ 0.5μ まで）による機械的研磨

(2) SUS 304の電解エッチング

① エッティング液：HCl (31cc) + HNO₃ (1.7cc) + H₂SO₄ (1.0cc)

② エッティング時間：30 Sec. SWAB*

(3) Nb-1%Zrの化学エッティング

・エッティング液：H₂SO₄ (10cc) + H₂O (10cc) + HF (5cc) + H₂O₂ (10cc)

・エッティング時間：30 Sec. SWAB

金相試験は供試体について、Fig.31の全体金相写真に示す位置、すなわち接合部の中心部（A点）と、中心部より外側へ2mm（B点）及び4mm（C点）の位置における圧接界面部を顕微鏡観察するものである。

Fig.31からFig.34は、全体及び圧接界面各部の金相写真である。倍率は全体写真が10倍であり、その他の部分が100倍である。結果から、圧接による歪がNb-1%Zr側に生じており、また一部圧接中心部に未接合部が観察された。今後、さらに圧接条件（形状を含む）の最適化を図ることが必要である。

3.5 XMA観察

圧接界面部における合金元素の分布状態を調べるために、XMAによる定性分析を行った。分析は、金相観察を実施した試験片を用いて行なわれた。

XMA試験機は、日本電子製のX線マイクロアナライザー（型式：JSM-35C）を使用した。測定対象元素は、Nb, C, Fe, Ni, Crの主要5元素であり、電子線の加速電圧は25KVである。また、測定位置は接合継手中心位置（A部）と中心部より5mm外径位置（B部）の圧接境界とする。なお、倍率は1,000倍である。

Fig.35（A点）及びFig.36（B点）にXMA分析結果の写真を示す。結果より、どちらの測定位置においても各測定元素は、圧接界面でシャープな変化を見せており、当初予想した圧接部における金属間化合物の形成層はかなり少なく抑えることができたものと思われる。

* SWAB：表面を脱脂綿でふくこと。

Table 4 Results of tensile test of transition joints (type A & B)
at 20°C

Specimen No	Dimensions(mm)		Tensile strength (kg/mm ²)	Fractured position	Remarks
	dia.	in.dia.			
1.	13.05		24. 67	Welded interface	bar
2.	13.05		22. 12	Welded interface	bar
3.	13.05		29. 15	Welded interface	bar
mean			25. 32		
4.	13.0	5.17	23. 26	Welded interface	pipe
5.	13.0	5.12	23. 36	Welded interface	pipe
6.	13.0	5.17	26. 13	Welded interface	pipe
mean			24. 25		

Table 5 Results of tensile test of transition joints (type C & D)
at 700°C

Specimen No	Dimensions(mm)		Tensile strength (kg/mm ²)	Fractured position	Remarks
	dia.	in.dia.			
7.	10.00		15.00	Welded interface	bar
8.	10.00		16.00	Welded interface	bar
9.	10.01		12.00	Welded interface	bar
mean			14.30		
10.	10.02	5.00	23.00	Nb-1%Zr	pipe
11.	10.00	5.00	21.00	Nb-1%Zr	pipe
12.	10.00	5.00	22.00	Welded interface	pipe
mean			22.00		

Table 6 Results of tensile test of transition joints (type E) at 20°C

Specimen No	Dimensions(mm)		Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Fractured position
	dia.	length			
13.	6.00	40.0	29.64	17.3	Nb-1%Zr
14.	6.00	40.0	31.31	18.0	Nb-1%Zr
15.	6.00	40.0	28.30	18.0	Nb-1%Zr
mean			29.75		

Table 7 Results of tensile test of transition joints (type E) at 300°C

Specimen No	Dimensions(mm)		Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Fractured position
	dia.	in.dia.			
16.	6.00	40.0	21.05	18.3	Nb-1%Zr
17.	6.00	40.0	18.93	1.8	Welded interface
18.	6.00	40.0	20.87	17.3	Nb-1%Zr
mean			20.28		

Table 8 Results of tensile test of transition joints (type E) at 500°C

Specimen No	Dimensions(mm)		Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Fractured position
	dia.	in.dia.			
19.	6.00	40.0	21.22	17.0	Nb-1%Zr
20.	6.00	40.0	21.15	16.8	Nb-1%Zr
mean			21.19		

Table 9 Results of torsion fatigue test

Specimen No	stress (Kgf/mm ²)	fracture cycles	Remarks
1	12.5	7.19×10^4	mother materials (Nb-1%Zr)
2	10.0	8.88×10^5	
3	7.5	1.26×10^7 *	
4	12.5	6.68×10^4	transition joints (welded)
5	10.0	8.23×10^5	
6	7.5	1.93×10^7 *	

(※: Non fracture)

Table 10 Results of burst test

Specimens No.	Dimension (mm)		Pressure at burst (kg/cm ²)	Hoop stress at burst (kg/mm ²)	Burst Position
	I. D	O. D			
1	11.00	13.00	650	35.75	mother materials (Nb-1%Zr)
2	11.00	13.00	630	34.65	
3	11.00	13.00	670	36.85	

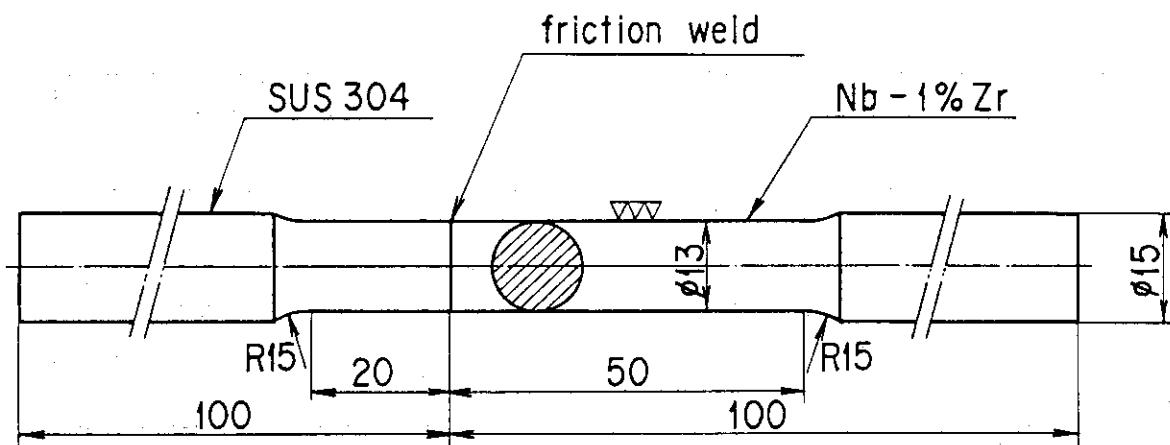


Fig. 3 Rodlike Specimens of tensile test at 20°C (type A)

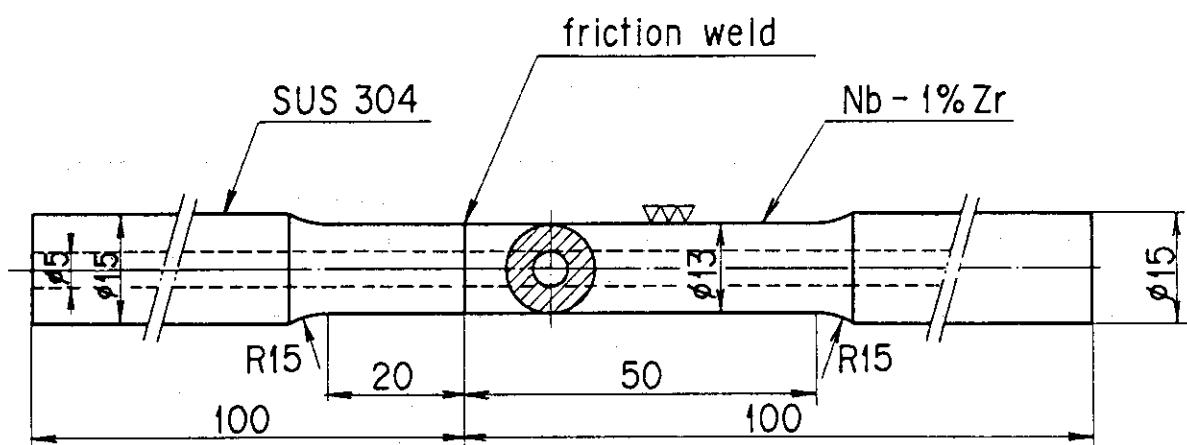


Fig. 4 Tubal specimens of tensile test at 20°C (type B)

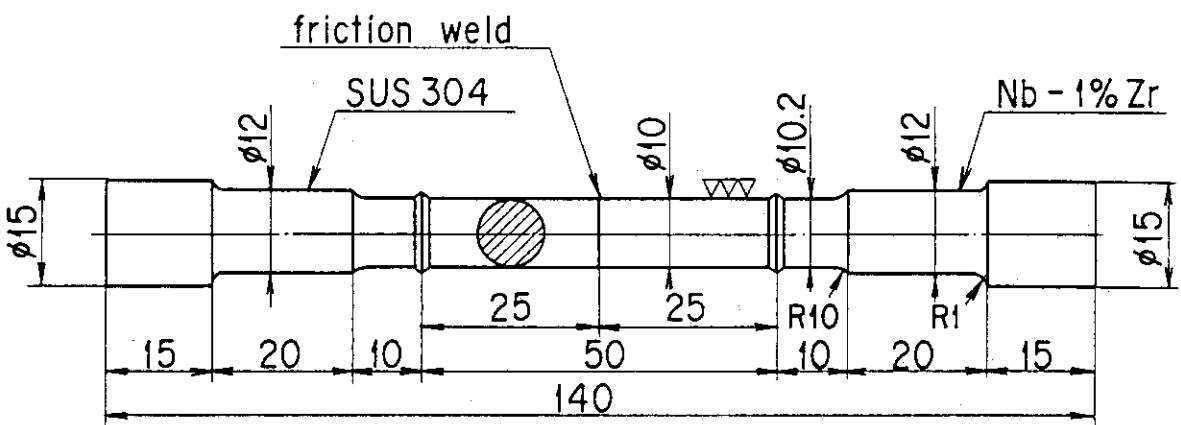


Fig. 5 Rodlike specimens of tensile test at 700°C (type C)

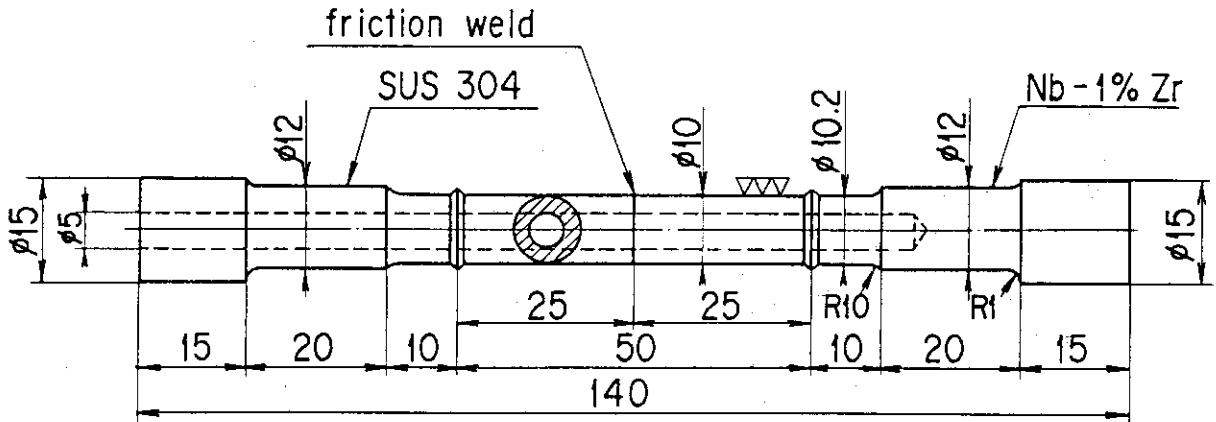


Fig. 6 Tubular specimens of tensile test at 700°C (type D)

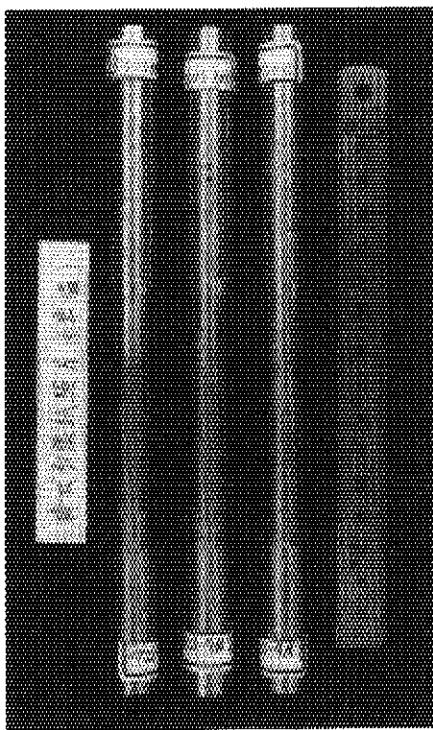


Fig. 7 Appearance of type A before tensile test

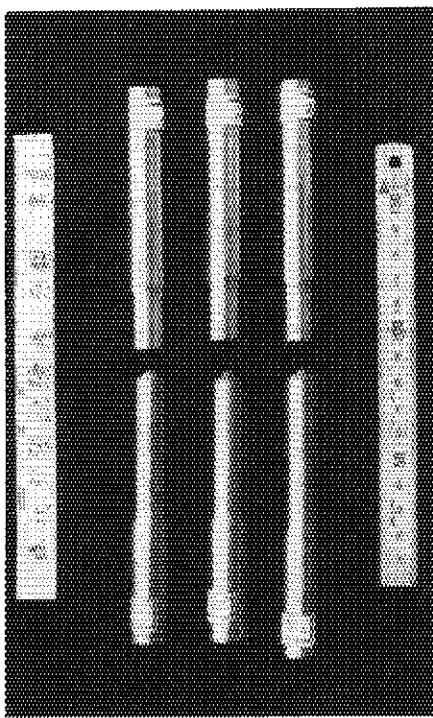


Fig. 8 Appearance of type A after tensile test

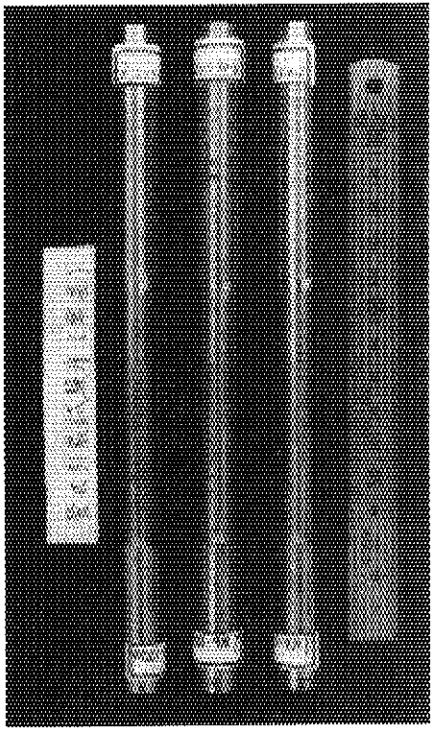


Fig. 9 Appearance of type B before tensile test

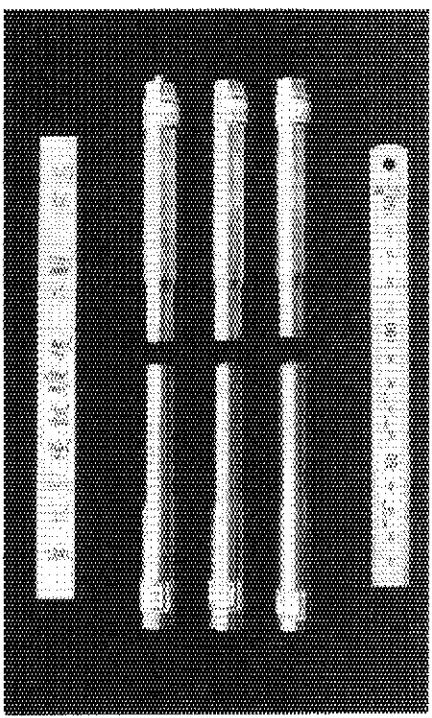


Fig. 10 Appearance of type B after tensile test

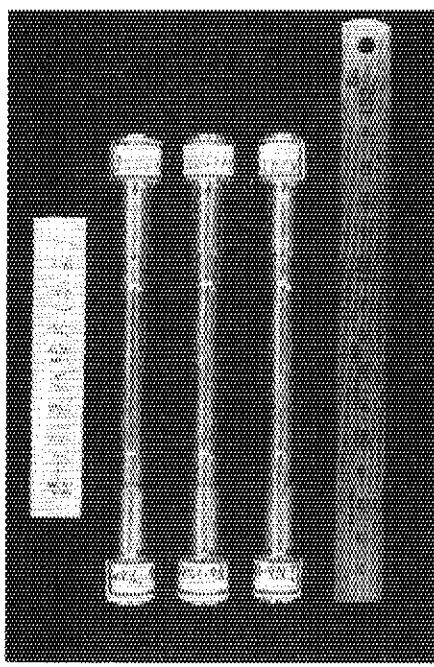


Fig. 11 Appearance of type C before tensile test

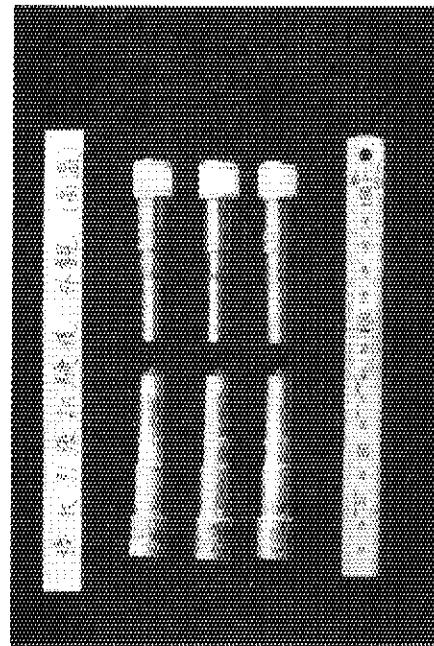


Fig. 12 Appearance of type C after tensile test

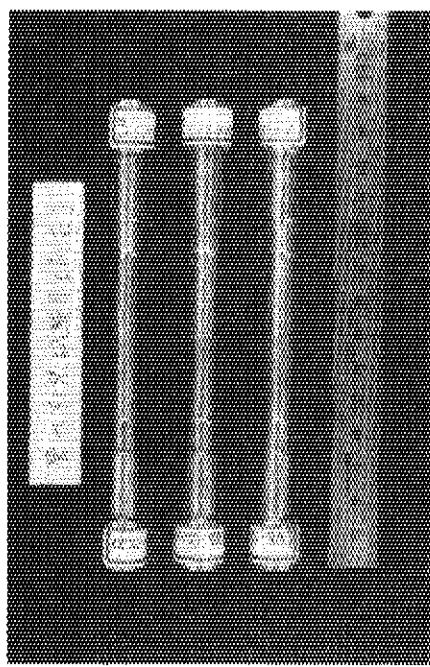


Fig. 13 Appearance of type D before tensile test

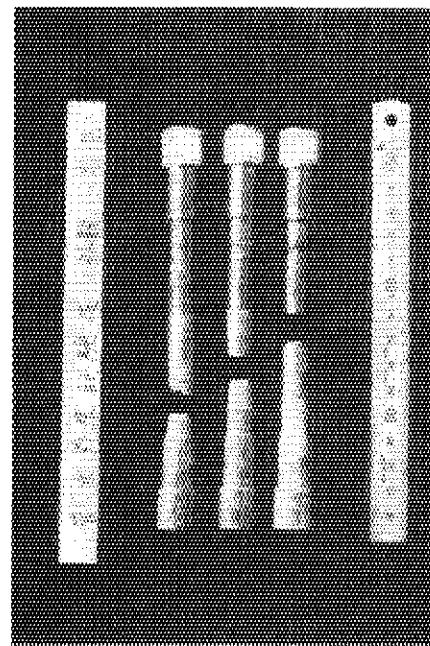


Fig. 14 Appearance of type D after tensile test

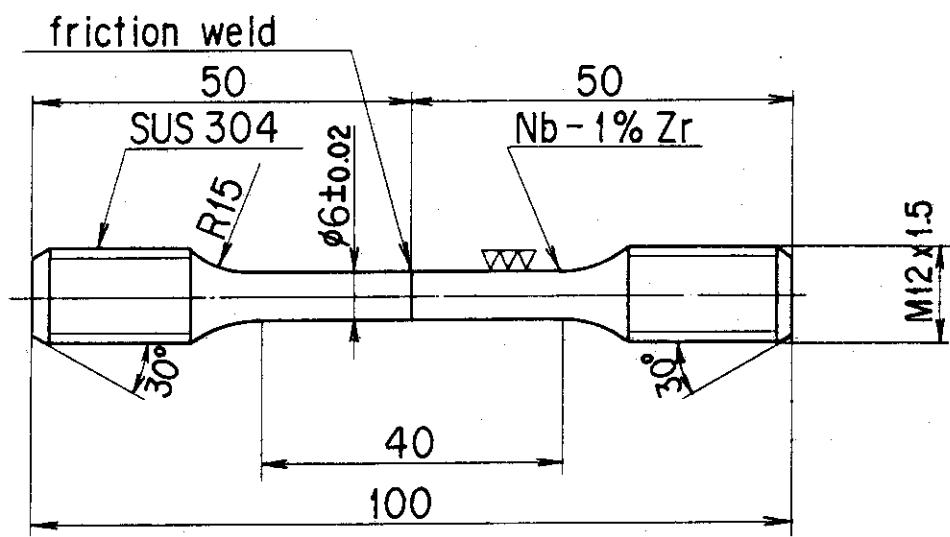


Fig. 15 Rodlike specimens of tensile test at 20°C, 300°C and 500°C
(type E)

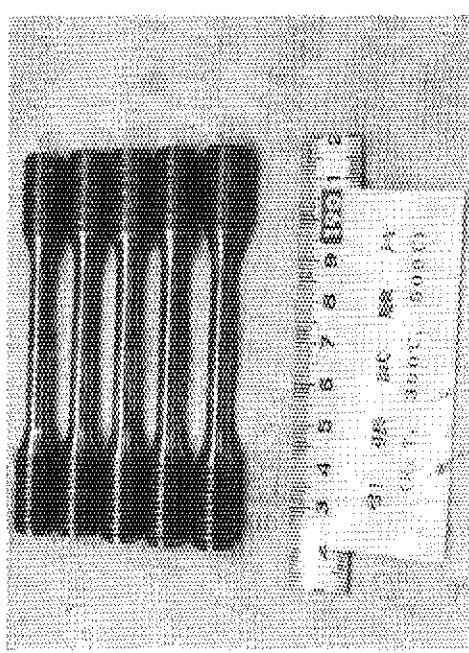


Fig. 16 Appearance of type E before tensile test (1)

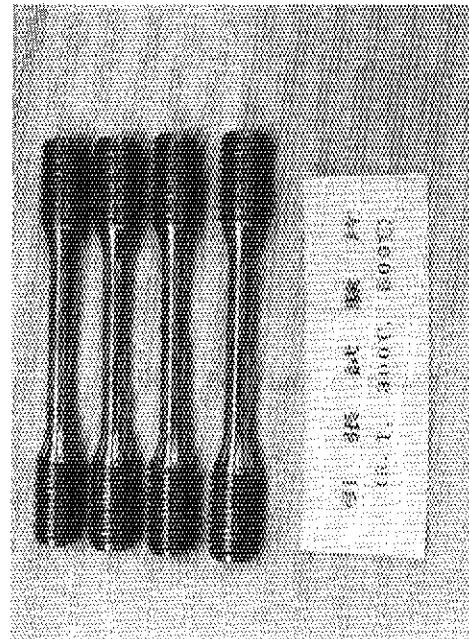


Fig. 17 Appearance of type E before tensile test (2)

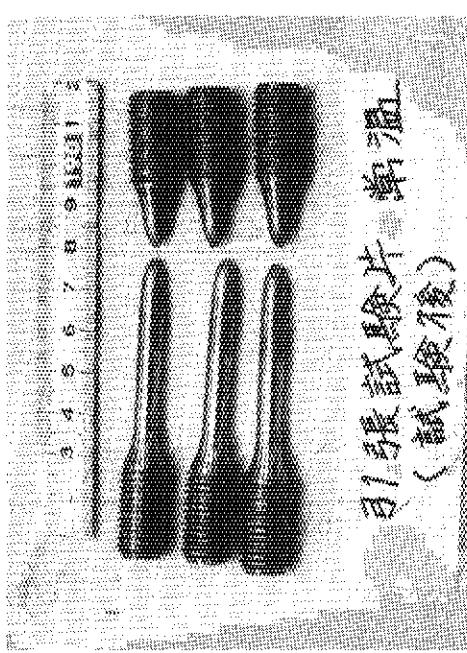


Fig. 18 Appearance of type D after tensile test at 20°C

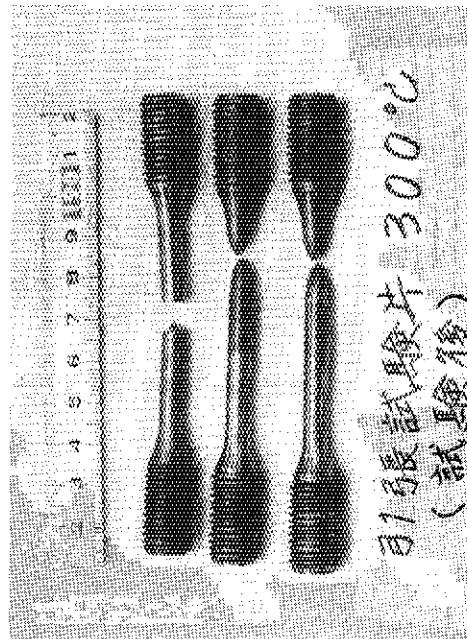


Fig. 19 Appearance of type D after tensile test at 300°C



Fig. 20 Appearance of type D after tensile test at 500°C

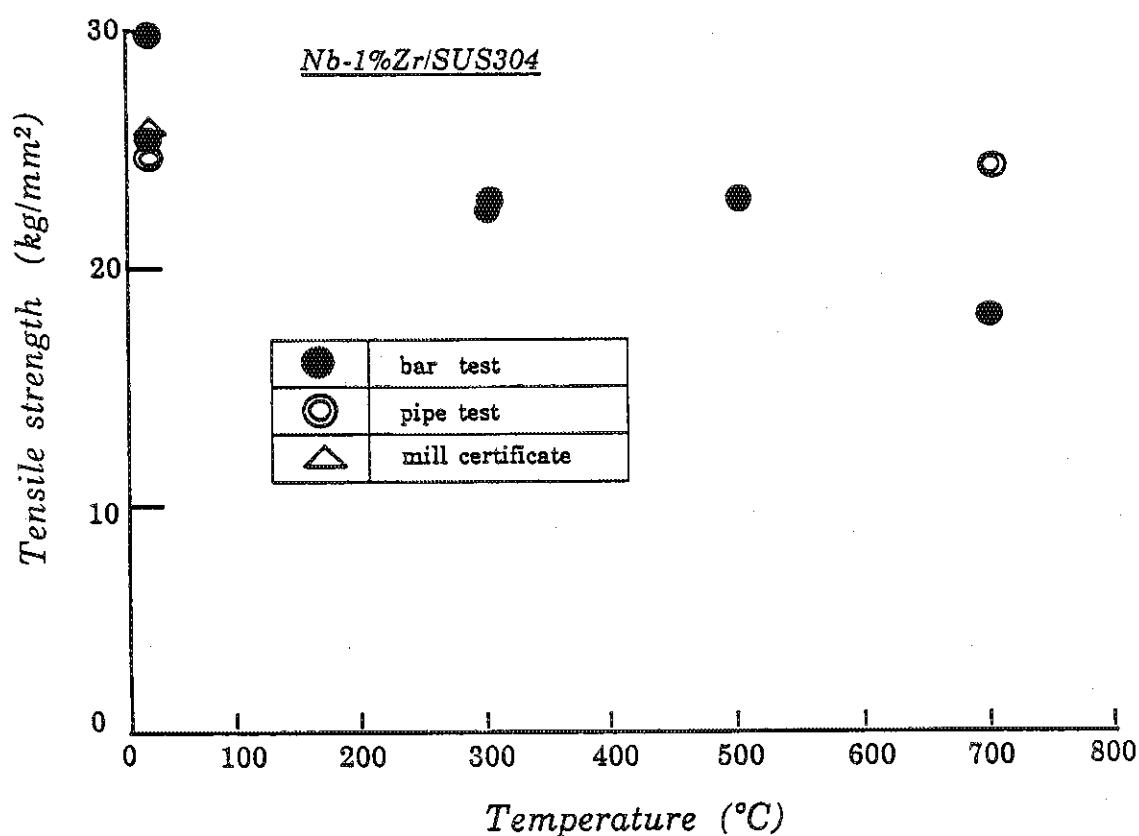


Fig. 21 Tensile Test Results of Transition Joint

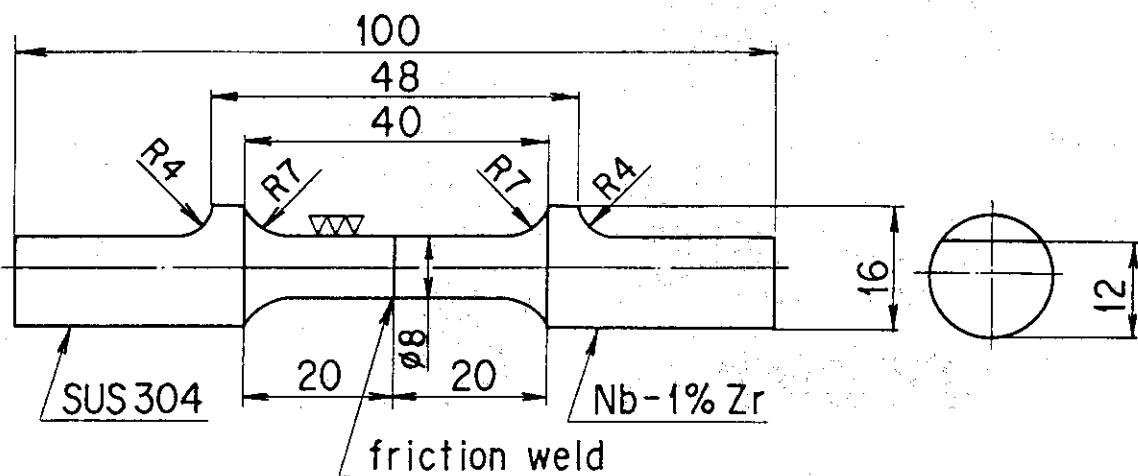


Fig. 22 Shape of specimen for torsion fatigue test

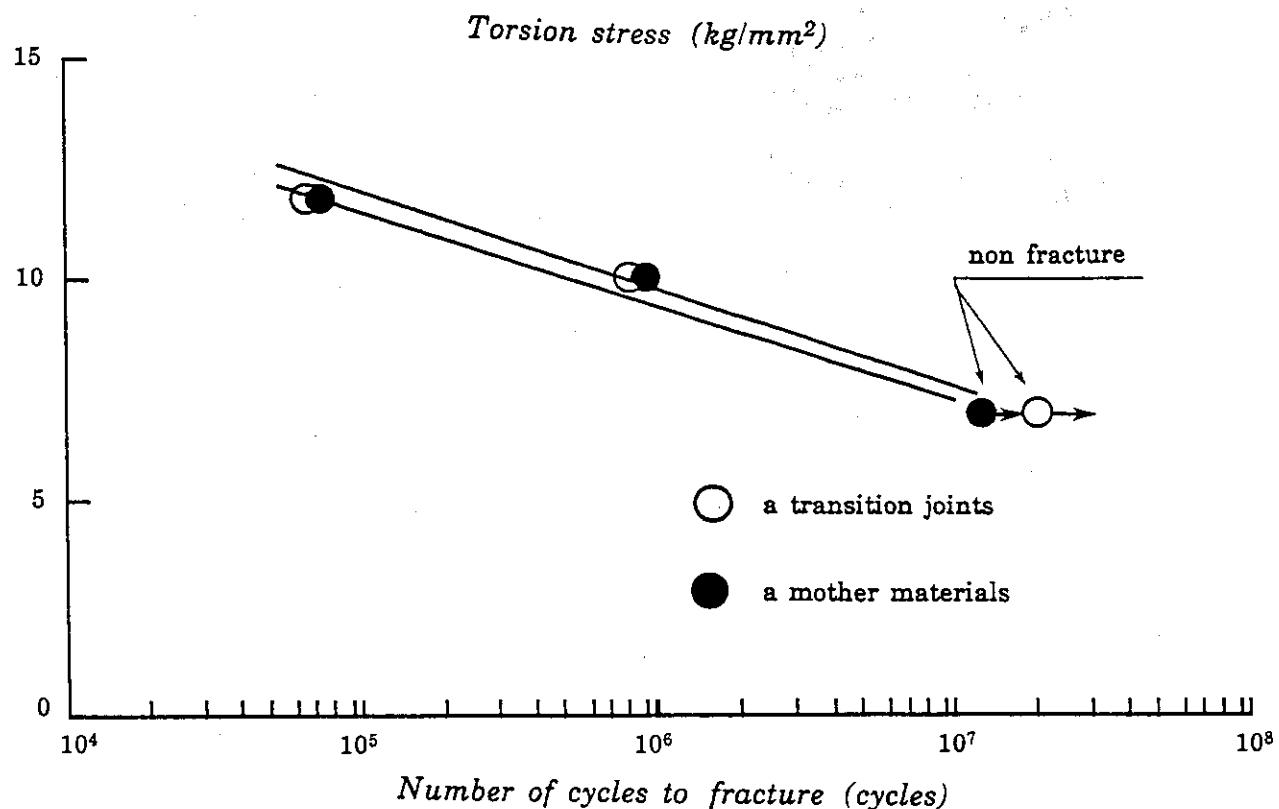


Fig. 23 S-N curve of torsion fatigue test

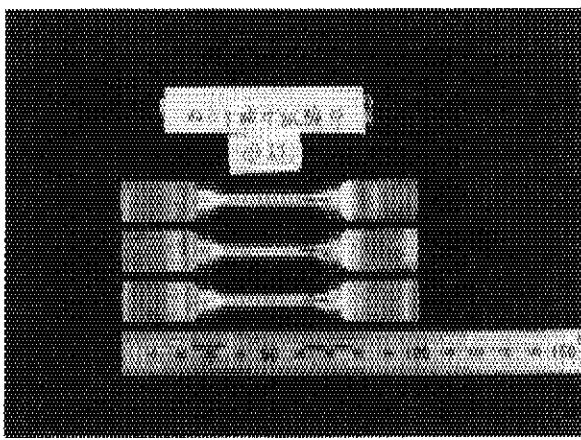


Fig. 24 Appearance of specimens
before torsion fatigue test
(mother material)

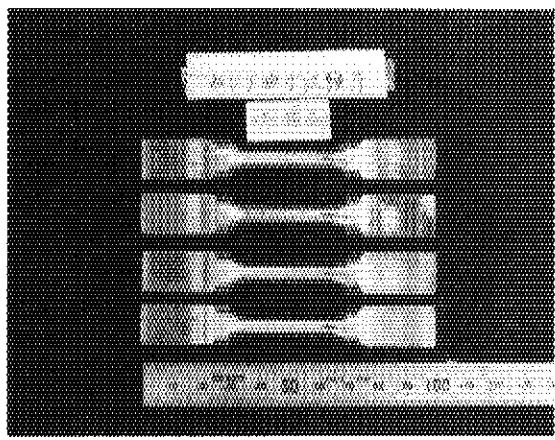


Fig. 25 Appearance of specimens
before torsion fatigue test
(transition joint)

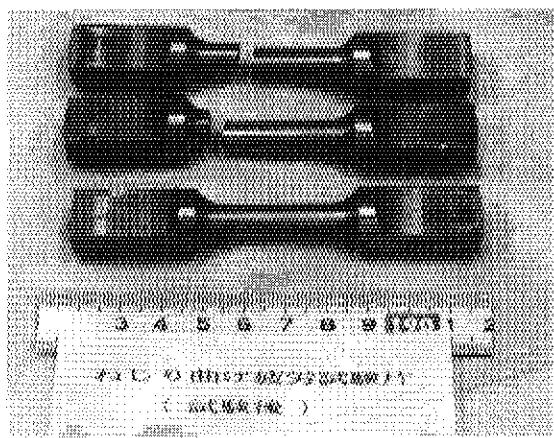


Fig. 26 Appearance of specimens
after torsion fatigue test
(mother material)

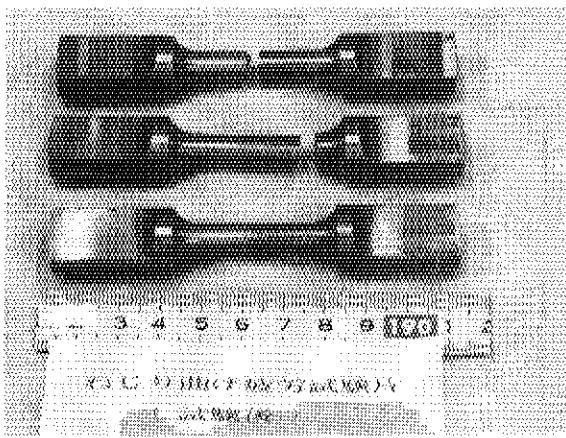


Fig. 27 Appearance of specimens
after torsion fatigue test
(transition joint)

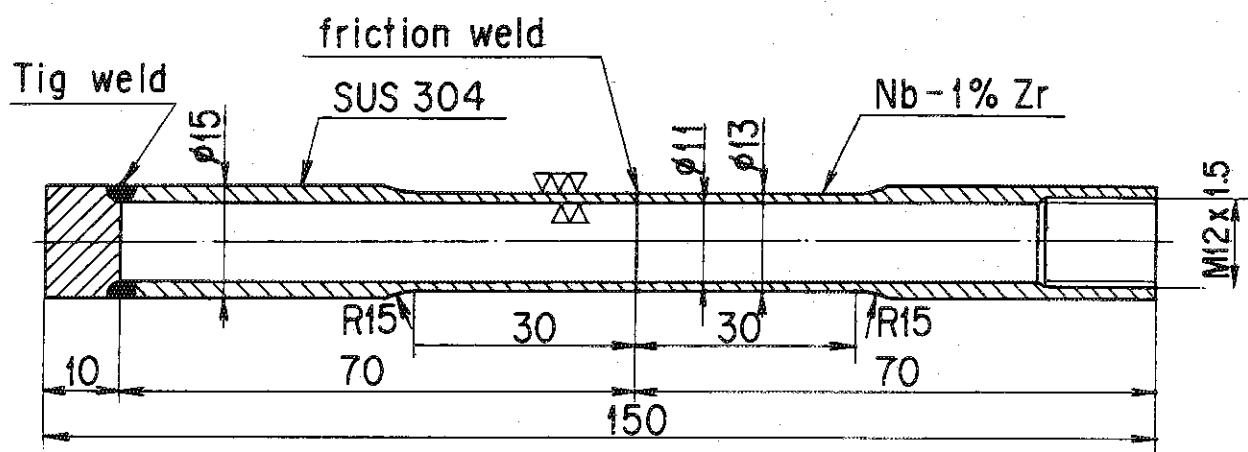


Fig. 28 Shape of specimen for burst test

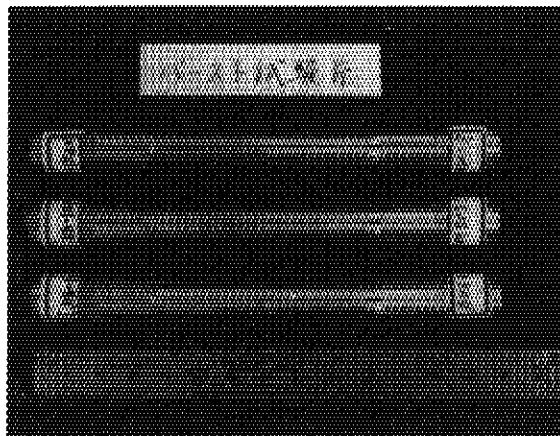


Fig. 29 Appearance of specimens
before burst test

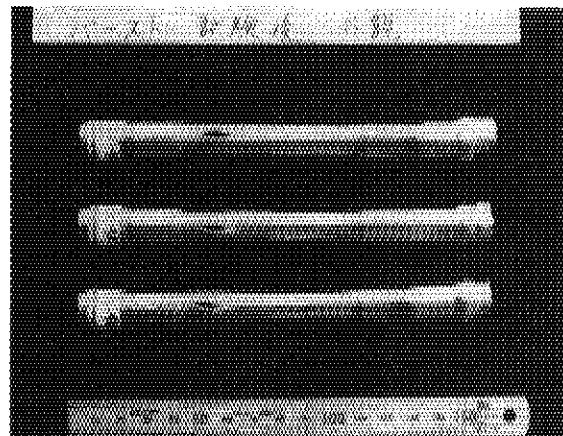


Fig. 30 Appearance of specimens
after burst test

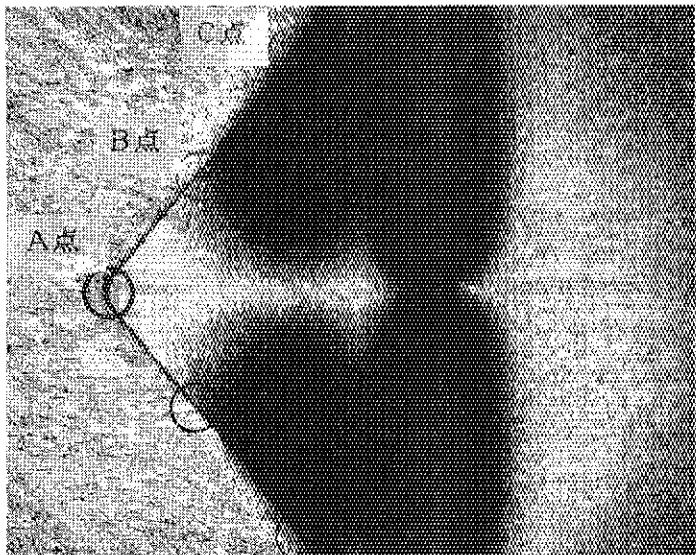


Fig. 31 Metallographic photograph of transition joints (whole view)



Fig. 32 Metallographic photograph of transition joints (part of center : A point)

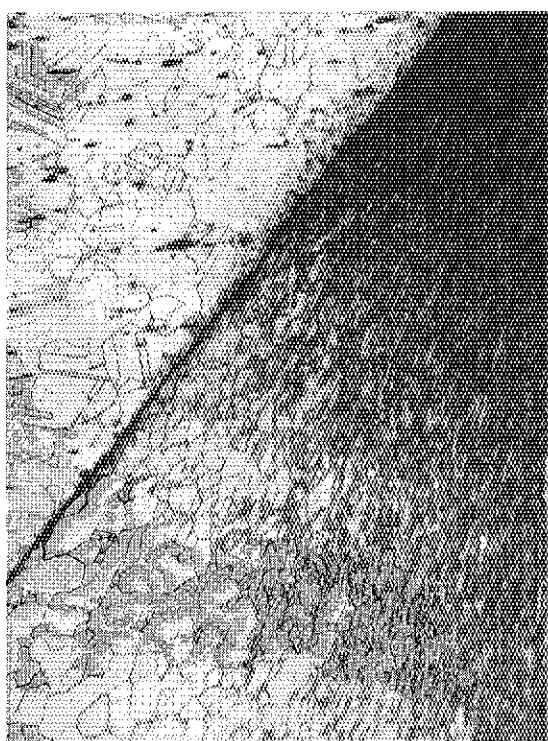


Fig. 33 Metallographic photograph of transition joints (part of taper : B point)

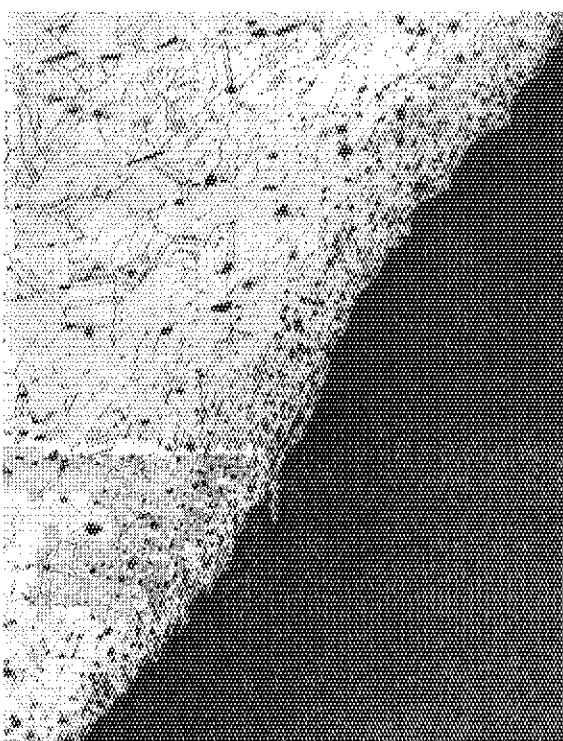


Fig. 34 Metallographic photograph of transition joints (part of taper : C point)

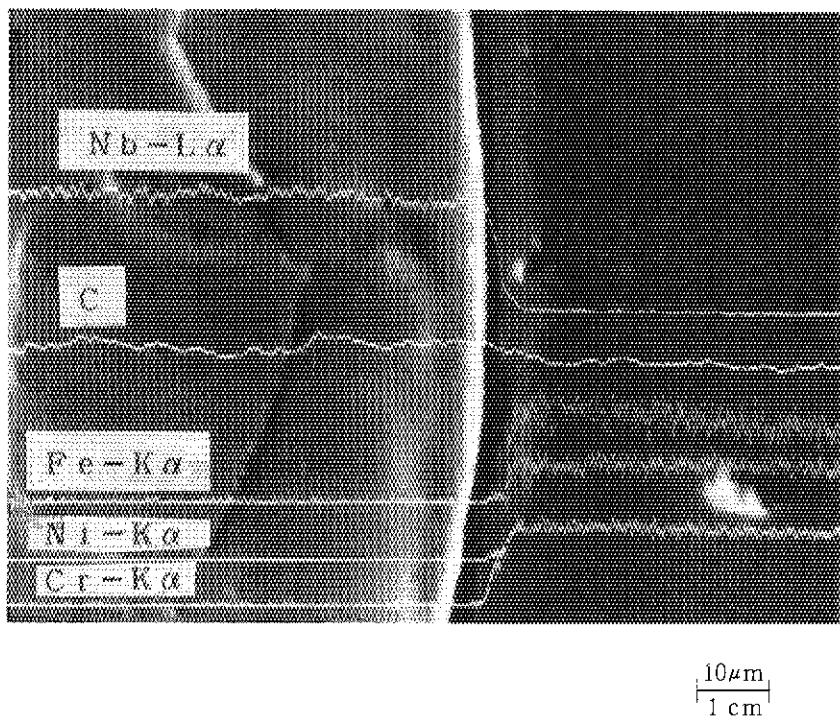


Fig. 35 XMA photograph of transition joints (A point)

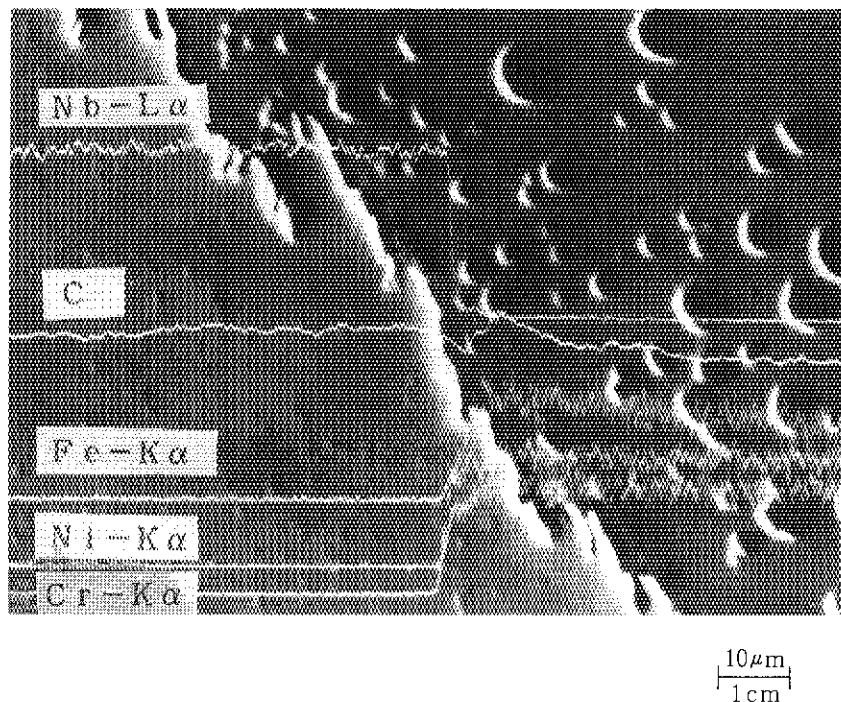


Fig. 36 XMA photograph of transition joints (B point)

4. 結 論

摩擦圧接法を利用してニオブ合金 (Nb-1%Zr) / ステンレス鋼 (SUS304) の異材継手を試作し、各種の評価試験を実施した。

異材継手の試作は40トン・ブレーキ式摩擦圧接機によって実施し、評価試験として常温、300°C、500°Cおよび700°Cにおける引張試験、疲労破壊に至るまでの繰返し数を実測するねじり疲労試験、水圧による内圧バースト試験、金相観察およびXMA観察を実施した。

評価試験において以下のような結果が得られた。

- (1) 圧接面の形状は、Fig. 2 に示すように Cone 側の角度 110 度近辺が、良好な圧接が得られることがわかった。
- (2) 室温引張試験においては、母材 (Nb-1%Zr) 強度の 90% 以上の強度が得られた。また、棒状試験片と管状試験片での強度比較に有意な差異のないことがわかった。
- (3) 300°C、500°C、700°Cにおける高温引張試験においては、破断箇所の大部分が母材 (Nb-1%Zr 部) であることから判断して、ほぼ母材強度と同程度の強度を有していることがわかった。
- また、試験の数に制約があり、300°C、500°Cを割愛して実施した700°Cにおける棒状試験片と管状試験片での強度比較では、管状試験片が棒状試験片より約4割高い強度が得られることがわかった。
- (4) ねじり疲労試験では母材と同等の疲労強度を有していることがわかった。
- (5) 水圧による内圧バースト試験の結果は、充分な円周方向応力を有していることがわかった。
- (6) 金相観察およびXMA観察において、圧接部界面の金属間化合物の形成はかなり少ないと確認された。

5. あとがき

異種材料の接合技術開発の一環として試作された Nb-1%Zr/SUS304 の摩擦圧接による異材継手は、各種の評価試験を経て十分使用に耐えうることが確認された。ただし、金相観察で一部中心部付近に接合されない箇所が認められたため、今後更に圧接条件の最適化を図り、引き続き各種試験を行い異材継手の信頼性を確認していきたい。

一方、年々高度化、複雑化する照射試験に対処するためには、各種金属・セラミックス等との異種材料接合技術開発が一層不可欠である。

我々は、現在、Nb-1%Zr/SUS304摩擦圧接材の照射試験を J M T R 第82運転サイクル（昭和63年6月）で行なっているが、更に、金属とセラミックスとの接合^{12), 13), 14), 15), 16)}についても取り組んでいく予定である。

謝 詞

Nb-1%Zr/SUS304異材継手の試作開発にあたり、計画課長斎藤 実氏に、計画遂行にあたり工作課長加古俊昭氏にそれぞれ、適切な御助言をいただきました。高温試験技術室深谷 清氏には X M A 観察で、構造強度研究室大場敏弘氏には引張試験で御助力をいただきました。また、ホットラボ課清水道雄氏には、金相写真を撮影していただきました。

以上、記して謝意を表します。

5. あとがき

異種材料の接合技術開発の一環として試作された Nb-1%Zr/SUS304 の摩擦圧接による異材継手は、各種の評価試験を経て十分使用に耐えうることが確認された。ただし、金相観察で一部中心部付近に接合されない箇所が認められたため、今後更に圧接条件の最適化を図り、引き続き各種試験を行い異材継手の信頼性を確認していきたい。

一方、年々高度化、複雑化する照射試験に対処するためには、各種金属・セラミックス等との異種材料接合技術開発が一層不可欠である。

我々は、現在、Nb-1%Zr/SUS304摩擦圧接材の照射試験を J M T R 第82運転サイクル（昭和63年6月）で行なっているが、更に、金属とセラミックスとの接合^{12), 13), 14), 15), 16)}についても取り組んでいく予定である。

謝辞

Nb-1%Zr/SUS304異材継手の試作開発にあたり、計画課長斎藤 実氏に、計画遂行にあたり工作課長加古俊昭氏にそれぞれ、適切な御助言をいただきました。高温試験技術室深谷 清氏には XMA 観察で、構造強度研究室大場敏弘氏には引張試験で御助力をいただきました。また、ホットラボ課清水道雄氏には、金相写真を撮影していただきました。

以上、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田中 獻, 他 : JAERI-M 6799 (1976)
- 2) 石井忠彦, 他 : JAERI-M 7152 (1977)
- 3) 野村 靖, 他 : JAERI-M 7629 (1978)
- 4) 中村光男：“異種金属の常温圧接”，溶接技術，No.1 (1983) 35-
- 5) 町田一道, 加柴良裕：“ユニークな新接合技術”，MOL, No.4 (1987) 42-
- 6) 大橋 修, 橋本達哉：“拡散接合に関する研究”，溶接学会誌, Vo.45, No.6 (1976) 485-
- 7) 奥山和己：“異種金属の摩擦圧接”，溶接技術, No.1 (1983) 24-
- 8) 野田三郎：“摩擦圧接の現状と作業標準”，溶接技術, No.5 (1985) 19-
- 9) 久保田彰：“異種金属の爆発圧接”，溶接技術, No.1 (1983) 40-
- 10) 久保田彰：“爆発圧接の現状と応用”，溶接技術, No.5 (1985) 28-
- 11) 摩擦圧接研究会編：“摩擦圧接”，コロナ社, 東京 (1979)
- 12) 諸住正太郎：“金属とセラミックスの接合における諸問題”，日本金属学会会報 Vol.25, No.5 (1986) 411-
- 13) 荒田吉明, 大森 明：“セラミックスと金属”，溶接技術, No.4 (1983) 15-
- 14) 井関孝善：“セラミックスの接合技術”，機械の研究, Vol.39, No.11 (1986) 29-
- 15) 山田武海：“金属とセラミックスの接合”，金属, No.11 (1987) 12-
- 16) 鈴木暁男, 他：“セラミックスとアルミニウムの摩擦圧力接合”，高温学会誌, Vol.13, No.1 (1987) 43-