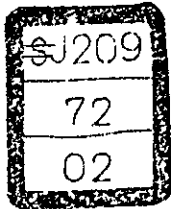


T



本資料はH13年11月30日付けで登録区分  
変更する。  
[技術情報グループ]

~~開示制限~~

02

原子燃料被覆管の渦流探傷  
概 要

昭和47年 4 月 3 0 日

住友金属工業株式会社

# 原子燃料被覆管の渦流探傷

## 概 要

### 1. 目 的

ステンレス被覆管に対する渦流探傷技術の確立をはかる。

### 2. 使用装置

渦電流探傷装置（動力炉核燃料開発事業団より借用）

米国 NORTEC 社製 ECS-4 型一式

管理番号、本社 15201-1

構成

渦電流探傷装置（NDT-1）

記録計（NDT-5220）

オッシュロスコープ（NDT-5601）

駆動機構（HS-11）

ブローワー

検査ライン（住友金属工業株式会社にて製作）

### 3. 実験場所

尼崎市 住友金属工業株式会社中央技術研究所

### 4. 研究期間

昭和46年11月～昭和47年4月

### 5. 対象材

#### (1) 常陽ステンレス被覆管

寸法 外径：6.3±0.030mm

内径：5.6±0.025mm

肉厚：0.35±0.030mm

この資料は、原子燃料の開発業務を進めるため、限られた関係者にのみ提供されるものと見做す。複製、転載、引用、レフタリおよびそのための利用には、事業団の承認が必要です。なお、開示が解除になった場合には、その旨通知します。

動力炉・核燃料開発事業団  
計画管理部技術情報室

長さ：1825±1.0mm

(2) 文珠ステンレス被覆管

寸法 外径：6.5±0.030mm

内径：5.6±0.025mm

肉厚：0.35±0.030mm

長さ：1825±1.0mm

6. 調査内容

項目	対象材	内容	数量	備考
1. 渦流探傷にて現われた信号と欠陥形状・寸法の対応調査(超音波探傷との比較)	常陽ステンレス被覆管  文珠ステンレス被覆管	1. 渦流探傷	20本, 6000パス*	*同一材料を条件を変えて各300回通している。(再現性テスト, 最適条件の決定を含む)
		2. 超音波探傷	20本	
		3. 破損検査 (表面観察) (断面観察)	20本	
2. 寸法変化と渦流探傷指示の対応調査	常陽ステンレス被覆管  文珠ステンレス被覆管	1. 超音波肉厚測定 (Vidigauge)	20本	
		2. 内径測定 (エアマイクロメータ)	20本	
		3. 表面粗さの測定	20本	
3. 量産検査	常陽ステンレス被覆管	1. 渦流探傷	214本 400パス*	*3ロット(214本)のうち疵指示品は再検査を行った。

## 7. 結 果

- (1) 渦流探傷では、超音波斜角探傷法で検出し難い斜め欠陥や2枚割れ性の欠陥を検出できる。これらの欠陥は超音波探傷法と超音波厚さ計を併用する事によっても検出可能である。
- (2) 渦流探傷では表面の微少な凹凸、ピット、研磨手入跡が良く検出される。
- (3) 肉厚の局所的な変化や内径の変化の状況によっては渦流探傷で指示を生じる場合や、バックグラウンドノイズが大きくなることがある。
- (4) 表面粗さが渦流探傷のバックグラウンドの大きさに影響を与えることがある。
- (5) その他渦流探傷では、原因不明の指示の現われる場合がある。

現在、3ロットの渦流探傷実施材につき、超音波探傷を実施中である。

原 子 燃 料 被 覆 管 の 渦 流 探 傷

昭 和 4 7 年 4 月 3 0 日

住 友 金 属 工 業 株 式 会 社

# 原子燃料被覆管の渦流探傷

## 1. 緒言

高速増殖炉用ステンレス原子燃料被覆管の探傷に渦流探傷を適用することを目的とした調査を米国 NORTEC社製渦流探傷装置 E C S - 4 を用いて行なった。本調査は動力炉・核燃料開発事業団より渦流探傷装置を借り受けられた際に締結された契約書に述べられている使用計画書にもとづき行なった。

## 2. 調査内容及び日程

### 2.1 調査内容

行なった調査は次の三点である。

- (1) "常陽"、"文珠" サイズについて渦流探傷を行ない、現われた信号と欠陥の形状・寸法との対応及び超音波探傷との比較。
- (2) "常陽"、"文珠" サイズにつき欠陥以外の要因、主に寸法変化と渦流探傷指示との対応。
- (3) "常陽" サイズについての量産検査

### 2.2 対象材

#### (1) 常陽ステンレス被覆管

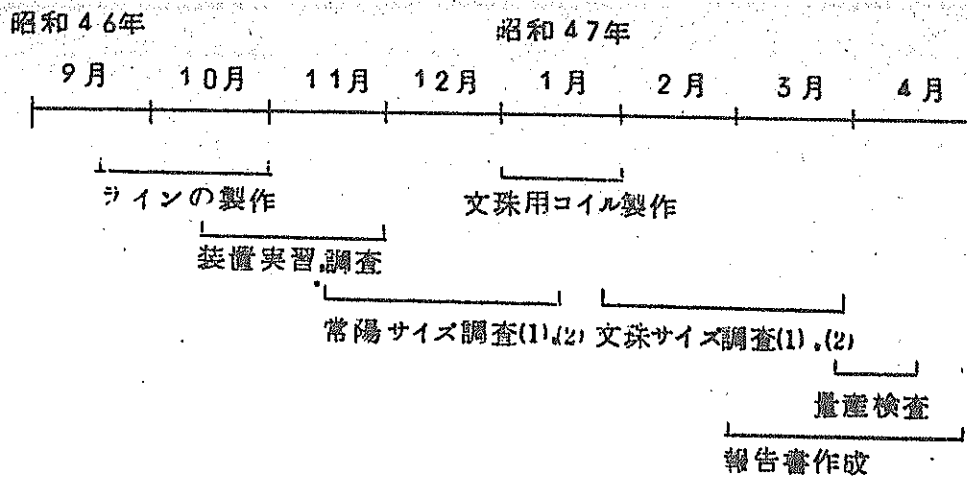
寸法 外径：6.3 ± 0.030 mm  
内径：5.6 ± 0.025 mm  
肉厚：0.35 ± 0.030 mm  
長さ：1825 ± 1.0 mm

#### (2) 文珠ステンレス被覆管

寸法 外径：6.5 ± 0.030 mm  
内径：5.6 ± 0.025 mm  
肉厚：0.35 ± 0.030 mm  
長さ：1825 ± 1.0 mm

### 2.3 日程

上記項目についての調査を次の日程で行なった。



## 8. 使用装置

### 3.1 探傷装置

探傷装置は動力炉・核燃料開発事業団（以下動燃とする）より借用した米国 NORTEC 社製 ECS-4 型渦流探傷装置で概略仕様は次の通りである。

検査周波数 500 KHz

疵検出能力 常陽サイズの被覆管の軸・円周方向の深さ 25  $\mu$  , 長さ 0.75 mm 以上の内外面欠陥。

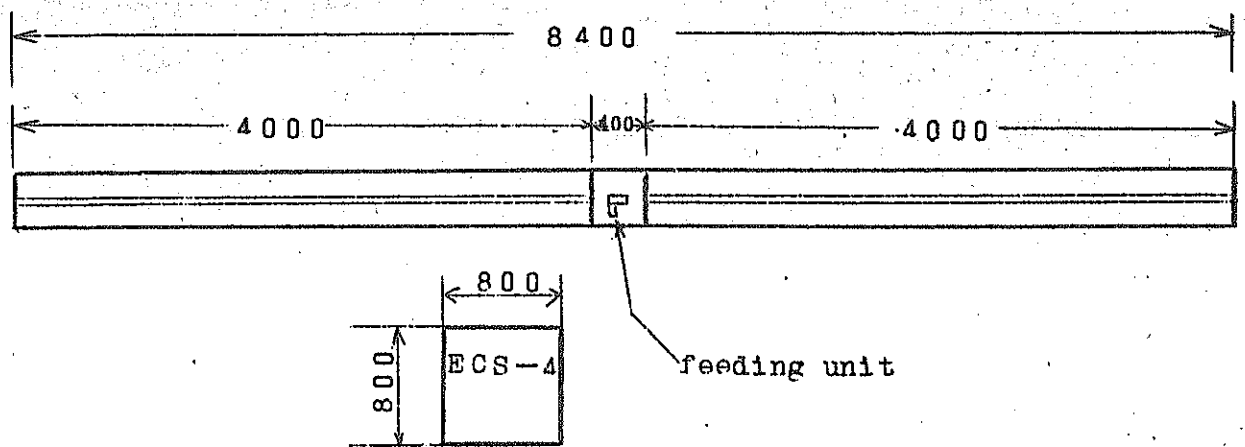
附属装置 記録器 (NDT-5220)

オシロスコープ (NDT-5601)

駆動装置 (HS-11)

### 3.2 探傷ライン

長さ 2 m ~ 4 m の被覆管の探傷が行えるように動燃東海事業所検査ラインと同様の 1 インチアルミアングルを用いた探傷ラインを製作した。ラインの概略寸法は下に示す通りである。ラインは被覆管が探傷中に表面に疵を付くのを防ぐためポリエステルテープで保護されている。



### 3.3 検査コイル

常陽サイズ用の検査コイルは装置に付属していたが、文珠サイズ用のものは付いていなかったため、検査コイルを製作した。

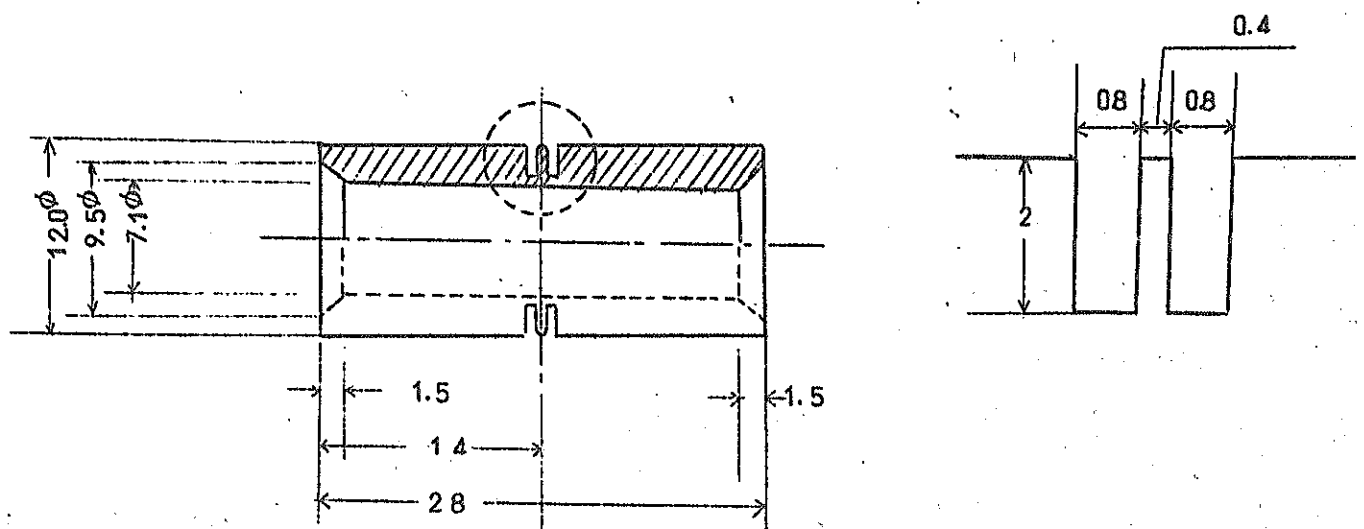
コイルはECS-4のブリッジ回路とマッチングさせる必要があるから、付属コイルのインダクタンスを測定して新しく作るコイルのインダクタンスを定めた。

コイルポピンはナイロンを用い、図の様な寸法に加工した。巻線は0.09mmホルマー線を用いてインダクタンスが規定値になるように巻線を加減した。以後の試験に用いたコイルは

コイルインダクタンス 25 μH

巻線数 42回

のものである。





## 4. 標準試験片及び感度設定

### 4.1 標準試験片

探傷感度は常陽，文珠サイズ共，標準試験片を用いて行なった。標準試験片は超音波探傷用のものである。

### 4.2 感度設定

#### 4.2.1 常陽サイズ

動燃より支給された S3579-2 標準試験片を用い，内面の 25 $\mu$  深さの疵が検出できる感度に設定した。

Table 1 に示す探傷条件で標準試験片を探傷したチャートを Fig. 1 に示した。

#### 4.2.2 文珠サイズ

超音波探傷用標準試験片を用い内面の 33 $\mu$  深さの疵が検出できる感度に設定した。

Table 2 に探傷条件を Fig. 6 に探傷チャートを示した。図のチャートでは標準疵以外にも渦流探傷の指示が現われているが標準疵の指示は疵位置より算出しチャート上に矢印で示してある。

## 5. 渦流探傷指示と超音波探傷指示の比較

### 5.1 常陽サイズ

当社より動燃へ納入した被覆管中，動燃にて渦流探傷を行なった結果，指示の認められた管を選び供試材とした。

供試材は S3061，S3805，S2601，S3451 の 4 本である。供試材の渦流探傷，超音波探傷の結果を Fig. 2 から Fig. 5 に示した。図中(a)は渦流探傷結果，(b)は超音波探傷結果，(c)は疵部表面の拡大写真，(d)は疵部断面の顕微鏡写真を示す。

又図には供試材外表面に観察できる疵の形状，位置等を示した。図の供試材スケッチ中斜線又は平行線部は研磨手入跡とみられる部分である。

Fig. 2 は Tube S3061 の結果であり超音波探傷の結果に比し渦流探傷では多くの指示が見られる。中央部の多くの指示は研磨手入跡の位置と対応が認められるがこの部分では超音波探傷での指示はみられない。表面観察の結果見出された疵は断面検鏡の結果深さ約 30 $\mu$  のものであった。この疵は渦流探傷では検出されている。

Fig. 3 は Tube S3805 の結果である。この管では外表面に多数のピット状疵や、カブレ状の疵が見られた。これらは超音波探傷では検出されていないが、渦流探傷では検出されている。この管の中央部のカブレ状疵の断面を観察した結果(a)に示す如く管表面に殆ど平行に近い疵の存在が認められた。斜角超音波探傷では検出困難な疵が渦流探傷で検出される例である。

Fig. 4 は S2601 の結果で、超音波探傷では欠陥指示が得られていないが、渦流探傷では管外面の微小な凹凸や研磨手入跡に対応する指示が見られる。

Fig. 5 は Tube は S3451 の結果で渦流探傷では周期的な指示が現われているが、超音波探傷では欠陥指示は無い。この管では外表面の状況と渦流指示の対応は見られなかった。

## 5.2 文珠サイズ

文珠サイズの被覆管に関しては次の供試材を用いた。

供試材 Tube 36-55, 22-09, 26-43

試験結果は Fig. 7 から Fig. 9 に示す如くで常陽サイズと同様渦流探傷結果、超音波探傷結果、外表面の観察結果、断面顕微鏡写真及び供試材の表面状況のスケッチ図を合わせて示してある。

Fig. 7 は Tube 36-55 の結果であり渦流探傷指示と外表面のへこみやピット疵の対応が見られた。

この管では、渦流探傷で指示のあった場所に微小ピット、手入跡が見られた。この管に見られた疵は次表に示す様な大きさのものである。

	形 状	寸 法	深 さ
1	ピット疵	約0.15 mm $\phi$	約10 $\mu$
2	ピット疵	約0.08 mm $\phi$	約10 $\mu$
3	ピット疵	約0.15 mm $\phi$	約10 $\mu$
4	スリット疵	軸方向約1.5 mm 長さ	約13 $\mu$
5	ピット疵	約0.15 mm $\phi$	約10 $\mu$
6	スリット疵	円周方向約0.6 mm 長さ	約7 $\mu$

Fig. 8は Tube 26-09の結果で、渦流探傷で指示のあった場所には微小ピット、手入跡が見られた。

Fig. 9は Tube 26-43の結果で管外面円周方向の長さ1mm以上、深さ50μの疵が渦流探傷、超音波探傷共に検出されている。

### 5.3 ま と め

常陽、文珠サイズについて行なった結果から渦流探傷指示は超音波探傷では検出されない表面の研磨手入跡や微小なピット、へこみにより大きく現われることや、斜角超音波探傷で検出困難な表面に沿って存在する斜め欠陥による場合がある事等がわかった。この中、後者は超音波探傷と超音波肉厚測定を併用することにより充分検出できる疵であり、今回の調査で製品検査の適切な方法を確認することが出来た。

## 6. 寸法変化と渦流探傷指示

### 6.1 肉厚変化

渦流探傷で欠陥指示のあった管を超音波肉厚計 (Vidigauge 14 H) で肉厚測定を行なった。肉厚の変動が極めて局部的に生じている部分では渦流探傷指示と対応のある箇所があった。Fig. 10, Fig. 11にはこれらの結果を示しており、肉厚変動に対応する渦流指示を矢印で示した。これらの管に見られた肉厚変化は0.01mm程度で肉厚の3.5%の変化である。Fig. 14から16には文珠サイズについての同様の結果であるが、外面疵の深いものでは肉厚の変化として検出されている。これらの記録はゲート範囲 (測定範囲) を0.44mmから0.47mmとしたもので、指示の振り切れたものはこの範囲を越えて肉厚が小さくなっていることを示している。

### 6.2 内径変化

エアマイクロメータによる内径測定の結果と渦流探傷との対応・比較の一例を Fig. 12と Fig. 13に示した。

Fig. 12は内径変化量の大きい管では渦流探傷でのバックグラウンドノイズが比較的大きいことを示しており、管No1は内径変化量がNo2に比し0.018mmと大きく、バックグラウンドの平均値も7.6mmに比し1.1mmと大きいことを示している。

Fig. 13は周期的な渦流探傷指示が内径の局部的な変化と対応を示した例である。 図

の(a)と(b)は横軸を合わせてあるが(b)に見られる0.005mm程度の急激な内径変化は(a)に見られる渦流探傷指示と対応している。

### 6.3 ま と め

渦流探傷では、肉厚の変化や内径の変化等が局部的に急激に生じた場合には欠陥指示を生じることがあり、又内径変化が大きい場合にはバックグラウンドノイズが大きくなること等がわかった。さらに肉厚測定により欠陥部の微小な肉厚減少が検出されることも確認できた。

## 7. 表面粗さの影響

既に述べた調査結果で研磨手入跡の部分が渦流探傷では大きな指示を生ずる場合がある事がわかったので、渦流探傷で疵指示の無い部分をエメリーペーパーで研磨し、研磨による指示の大きさを調査した。

Fig. 10 (a)は # 800, # 1000, # 1200 の3種の粗さのペーパーを用いて10秒間巾5mmの円筒状研磨を行なった個所の渦流探傷指示を、Fig. 10 (b)は # 800のペーパーを用い研磨時間を変化させて渦流探傷指示の変化を示したものである。同じ研磨時間では表面粗さの粗い程、研磨時間が変化した場合には研磨時間の長い程渦流探傷指示は大きく、わづかの研磨で渦流探傷では大きい指示が現われることがわかった。

上述の渦流探傷指示の他に Fig. 18に見られる様な極めて特徴のある指示を示すものがあった。この管を調査した結果、外面の状況、寸法変化等に顕著な対応は見られなかった。この図からわかる様に管の中央部を境に左右で何らかの差がある事が考えられ外面の表面粗さを測定した所渦流探傷でバックグラウンドが異状に高い部分では表面粗さが  $R_t=4.0\mu$  ( $R_{rms}=0.33\mu$ ) と粗く、反対側の部分は  $R_t=2.2\mu$  ( $R_{rms}=0.22\mu$ ) と比較的良好であった。又内表面は一様にスリキズ状のスジが幾条にも存在しており、この内面のスジが超音波探傷ではノイズとなってあらわれているものと考えられる。この様に表面粗さも渦流探傷指示の一因となることがわかった。

## 8. 量産調査

動燃に納入される常陽サイズ被覆管の中3ロットにつき渦流探傷を行なった。探傷した管の明細を次表に示す。

ロット番号	鋼種	寸法 (mm)	数量 (本)	重量 (kg)
TTQ9052①	SUS32TP	6.3×0.35×1825	67	6
TTQ9052②	SUS32TP	6.3×0.35×1825	72	7
TTQ9052③	SUS32TP	6.3×0.35×1825	75	7

これらの被擾管の渦流探傷を Table.1 に示す探傷条件で行い、渦流探傷指示のある管について次のような分類をした。

1. 渦流探傷指示の大きさによる分類

渦流探傷チャートで、①1.6mm以下、②1.6mmから2.0mm、③2.0mmから2.4mm、④2.4mm以上の、指示を示す管に分類した。

なお、1.5μ深さの外面人工疵は記録紙の振巾が1.2mm、2.5μ深さの外面人工疵は振巾が3.2mmの、渦流探傷指示を示している。

2. 渦流探傷指示の種類による分類

渦流探傷チャートで1.6mm以上の指示のある管のうち、①急激な単発パルス状の指示を示す管、②全体にバックグラウンドノイズが高い指示を示す管、③パルス状の指示が群となってあらわれている管、に分類した。

①②③の典型的な渦流探傷チャートを Fig.19 に示す。なお Fig.19 (a)は渦流探傷の欠陥指示のないチャート、(b)は①、(c)は②、(d)は③のチャートの実例を示す。

これら1及び2に分類した結果を次表に示す。

1. 渦流探傷指示の大きさによる分類

ロット番号	1.6mm以下	1.6mm~2.0mm	2.0mm~2.4mm	2.4mm以上	計
TTQ9052①	41	9	5	12	67
TTQ9052②	27	11	14	20	72
TTQ9052③	47	13	4	11	75
計	115	33	23	43	214

単位：本

## 2. 渦流探傷指示の種類による分類

ロット番号	急激な単一パルス状の指示	全体に高いノイズの指示	単一パルスが群となった指示	計
TTQ9052⑪	21	3	2	26
TTQ9052⑬	28	13	4	45
TTQ9052⑮	16	1	11	28
計	65	17	17	99

単位：本

16mm以上の渦流探傷指示を示す管は、ロット番号が⑪のものでは約39%、⑬では約63%、⑮では約37%であり、全体では約46%である。

このうち、急激な単一パルス状の指示を示すものは全体で、約66%であり、これらの中には独立欠陥をもつ管があるものと思われる。

全体に高いノイズの指示を示すものは、全体で約17%、単一パルスが群となった指示を示すものは、全体で約17%であった。これらの中には寸法変化や表面状況の悪いものがあると考えられるが、今後、超音波探傷結果との比較検討により明確になるであろう。

## 9. ま と め

ステンレス原子燃料被覆管の渦流探傷につき種々の調査を行なった結果次のことがわかった。

- (1) 渦流探傷では、超音波斜角探傷法で検出し難い斜め欠陥や2枚割れ性の欠陥を検出できる。これらの欠陥は、超音波探傷法を改善し且超音波厚さ計を併用する事によっても検出可能である。
- (2) 渦流探傷では表面の微小な凹凸、ピット、研磨手入跡が良く検出される。
- (3) 肉厚の局所的な変化や内径の変化の状況によっては渦流探傷で指示を生じる場合や、バックグラウンドノイズが大きくなることがある。
- (3) 表面粗さが渦流探傷のバックグラウンドの大きさに影響を与えることがある。
- (5) 以上の他渦流探傷では原因不明の指示の現われる場合がある。

今回の調査で渦流探傷を適用する場合には

- (6) 研磨手入等の工程の前に行なう(中間検査の場合)
  - (7) 超音波探傷の前工程として行なう(製品検査の場合)
- の2方法が考えられ、更に超音波探傷工程に関しては
- (8) 超音波探傷と超音波肉厚測定を併用すること

等の従来の工程を改善し製品の品質保証を高める指針が得られた。しかし渦流探傷では不明な指示もあり工業的規模で検査を行なうには超音波探傷の如き高い信頼度を持つ必要があり、今後の更に詳細な調査を待たねばならないだろう。

謝 辞

終りに、渦流探傷装置の借用に際し、装置の使用法等を御教授下さった東海事業所、青木利昌検査課長、立石嘉徳検査係長をはじめ関係諸氏に深く感謝の意を表します。

以 上

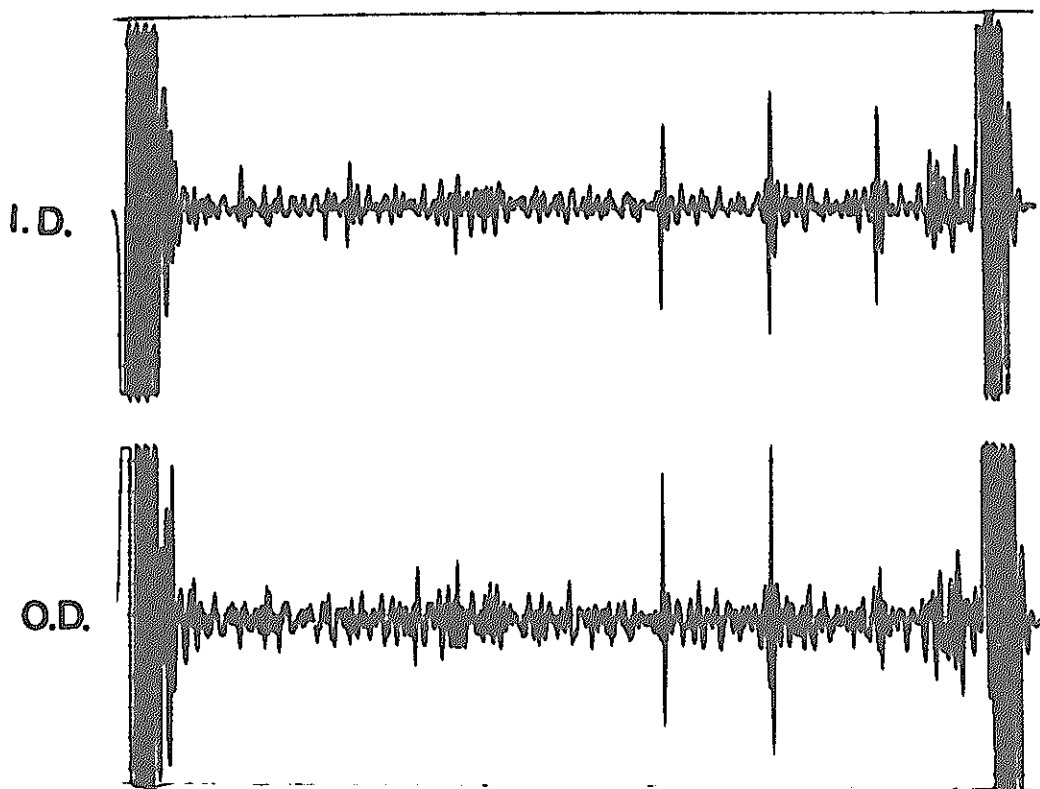
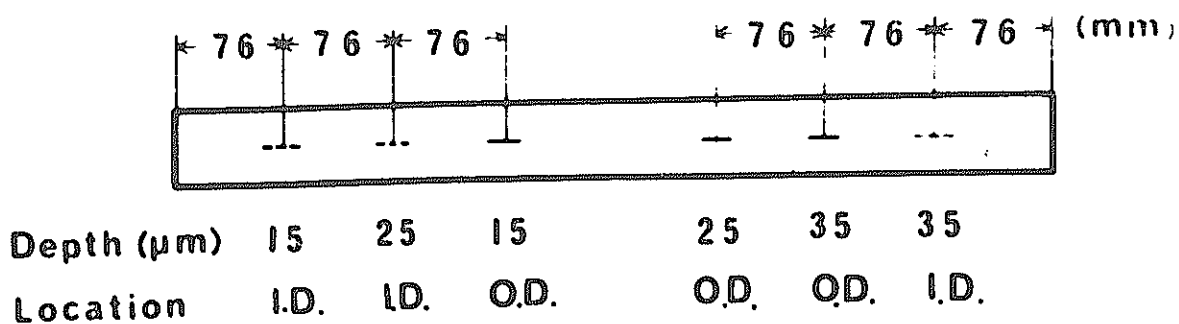
**Table 1 Testing Condition**

<b>Feeding Speed</b>	<b>1.5 m / min</b>
<b>Chart Speed</b>	<b>5 mm / sec</b>
<b>Sensitivity I.D.</b>	<b>10mV / div</b>
<b>Sensitivity O.D.</b>	<b>10mV / div</b>
<b>Rotation</b>	<b>30</b>
<b>Gain</b>	<b>60</b>



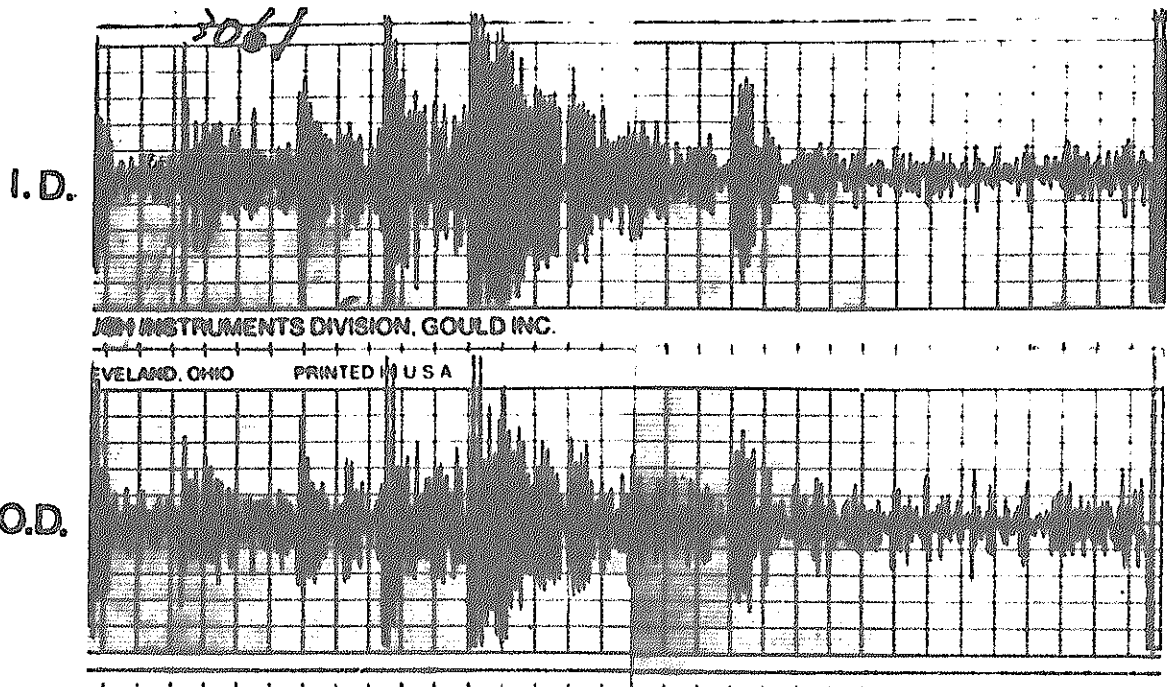
**Table 2 Testing Condition**

<b>Feeding Speed</b>	<b>1.5 m / mis</b>
<b>Chart Speed</b>	<b>1 mm / sec 5 mm / sec</b>
<b>Sensitivity I.D.</b>	<b>10mV / div</b>
<b>Sensitivity O.D.</b>	<b>10mV / div</b>
<b>Rotation</b>	<b>15</b>
<b>Gain</b>	<b>20.</b>



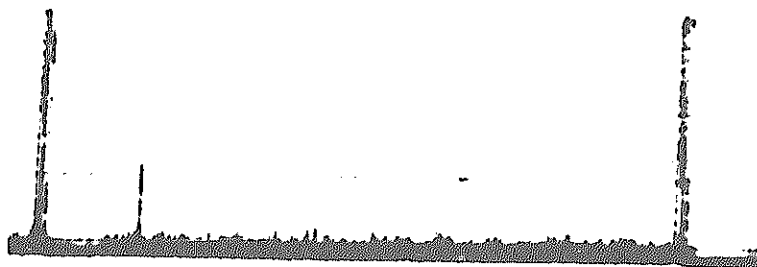
**Fig.1 Eddy Current Recording Chart  
of Standard Tube**

[Redacted box]

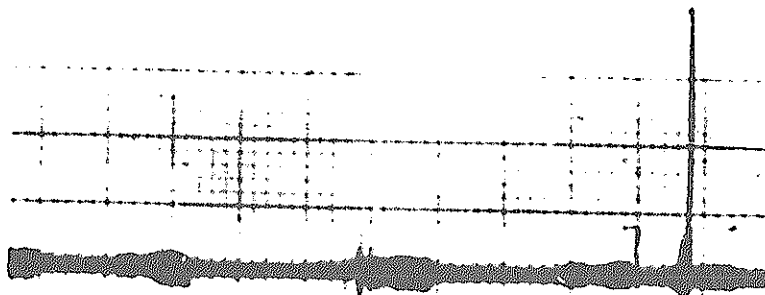


(a) Eddy Current Recording Chart

Transverse Channel

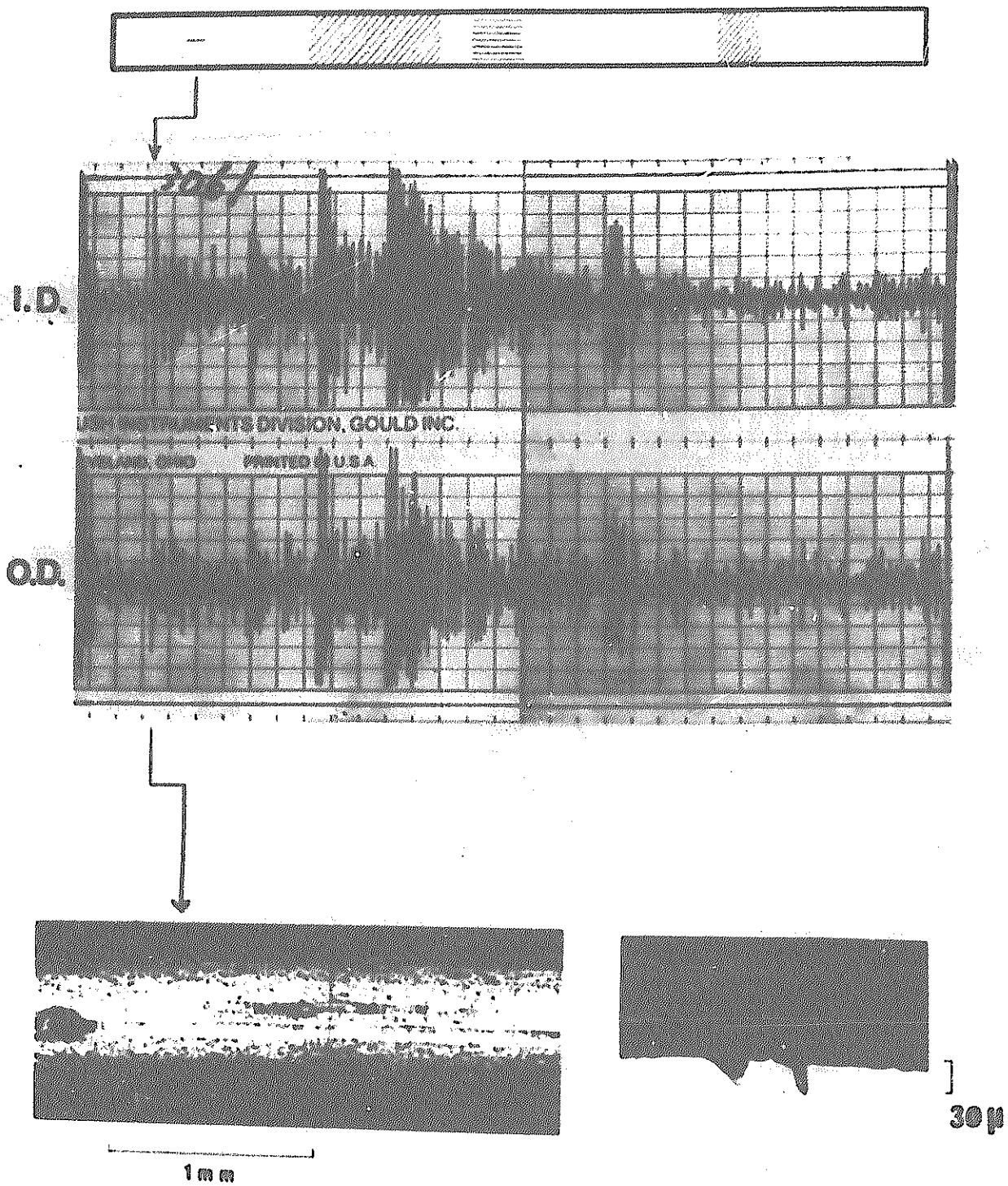


Longitudinal Channel



(b) Ultrasonic Recording Chart

Fig.2 Tube S3061



(c) Surface View

(d) Transverse Cross-section

Fig.2 Tube S3061

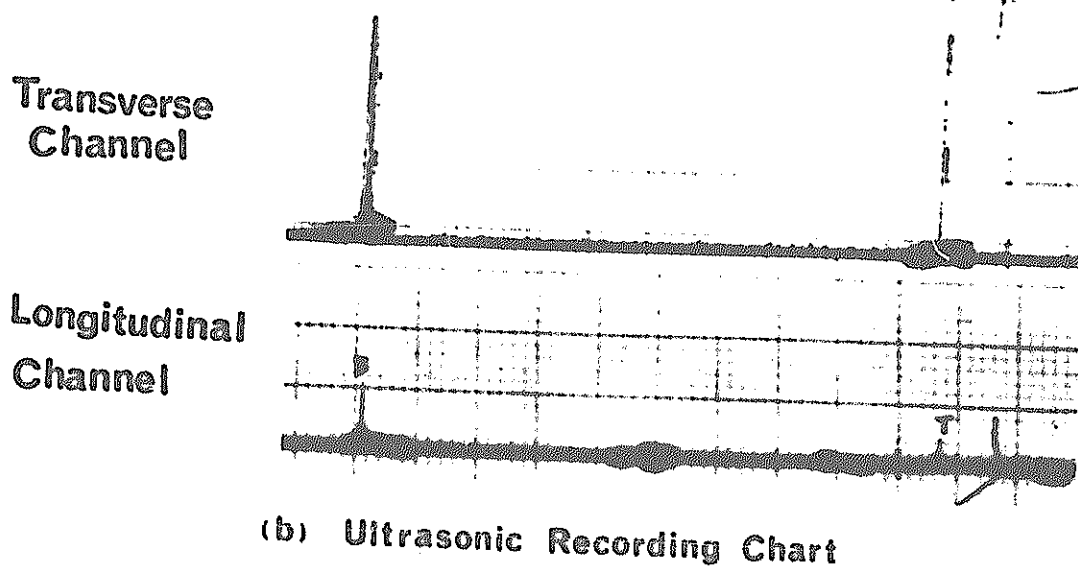
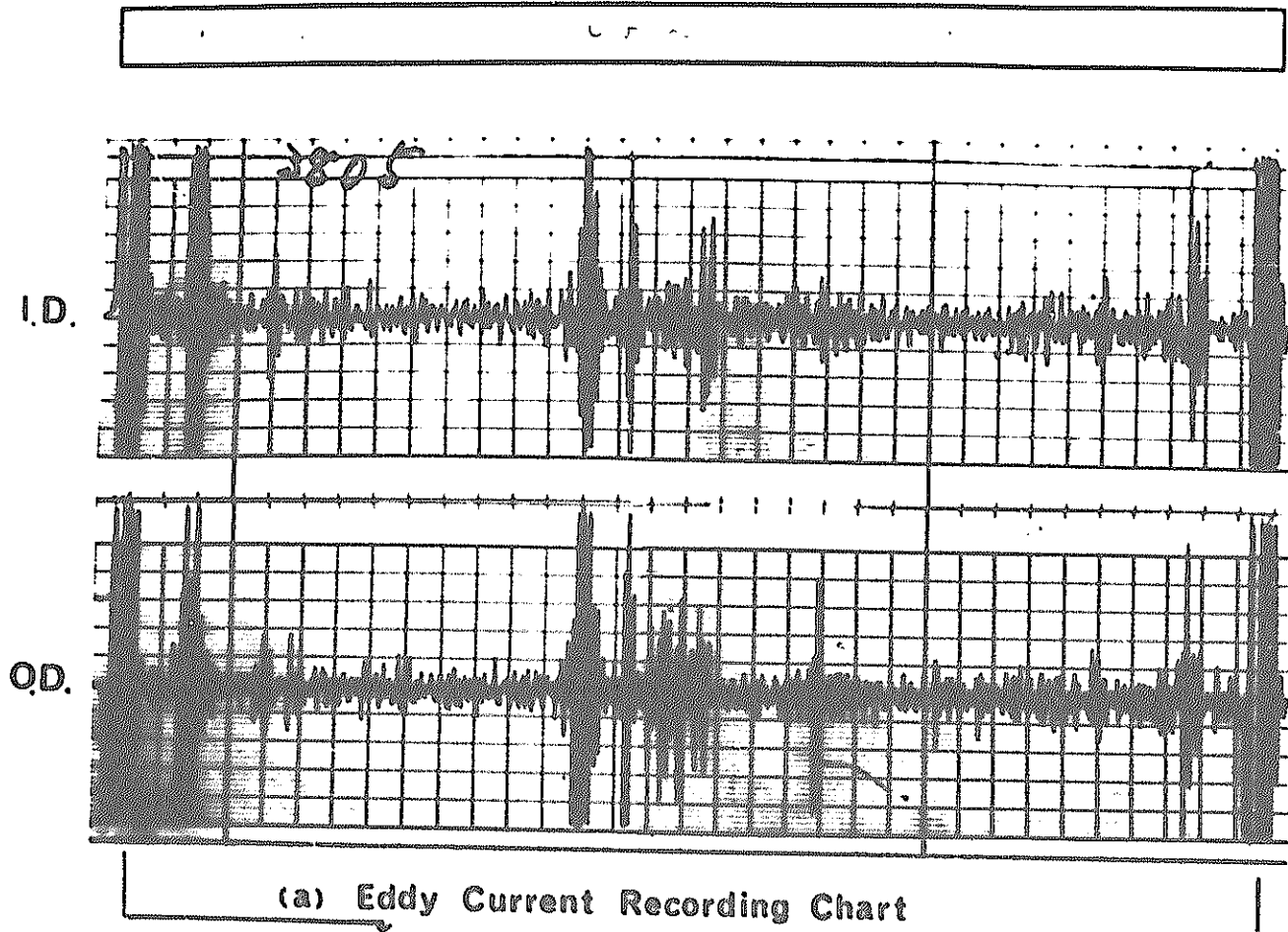
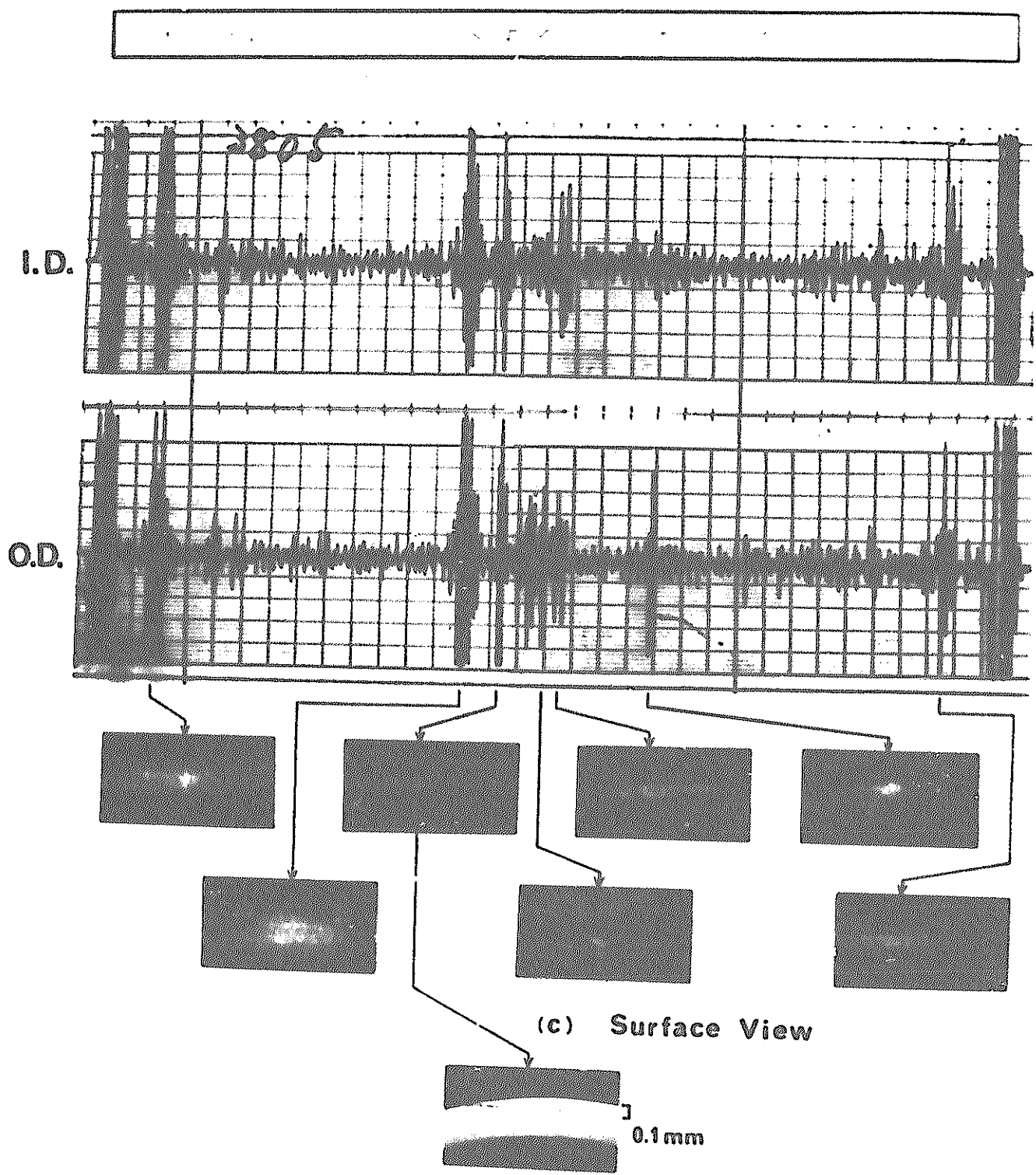
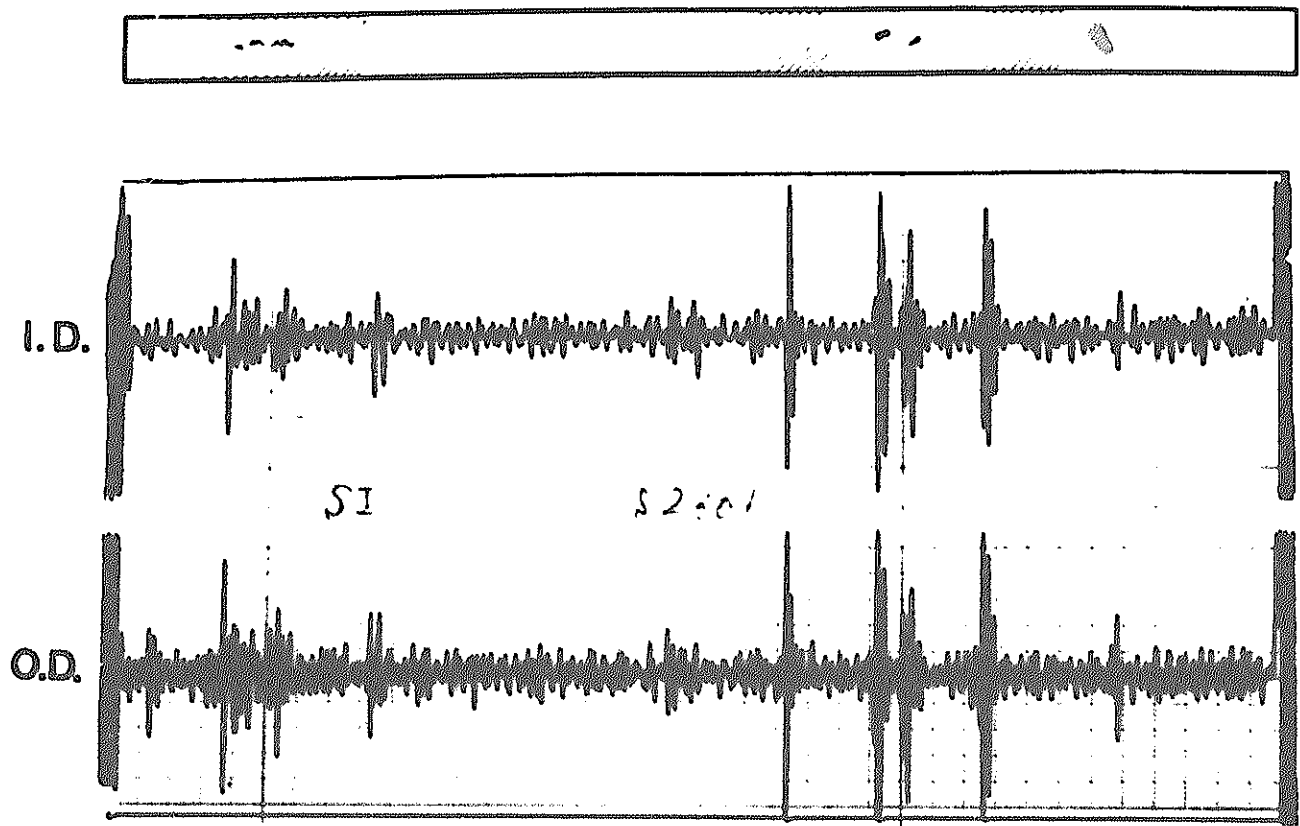


Fig.3 Tube S3805



(d) Transverse Cross-section

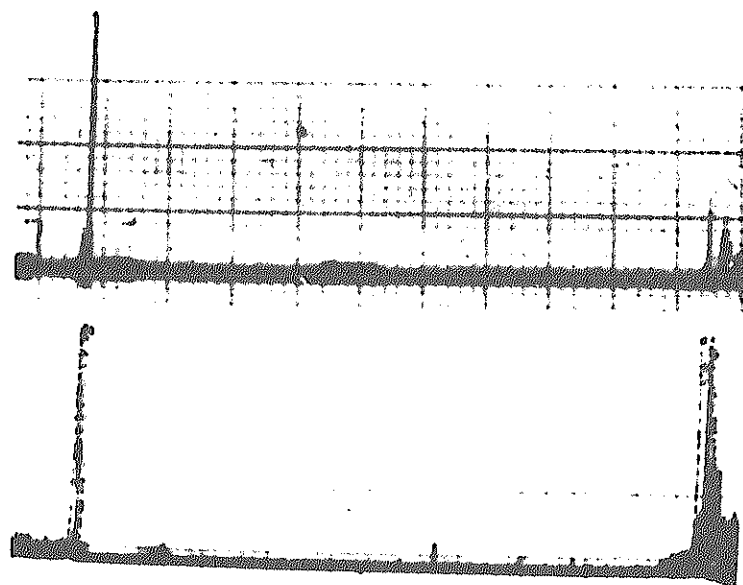
Fig.3 Tube S3805



(a) Eddy Current Recording Chart

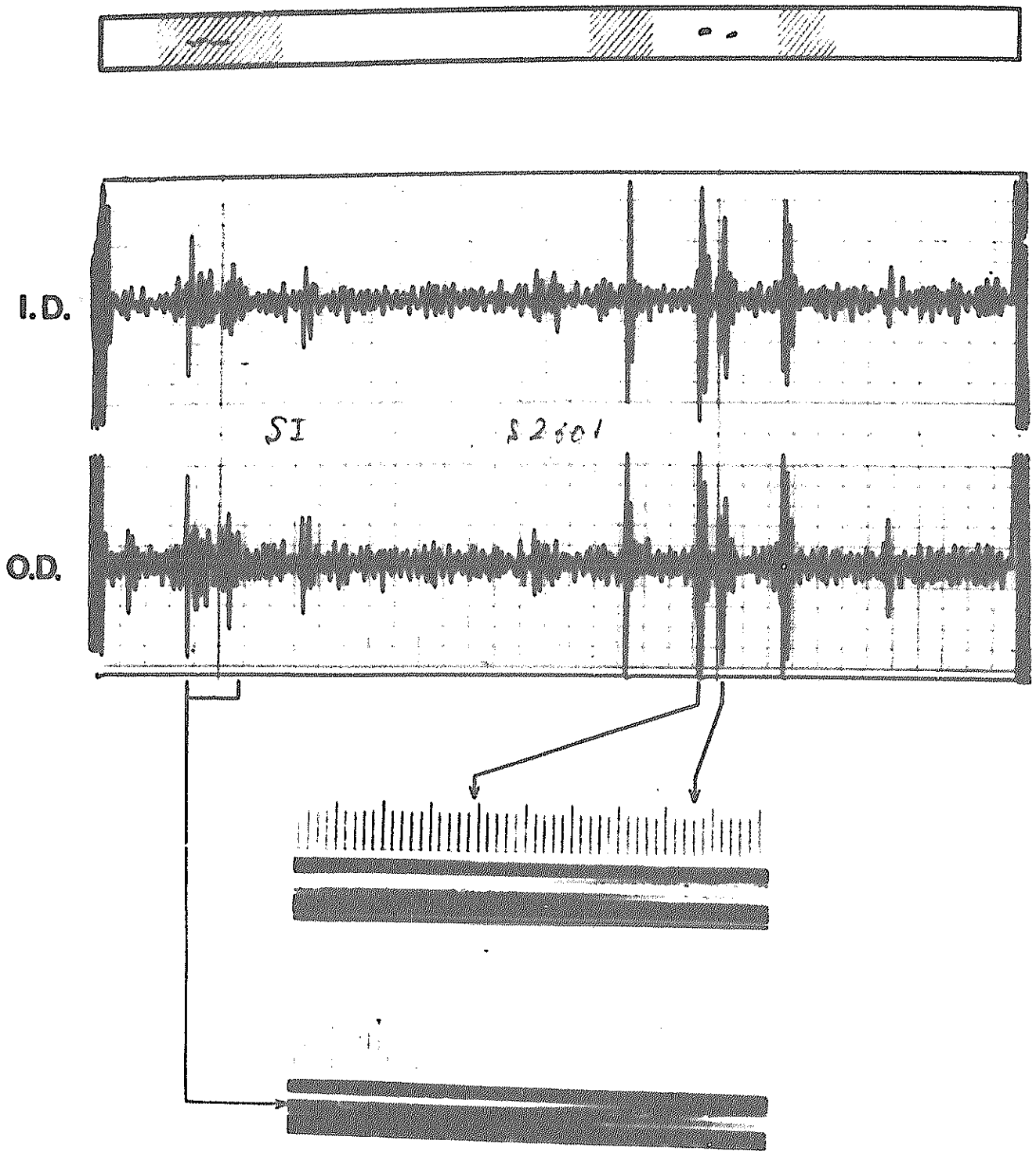
Transverse  
Channel

Longitudinal  
Channel



(b) Ultrasonic Recording Chart

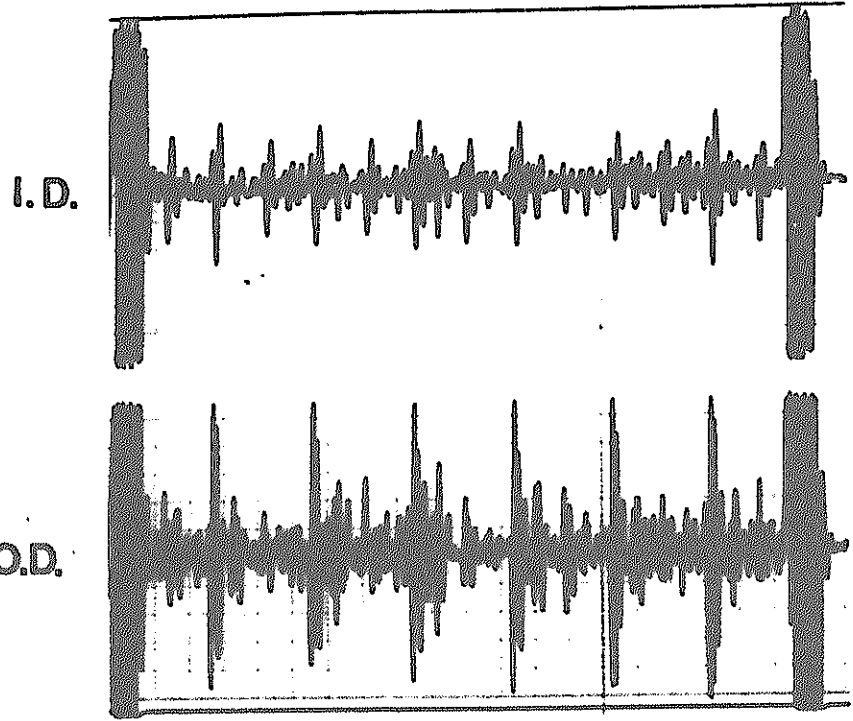
Fig.4 Tube S2601



(c) Surface View

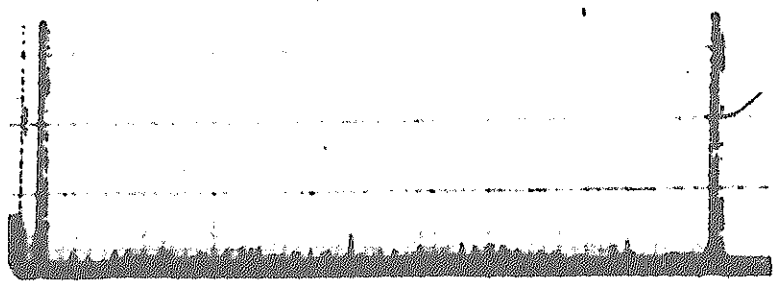
Fig.4 Tube S2601



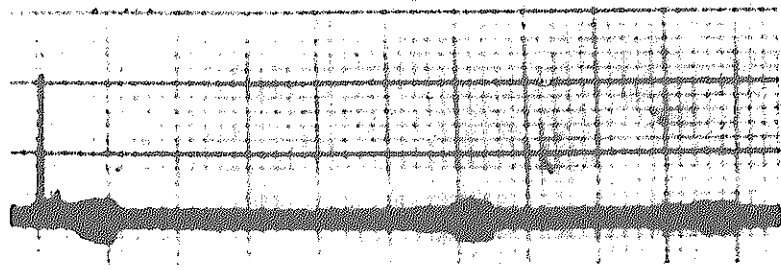


(a) Eddy Current Recording Chart

Transverse Channel

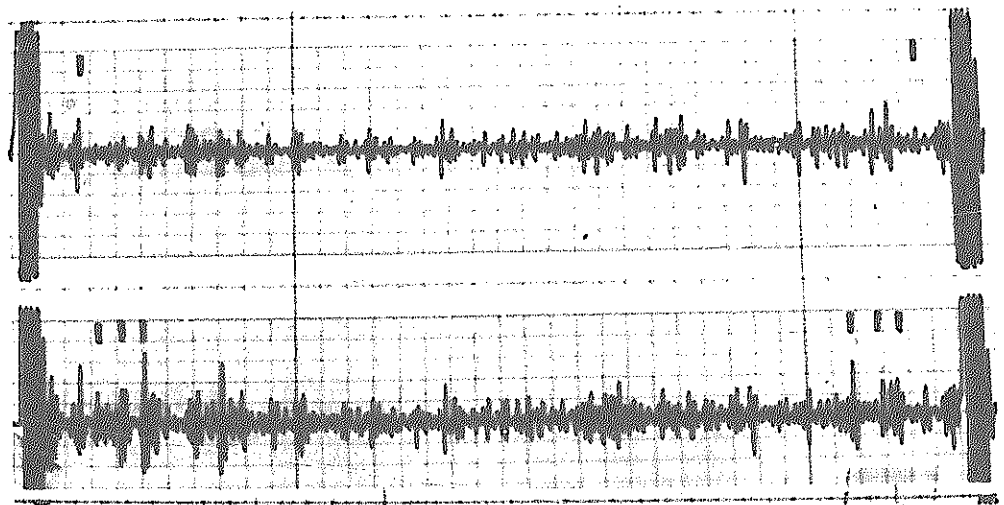
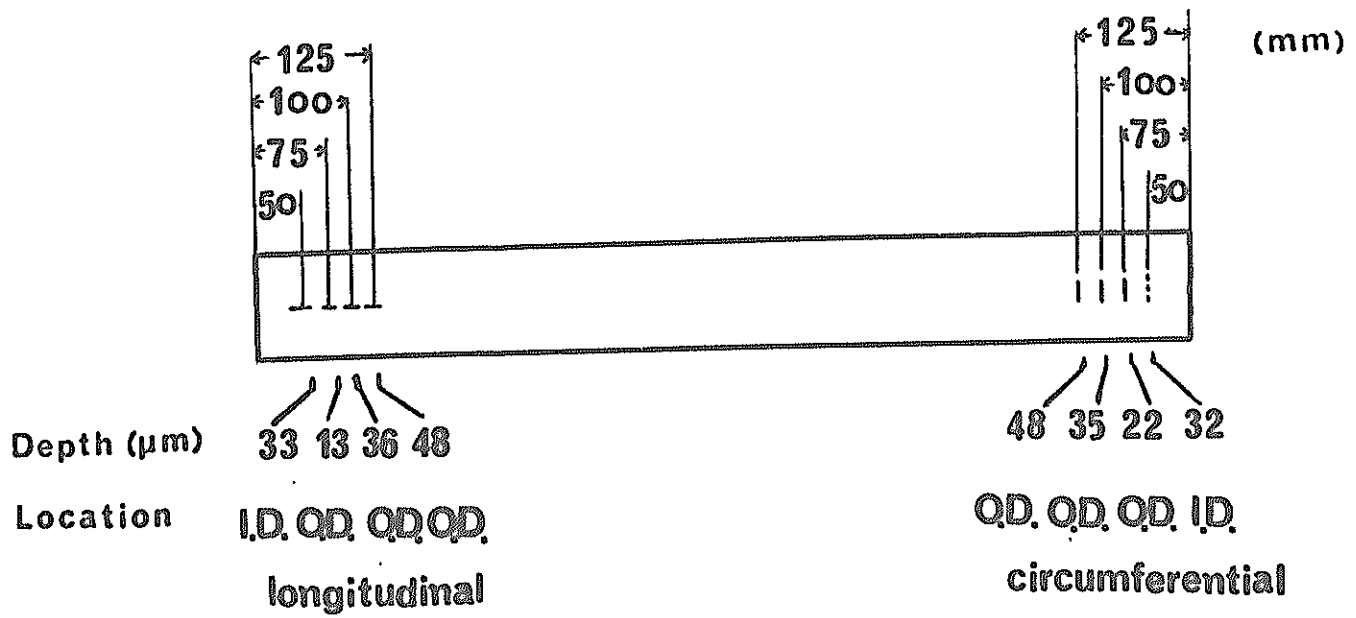


Longitudinal Channel

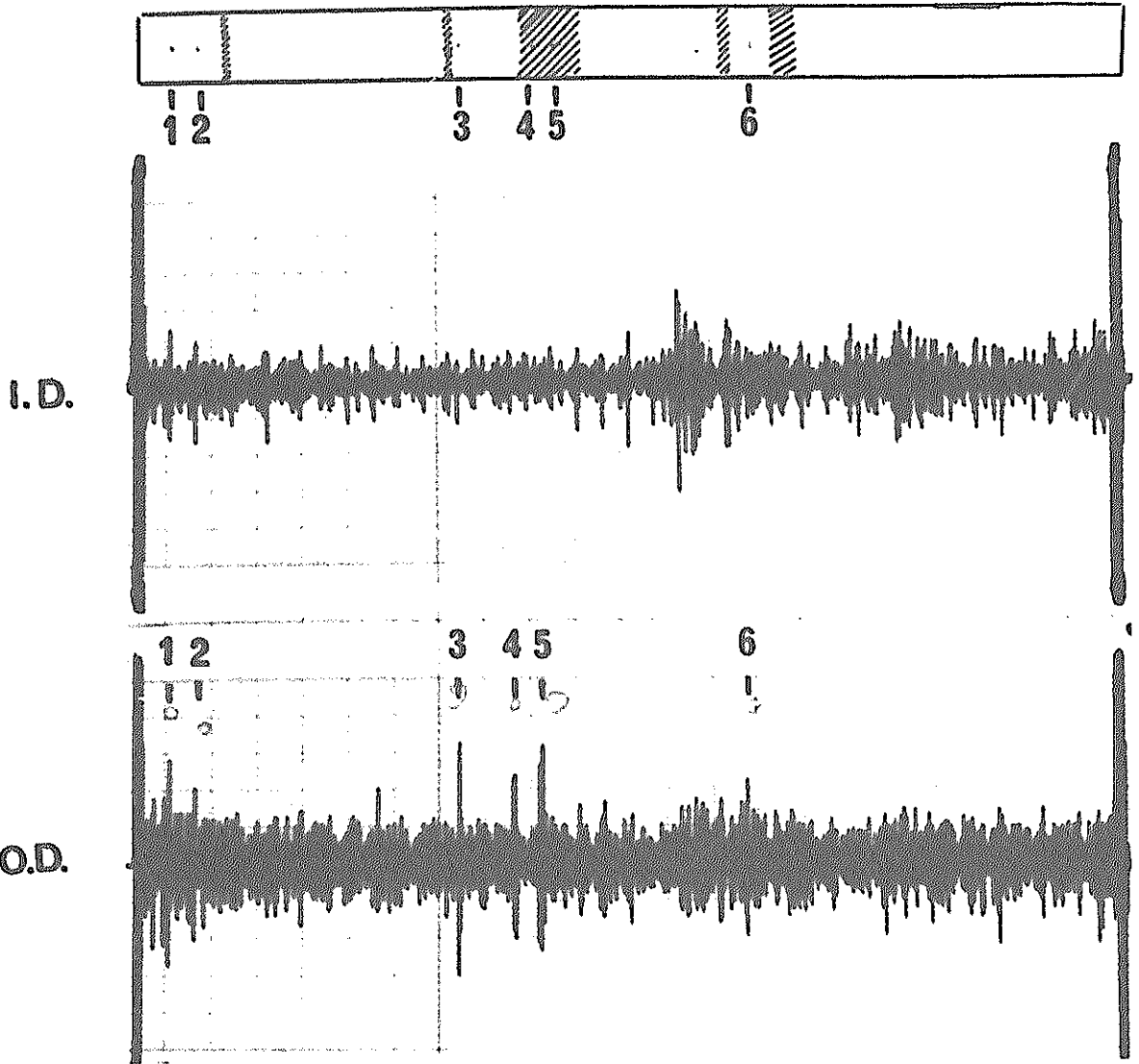


(b) Ultrasonic Recording Chart

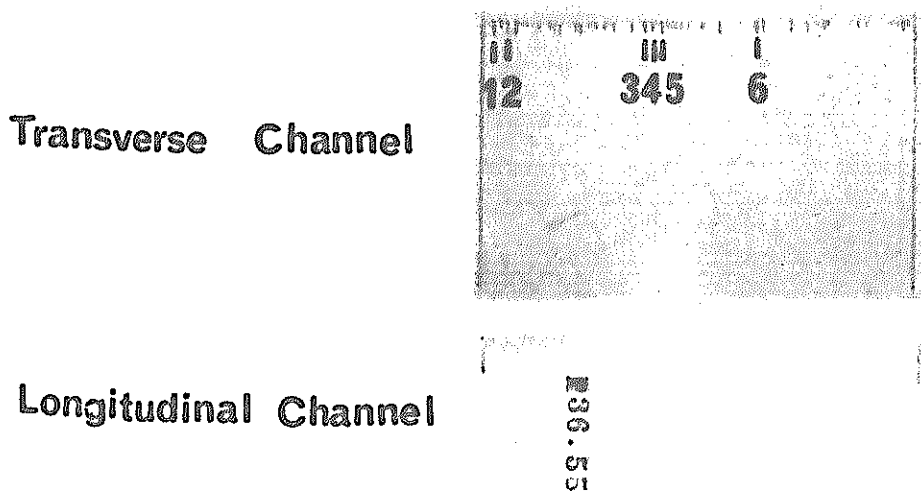
Fig.5 Tube S3451



**Fig.6 Eddy Current Recording Chart of Standard Tube**



(a) Eddy Current Recording Chart

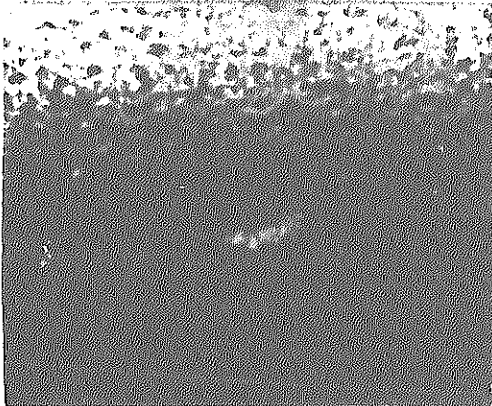


(b) Ultrasonic Recording Chart

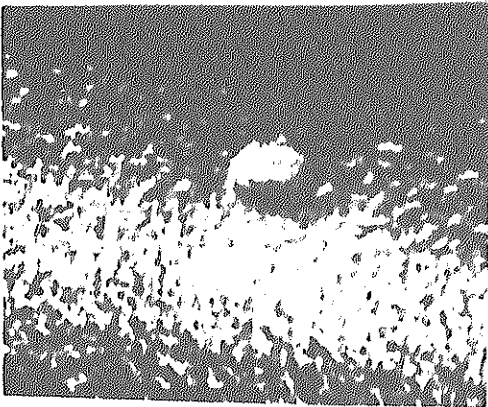
Fig.7 Tube 36 55



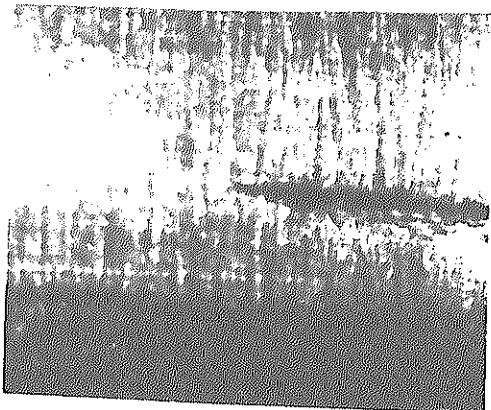
1



3

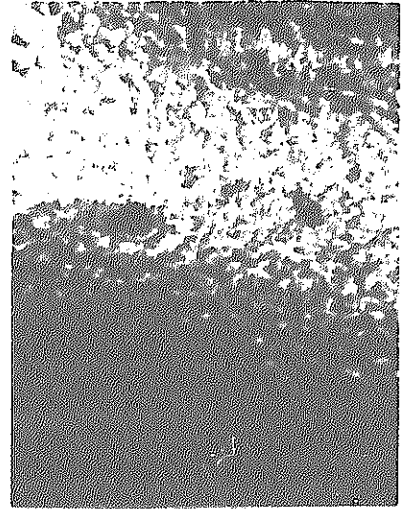


5

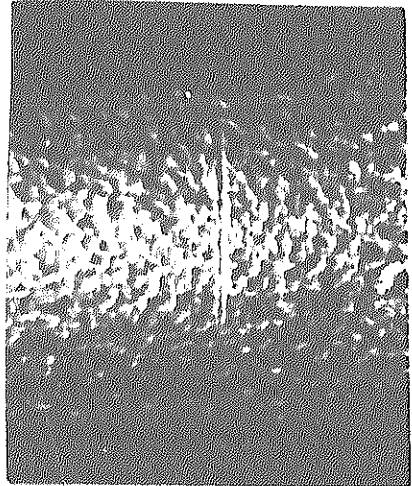


4

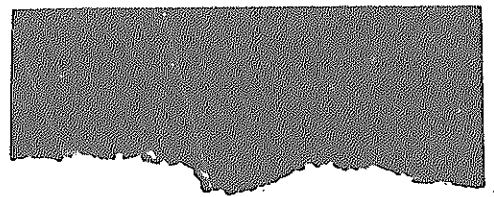
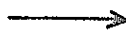
0.1 mm



2



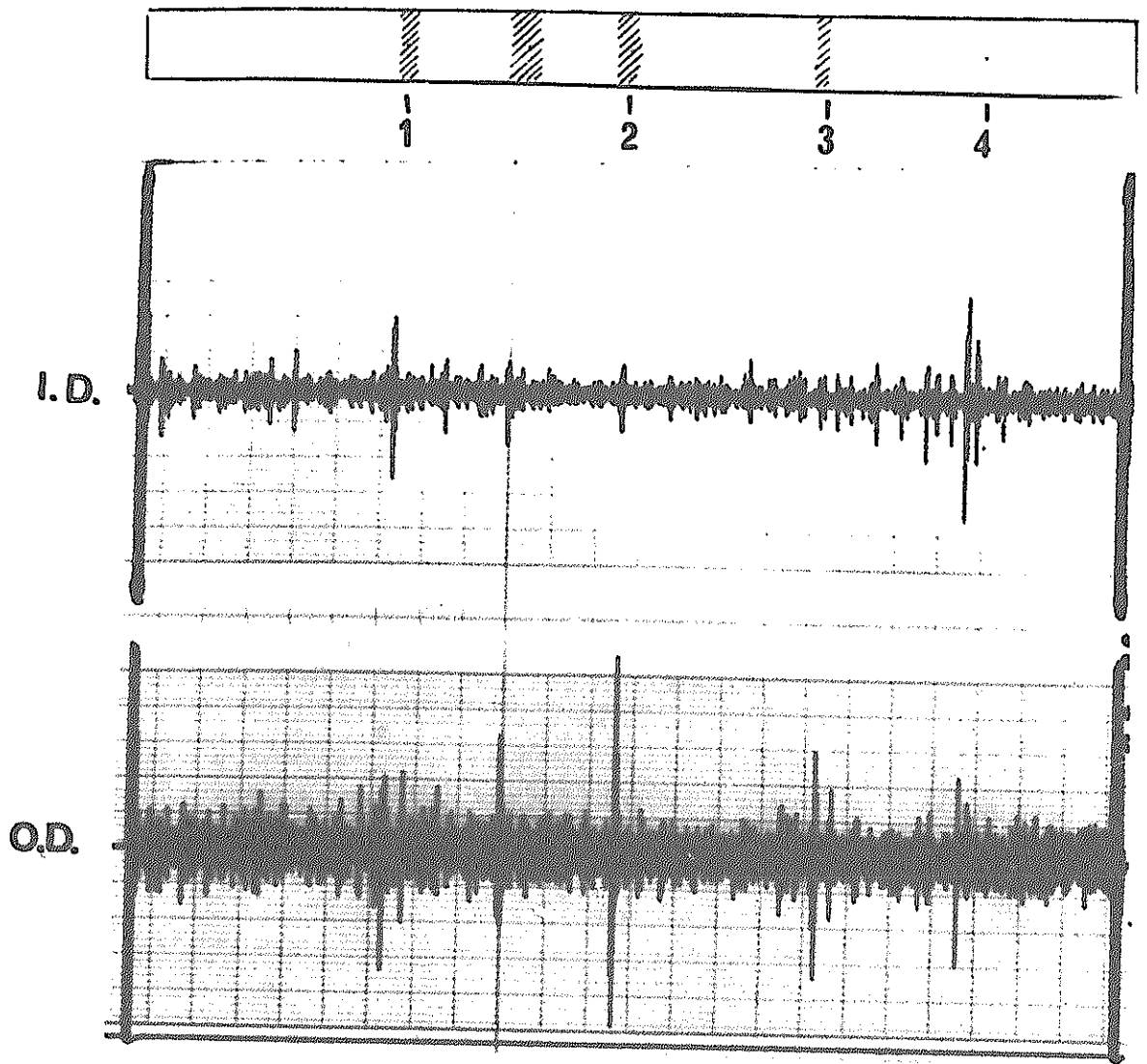
6



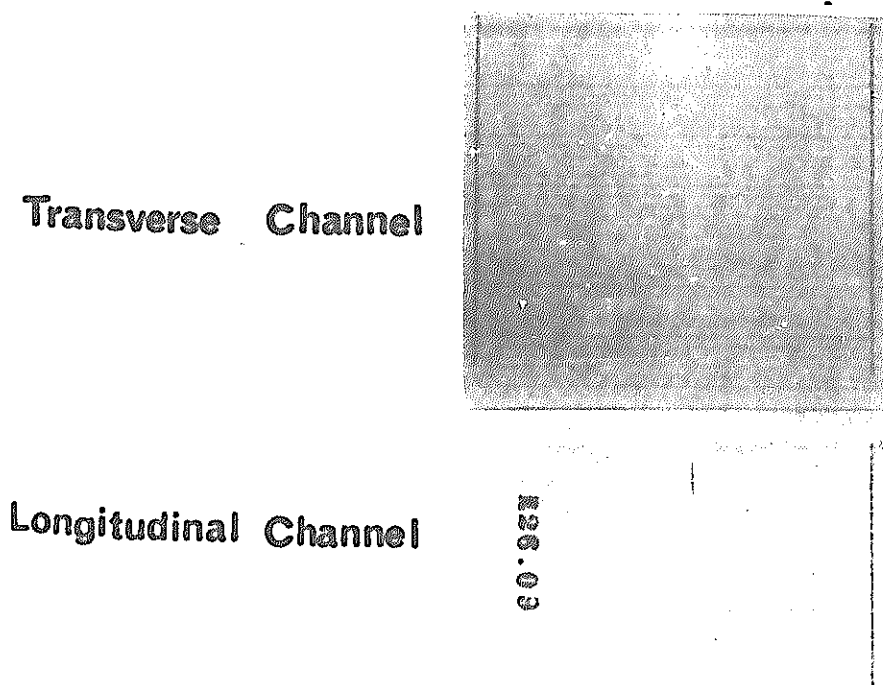
13 μ

Transverse Cross-section

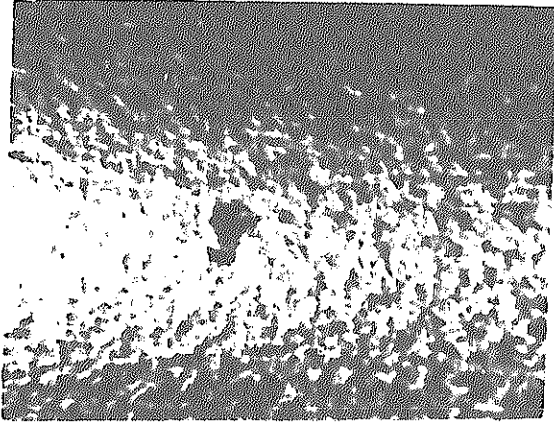
(C) Micrograph Of The Defect



(a) Eddy Current Recording Chart

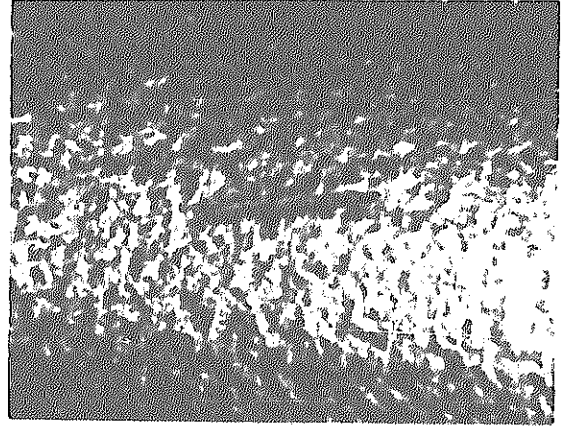


(b) Ultrasonic Recording Chart

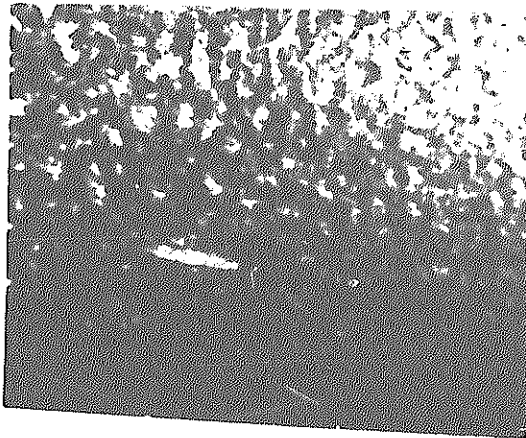


1

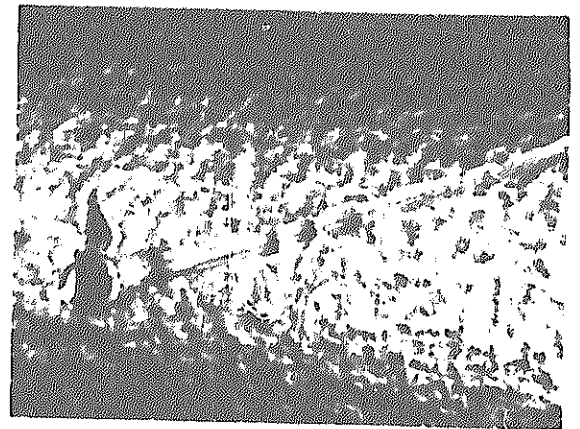
]0.1mm



2

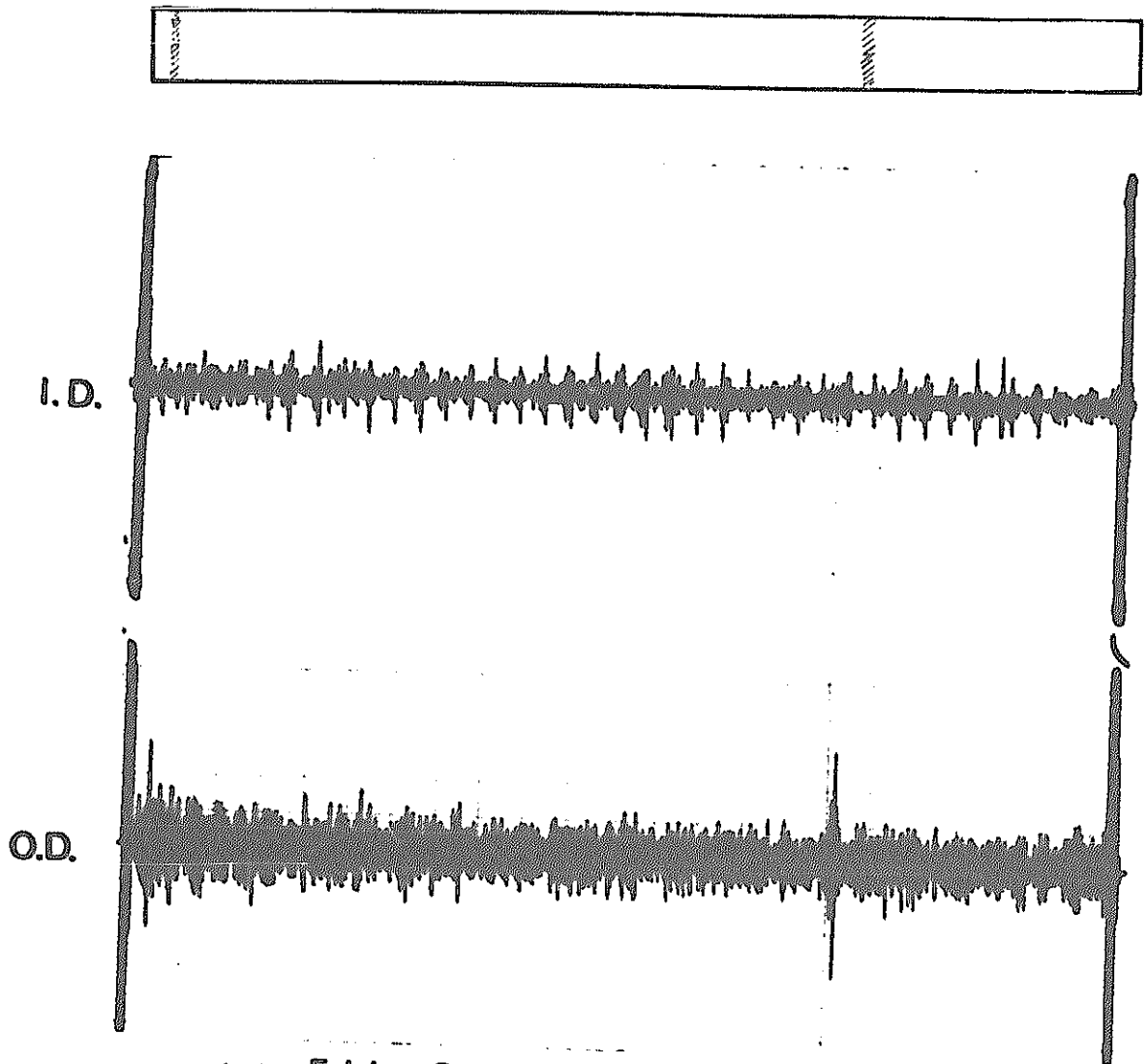


3



4

(c) Micrograph Of The Defect

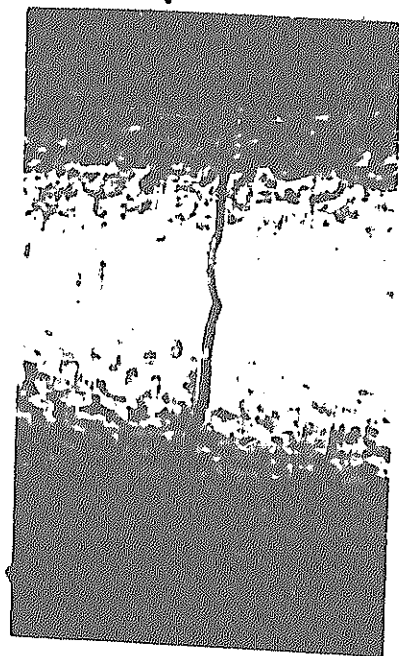


(a) Eddy Current Recording Chart

Transverse Channel

Longitudinal Channel

220.43

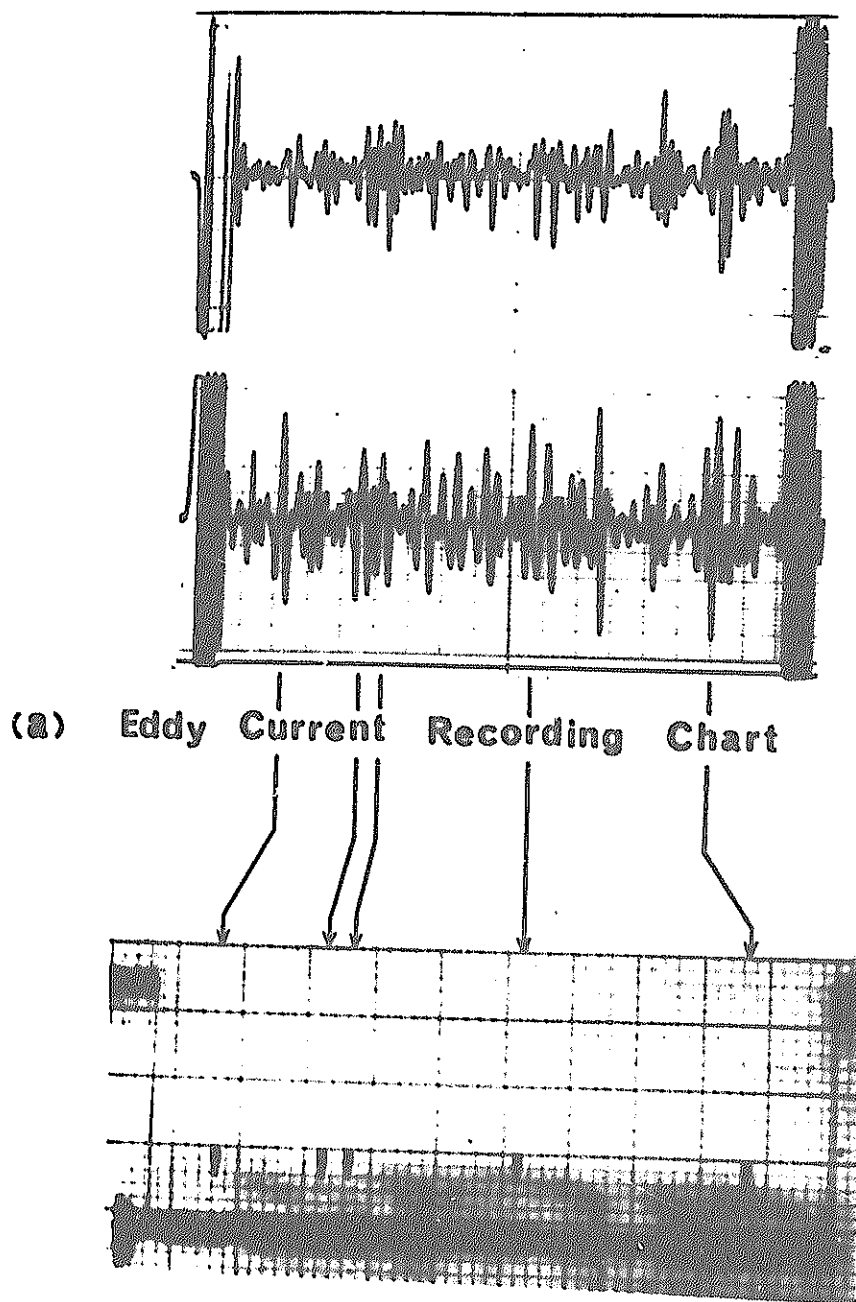


0.2mm

(b) Ultrasonic Recording Chart

(c) Surface View

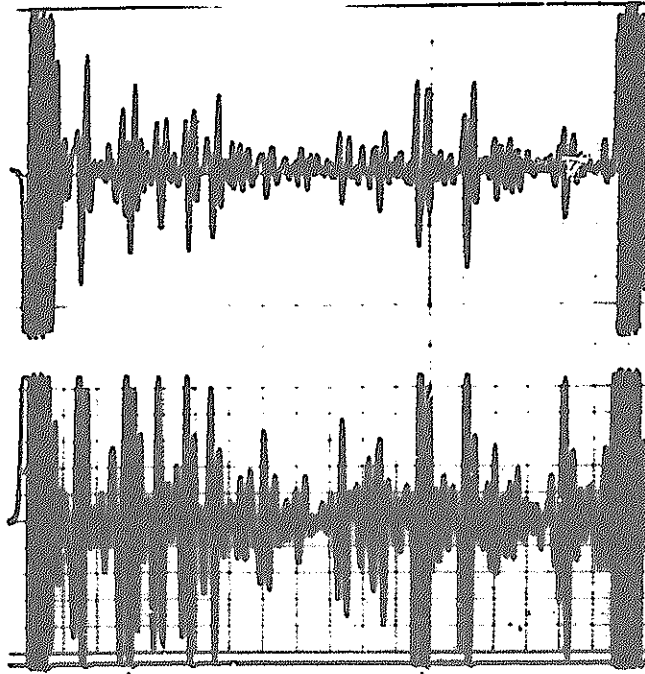
Fig.9 Tube 26 43



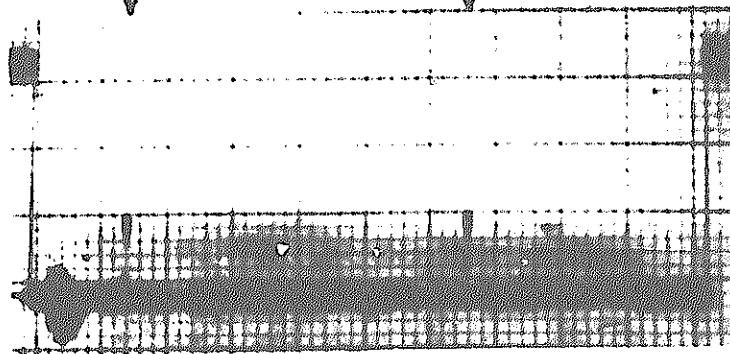
(b) Wall Thickness Shown By Ultrasonic Wall Thickness Gauge

Fig.10 Comparison Between Variation Of Wall Thickness And Eddy Current Signals



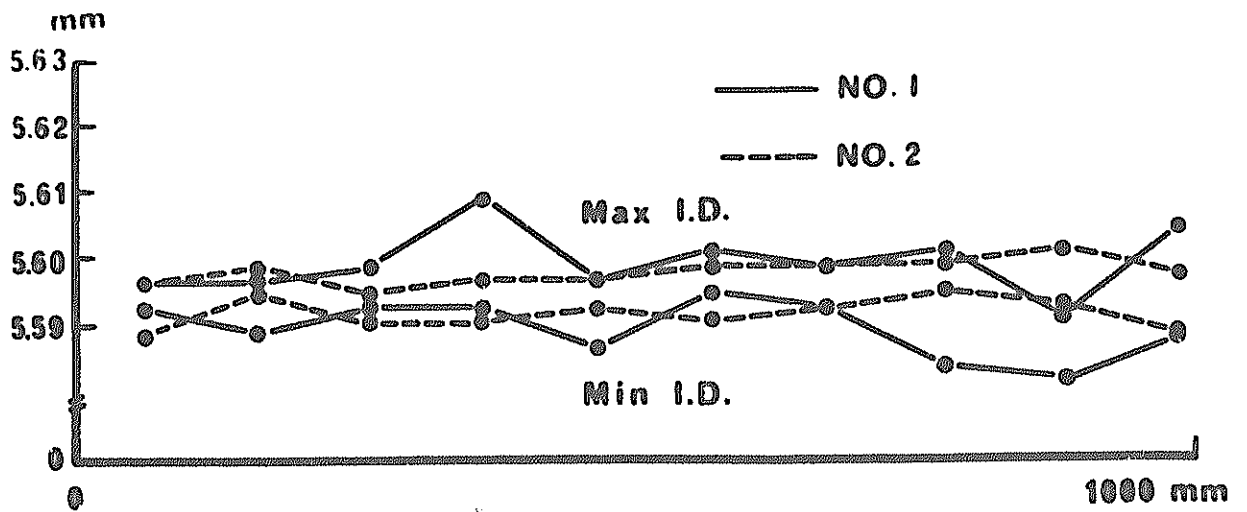


(a) Eddy Current Recording Chart

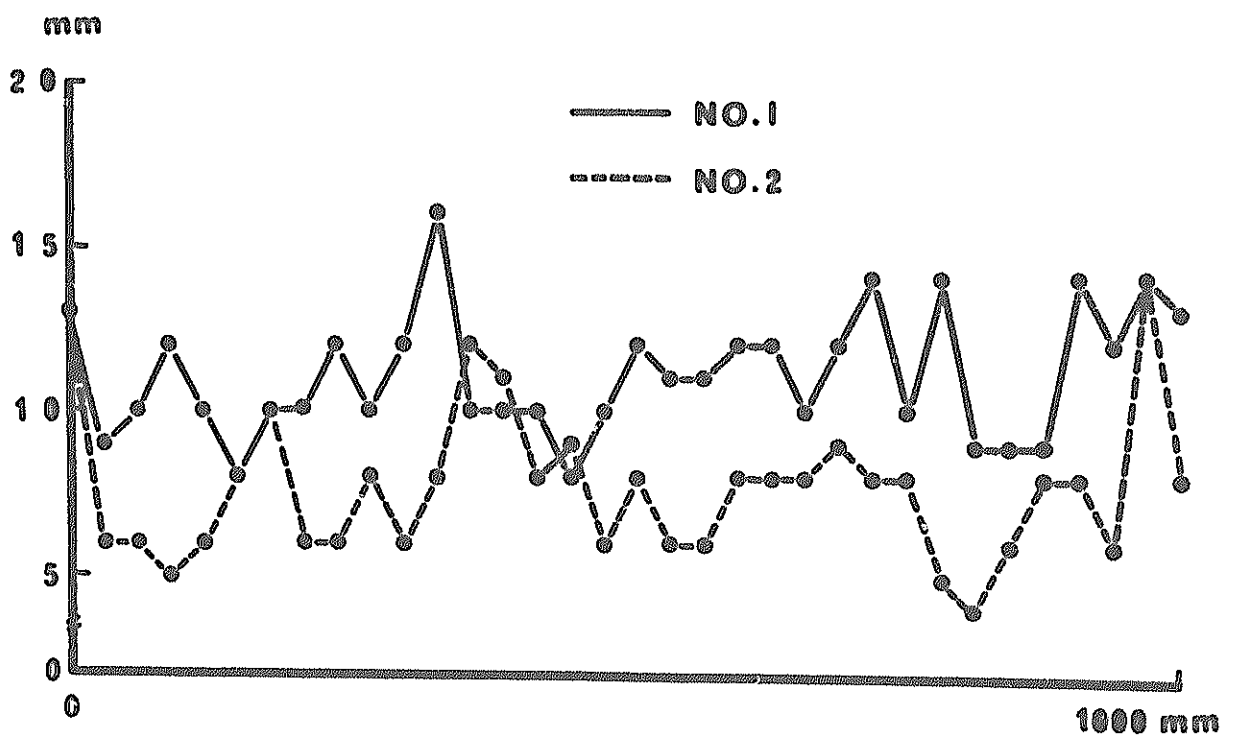


(b) Wall Thickness Shown By Ultrasonic Wall Thickness Gauge

**Fig.11 Comparison Between Variation of  
Wall Thickness and Eddy Current Signals**

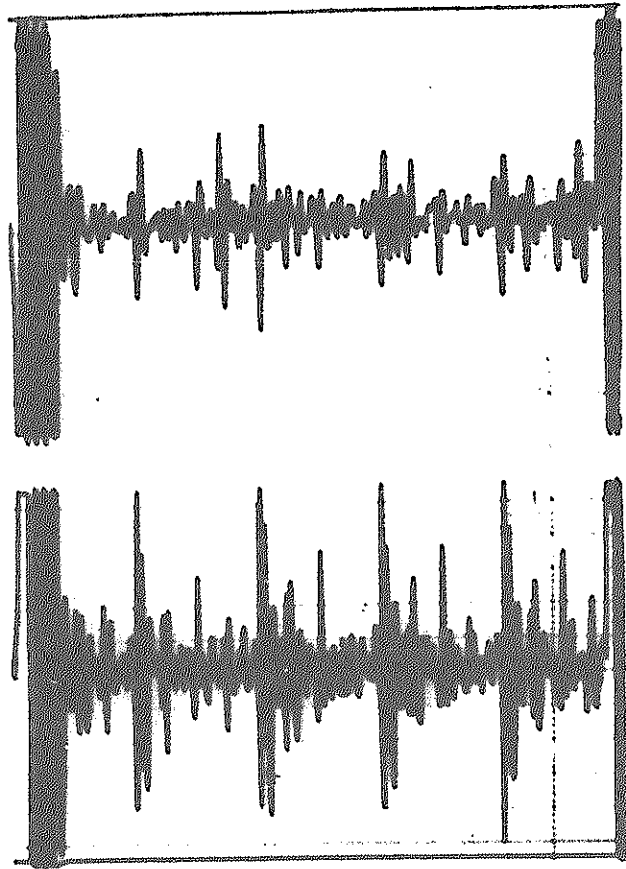


(a) Inner Diameter

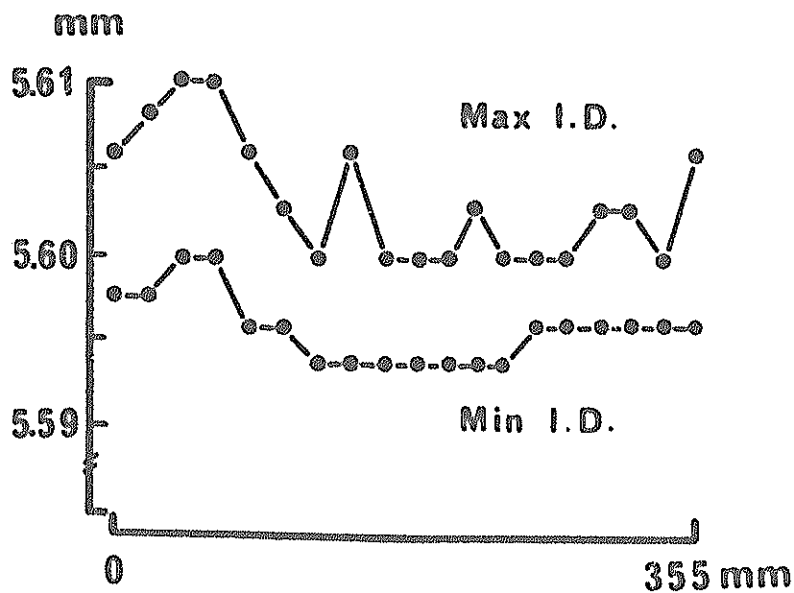


(b) Background Noise

**Fig12 Comparison between Variation of Inner Diameter and Background Noise**

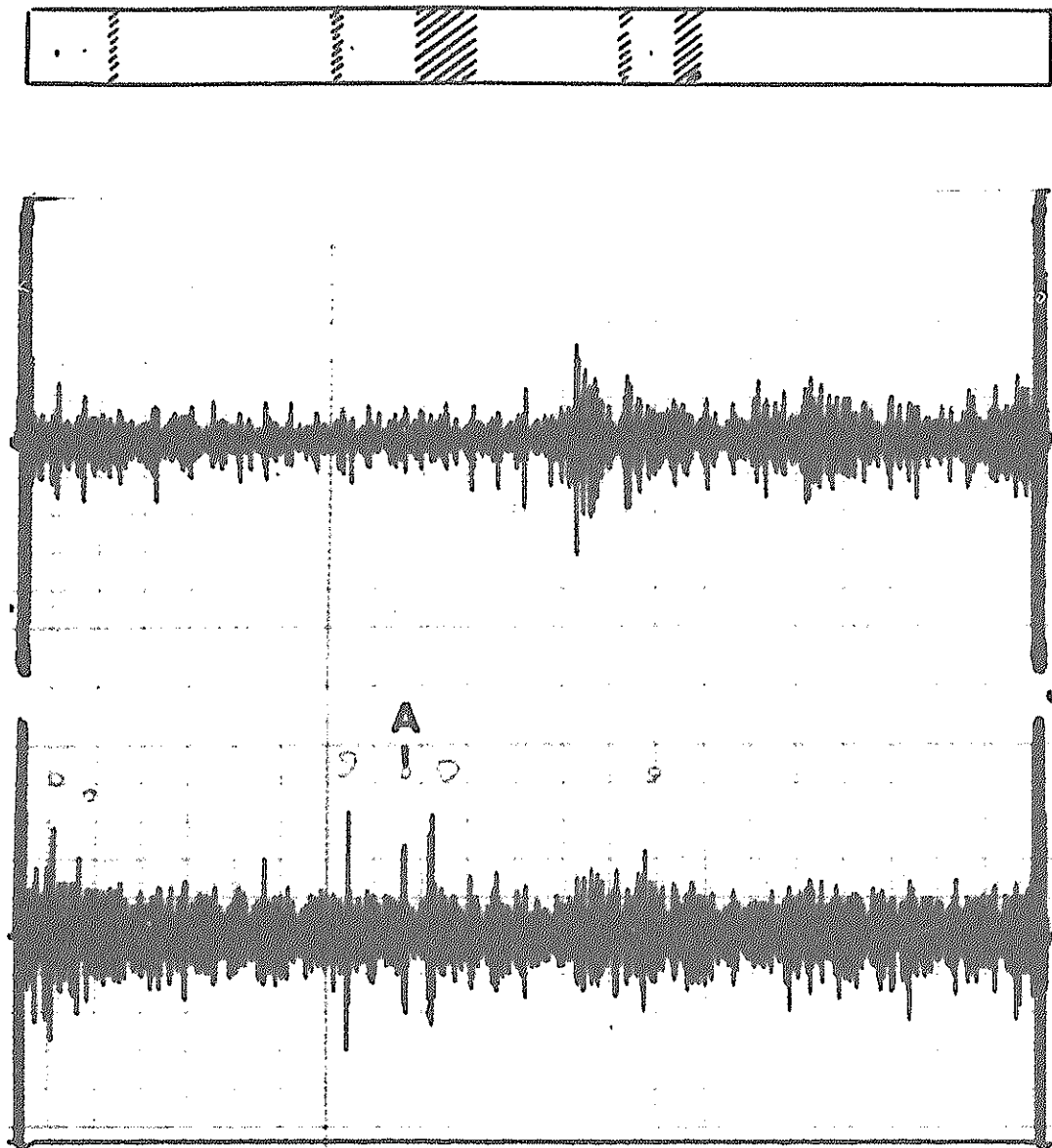


(a) Eddy Current Recording Chart

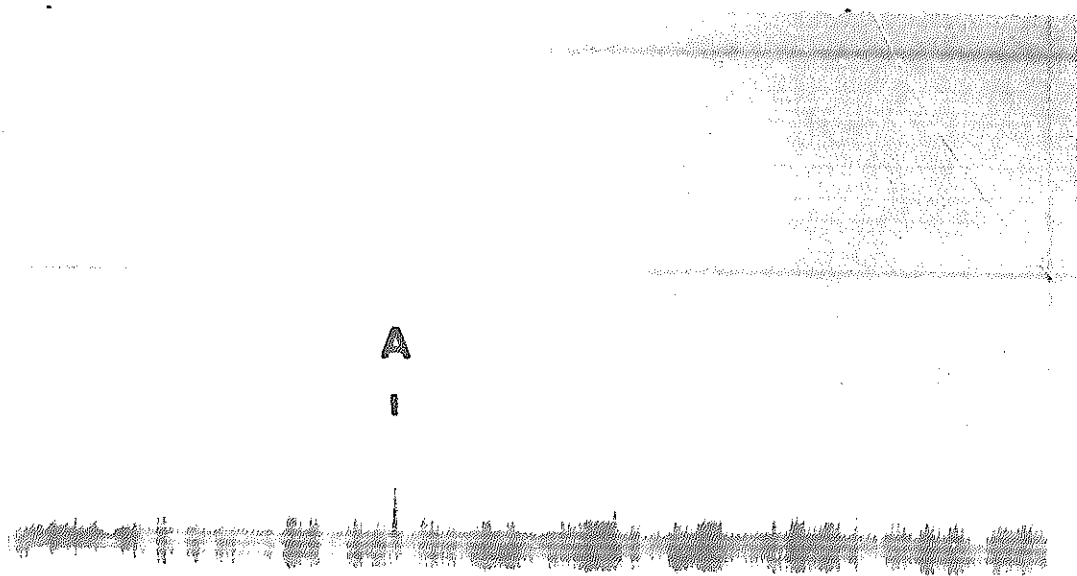


(b) Inner Diameter

Fig.13 Comparison Between Variation of Inner Diameter and Eddy Current Signals

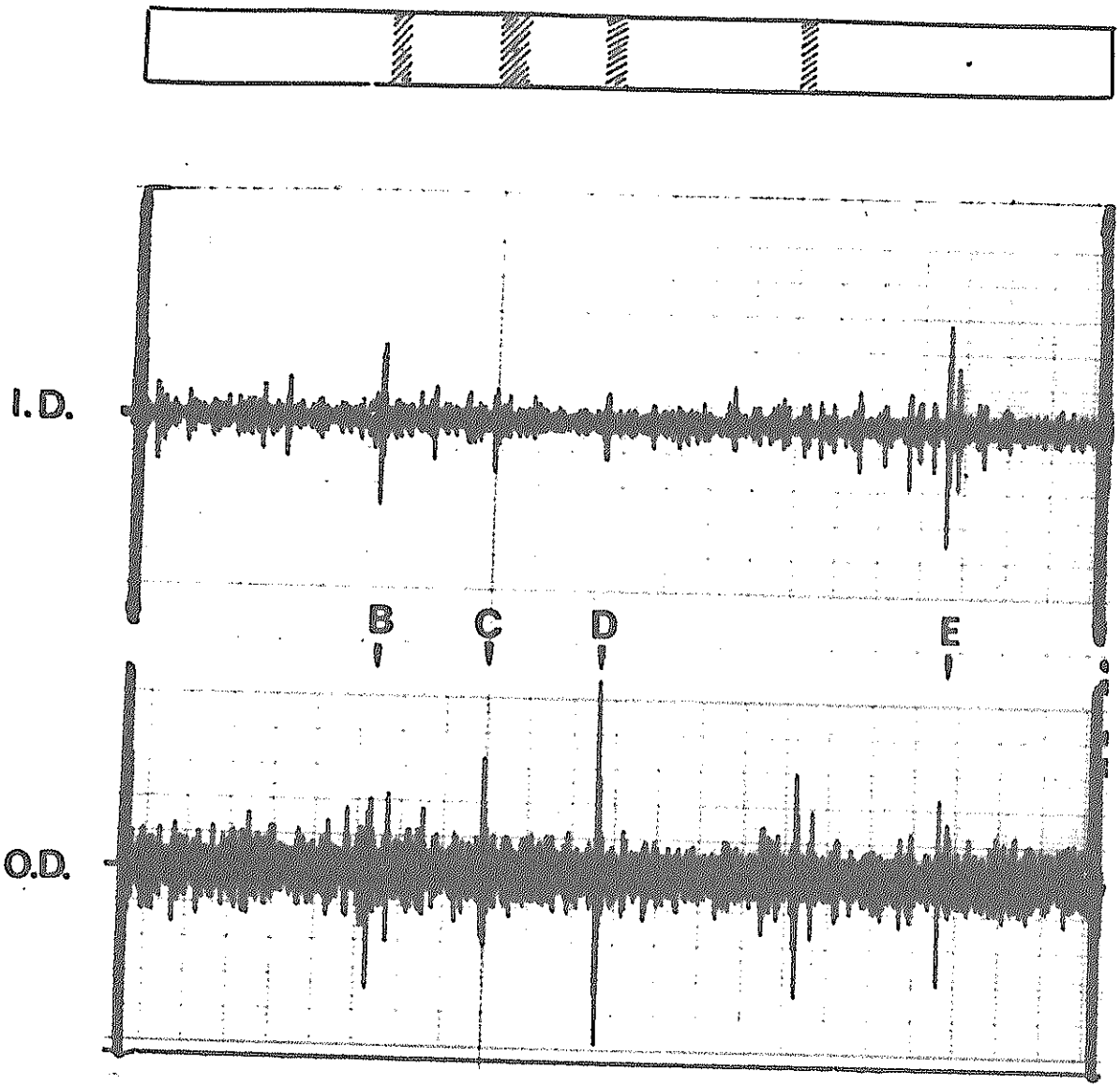


(a) Eddy Current Recording Chart

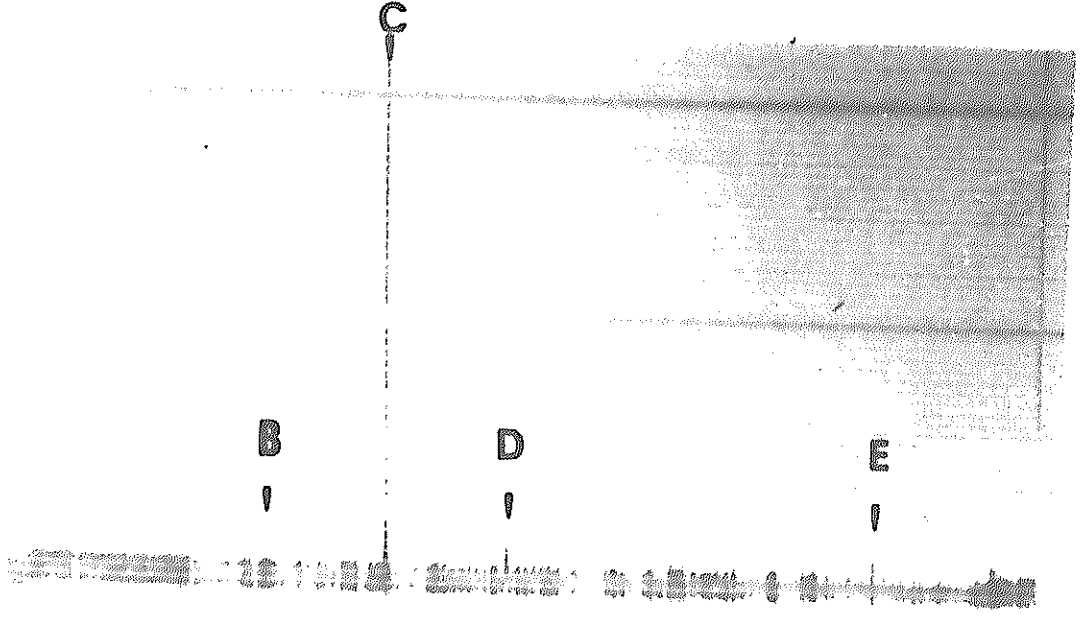


(b) Wall Thickness

**Fig. 14 Comparison Between Variation Of Wall Thickness And Eddy Current Signals**

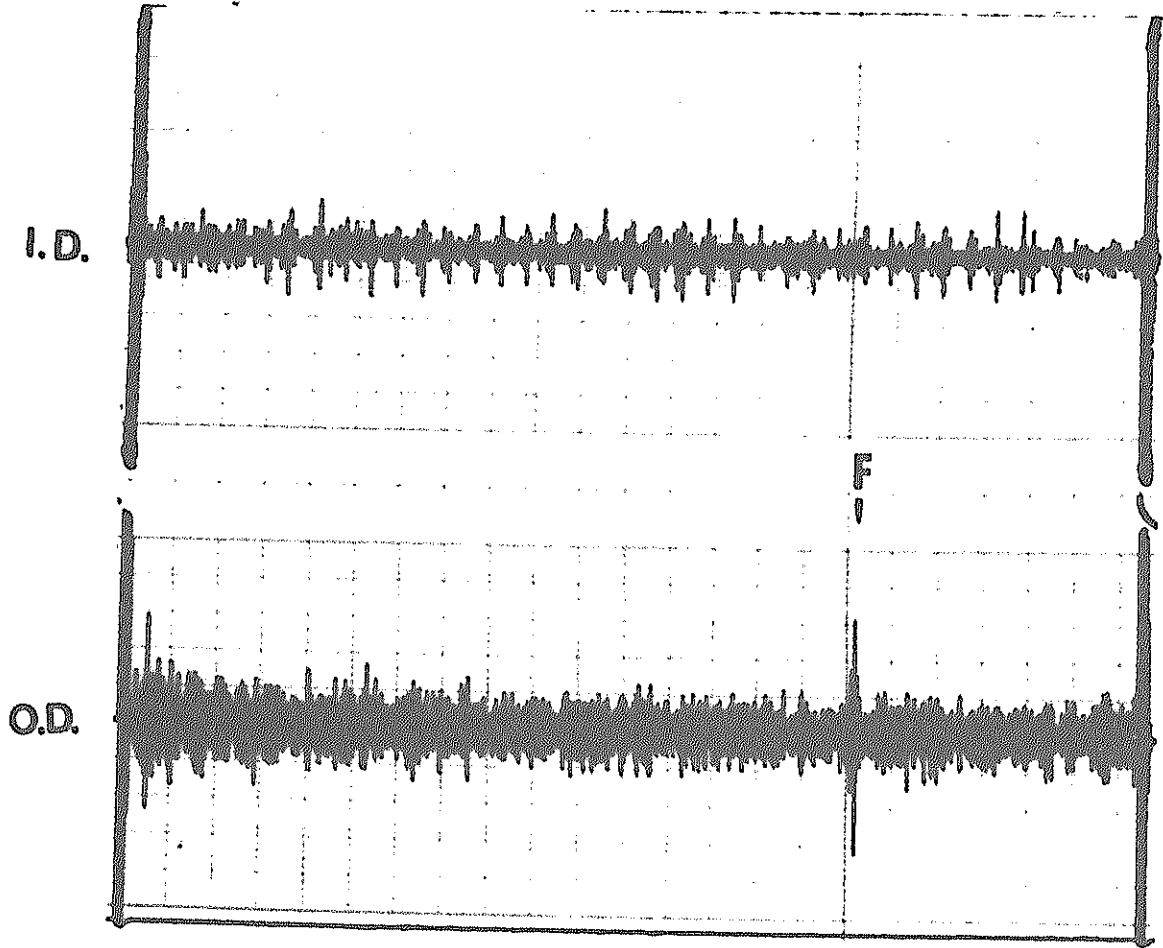


(a) Eddy Current Recording Chart

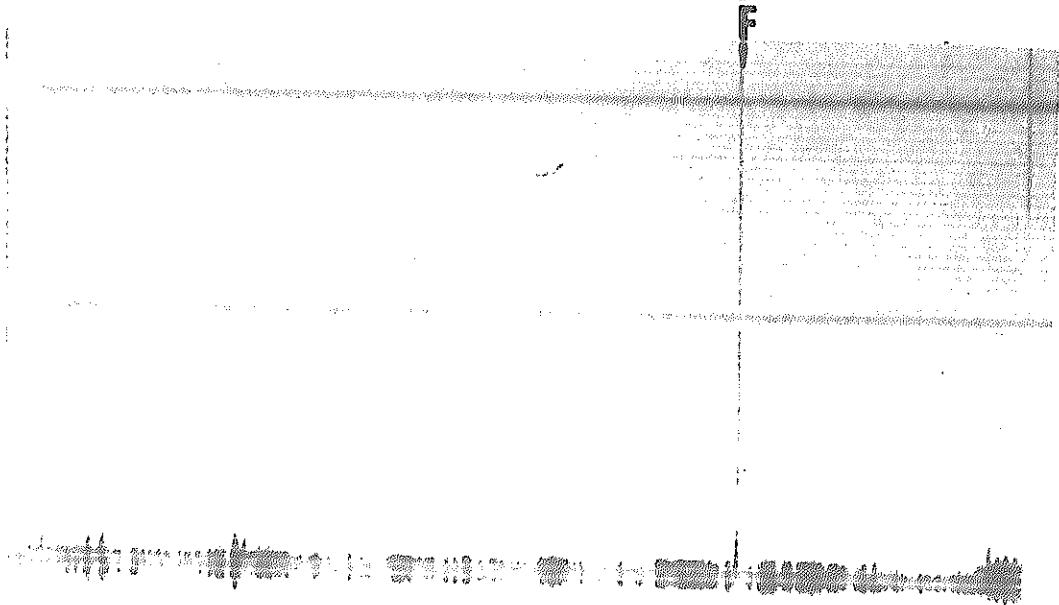


(b) Wall Thickness

Fig.15 Comparison Between Variation of Wall Thickness and Eddy Current Signals



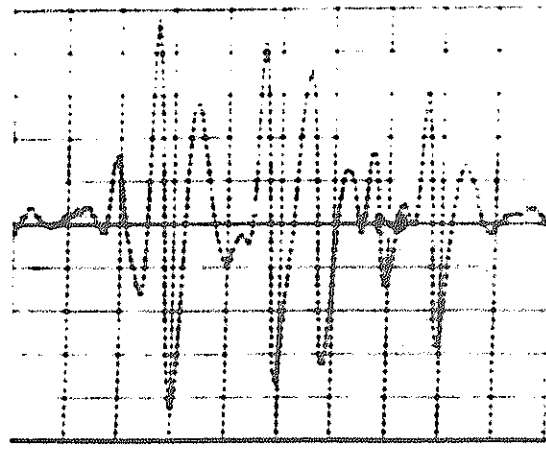
(a) Eddy Current Recording Chart



(b) Wall Thickness

Fig.16 Comparison Between Variation of Wall Thickness and Eddy Current Signals

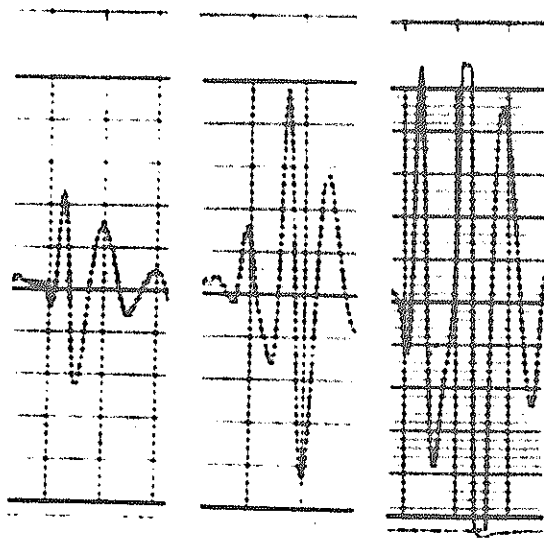
( a )



↑    ↑    ↑  
# 800   # 1000   # 1200

10 sec

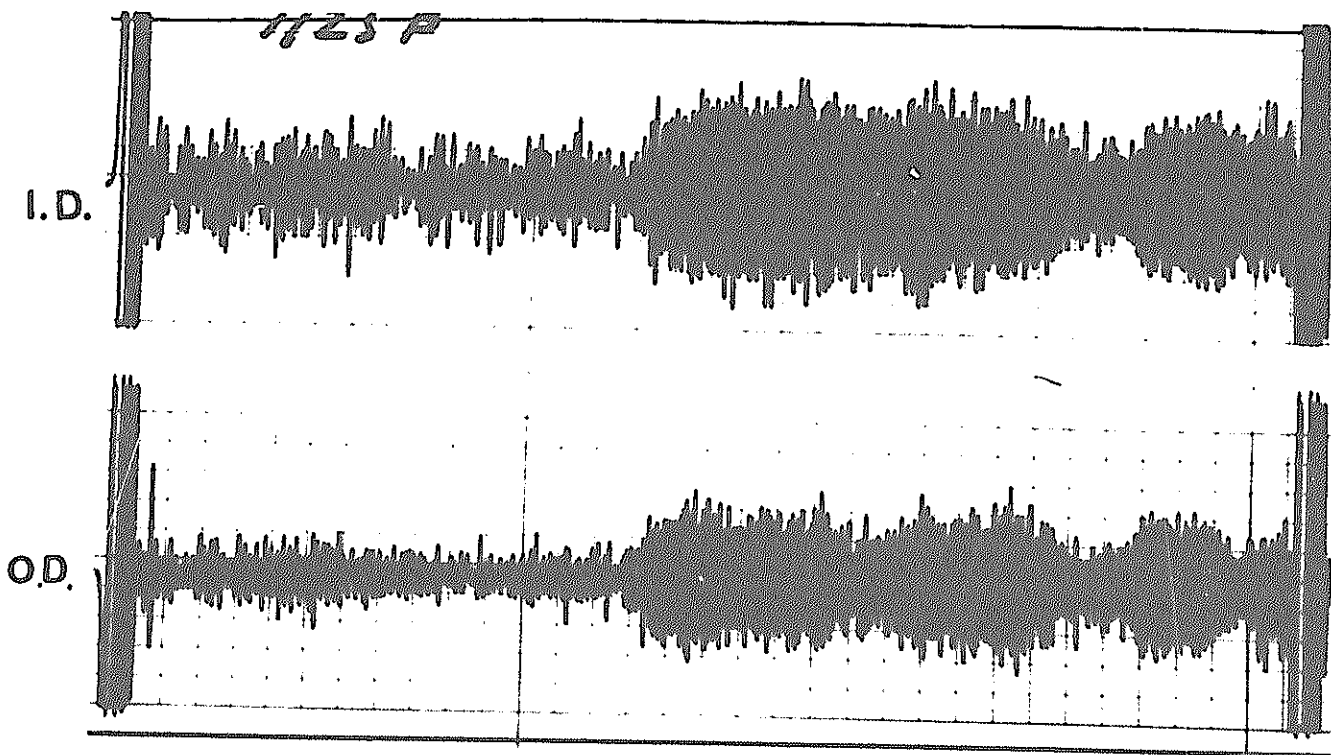
( b )



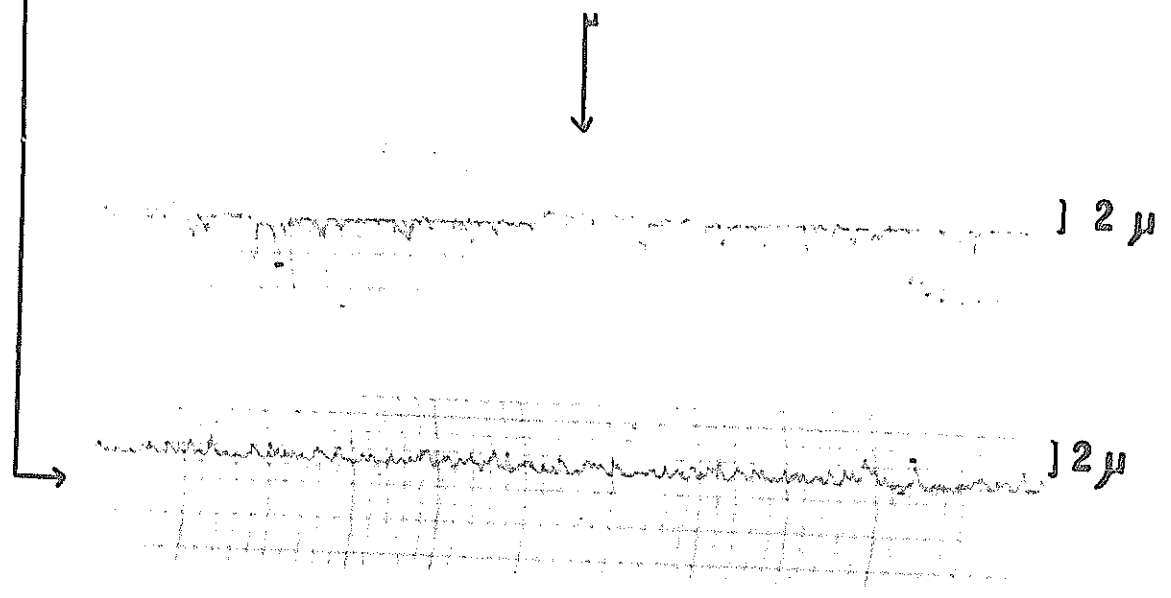
↑            ↑            ↑  
5 sec        10 sec        20 sec

# 800

Fig. 17 Indication Of Grinding Surface



(a) Eddy Current Recording Chart

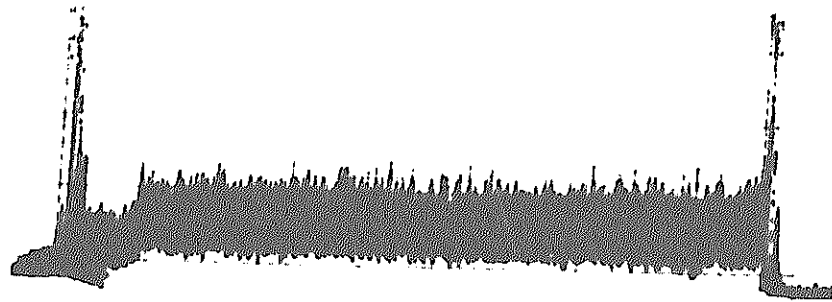


(b) Surface Roughness

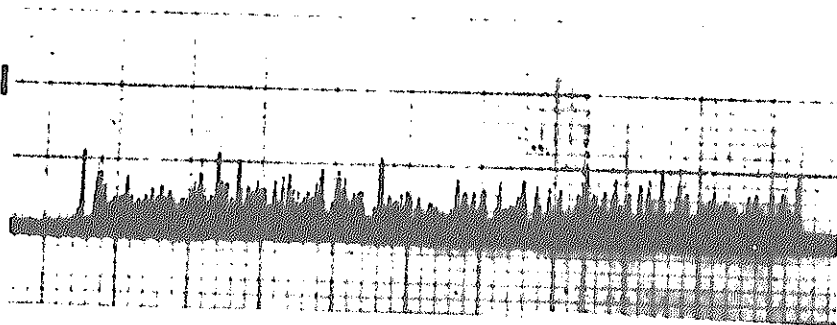
Fig.18 Surface Roughness Of Tube 1125B



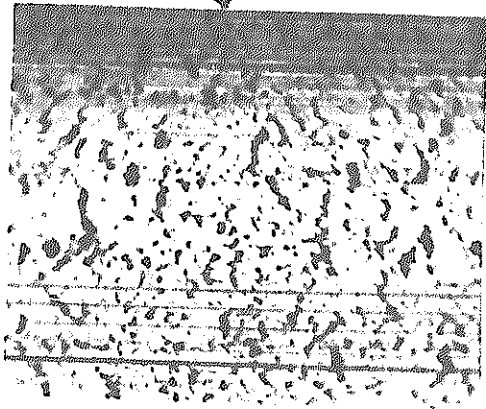
Transverse  
Channel



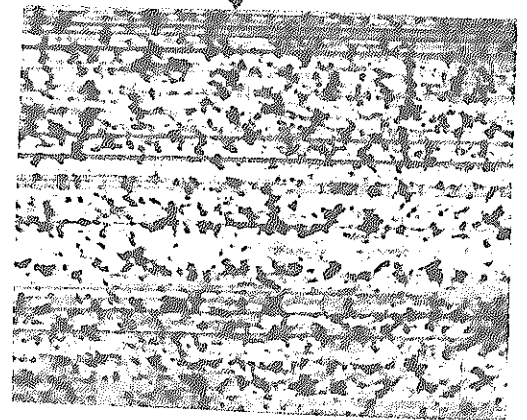
Longitudinal  
Channel



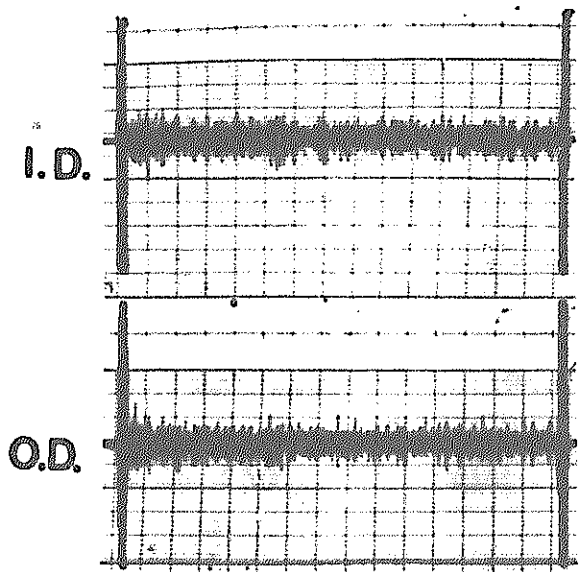
(c) Ultrasonic Recording Chart



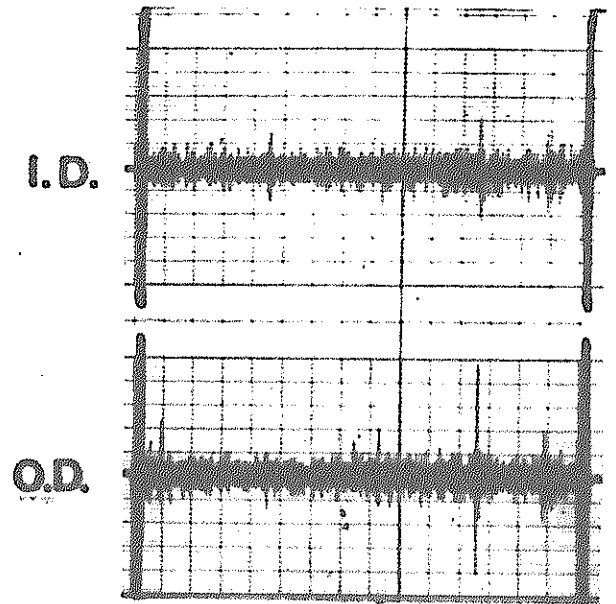
0.1 mm



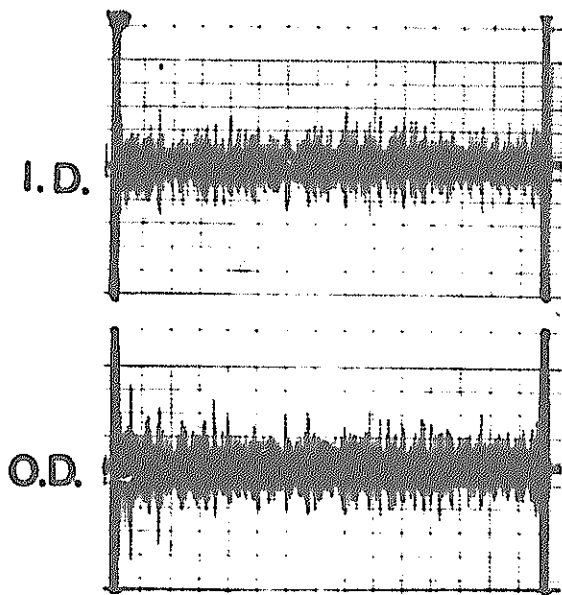
(d) Inner Surface



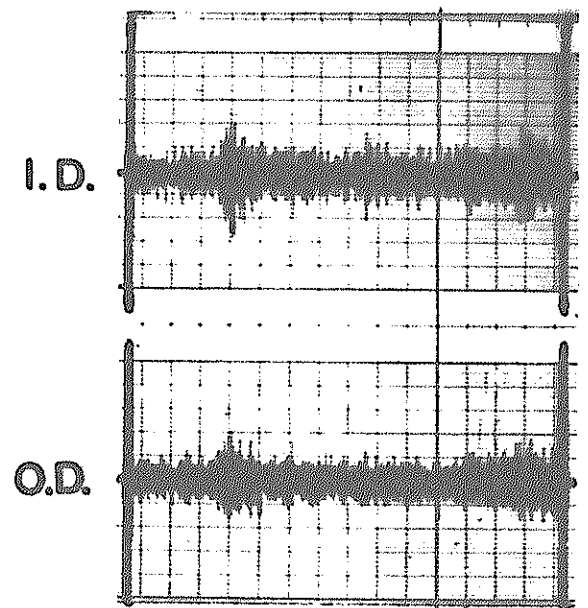
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.19 Eddy Current Recording Chart