

表面硬化材のナトリウム中試験(I)

2000時間腐食試験

1977年6月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

1977年 6月

表面硬化材のナトリウム中試験(I)

2000時間腐食試験

加納茂機* 長谷川成生* 中山祐一*

小坂 実* 中筋 孝* 厚母栄夫**

要旨

高速炉機器の接触摺動部に適用される表面硬化材の長時間使用におけるナトリウムとの共存性をしらべる目的で、600℃ナトリウム中に約2000時間没せきし、材料間の腐食挙動を比較した。試験片はナトリウム中摩擦・自己融着試験に供されてきた各種Co基合金、Ni基合金、カーバイト材である。なお、比較のため従来腐食試験が行なわれてきたSUS 304, SUS 316, 2 1/4 Cr-1 Mo鋼等手持ちの耐食耐熱材料も同時没せきした。解析は摩擦、自己融着現象に影響のある表面あらさ、かたさ、表面観察、組織観察および腐食量の測定により行なった。得られた結果のうち、主なものを挙げると次のようである。

- (1) ステライト合金: 腐食量はSUSとくらべてそれほど大きくはなく、一部の試験片は増量した。表面あらさの変化は小さく、かたさは増加する。ナトリウム接液面近傍組織にはナトリウム没せきによる変化がみられない。
- (2) コルモノイ合金等Ni基肉盛材: 大きな腐食量を示すかたさは低下する。コルモノイ合金表面には10~40μm厚さの変質層が生じ、表面あらさは増加する。
- (3) インコネル合金: 腐食量はSUSの約2倍であり、表面に1~4μm厚さの変質層を生ずる。表面あらさの変化は小さい。
- (4) 耐食耐熱材料: 腐食量はSUSの1~2倍である。表面あらさの変化は小さく、かたさは変化しない。表面にはっきりした変質層はみられないが、組織内に析出物が生成するものがある。
- (5) カーバイト材: LC-1Cは台金よりはく離した。LW-1N40は腐食量の変動が大きい。表面あらさはいずれも増加した。
- (6) その他の: SUS 316は粒界、特にナトリウム接液面側に σ 相が生成する。

* ナトリウム技術開発室

** 現在、FBR開発本部

June, 1977

Shigeki KANOH*, Naruo HASEGAWA*, Kohichi NAKAYAMA*,
Toru KOAKUTSU*, Takashi NAKASUJI* and Hideo ATSUMO**

Abstract

A corrosion test of hard facing material has been conducted in 600°C sodium for 2000 hrs. Test pieces were Co base alloys, Ni base alloys and carbides which were provided for tribology studies in sodium. These materials were compared with SUS304, SUS316 and another corrosion and heat resisting alloys by simultaneous exposure. Analysis methods after exposure were as follows: surface roughness, hardness, corrosion rate, surface morphology and metallurgical structure which have influence on friction and self-welding behavior.

The results obtained are as follows:

- (1) Stellite alloys: Part of test pieces showed weight gain. Change of surface roughness was minute.
Structural change was not observed in the surface vicinity of sodium contact. However, hardness increase was observed.
- (2) Ni base hard facing materials such as Colmonoy alloys:
Corrosion rates were high and hardness was reduced. A degraded layer of 10µm through 40µm was observed on the surface of Colmonoy alloys and their surface roughness increased.
- (3) Inconel alloys: Corrosion rates were double those of stainless steels. A degraded layer of 1µm through 4µm was observed on the surface. Change in surface roughness was minute.
- (4) Corrosion and heat resisting alloys:
Corrosion rates showed one to two times greater than those of stainless steels. Change in surface roughness was minute. No change in surface layer was observed. However, precipitates were observed in the metallurgical structures of some alloy types.
- (5) Carbides: Large increase of surface roughness was observed. LC-1C exhibited stripping from substratum. LW-1N40 indicated wide variation in corrosion rates.
- (6) Other materials:
SUS316 produced a sigma phase at the grain boundary of sodium surface contact.

* Sodium Technology Section

** FBR Project

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験方法	2
2.1 供 試 材	2
2.2 試験装置	2
2.3 ナトリウム中浸せき条件	2
2.4 解析方法	3
3. 試験結果および考察	4
3.1 浸せき材の外観	4
3.2 浸せき表面の走査型電顕観察	4
3.3 重積測定による腐食量	4
3.4 浸せき表面の表面あらさ変化	5
3.5 浸せき材の金属組織	5
3.6 浸せき表面のかたさ変化	5
4. まとめ	7
5. あとがき	8
6. 文 献	9

1. 緒 言

高速ガラ機器の接触、摺動部には摩擦および自己融着の観点よりSUS 304 およびSUS 316 以外の表面硬化材が適用される。表面硬化材のナトリウム中摩擦、自己融着現象の解明に関しては別に試験が行なわれているが、ナトリウム中で長時間使用される際問題となる腐食挙動については今まで試験がまったく行なわれておらず、その解明が要請されている。

本試験ではまず 600 °C ナトリウム中に試験片を約 2000 時間没せきした。試験片はナトリウム中摩擦および自己融着試験に供されてきた各種の Ni 基合金、Co 基合金およびカーバイト材である。なお、比較のため従来腐食試験が行なわれてきたSUS 304, SUS 316, 2 1/4Cr-1Mo と手持ちの耐食耐熱材料も同時没せきした。解析手法としては従来ナトリウム中腐食試験の解析に用いられてきたもののうち、自己融着、摩擦現象に影響のある表面あらさ測定、かたさ測定、表面観察、組織観察および腐食量の測定を行なった。

2. 試験方法

2.1 供試材

Table. 1に供試材の化学成分を、Table. 2に機械的および物理的性質を、Table. 3に供試材の肉盛方法および熱処理条件を示す。試験片の寸法はFig. 1に示すとおりである。Table. 1に示すインコネル718から純鉄までは素材の機械加工により、またカーバイト材はSUS316板上に200 μm D-ガン溶射することにより試験片を製作した。残りのステライト、コルモノイ等の試験片は素材を酸素アセチレン溶融したものから機械加工により製作した。試験片表面の最終仕上げはエメリー紙#600で行なった。Ni基およびCo基の肉盛素材は住友金属鉱山(株)のサーフアロイを、カーバイト材はユニオンカーバイト社のものを使用した。またインコネル718は日立金属(株)のHRN718、AISI661は日本冶金(株)のNAS H40-2、純鉄は新日鐵(株)のもの、SUS304、SUS316および2 1/4 Cr-1Moは神鋼(株)のもの、これら以外の素材は三菱金属(株)のものを使用した。

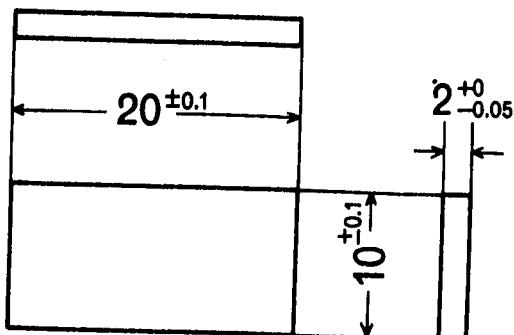


Fig. 1 Size of Test Piece

2.2 試験装置

Fig. 2にSUS316製自己融着・摩擦試験ループのフローシートを示す。本試験に使用した試験装置は流動ナトリウム中における表面硬化材の摩擦係数の時間依存性をしらべる目的で設置されたSW-3ポットである。Fig. 3にポットの断面を示す。試験片はFig. 4に示すSUS316製ホルダー2個に取付けられ、ポットの入口ノズルわきのナトリウム中に浸せきされた。なお、材質間の相互作用を極力小さくするため化学成分の異なる試験片は互いに離してナトリウム中に浸せきした。

2.3 ナトリウム中浸せき条件

Table. 4にナトリウム中浸せき条件を、Fig. 5に試験装置の運転経過を示す。試験時間は試験部の温度が600°C、ナトリウム流速が5ℓ/minであった期間の合計値とし、2,174時間である。試験片表面におけるナトリウム流速はほぼ0に等しいと考えられる。ナトリウム弁VN301, 302, および303の切り替えにより、コールドトラップで純度管理したナトリウムを時々試験部に供給した。コールドトラップで純化したナトリウムを試験部に供給した合計時間は約1700時間である。

2.4 解析方法

ナトリウム没せき試験前後の試験片について次のような方法で解析を行ない、材質間の腐食挙動を比較した。なお、試験片は試験装置から取出し後エチルアルコール、水、アセトンの順で洗浄し、最終的にエチルアルコール中で超音波洗浄して解析に供するまで真空乾燥器内で保管した。

(1) 重量測定

METTLER社の精密直示天秤により重量測定を行ない、ナトリウム浸漬前後の腐食量を求めた。最小読み取り値は1/100mgであった。

(2) 表面あらさ

小坂研究所製SE-3C型万能表面形状測定機により最大高さあらさH_{max}を測定した。倍率は横方向が100倍、縦方向はクロムカーバイトが2000倍、その他は5000倍である。各試験片当り5ヶ所触針を走査し、その平均値を求めた。

(3) 走査型電顕観察

HITACHI製HS M-2型を使用し、加速電圧20kV、傾斜角度水平、露光時間100秒、倍率1000倍および5000倍で試験片表面を写真撮影した。

(4) 金属組織観察

ライヘルト金属顕微鏡写真装置MeF型により試験片断面の組織写真を撮影した。倍率は100倍および400倍である。純鉄はナイタールで、2 1/4Cr-1Mo鋼は5%ピクリン酸アルコールおよび5%塩酸アルコールの100対1混液で、その他の試験片は10%硝酸で腐食処理した。

(5) かたさ測定

AKASHI製微小かたさ計MVK-C型により試験片表面のかたさを測定した。試験片あたり5点ずつ表面に垂直方向の圧痕をつくりそれらの平均値を求めた。

3. 試験結果および考察

3.1 浸せき材の外観

ナトリウム浸せき後の試験片表面の肉眼観察を行なった。インコロイ800, カーペンター20, SUS304, SUS316 およびLC-1Cは黒っぽい色を、その他の材料は銀白色を呈していた。LC-1Cは合金のSUS316より一部がはく離していた。

3.2 浸せき表面の走査型電顕観察

Photo. 1~22にナトリウム浸せき試験前後の試験片表面の走査型電顕写真を示す。いずれの試験片も浸せき前後で表面形態が変わっているが、これは後述の重量変化データによるとステライトNa6およびカーバイトを除き浸せき後重量減少を示しているので、成分元素がナトリウム中に溶出したためと考えられる。コルモノイ合金、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼および純鉄では結晶粒界がはっきりとあらわれている。ハスティロイC表面にみられる白色粒状物は素材中にもともと存在する初析カーバイト(Mo rich)と考えられる。

3.3 重量測定による腐食量

Fig. 6にナトリウム浸せき前後の重量変化を試験片ごとにプロットした。縦軸の「-」は浸せき後重量が減少したことをあらわす。Table. 5には各試験片の重量測定値を示す。SUS304およびSUS316の腐食量が最も少なく、インコネル合金、カーペンター20Nb、インコロイ800、純鉄などはSUSの1~2倍となっている。 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼はSUSの4.5倍と高い。酸素アセチレンガス溶融した材料のうちコルモノイ合金はNo.20, 4, 5, 6の順に腐食量がふえている。ステライト合金の腐食量はコルモノイ合金より少ないが変動が大きい。特にステライトNa6は重量が増加している。メテコ16CおよびデロロステライトSF-60Mは本試験のうち最も大きい腐食量を示しておりSUSの10倍となっている。

Table. 6はSUS304, SUS316 および $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の腐食量に関する本試験結果と材料試験ループ1および2による試験結果^{(1)~(3)}を比較したものである。材料間の腐食量の大小は双方とも同じ傾向である。本試験のほうが腐食量が小さくなっているが、Table. 4に示したように本試験ではナトリウム流速がほぼ0であることとコールドトラップ温度が低いことが原因していると考えられる。Fig. 7に示すようにコールドトラップ温度が高いほど、各材料とも腐食量が大きくなっている。

Table. 5に示すようにLW-1N40の腐食量は著しい変動を示したので、Fig. 6にはプロットしなかった。またLC-1Cはナトリウム浸せきにより合金から一部がはく離したので重量測定を行なわなかった。

3.4 浸せき表面の表面あらさ変化

Table. 7にナトリウム浸没前後の試験片表面のあらさ値を示す。Fig. 8は浸せき前後の表面あらさ平均値を試験片ごとにプロットしたものである。ほとんどの試験片は浸せき後表面あらさが増加する傾向がみられるが、コルモノイ合金およびカーバイトを除くとその変化は小さい。コルモノイ合金はFig. 6に示した腐食量の増加と対応して表面あらさが増加している。カーバイトはカーバイト粒子の表面からの脱落のため表面あらさが増加したと考えられる。Fig. 6において最も大きな腐食量を示したメテコ 16 C およびデロロステライト SF - 60 M のあらさはほとんど変化していない。Appendix I に表面あらさ曲線の例を示した。

3.5 浸せき材の金属組織

Photo. 23～44にナトリウム浸せき前後の試験片断面組織を示す。ステライト合金はナトリウム接液近傍に変質層はみとめられないが、ステライト No. 1 は組織全体が変化している。コルモノイ合金はいずれもナトリウム接液面近傍に 10～40 μm 厚さの変質層が生じている。メテコ 16 C およびデロロステライト SF - 60 M にはナトリウム浸せきによる組織変化はみとめられないが、受入れ材に巣がある。インコネル合金にはいずれも 1～4 μm 厚さの変質層が生じている。インコネル 718 およびインコネル X 750 組織には金属間化合物 Ni₃(Ti, Al, Nb) が、またインコネル 600 組織には微細な炭化物がみられる。ハスティロイ C, AISI 661 およびカーペンター 20Nb のナトリウム接液面近傍は著しい変化は示していない。ハスティロイ C 組織には初析カーバイト (W, Mo)₆C が、AISI 661 組織には Laves 相 (Fe₂Mo, Fe₂Nb, Ni₃Mo) がみられる。AISI 661 の粒界はナトリウム浸せき後明白となり接液面に近いほど炭化物が多くなっている。カーペンター 20Nb はナトリウム浸せき後双晶が消失し、粒界の炭化物が多くなっている。インコロイ 800 はナトリウム浸せき後粒界および粒内に析出物が多くなっている。

SUS 304 およびSUS 316 はナトリウム接液面近傍に変質層はみられないが、SUS 316 粒界に δ 相がみられる。この δ 相はナトリウム接液面に近いほど多くなっている。2 1/4Cr - 1Mo 鋼は完全焼きなましの 3 mm 厚板を片面のみの研削により 2 mm 厚とした。熱処理時に脱炭が生ずると考えられるため両面の組織を比較したが、本試験では明白な差はみられなかった。純鉄はナトリウム浸せきによる組織変化がみられない。LW-1N 40 も同様である。LC-1C は合金との境界面組織に変化がみられる。LC-1C は一部が合金からはく離したがこの組織変化が原因と考えられる。

3.6 浸せき表面のかたさ変化

Table. 8 にナトリウム浸せき前後の試験片表面のかたさ測定値を示す。また Fig. 9 に平均のかたさ値をプロットした。ステライト合金はナトリウム浸せきによりいずれもかたさが増加しているが、Ni 基の肉盛合金は著しく低下している。コルモノイ合金の低下は Photo. 26～Photo.

29に示した表面の変質層のためと考えられる。LW-1N40のかたさはナトリウム没せき後増加しているが、LC-1Cは著しく低下している。2 1/4Cr-1Moは試験片両表面のかたさが異なっている。これは完全焼きなましした3mm厚板材を片面のみ研削し2mmほにしたため、研削しない側の表面は熱処理過程で生ずる表面近傍の脱炭の効果があらわれて研削した面よりかたさが低いと考えられる。

4. ま　と　め

表面硬化材を 600 °C ナトリウム中に約 2000 時間浸漬した結果、次のことが明らかとなった。

(1) ステライト合金について

腐食量は SUS とくらべそれほど大きくなく、一部の試験片は浸せき後増加する。ナトリウム浸せきによりかたさは増加する。表面あらさの増加はわずかである。ナトリウム接液面近傍組織は著しい変化がない。

(2) コルモノイ合金等 Ni 基肉盛材について

試験材中最も大きな腐食を呈し、コルモノイ合金は 10 ~ 40 μm 厚さの変質層を生ずる。かたさはいずれも低下し、表面あらさはコルモノイ合金の増加が著しく、これは腐食量の増加に対応している。ナトリウム腐食によりコルモノイ合金表面には結晶粒界がはっきりあらわれる。

(3) インコネル合金

腐食量は SUS の約 2 倍であり、ナトリウム接液面に 1 ~ 4 μm 厚さの変質層を生ずる。表面あらさはほとんど変化がなく、かたさはインコネル 600 が低下し、他材料は変化しない。

(4) 耐食耐熱材料

腐食量は SUS の約 1 ~ 2 倍である。表面あらさおよびかたさの変化は小さい。

ナトリウム接液面にははっきりとした変質層はみられないが AISI 661 とカーペンター 20Nb は粒界に、インコロイ 800 は粒内に析出物が多くなる。

(5) SUS 304 および SUS 316

腐食量は試験材料のなかで最も少ない。表面あらさおよびかたさの変化は小さい。SUS 316 は粒界に、特にナトリウム接液面側に σ 相が生成する。

(6) 2 1/4 Cr - 1 Mo および純鉄

腐食量は 2 1/4 Cr - 1 Mo が SUS の 4.5 倍、純鉄が SUS の 2 倍であり、いずれも表面には結晶粒界がはっきりあらわれる。表面あらさは変化がなく、かたさはいずれも低下する。

(7) カーバイト材

LC - 1 C は台金から一部がはく離した。LW - 1 N 40 の腐食量は変動が大きく著しい腐食量を呈した試験片がある。表面あらさはいずれも増加し、かたさは LC - 1 C が低下し、LW - 1 N 40 は増加する。

5. あとがき

表面硬化材は炉内における長時間使用に耐えるためにはナトリウムとの優れた共存性を有することが必要不可欠な条件であり、その検討が要請されている。本試験はその予備試験的なもので、600 °C ナトリウム中に種々の表面硬化材を約 2000 時間浸せきした試験結果をまとめたものである。

尚、現在 5000 時間のナトリウム浸せきを行なっており、この解析結果を本試験結果と比較して浸せき時間の影響を明らかにする予定である。また腐食効果が本試験より大きい 5000 時間試験片を使って詳細な解析を行なって腐食挙動をさらに明らかにしたい。

本試験により予想外のはく離を呈した L C - I C については試験片製作者にもその検討を依頼しており、今後原因を明らかにしていく。

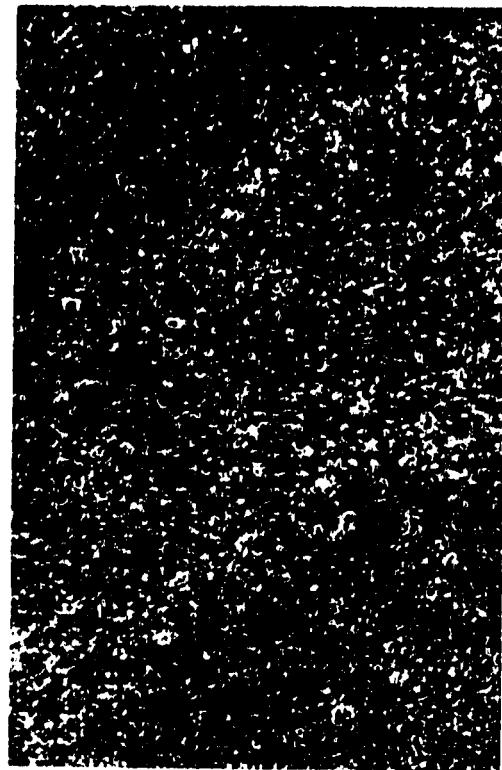
材料開発上最も難かしい条件を有する熱交換用バウンダリー材も表面硬化材同様ナトリウムとの共存性を満足することが必要不可欠であり、本試験結果がその基礎資料となれば幸いである。

終りに、本試験を遂行するにあたり御指導賜った斎藤部長、本計画の推進を図っていただいた F B R 開発本部望月および山本主任研究員、耐食耐熱材を提供していただいたナトリウム技術室 柚原主任研究員に感謝の意を表する。また本試験に使用したループの運転保守を担当していただいた常陽産業（株）の関係者に感謝する。

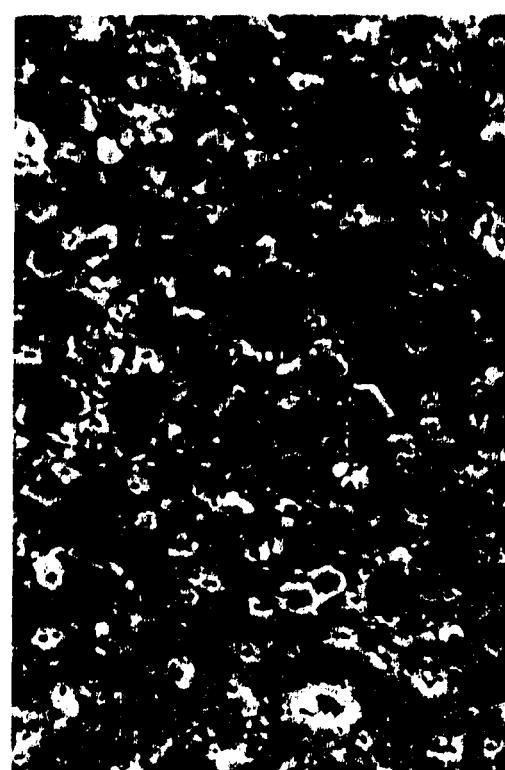
6. 文 献

- (1) 丸山昭 他 「高温ナトリウム中における高速炉構造材 (AISI Type 304SS) の腐食と質量移行 (総合報告)」 PNC 報告書 SN 941 77-16, 1月 (1977)
- (2) 青木法智嘉 他 「高速炉用燃料被覆管材 SUS 316 の高温ナトリウム中質量移行試験、腐食におよぼす結晶粒度および冷間加工度の影響」 PNC 報告書 N 941 74-64, 6月 (1974)
- (3) 丸山昭 他 「高速増殖炉用構造材 2 1/4 Cr - 1 Mo 鋼のナトリウム中質量移行試験(II), 2500 時間連続浸漬試験」 PNC 報告書 SN 941 73-14, 5月 (1973)

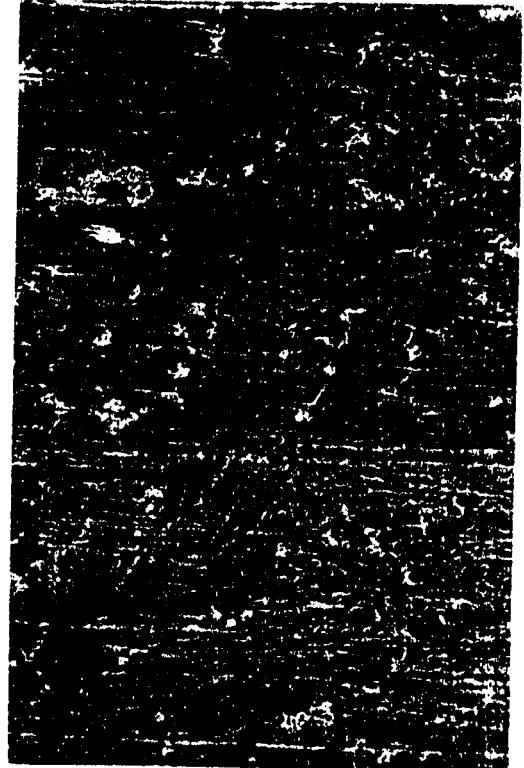
as Received after Exposure



× 1000



× 1000



× 1000



× 5000

Photo. 1 Scanning Electron Probe Micrographs of Stellite No.1

after Exposure



x 1000



x 5000

as Received



x 1000



x 5000

Photo. 2 Scanning Electron Probe Micrographs of Stellite No.6

after Exposure

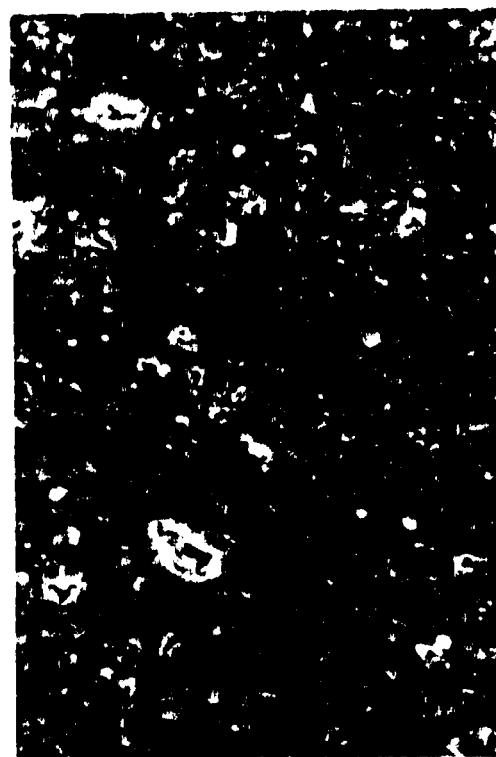


× 1000

as Received



× 1000



× 5000



× 5000

Photo. 3 Scanning Electron Probe Micrographs of Stellite No.12

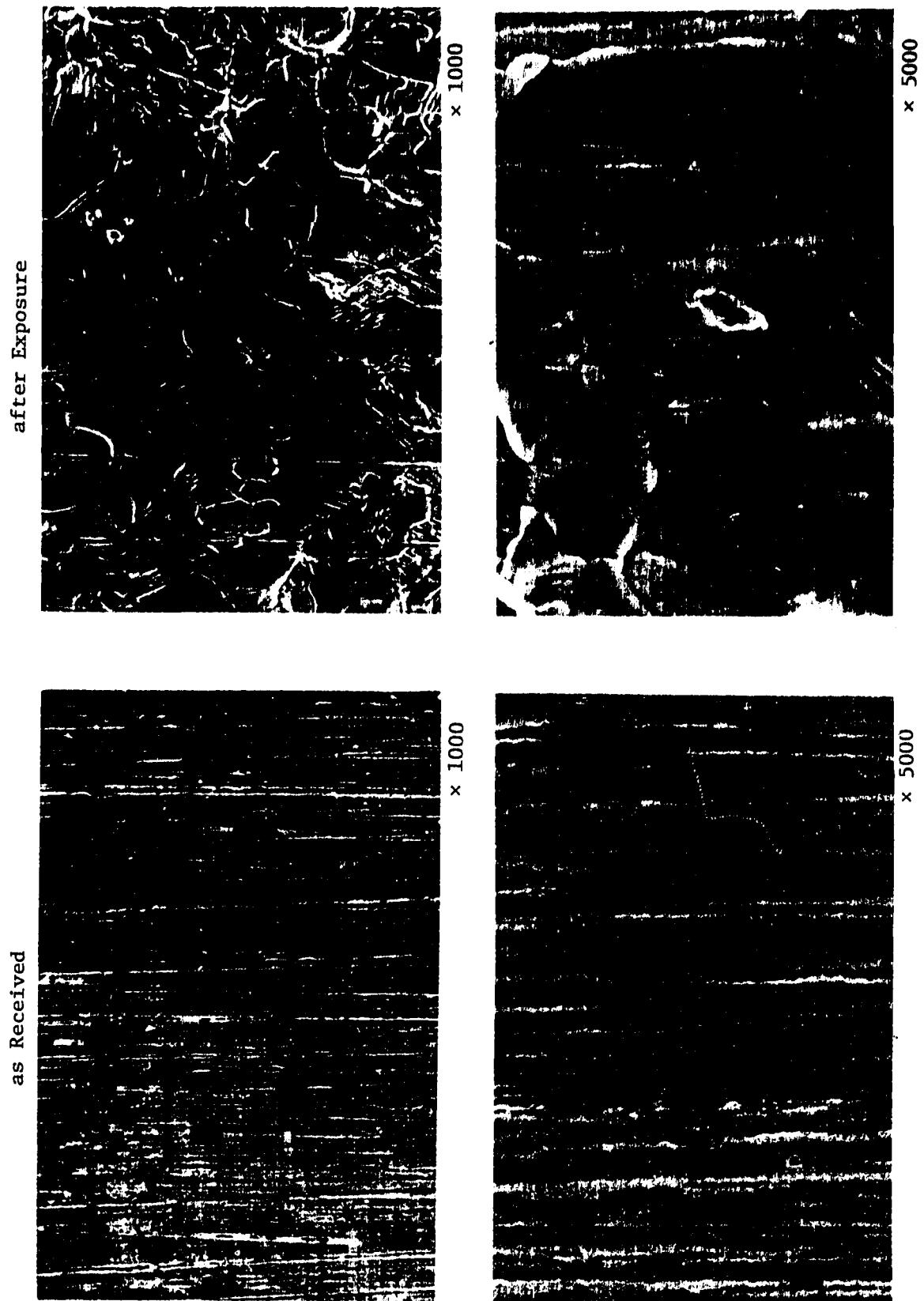


Photo. 4 Scanning Electron Probe Micrographs of Colmonoy No.20

after Exposure



× 1000

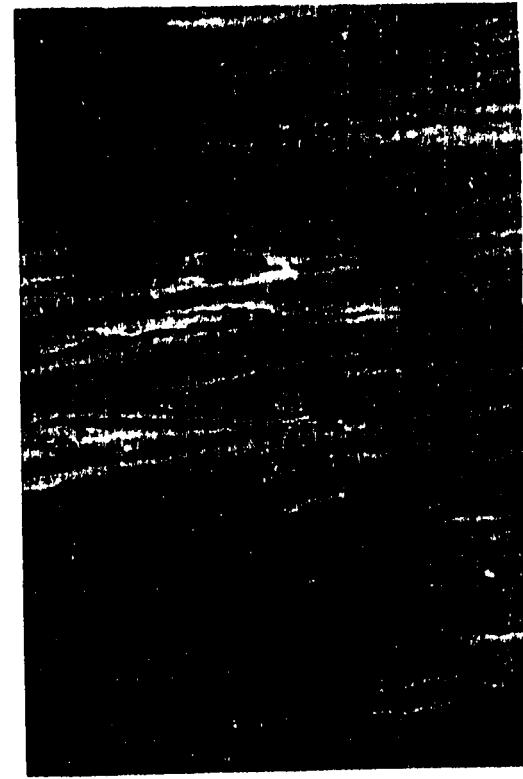
as Received



× 1000



× 5000



× 5000

Photo. 5 Scanning Electron Probe Micrographs of Colmonoy No. 4

after Exposure

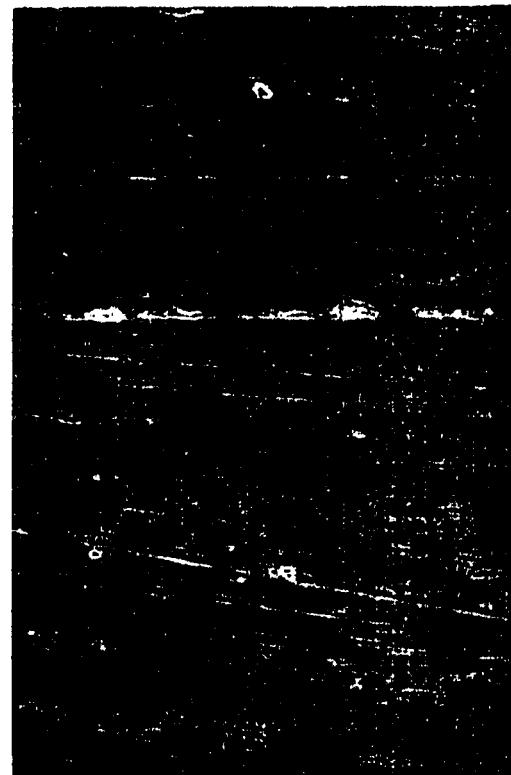


$\times 1000$

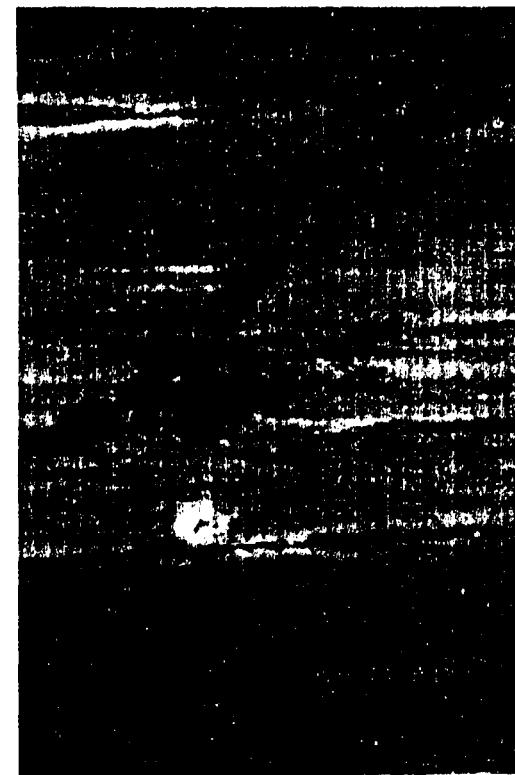


$\times 5000$

as Received



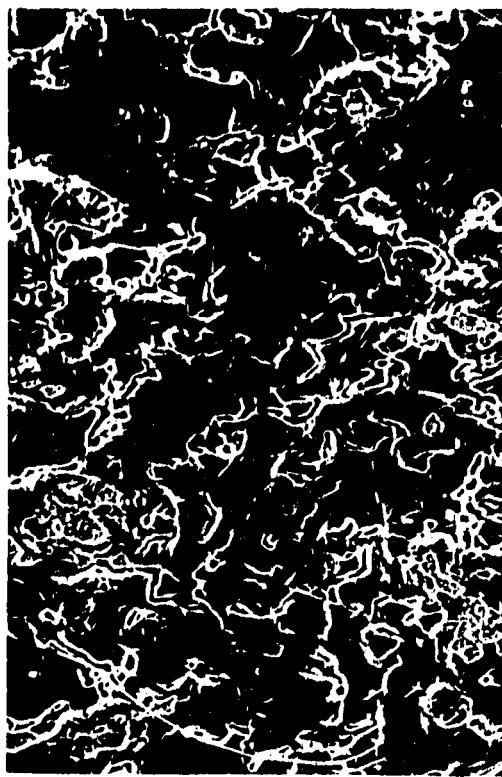
$\times 1000$



$\times 5000$

Photo. 6 Scanning Electron Probe Micrographs of Colmonoy No.5

as Received
after Exposure



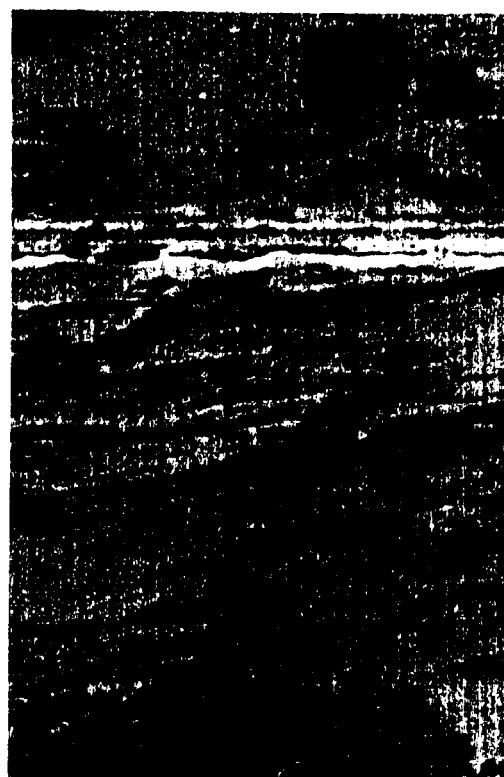
$\times 1000$



$\times 5000$



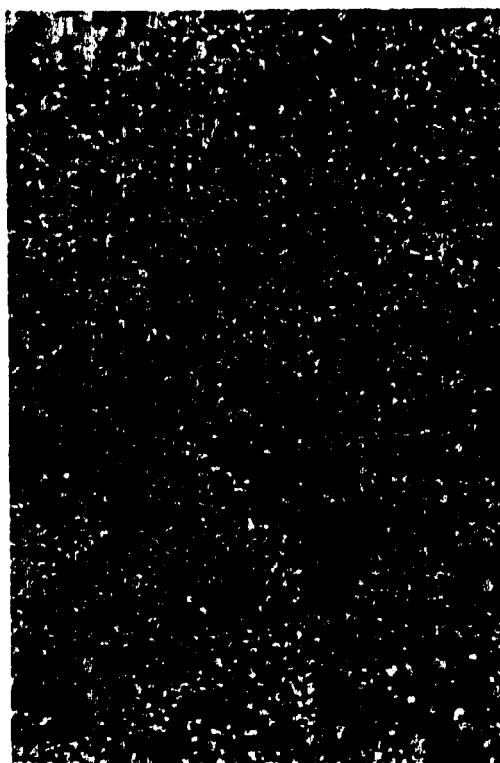
$\times 1000$



$\times 5000$

Photo. 7 Scanning Electron Probe Micrographs of Colmonoy No. 6

after Exposure

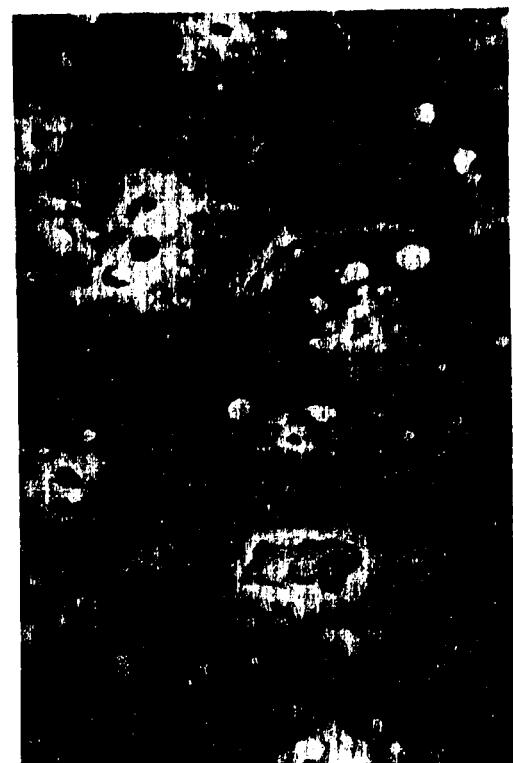


x 1000

as Received



x 1000



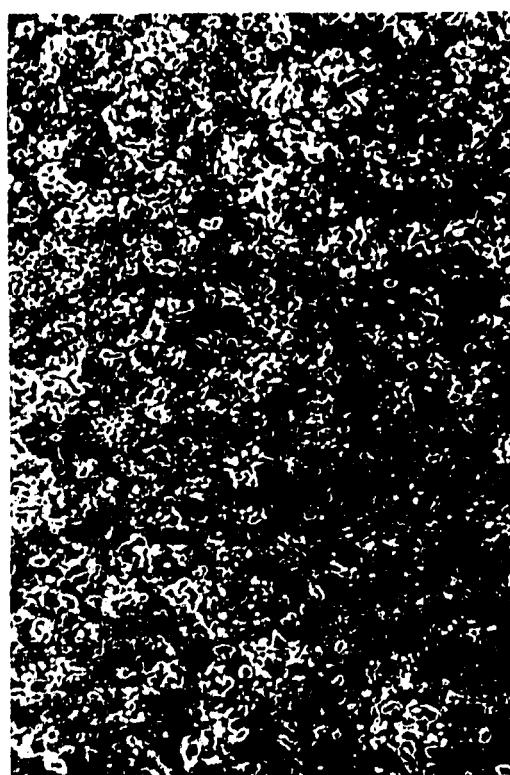
x 5000



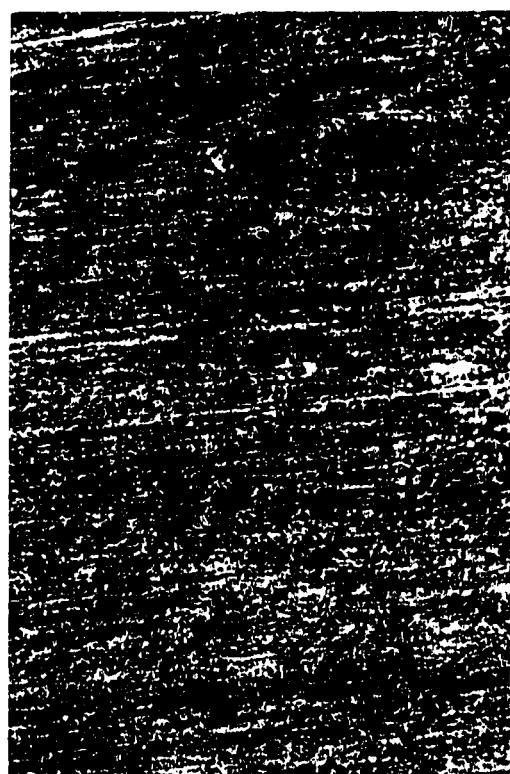
x 5000

Photo. 8 Scanning Electron Probe Micrographs of Metco 16C

after Exposure



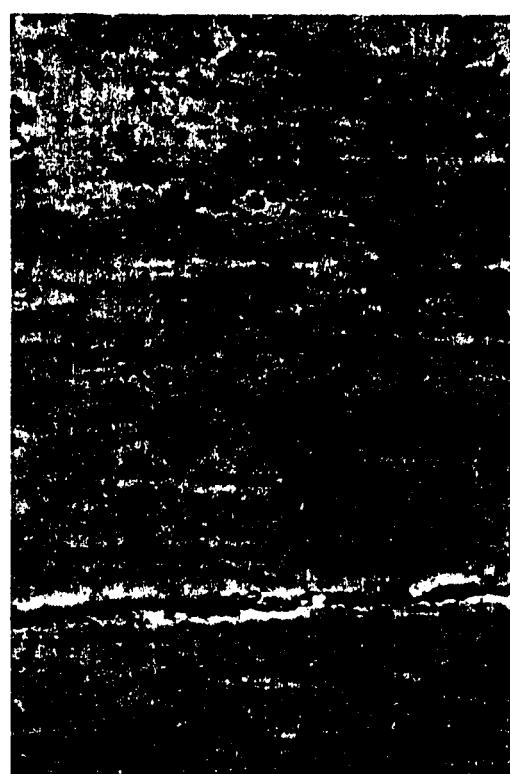
as Received



x 1000



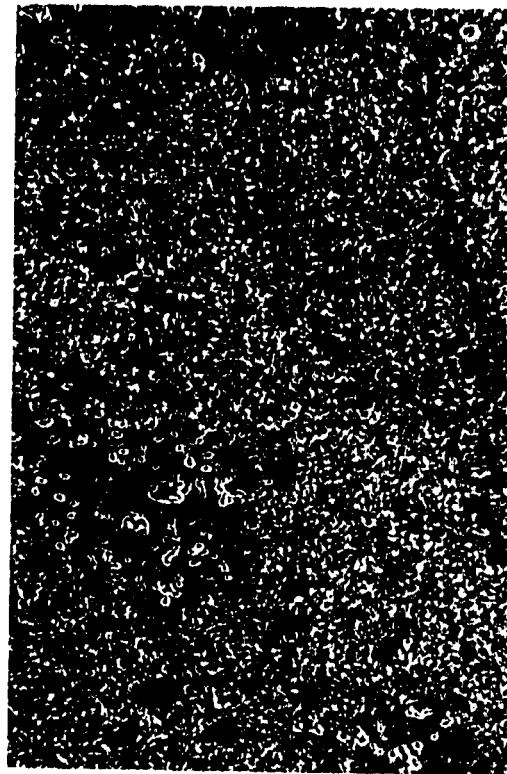
x 5000



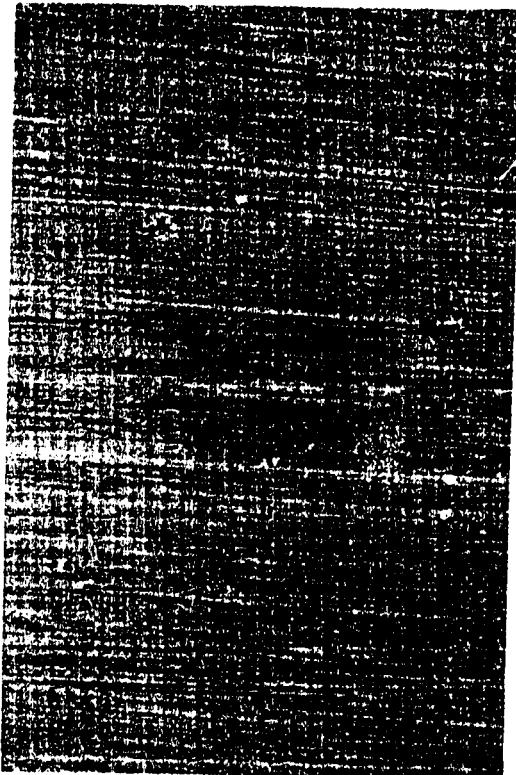
x 5000

Photo. 9 Scanning Electron Probe Micrographs of Deloro Stellite SF-60M

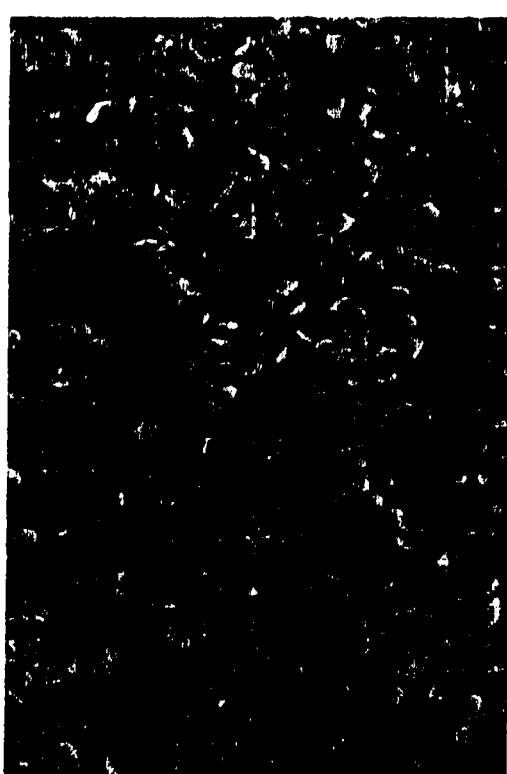
as Received
after Exposure



x 1000



x 1000



x 5000

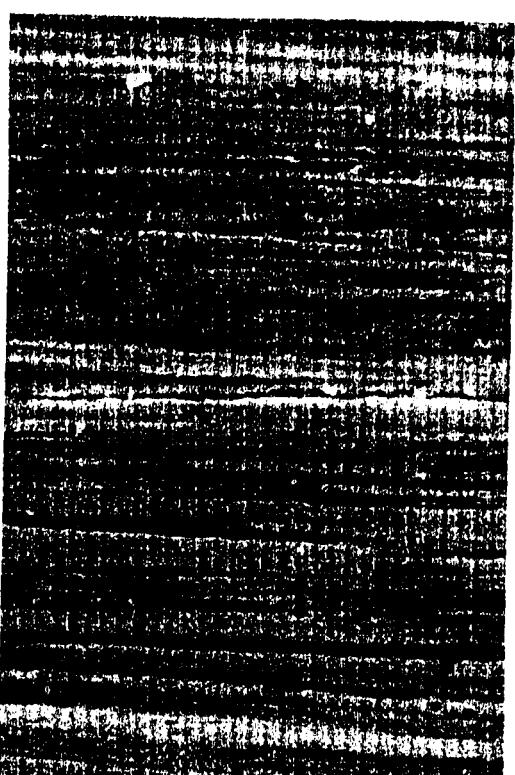
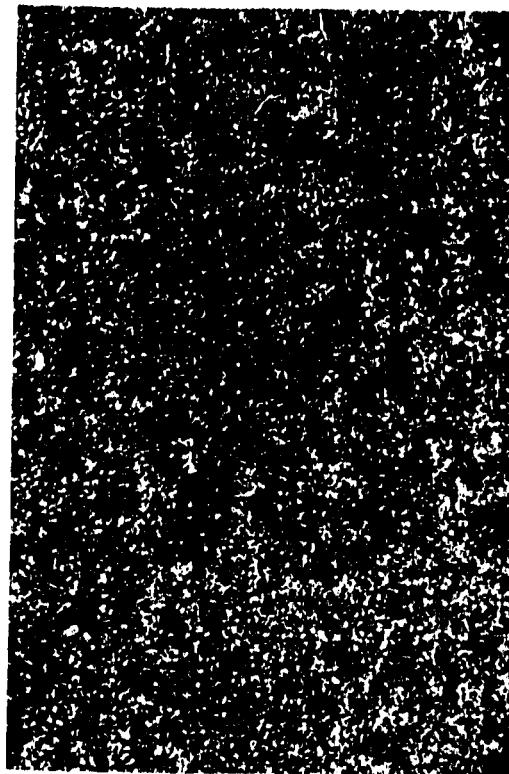
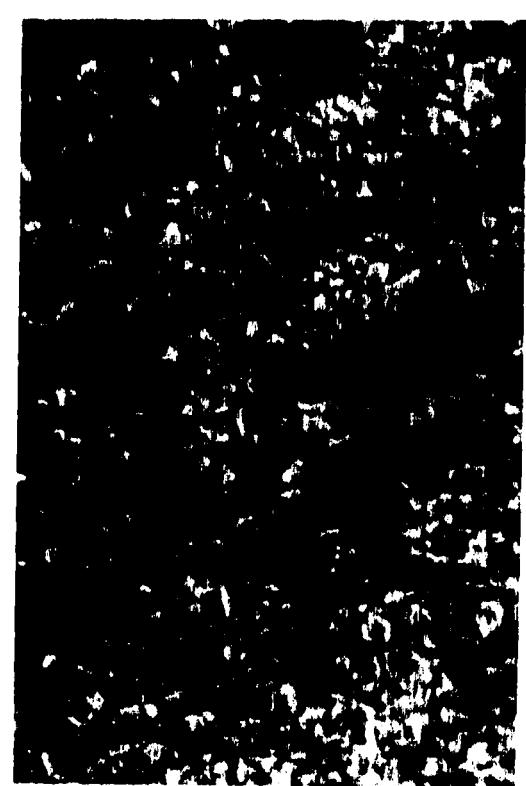


Photo. 10 Scanning Electron Probe Micrographs of Inconel 718

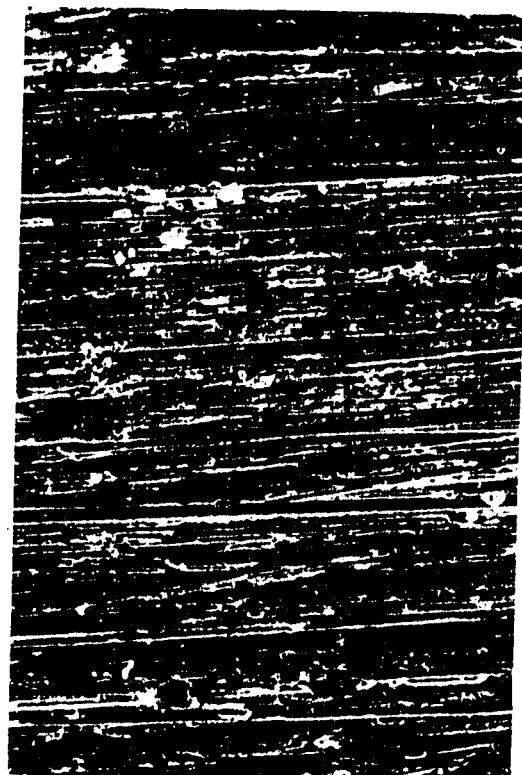
as Received after Exposure



x 1000



x 1000



x 1000



x 5000

Photo. 11 Scanning Electron Probe Micrographs of Inconel X750

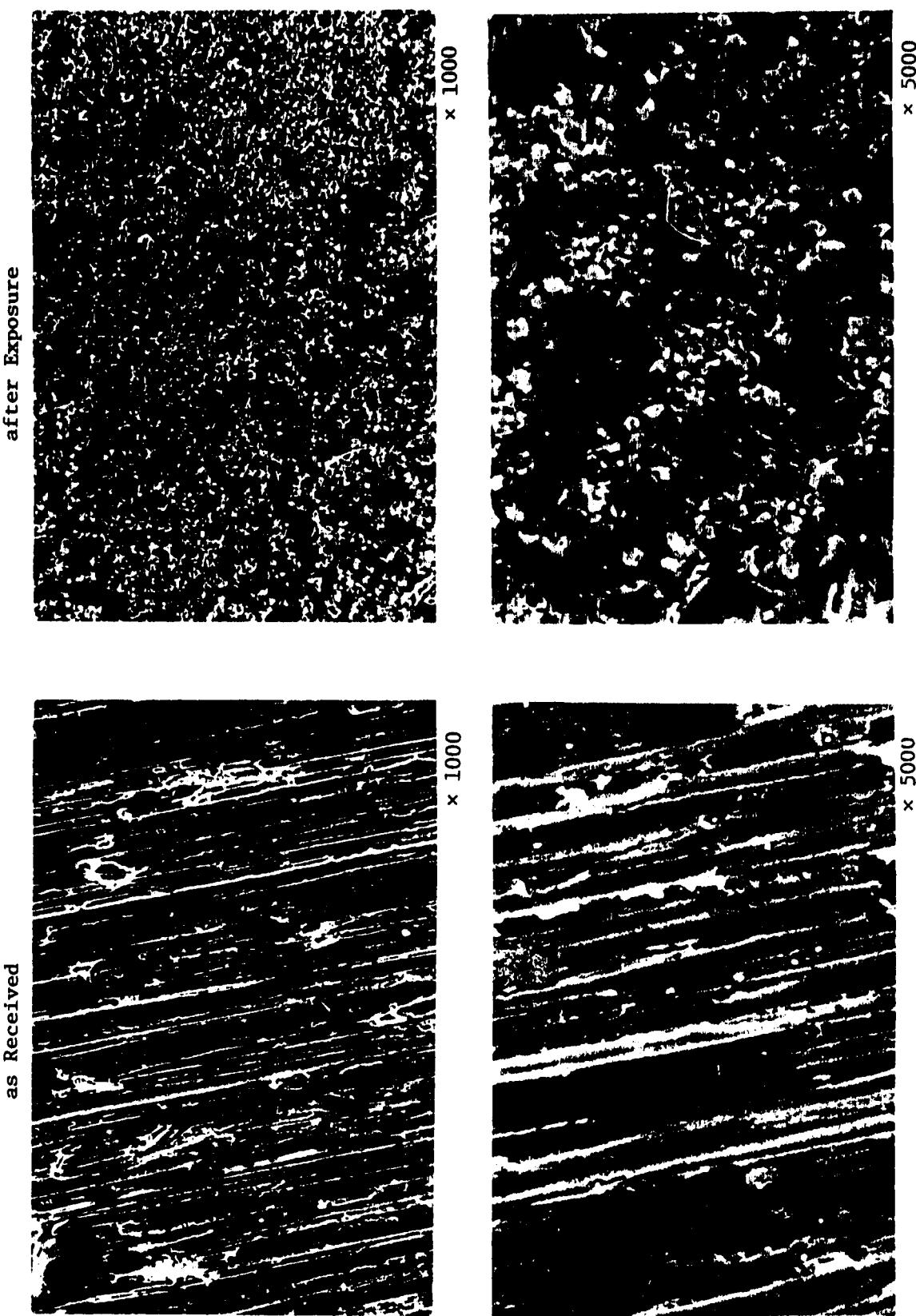
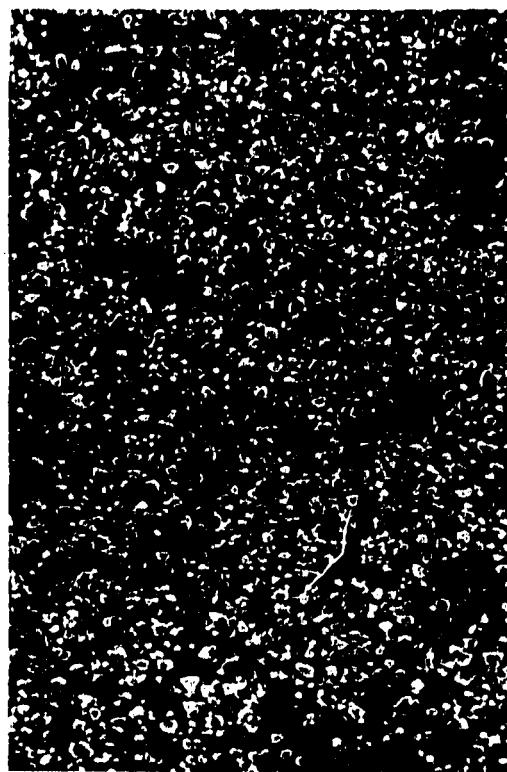


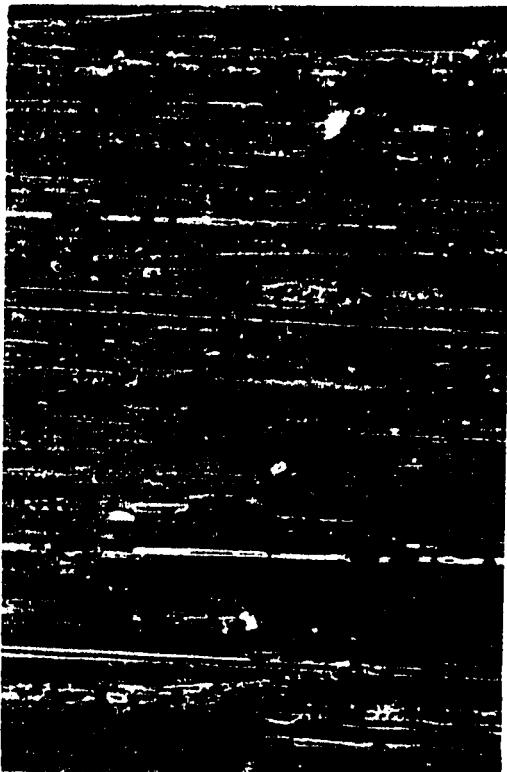
Photo. 12 Scanning Electron Probe Micrographs of Inconel 600

after Exposure

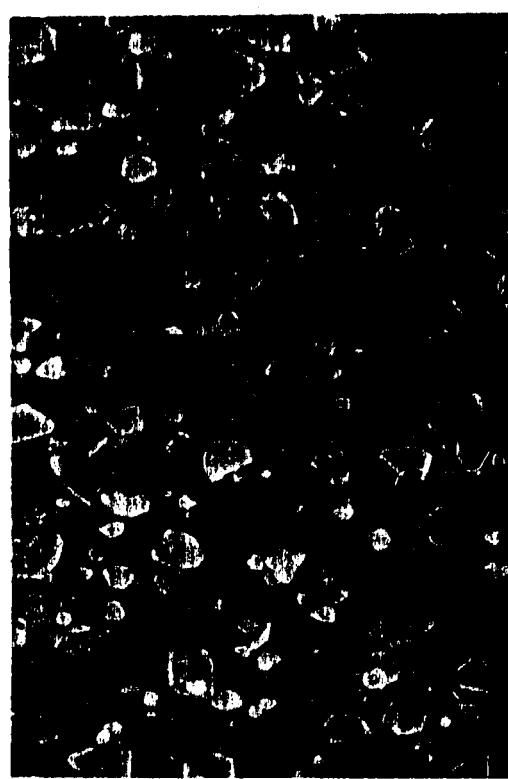


× 1000

as Received



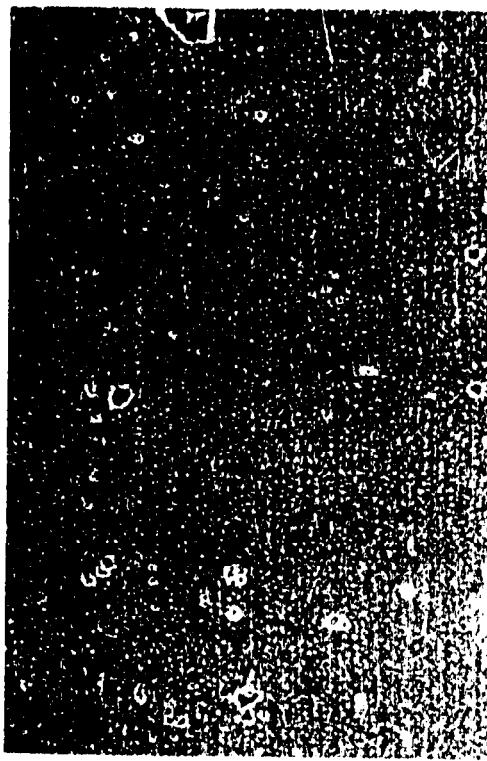
× 1000



× 5000

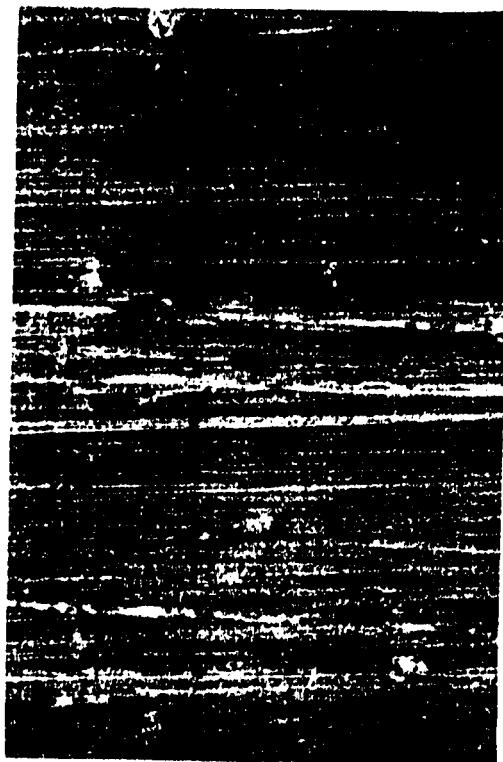
Photo. 13 Scanning Electron Probe Micrographs of Hastelloy C

after Exposure



$\times 1000$

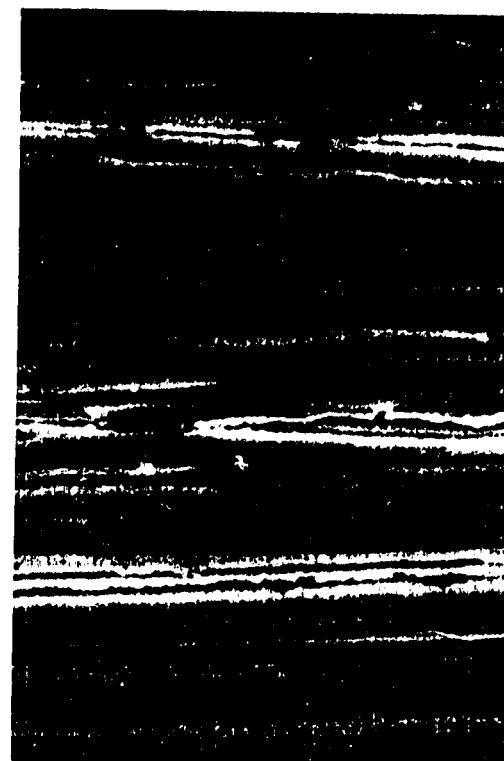
as Received



$\times 1000$



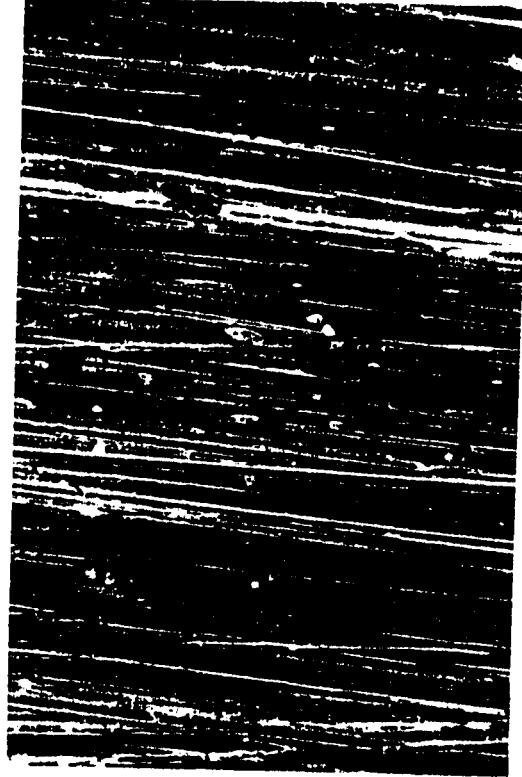
$\times 5000$



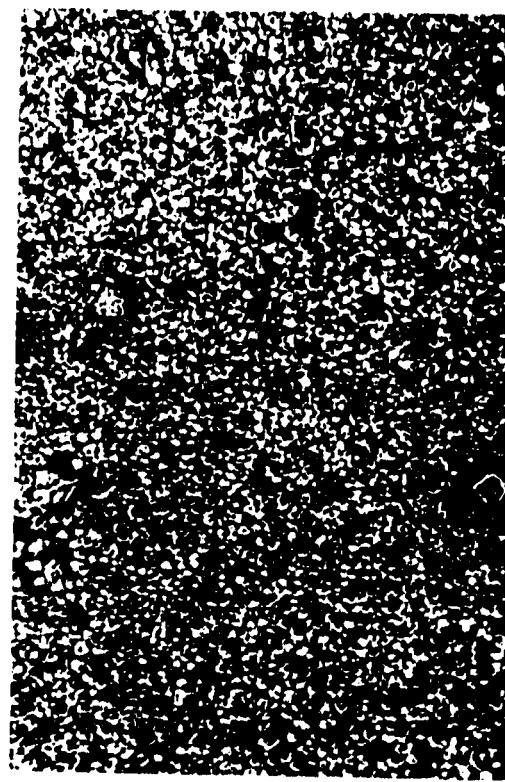
$\times 5000$

Photo. 14 Scanning Electron Probe Micrographs of AISI 661

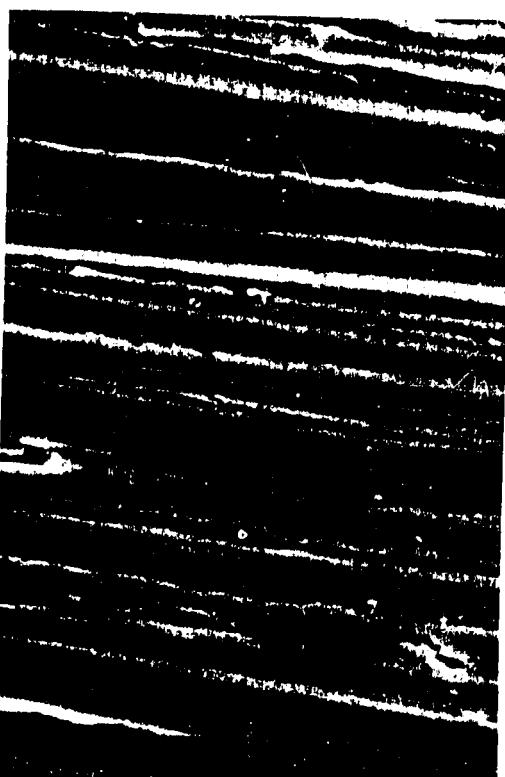
as Received



after Exposure



x 1000



x 5000

Photo. 15 Scanning Electron Probe Micrographs of Carpenter 20 Nb

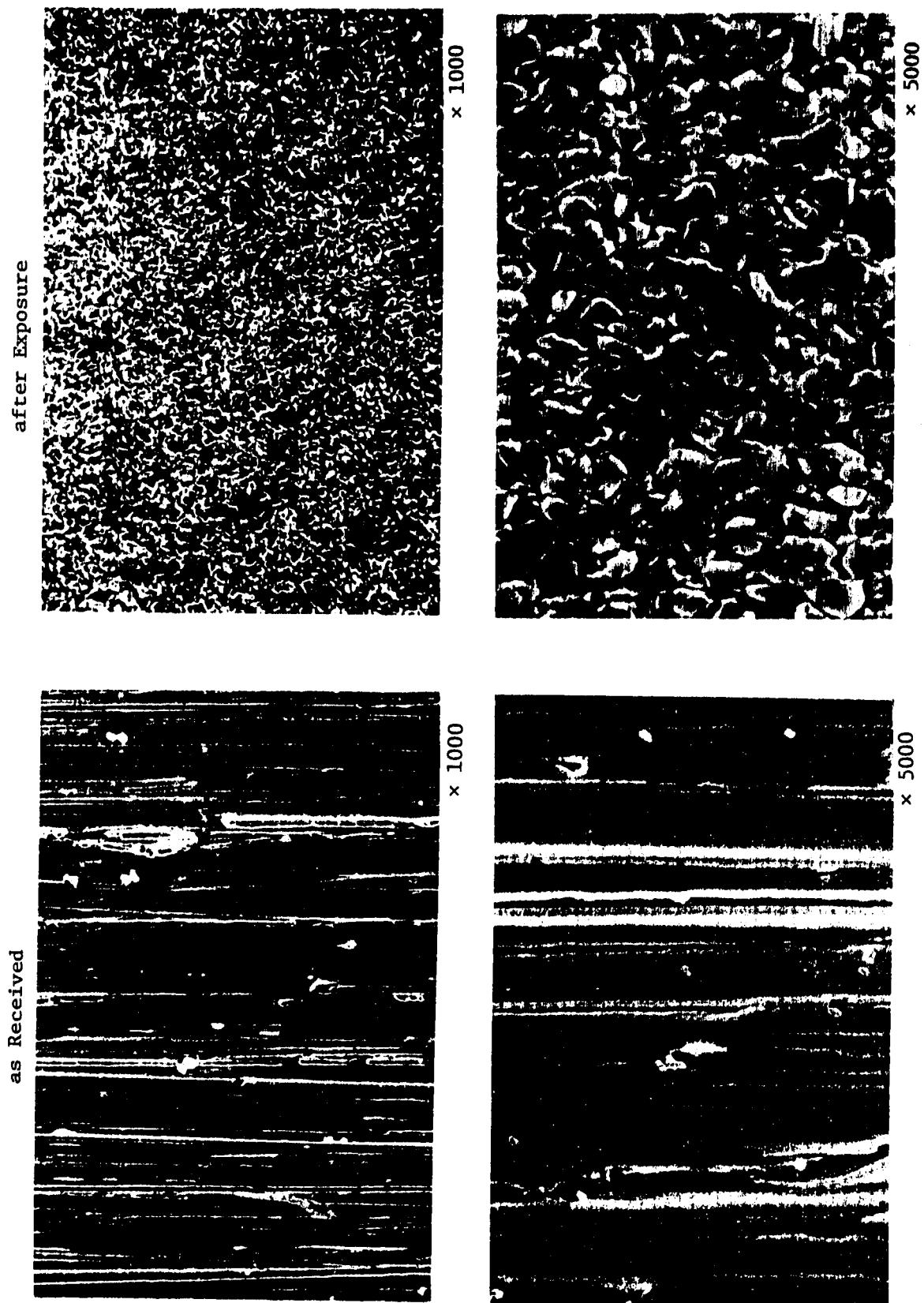
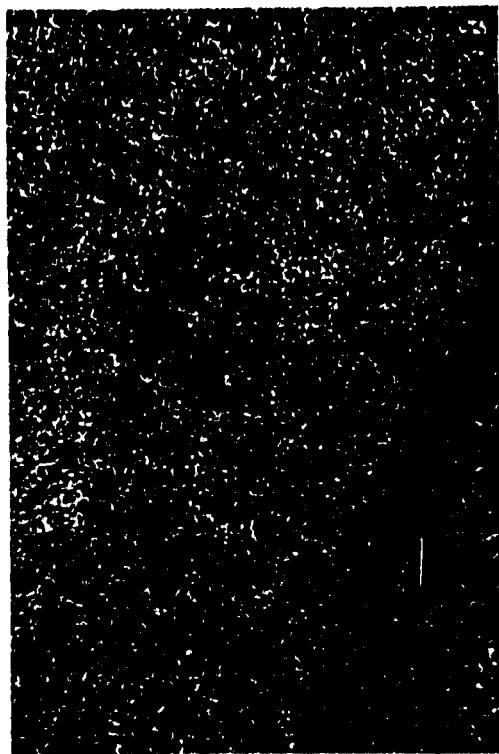


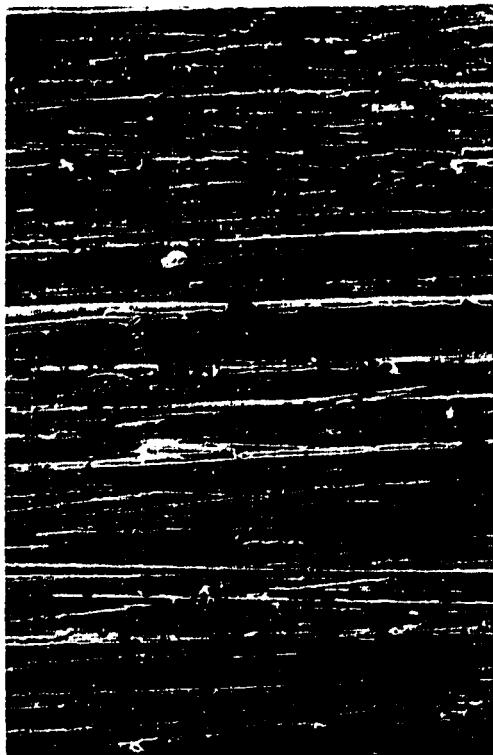
Photo. 16 Scanning Electron Probe Micrographs of Incoloy 800

after Exposure

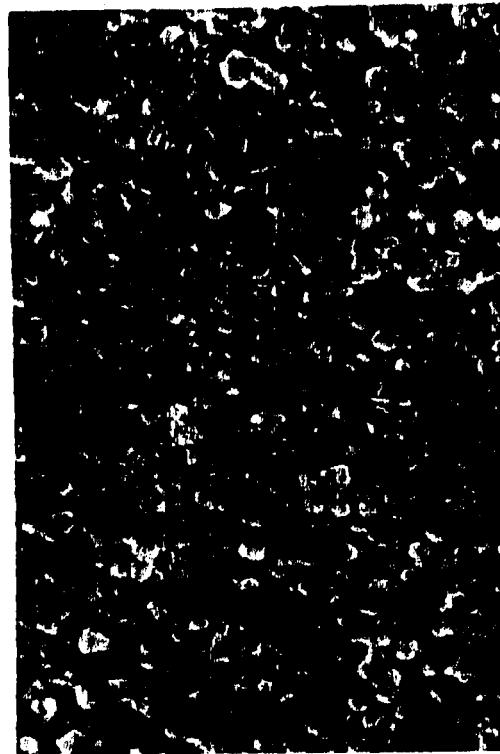


x 1000

as Received



x 1000



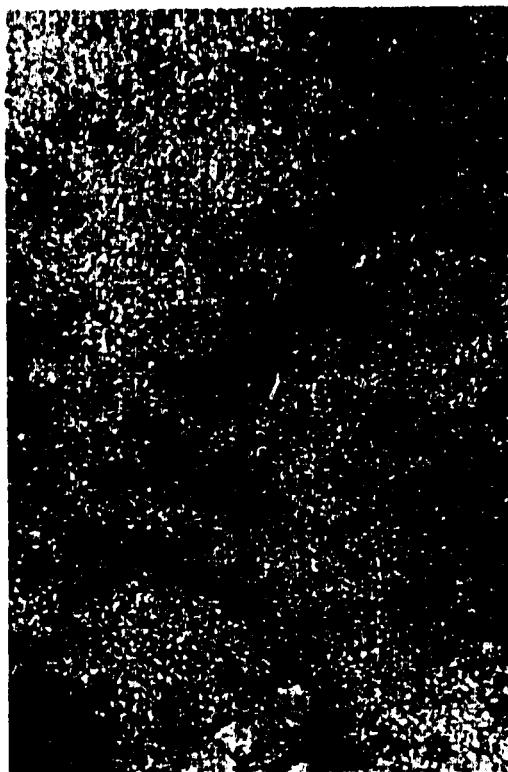
x 5000



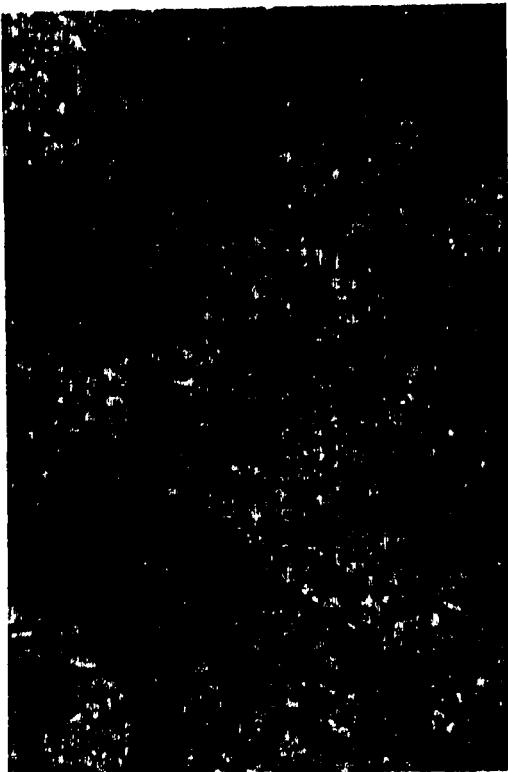
x 5000

Photo. 17 Scanning Electron Probe Micrographs of SUS 304

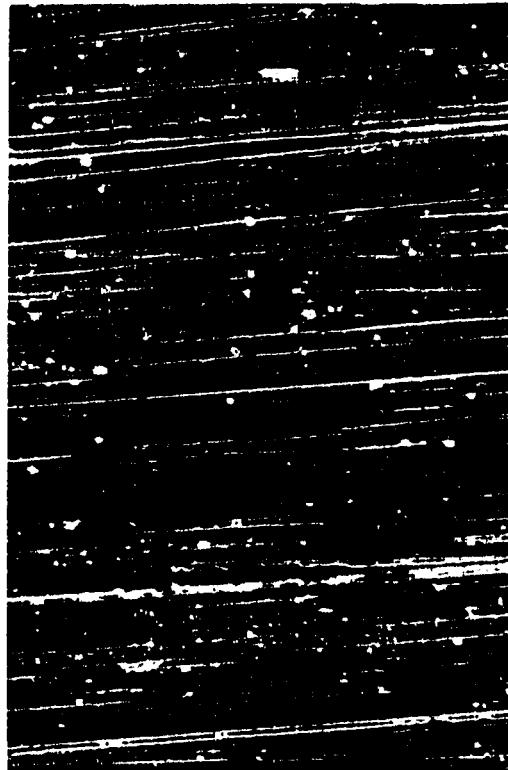
as Received
after Exposure



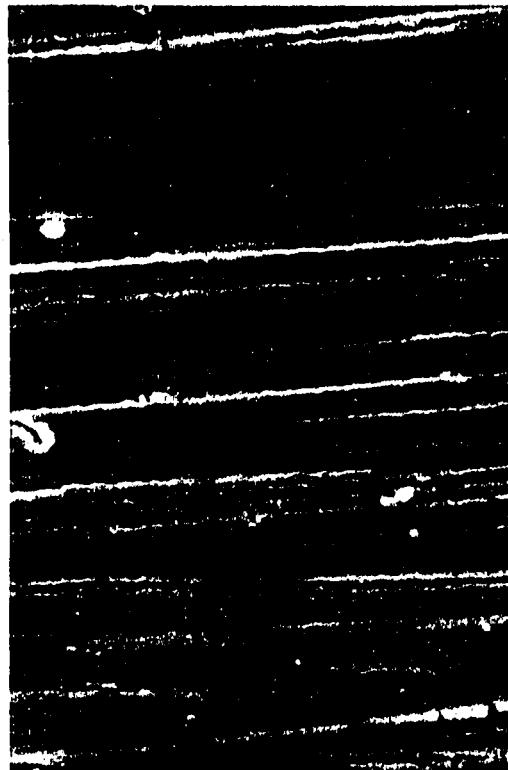
× 1000



× 5000



× 1000



× 5000

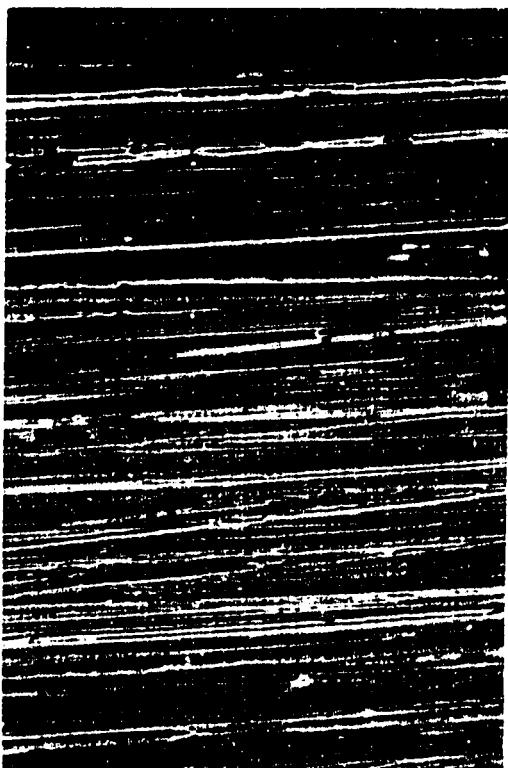
Photo. 18 Scanning Electron Probe Micrographs of SUS 316

after Exposure



× 1000

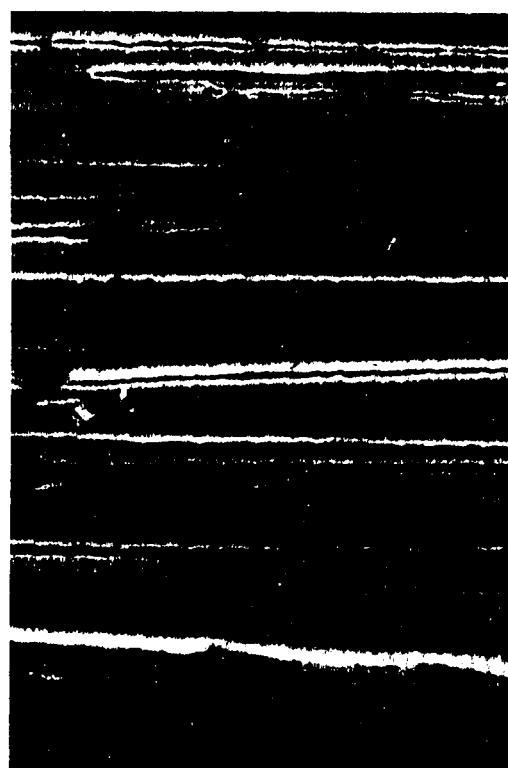
as Received



× 1000



× 5000



× 5000

Photo. 19 Scanning Electron Probe Micrographs of 2 1/4Cr-1Mo

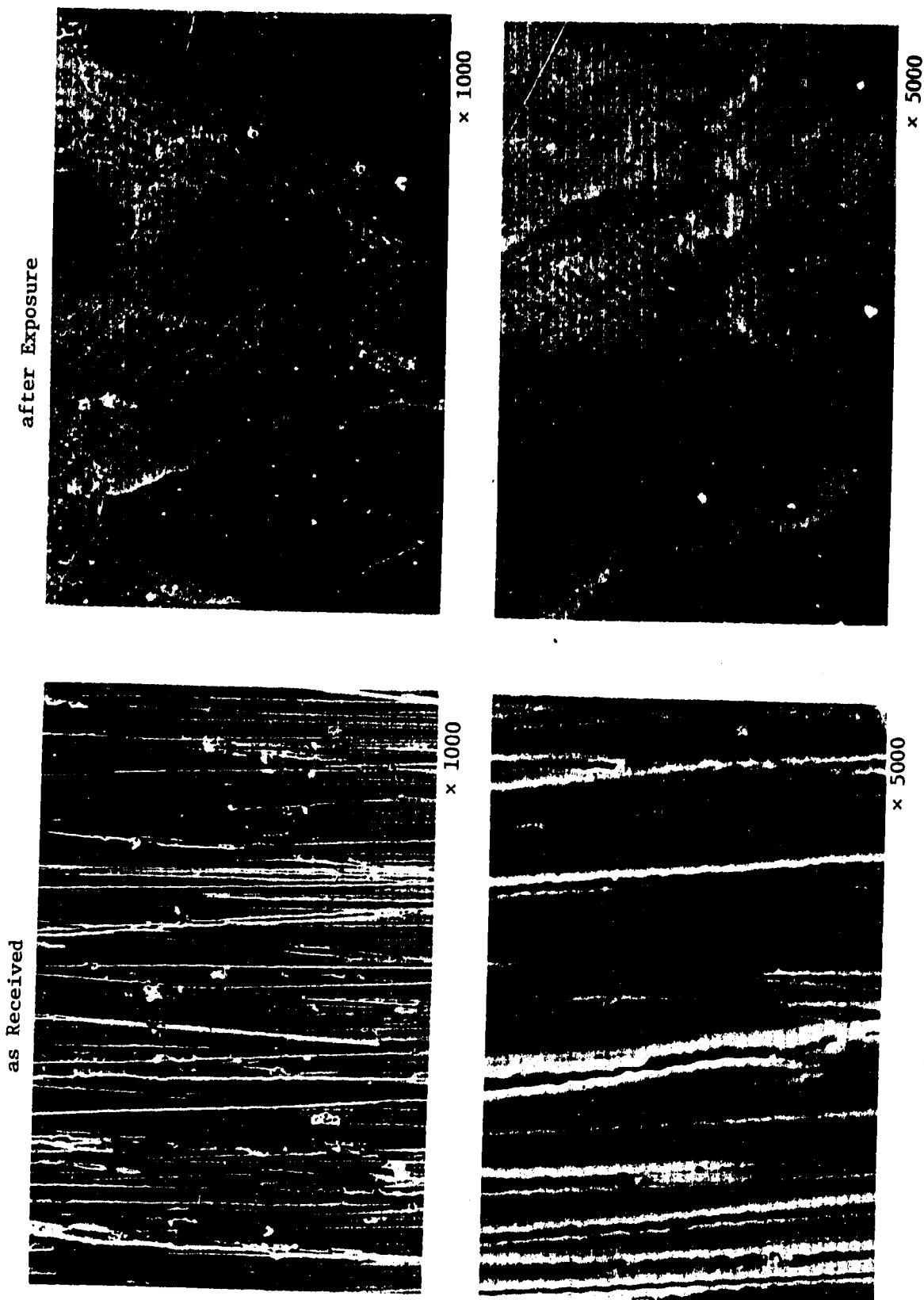
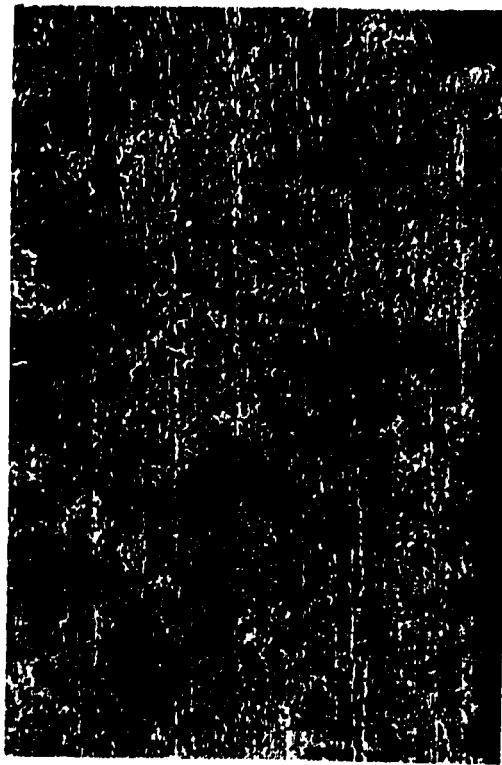


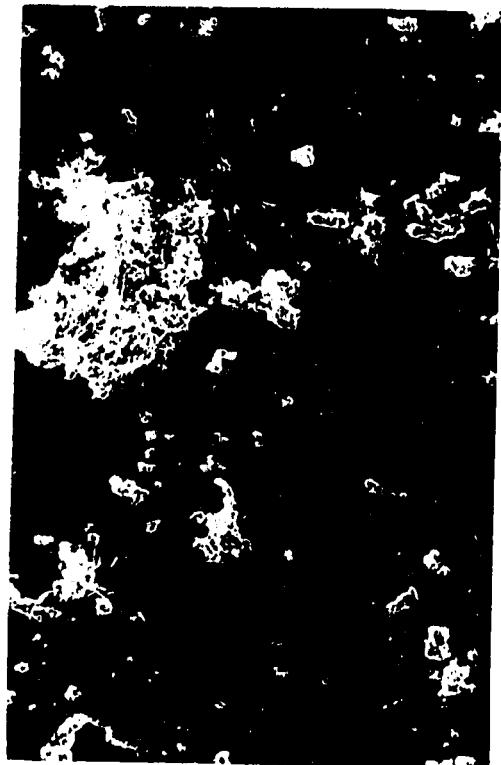
Photo. 20 Scanning Electron Probe Micrographs of Pure Iron

after Exposure



x 1000

as Received



x 1000



x 5000

Photo. 21 Scanning Electron Probe Micrographs of LW-1N40



x 5000

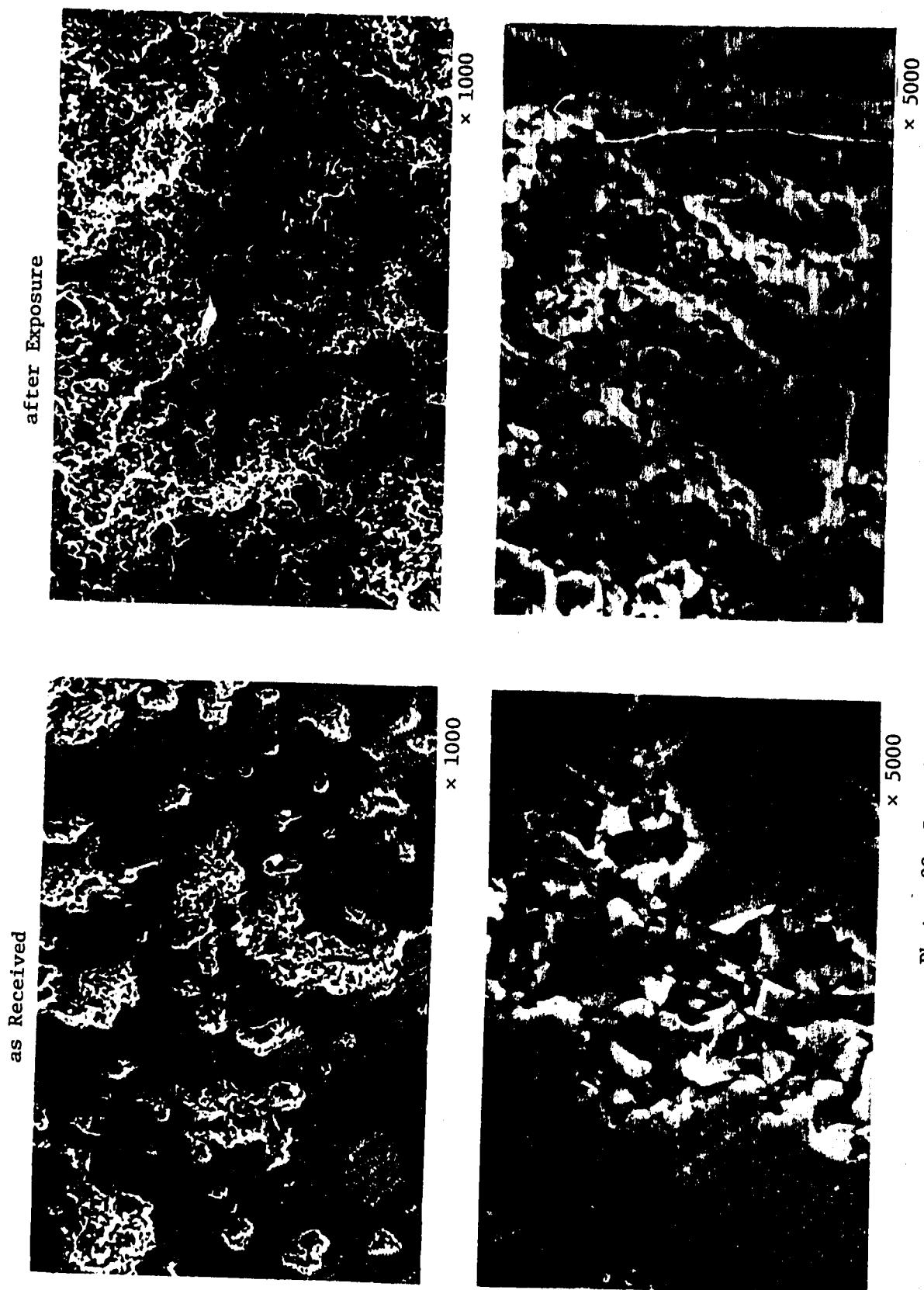


Photo. 22 Scanning Electron Probe Micrographs of LC-1C

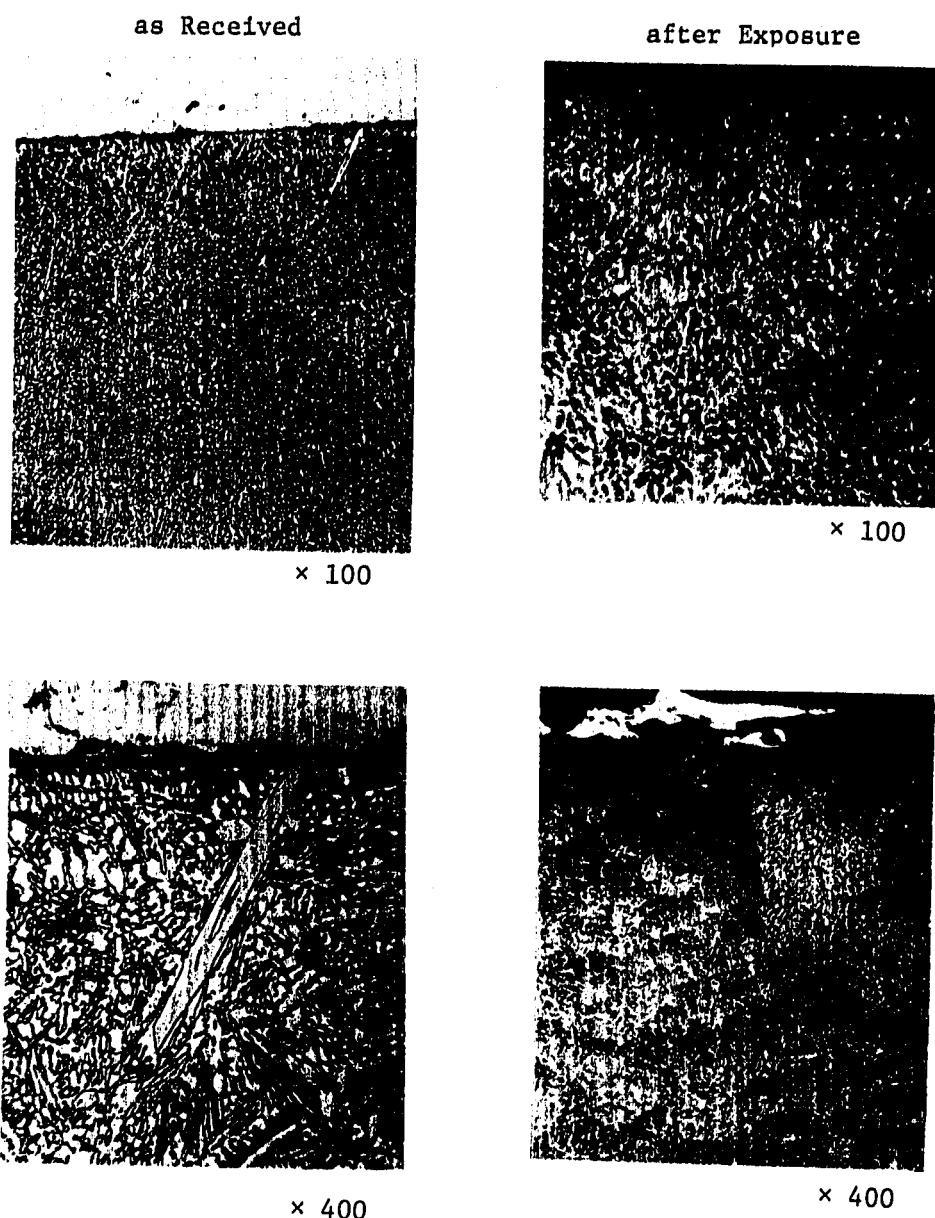
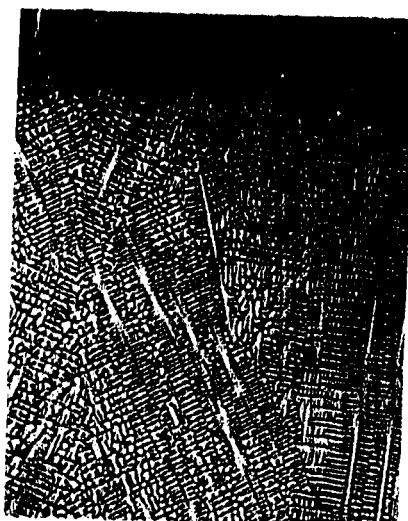


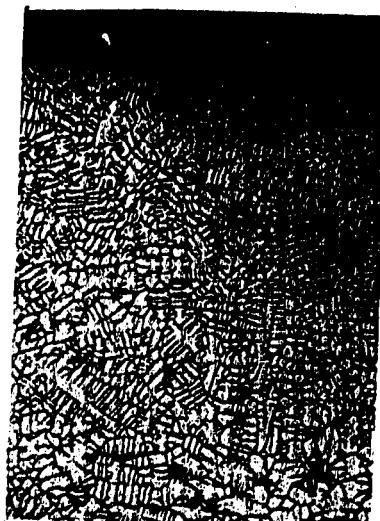
Photo. 23 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No.1

as Received



× 100

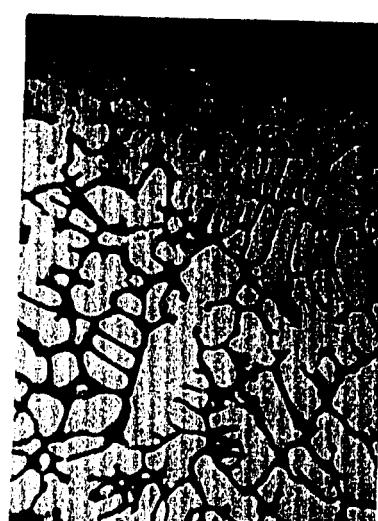
after Exposure



× 100



× 400



× 400

Photo. 24 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No.6

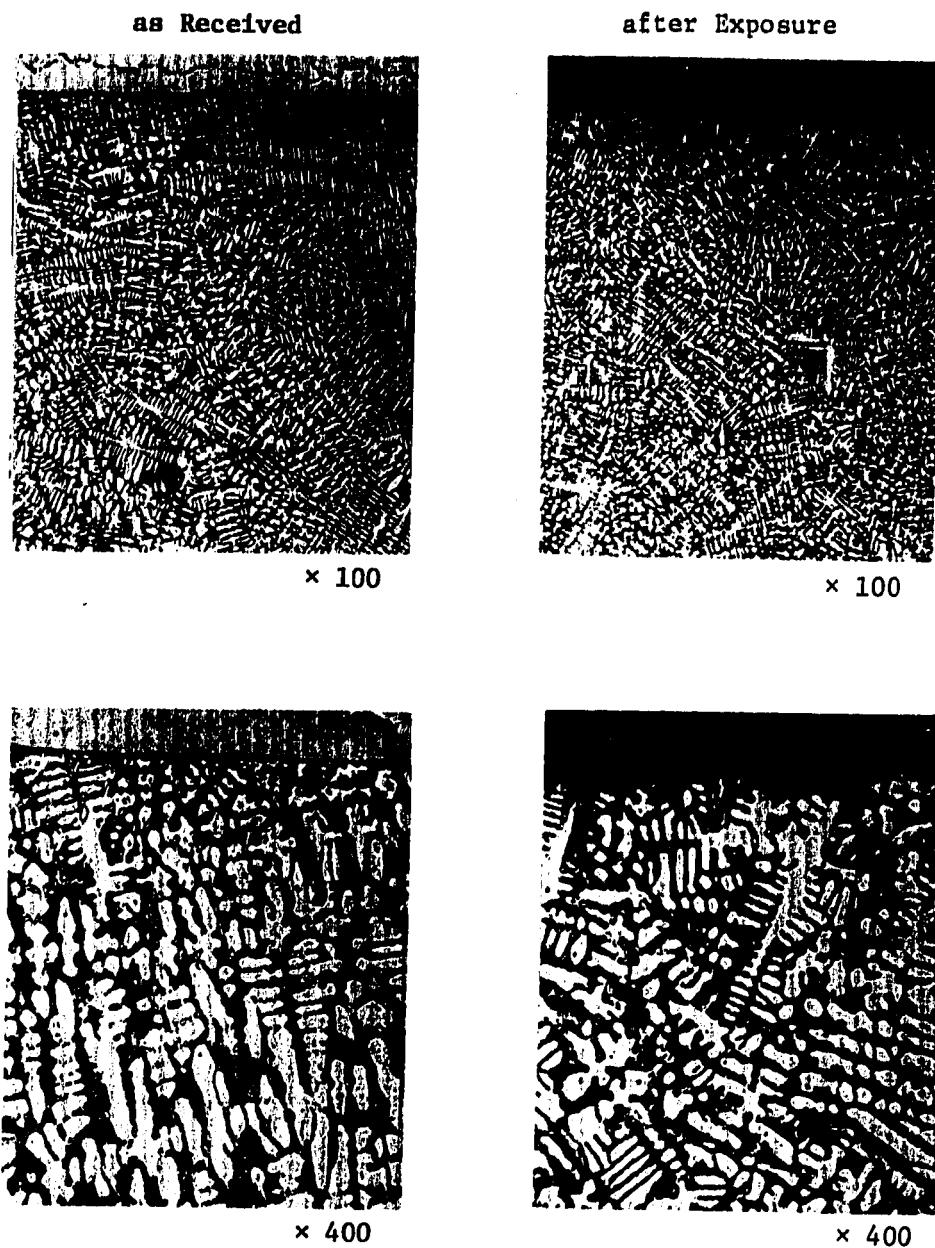


Photo. 25 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No.12

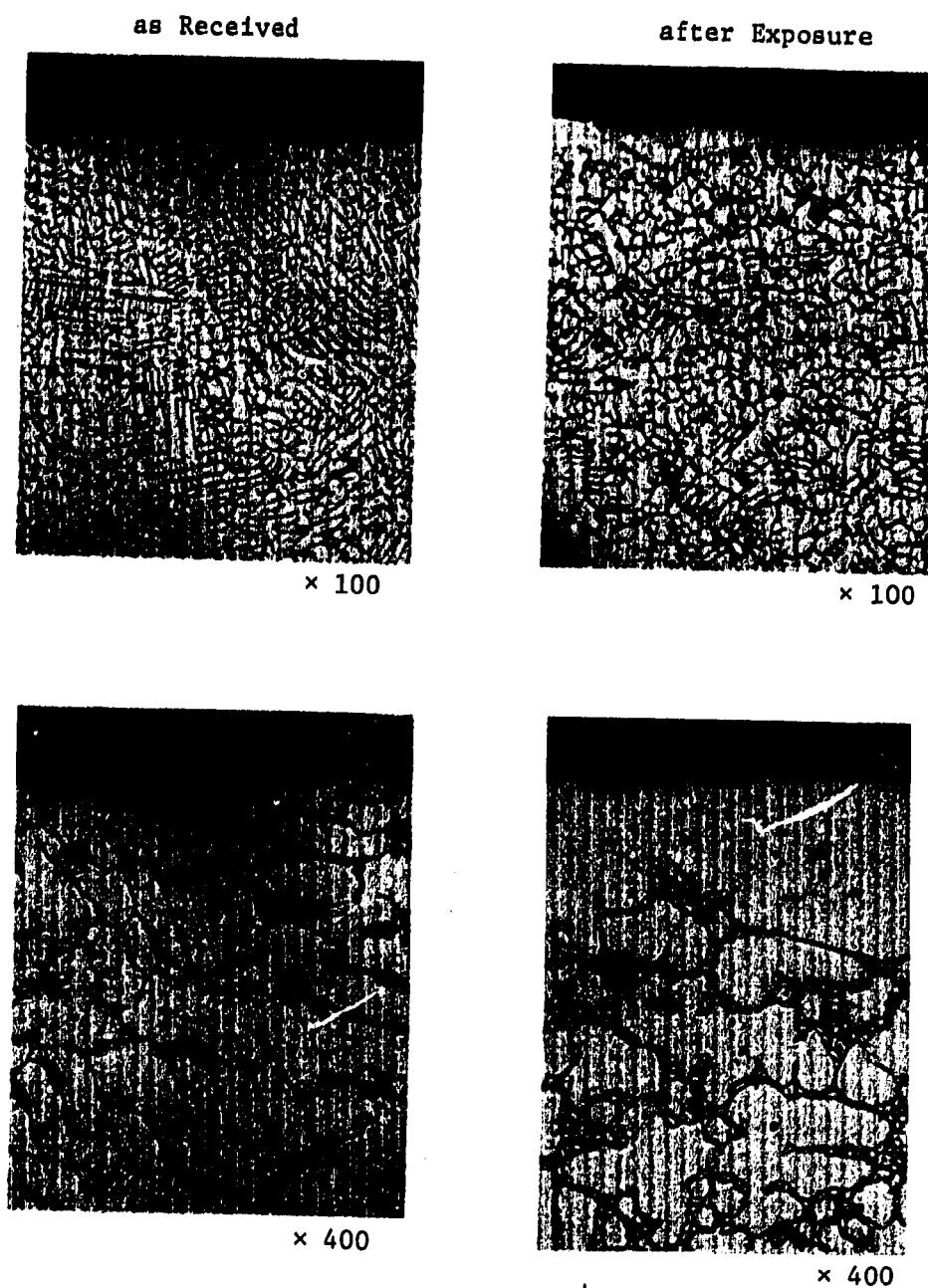


Photo. 26 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.20

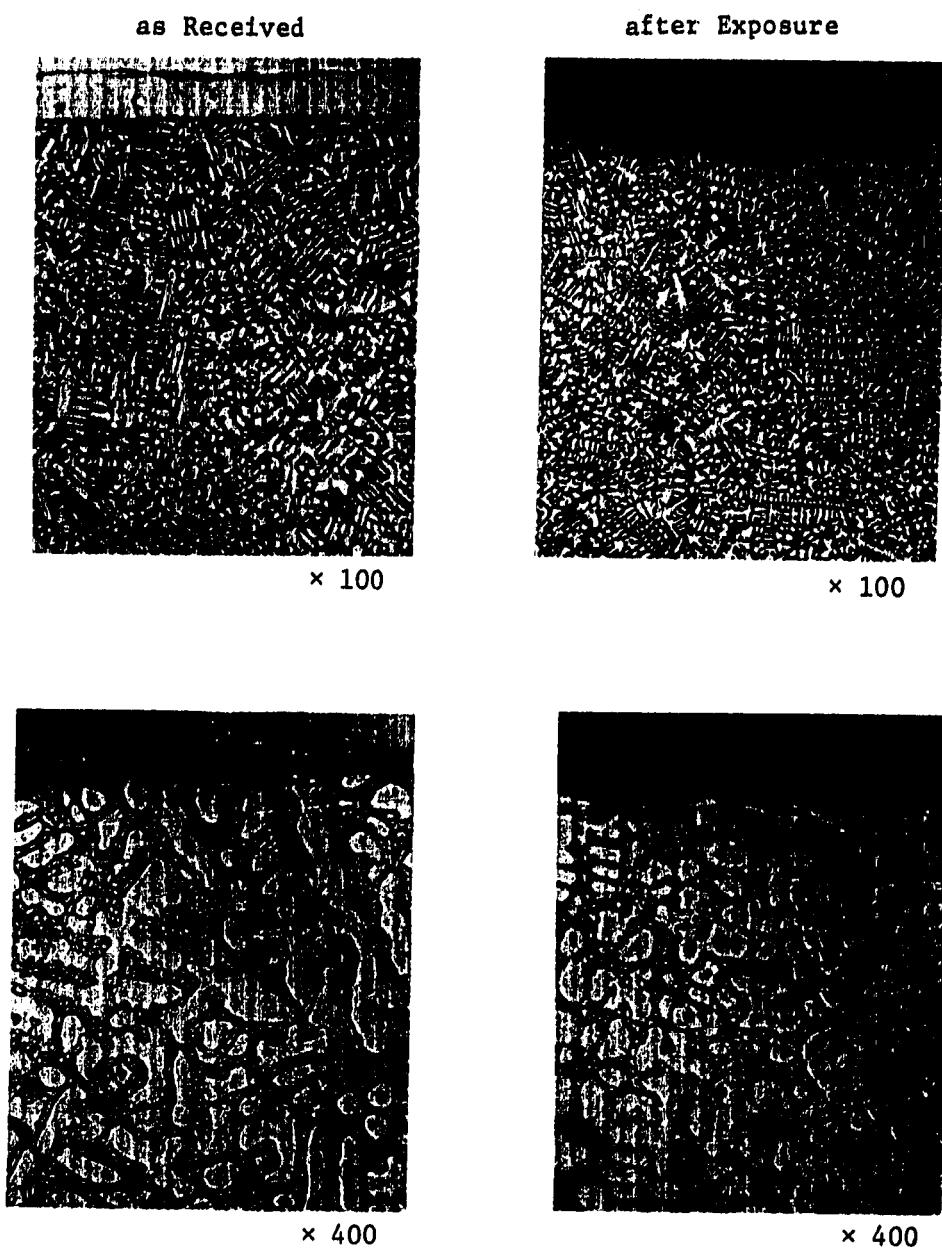
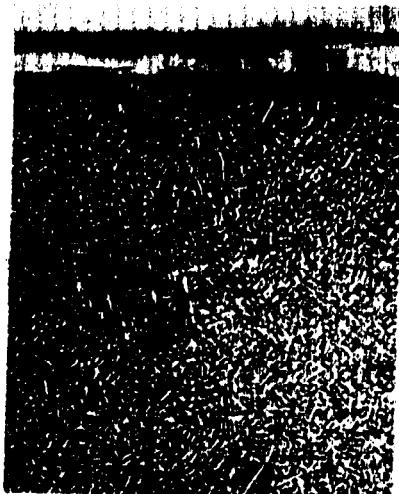


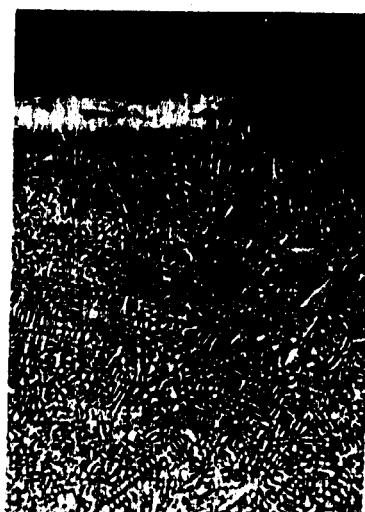
Photo. 27 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.4

as Received



× 100

after Exposure



× 100



× 400



× 400

Photo. 28 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.5

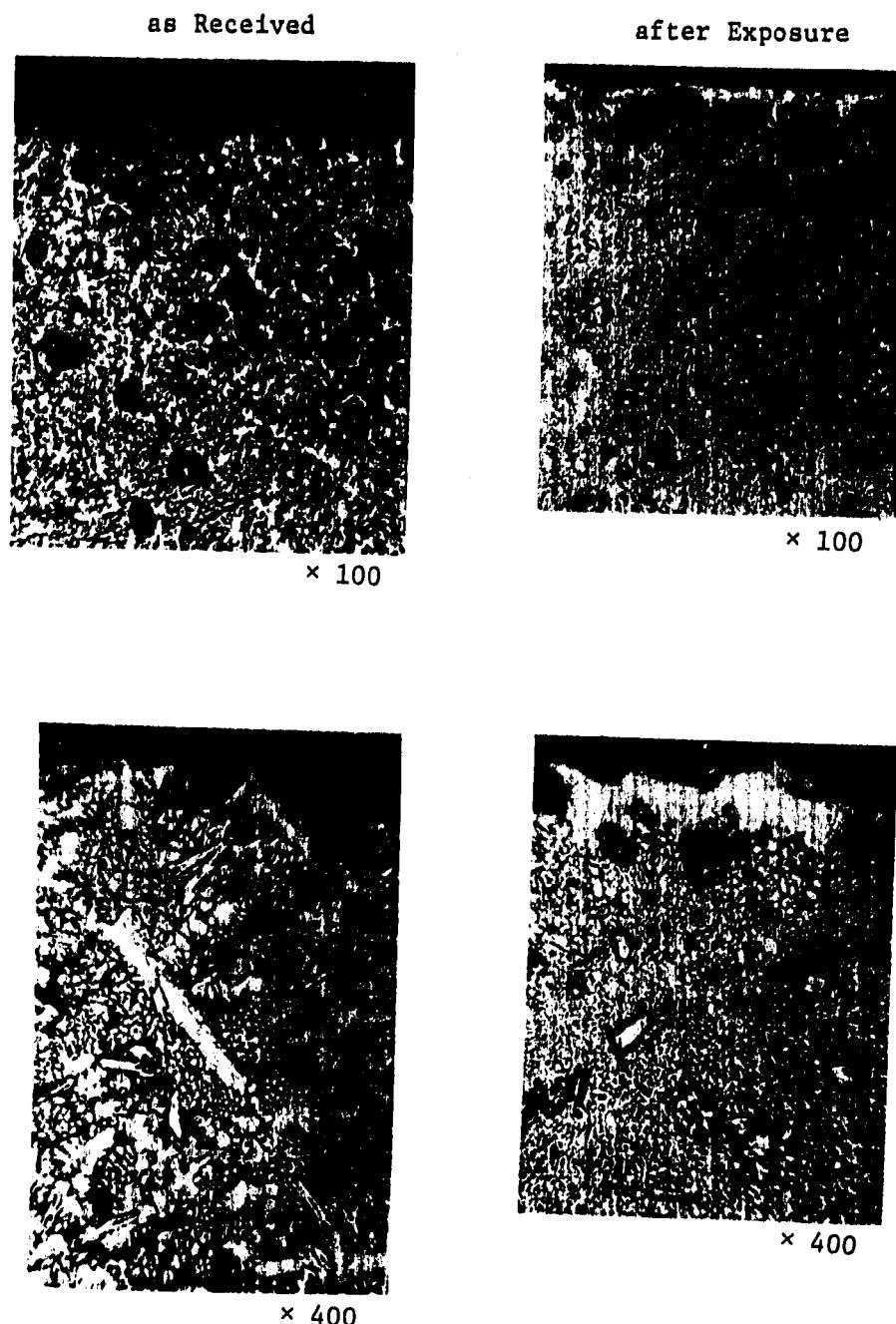


Photo. 29 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.6

as Received

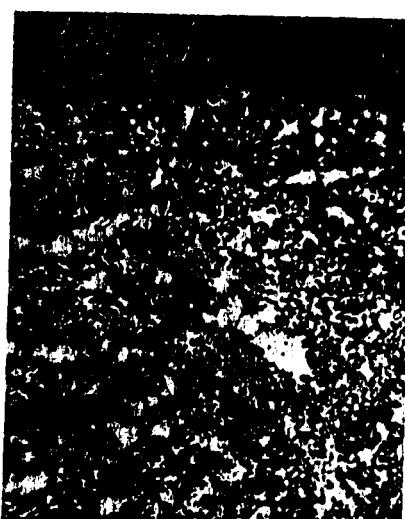


× 100

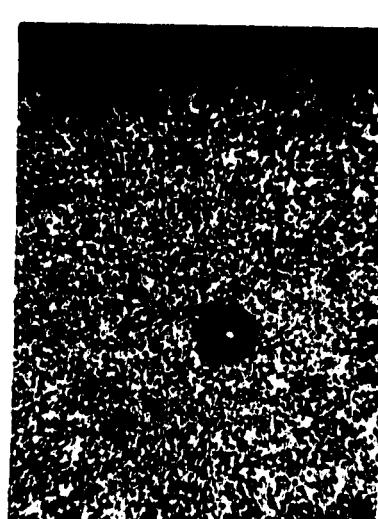
after Exposure



× 100



× 400



× 400

Photo. 30 Cross-Sectional Micrographs of Metco 16C

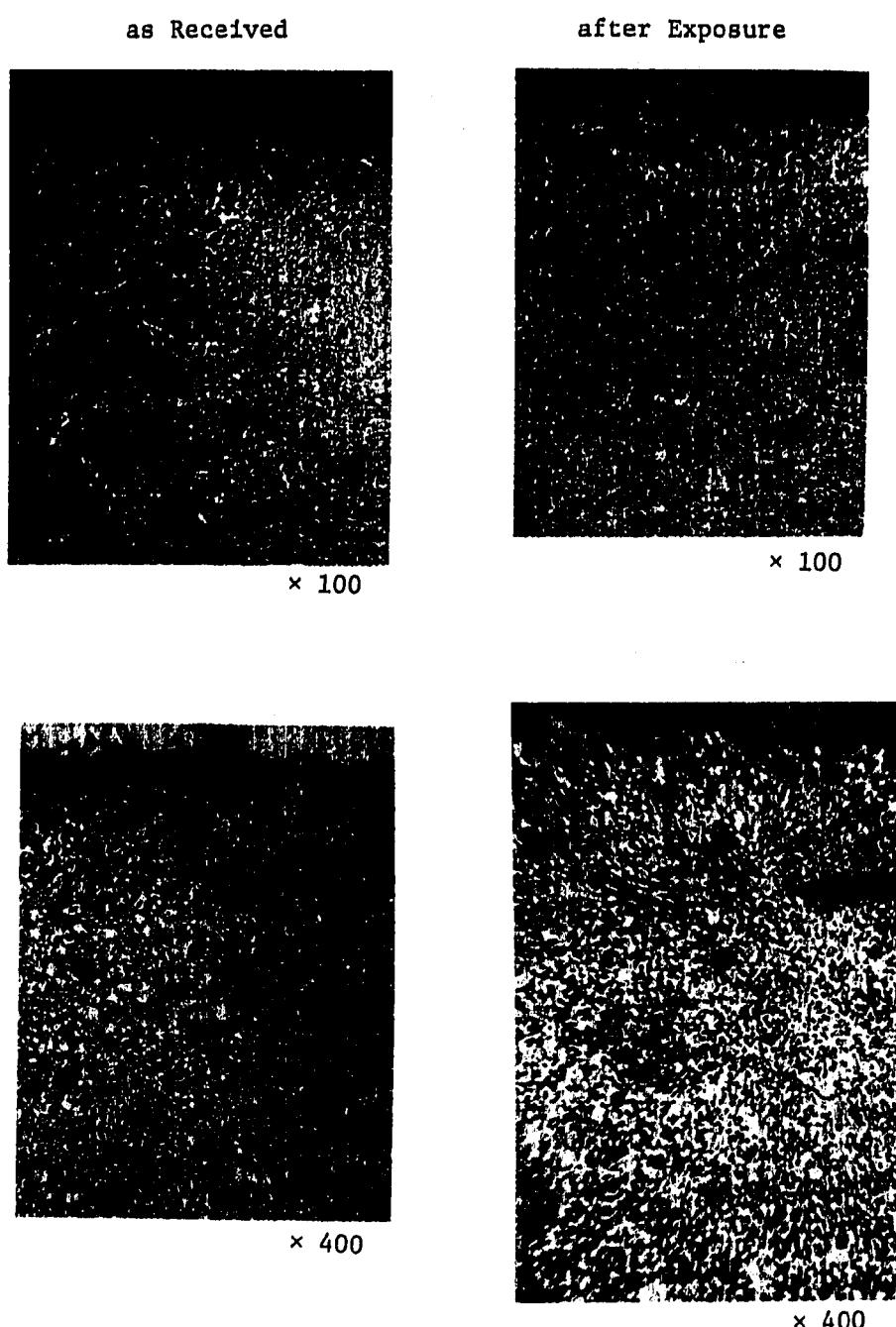
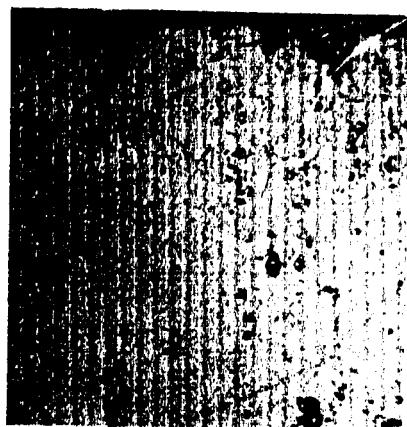


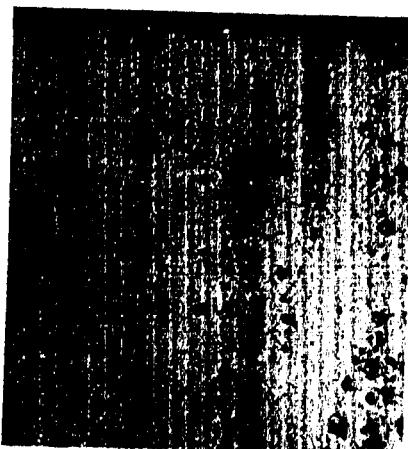
Photo. 31 Cross-Sectional Micrographs of Deloro Stellite SF-60M

as Received

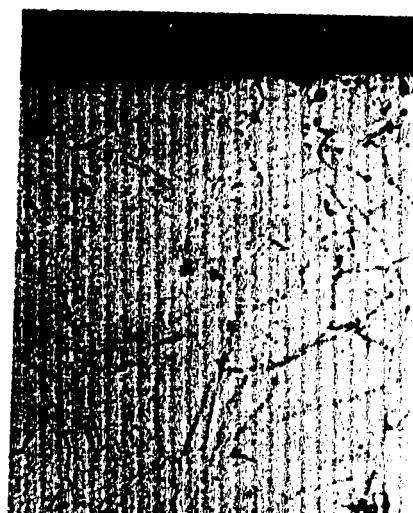


× 100

after Exposure



× 100



× 400



× 400

Photo. 32 Cross-Sectional Micrographs of Inconel 718

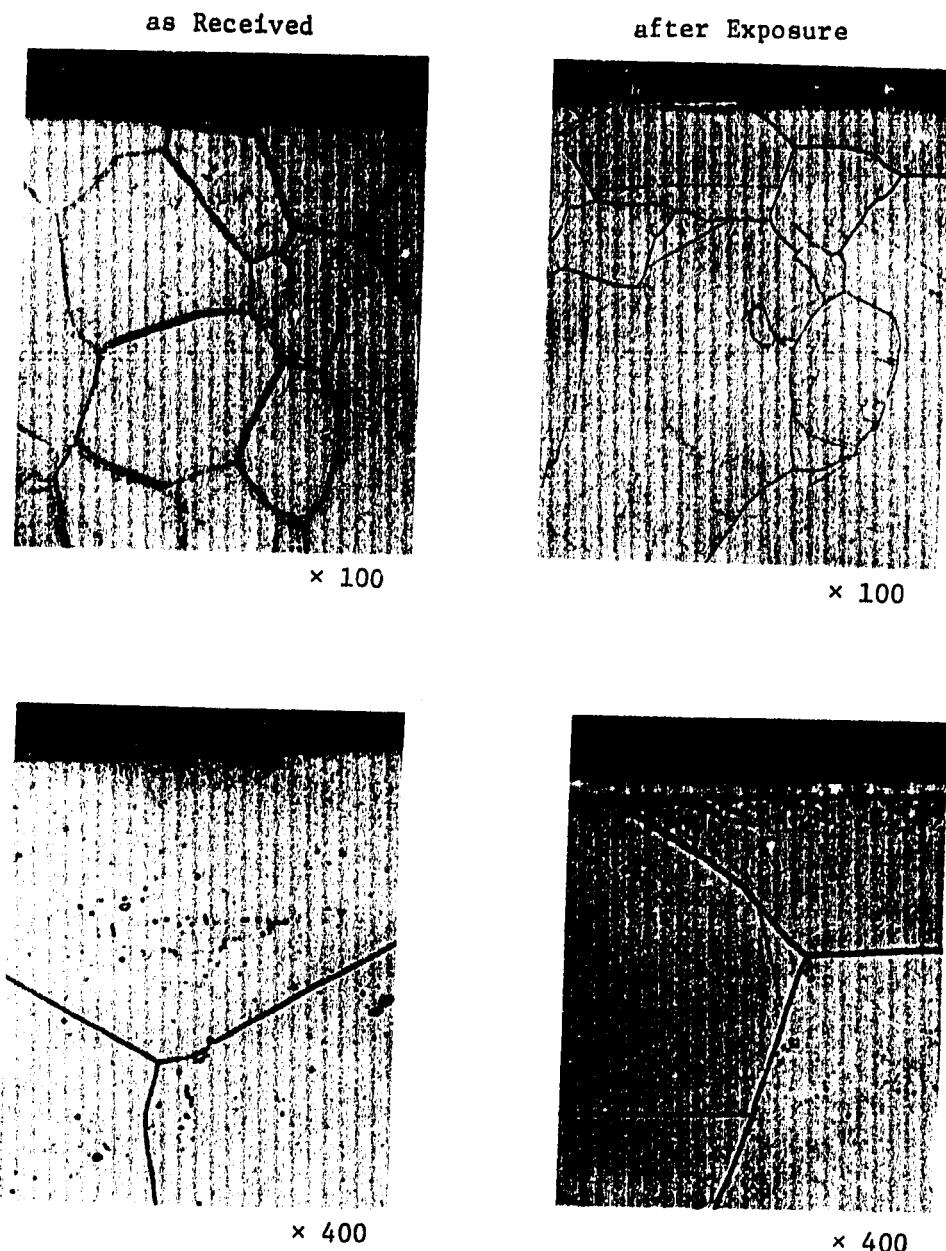
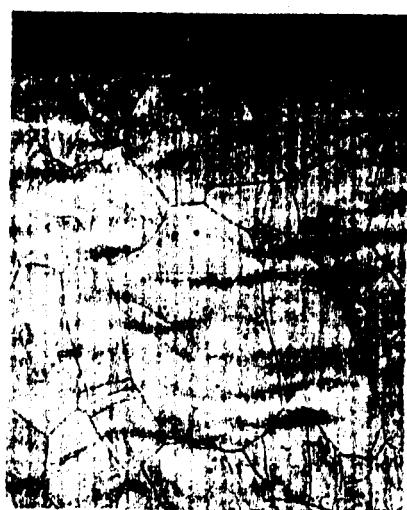


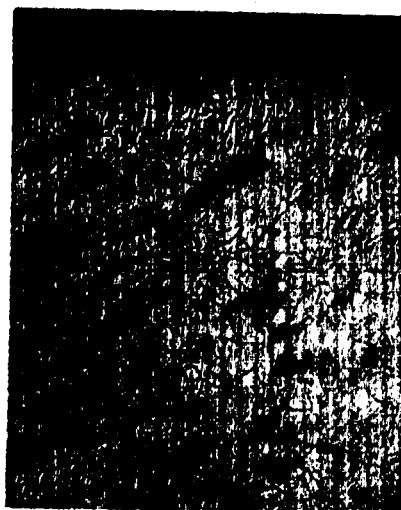
Photo. 33 Cross-Sectional Micrographs of Inconel X750

as Received



× 100

after Exposure



× 100



× 400



× 400

Photo. 34 Cross-Sectional Micrographs of Inconel 600

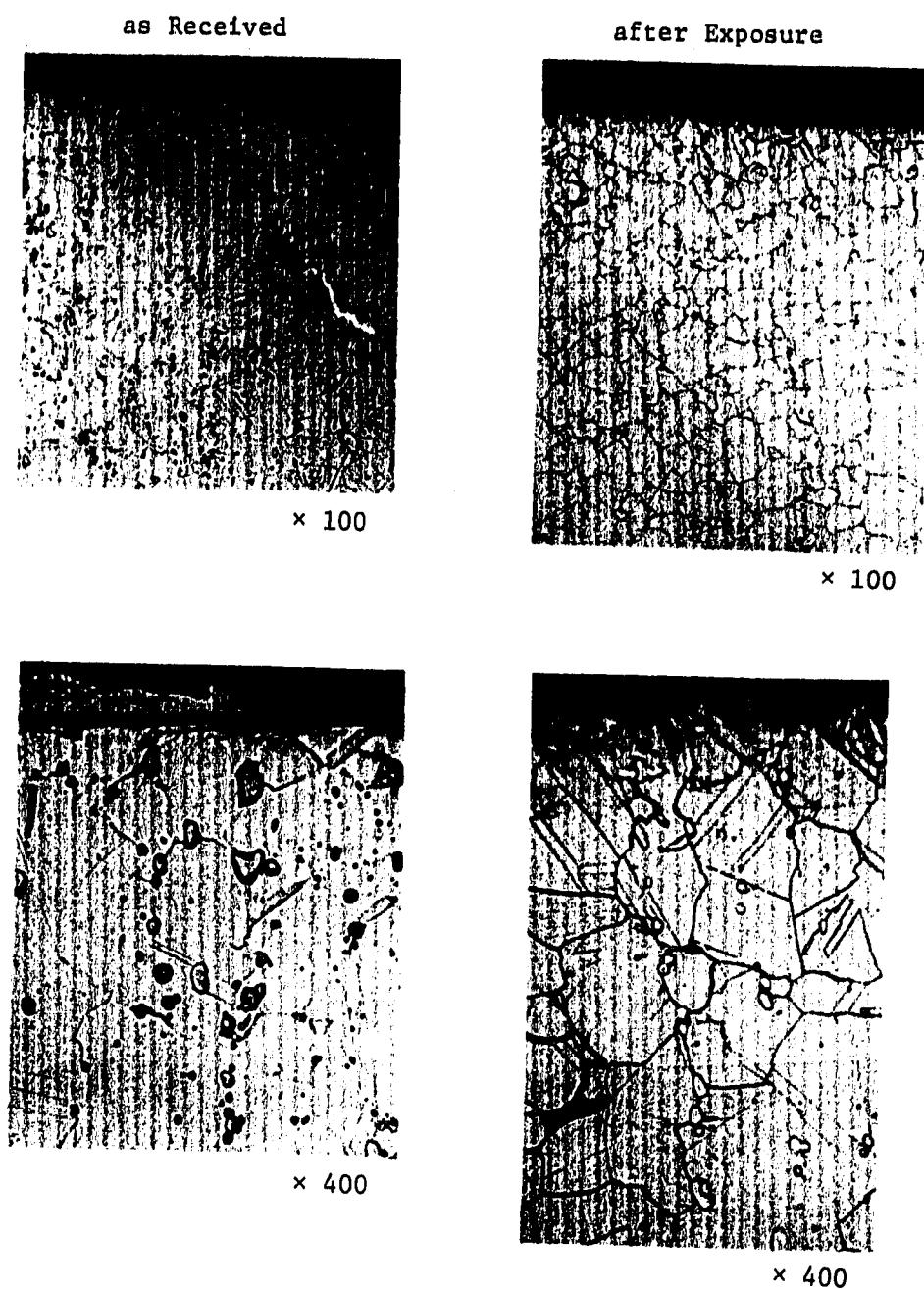
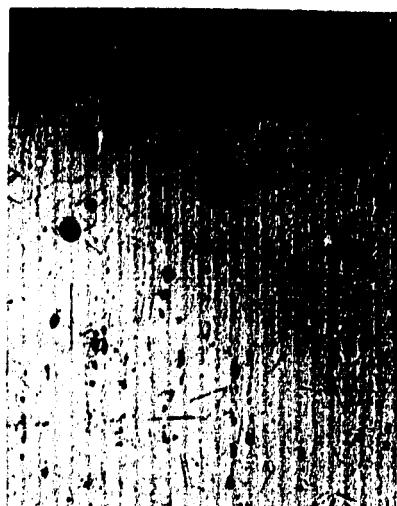


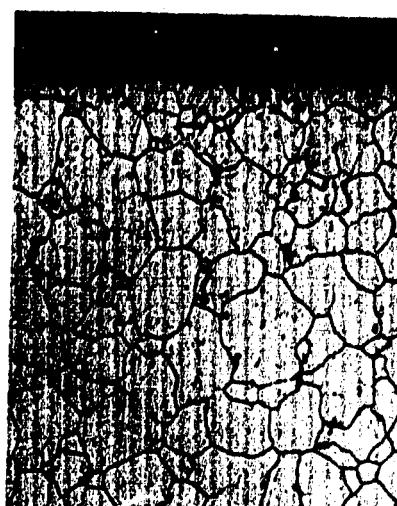
Photo. 35 Cross-Sectional Micrographs of Hastelloy C

as Received



× 100

after Exposure



× 100



× 400



× 400

Photo. 36 Cross-Sectional Micrographs of AISI 661

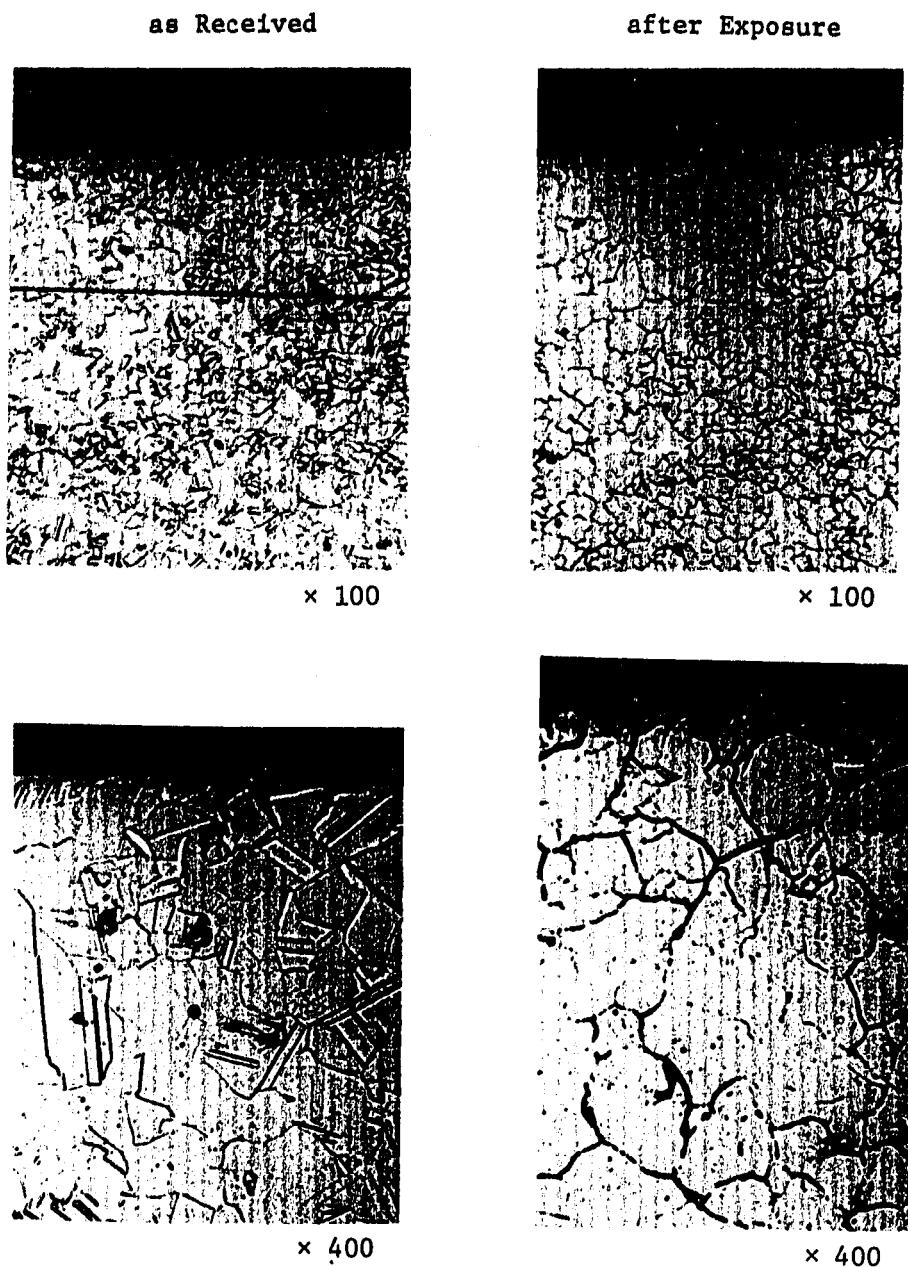


Photo. 37 Cross-Sectional Micrographs of Carpenter 20Nb

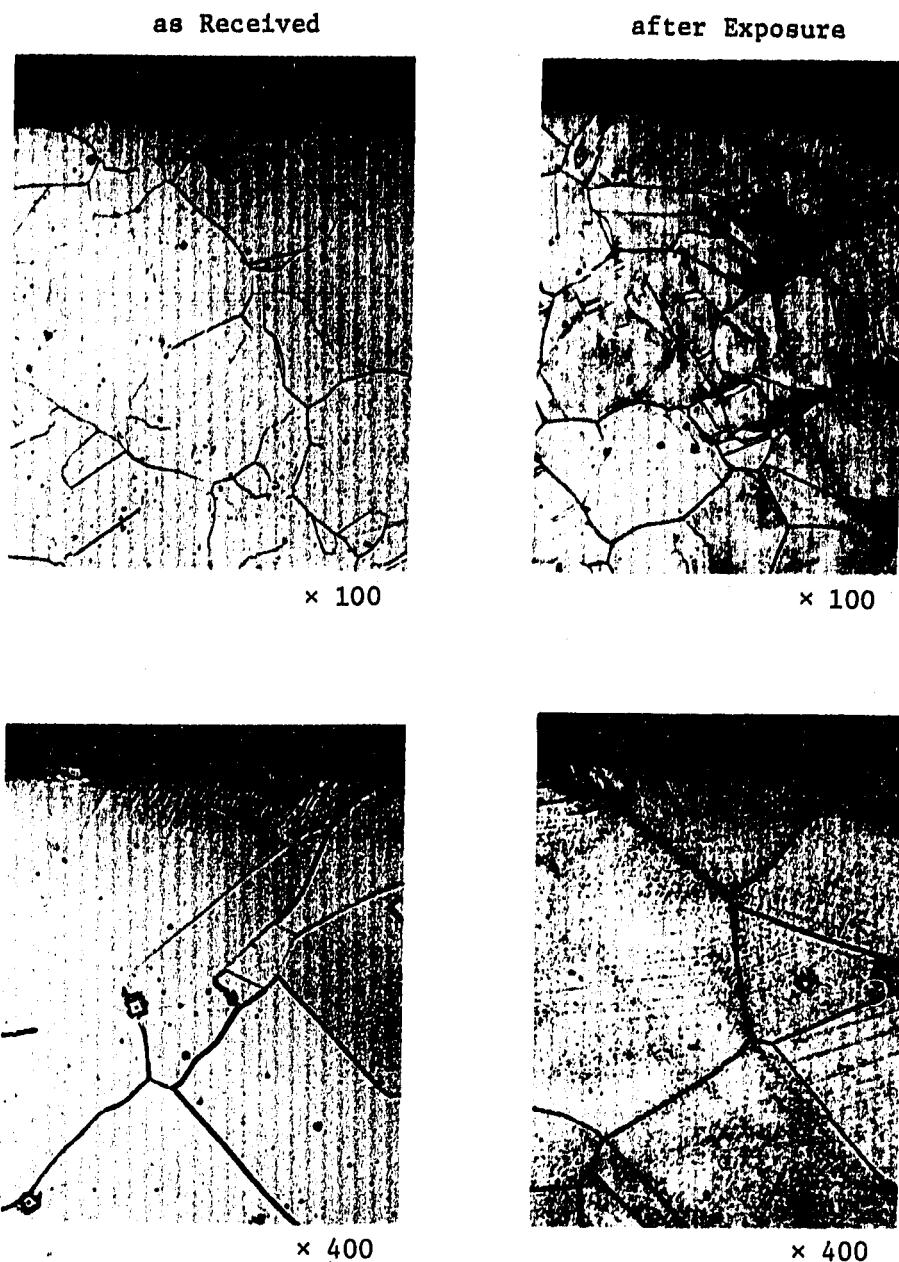


Photo. 38 Cross-Sectional Micrographs of Incoloy 800

as Received



× 100

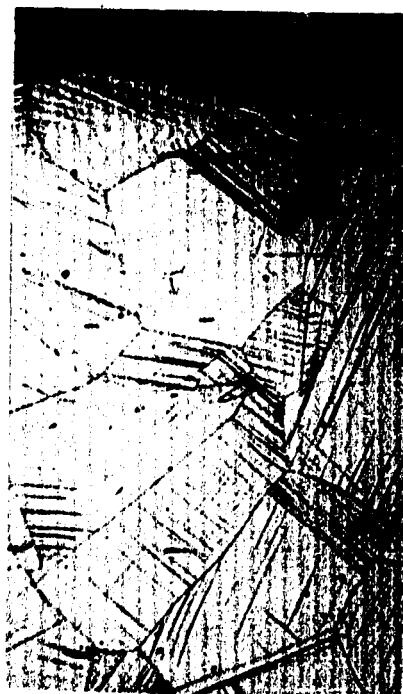
after Exposure



× 100



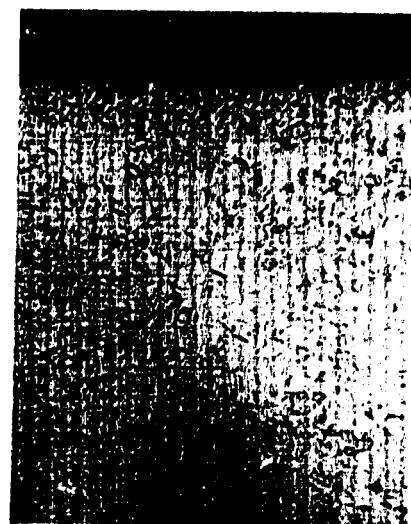
× 400



× 400

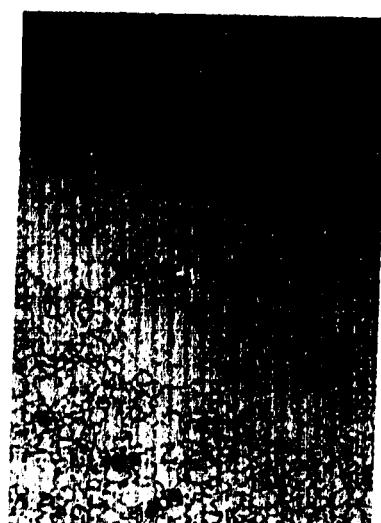
Photo. 39 Cross-Sectional Micrographs of SUS 304

as Received



× 100

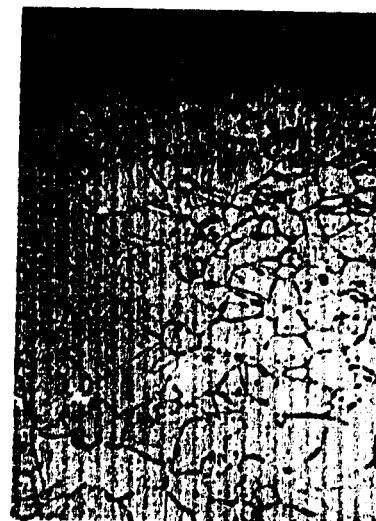
after Exposure



× 100



× 400



× 400

Photo. 40 Cross-Sectional Micrographs of SUS 316

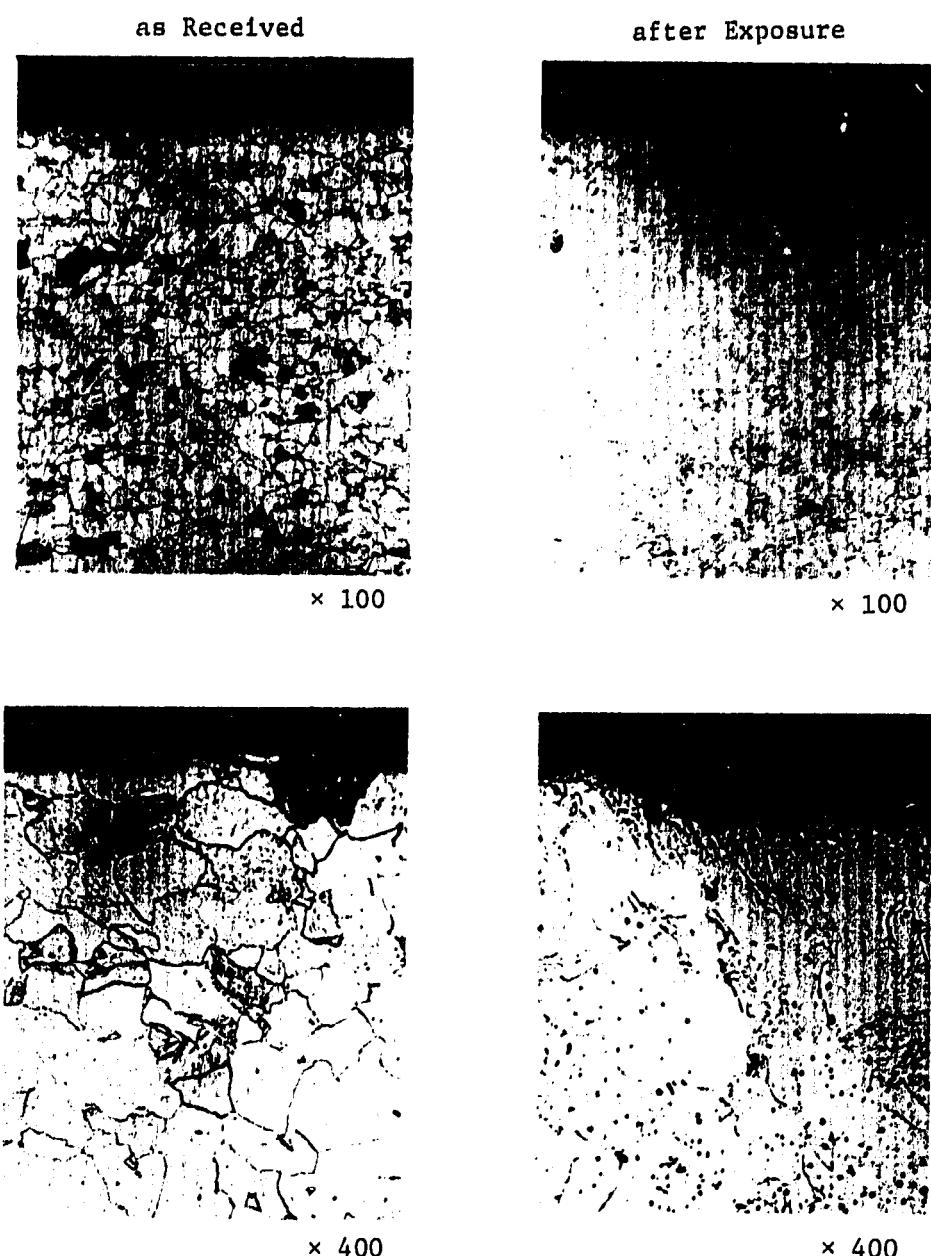


Photo. 41 Cross-Sectional Micrographs of 2 1/4Cr-1Mo Steel

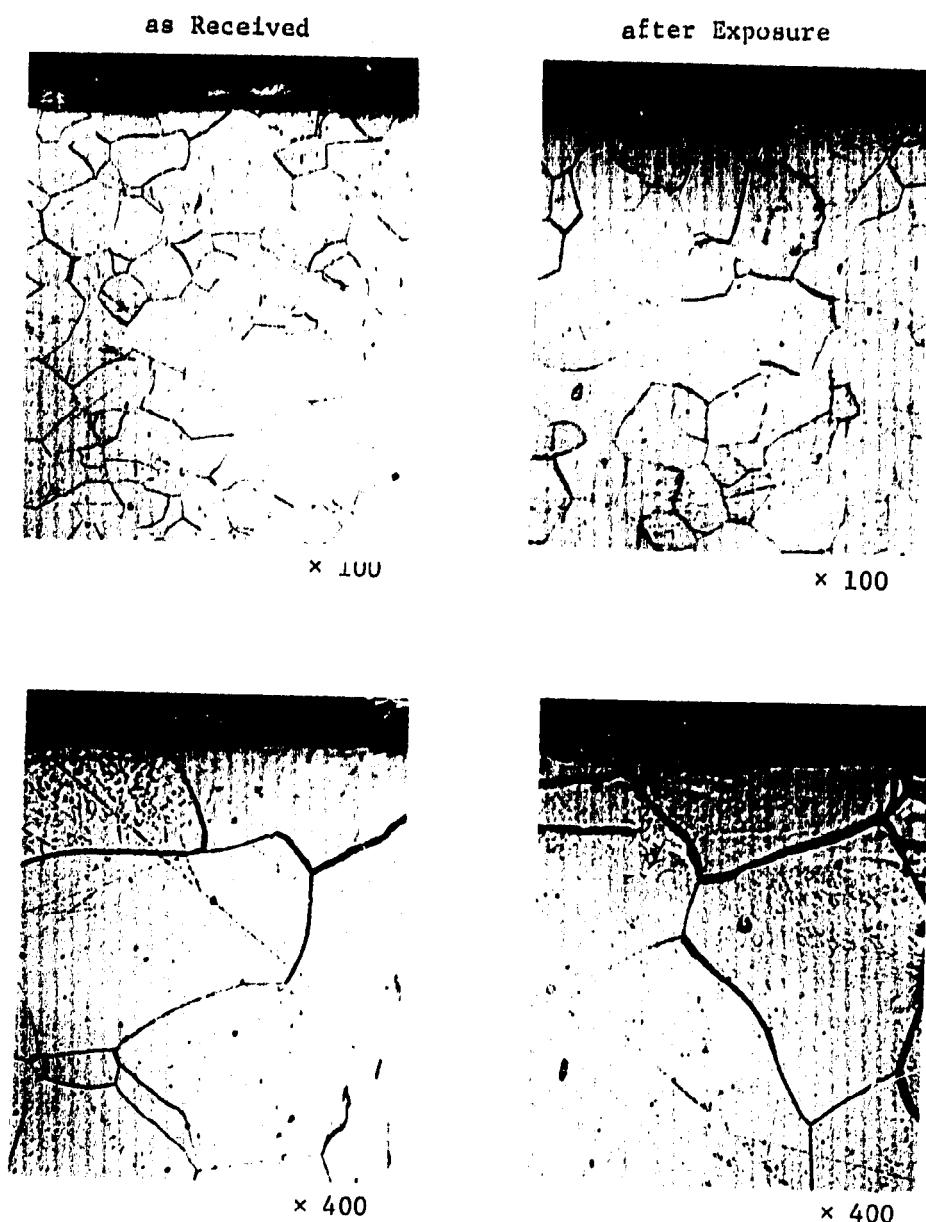


Photo. 42 Cross-Sectional Micrographs of Pure Iron

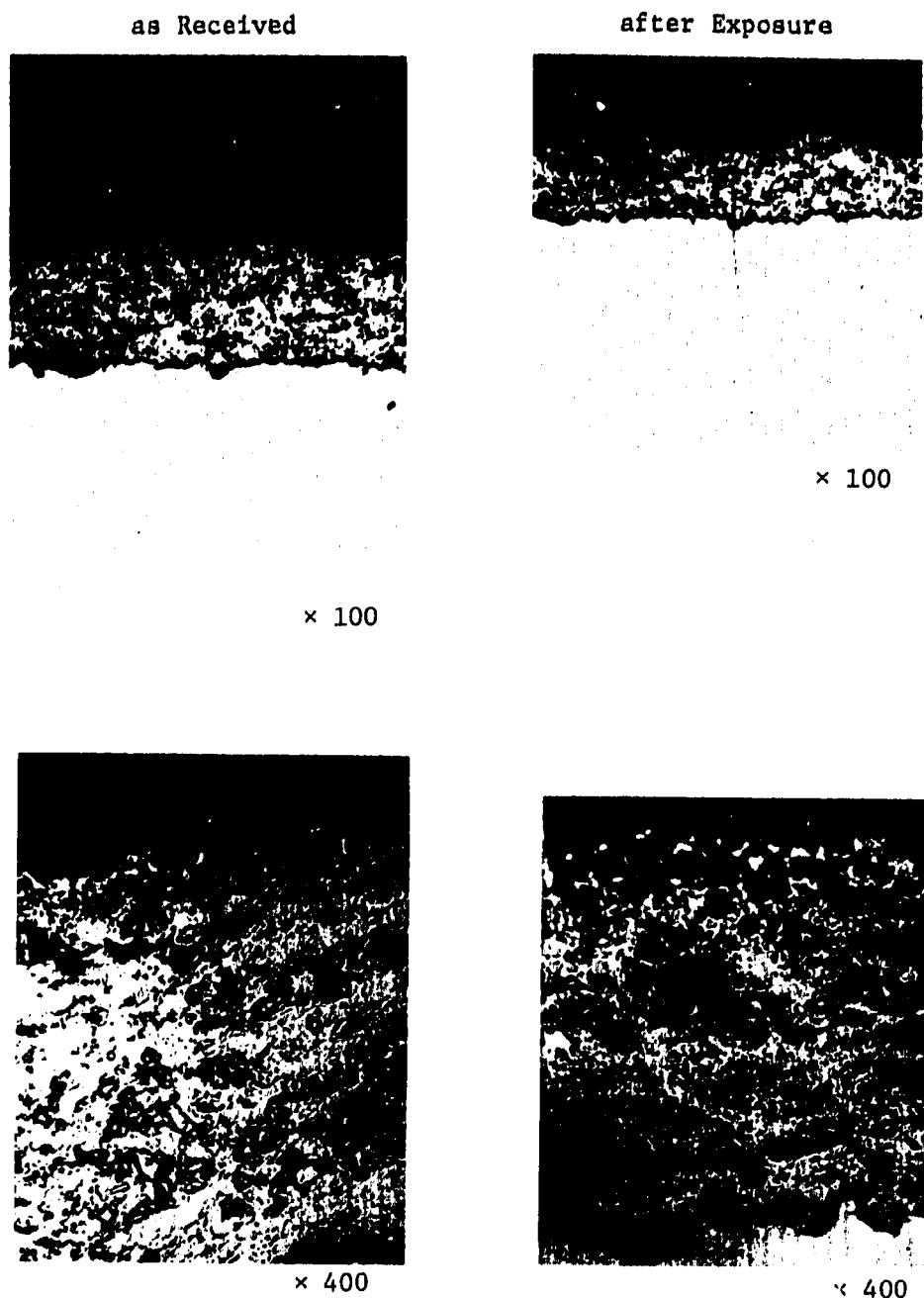


Photo. 43 Cross-Sectional Micrographs of LW-1N40

as Received



after Exposure

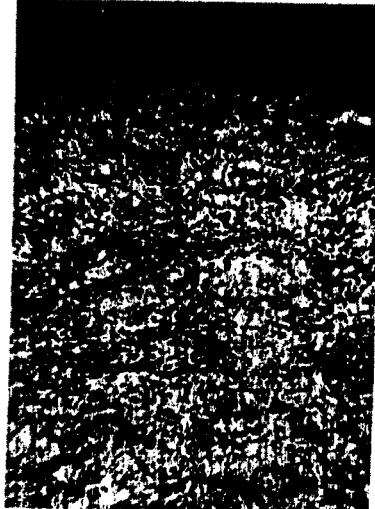


× 100

× 100



× 400



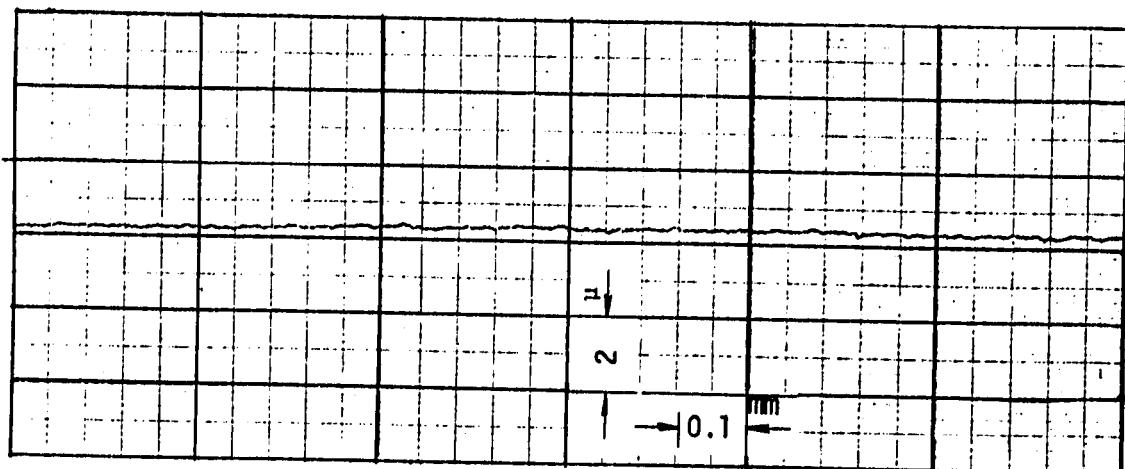
× 400

Photo. 44 Cross-Sectional Micrographs of LC-1C

Appendix I

表面あらさ曲線の例

as Received



after Exposure

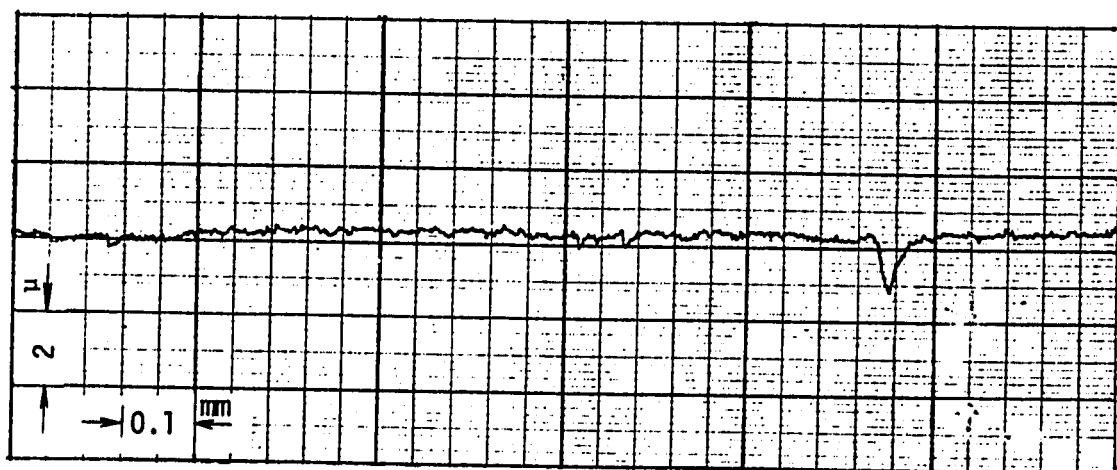
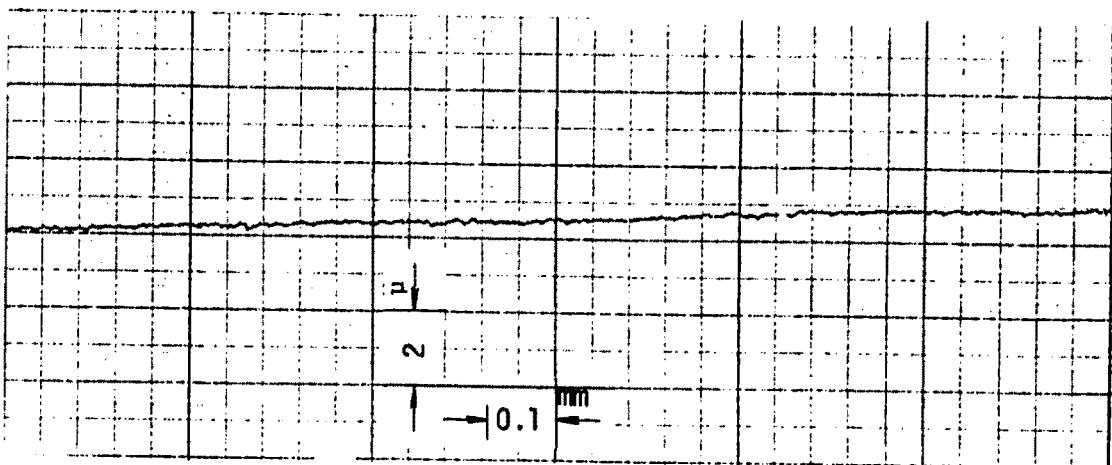


Fig. 1 Surface Roughness of Stellite No.1

as Received



after Exposure

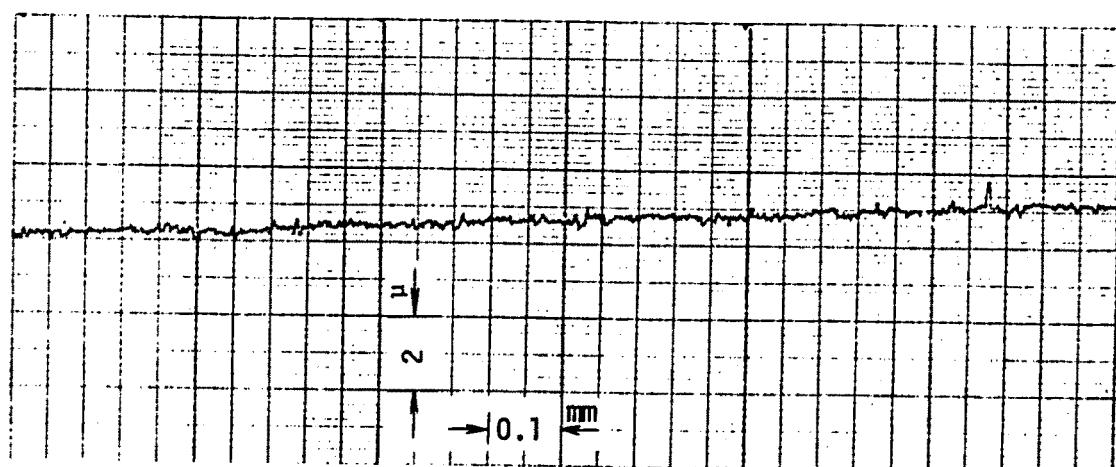
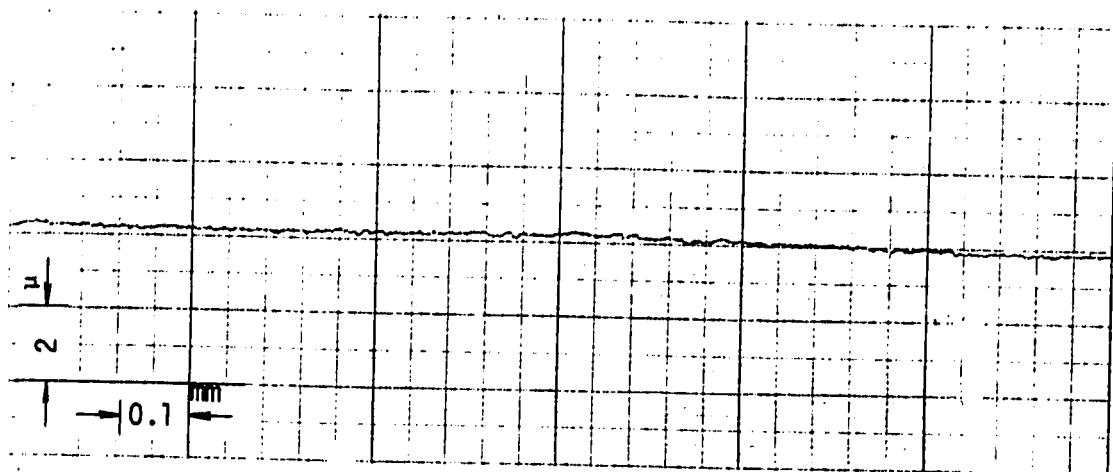


Fig. 2 Surface Roughness of Stellite No.6

as Received



after Exposure

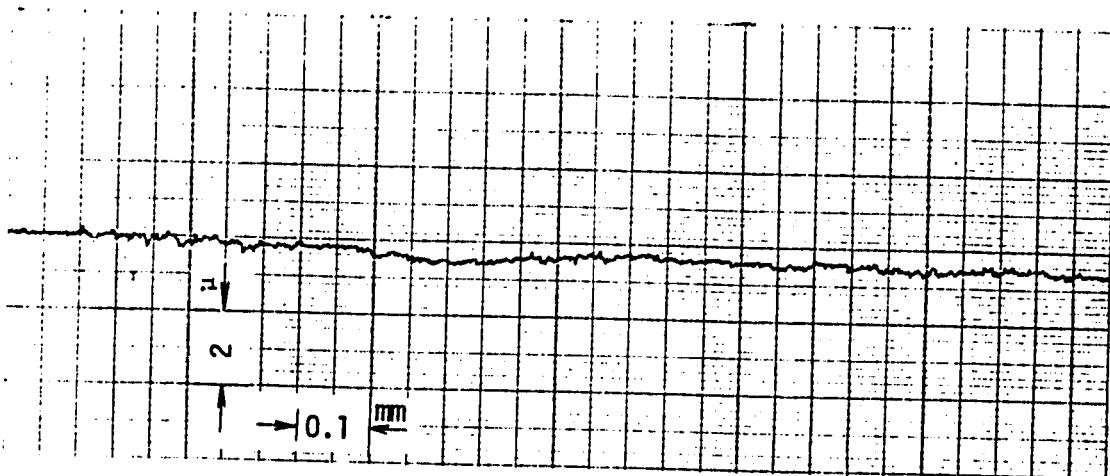
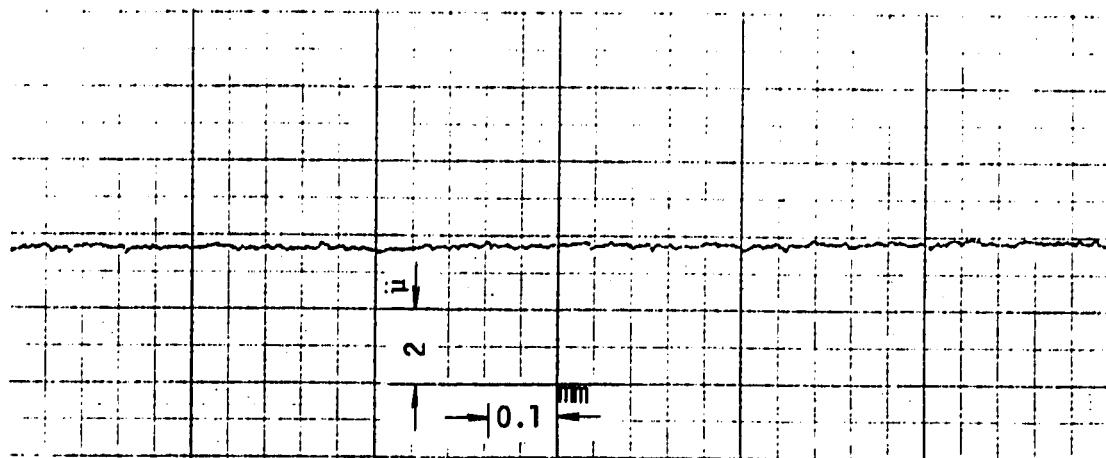


Fig. 3 Surface Roughness of Stellite No.12

as Received



after Exposure

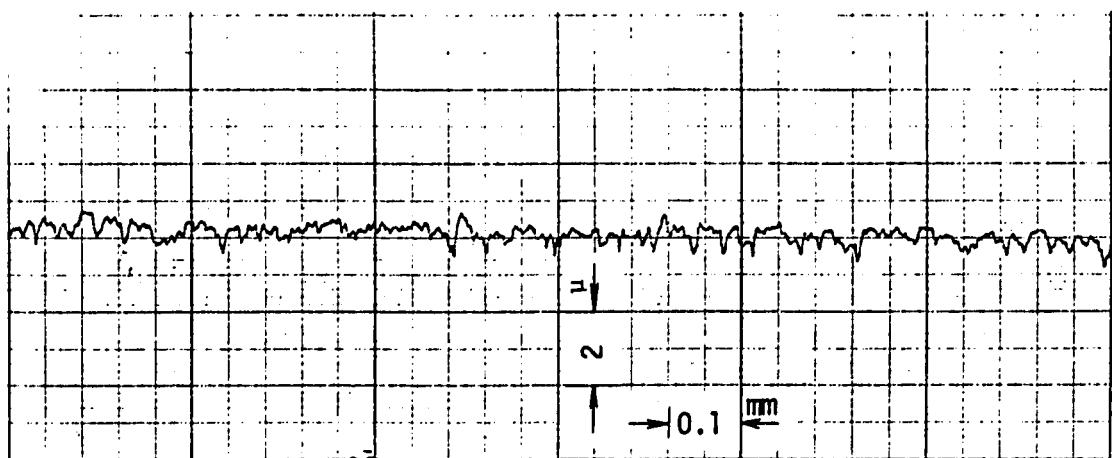
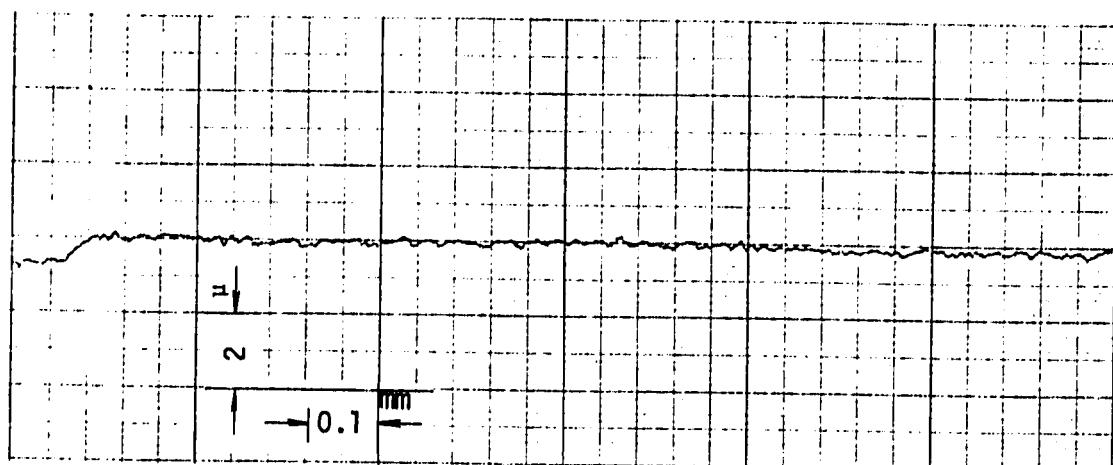


Fig. 4 Surface Roughness of Colmonoy No.20

as Received



after Exposure

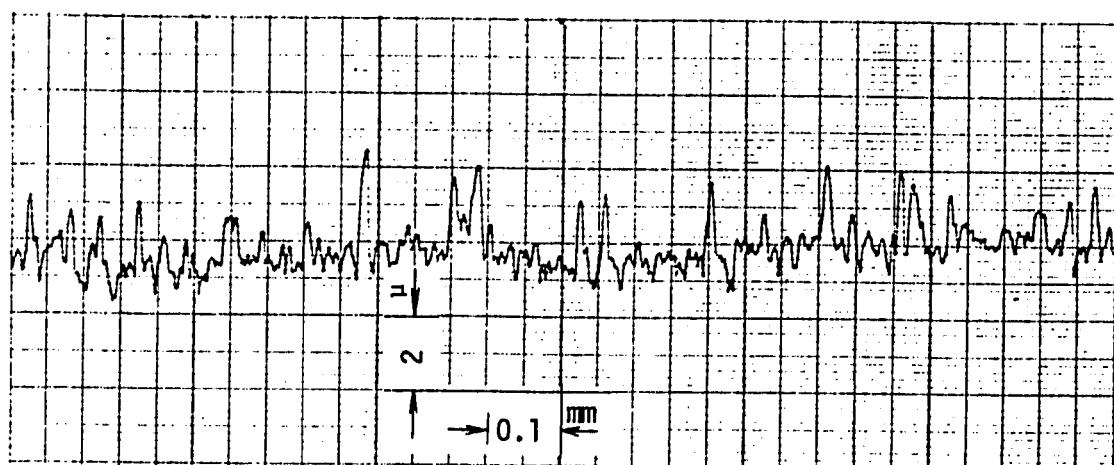
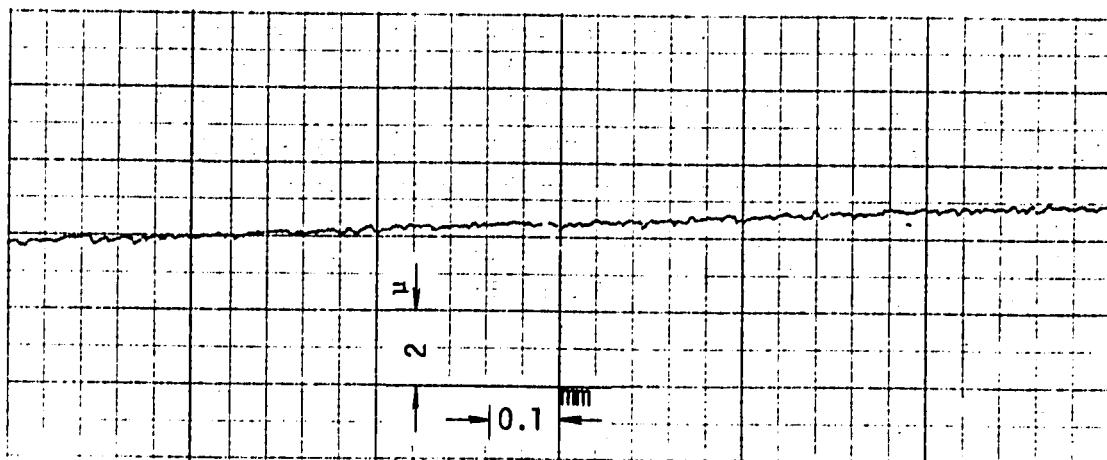


Fig. 5 Surface Roughness of Colmonoy No.4

as Received



after Exposure

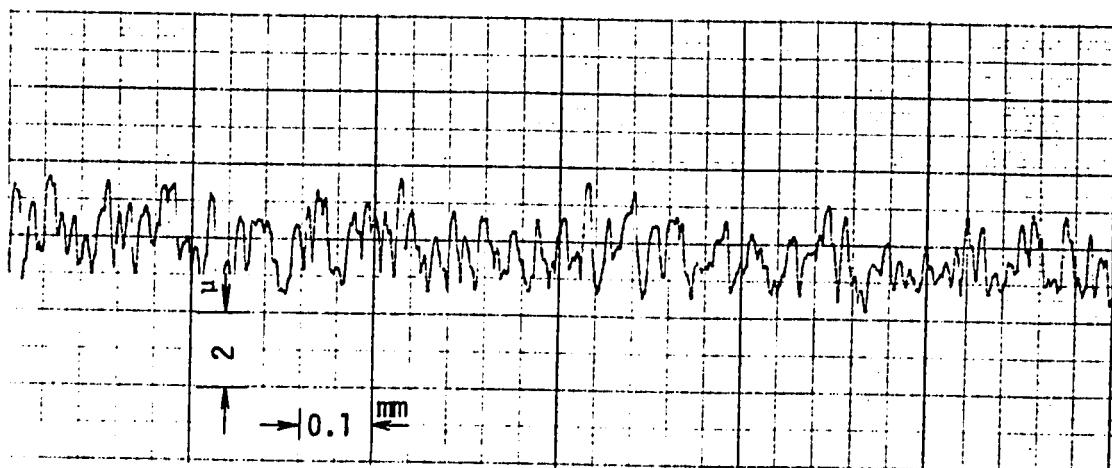
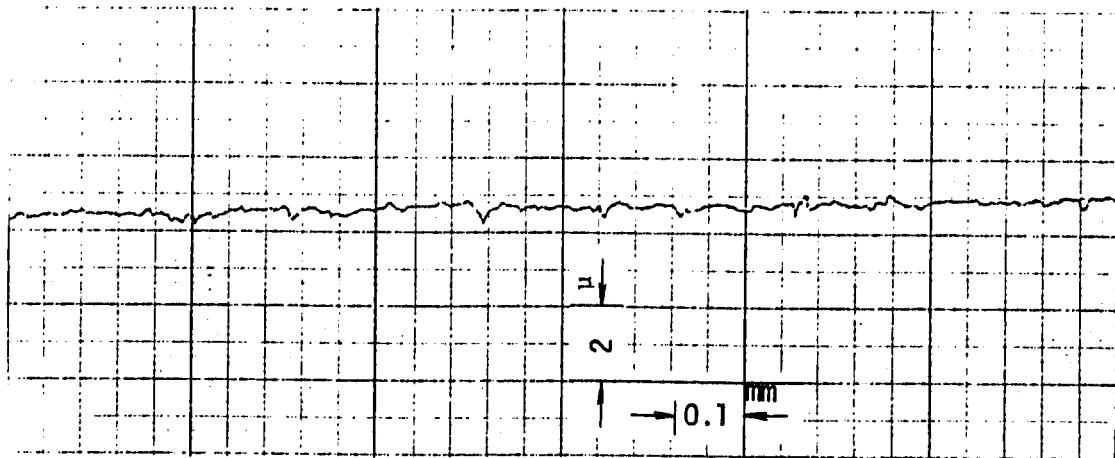


Fig. 6 Surface Roughness of Colmonoy No.5

as Received



after Exposure

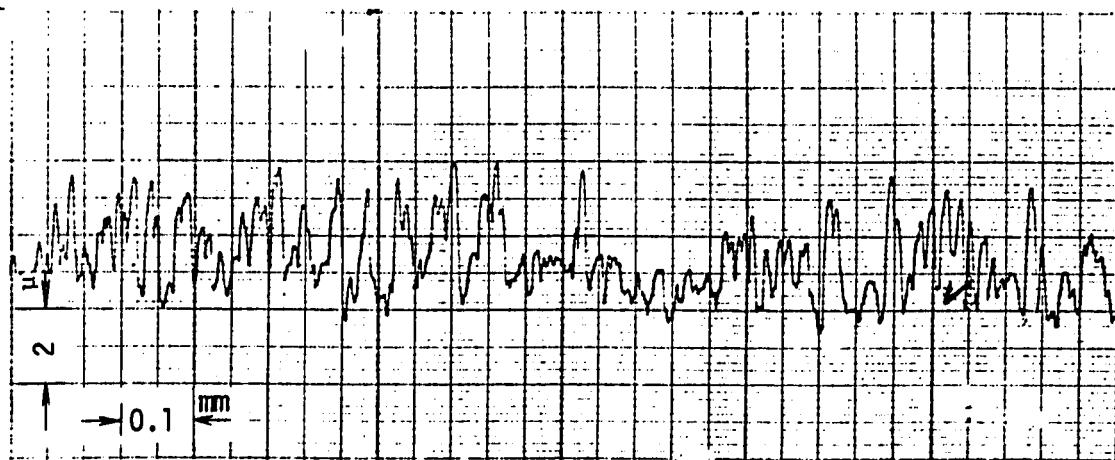
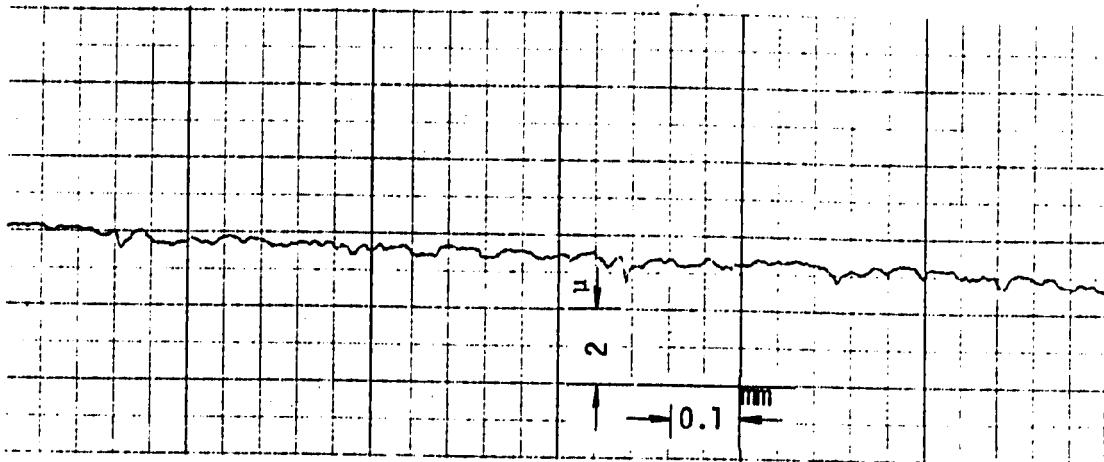


Fig. 7 Surface Roughness of Colmonoy No.6

as Received



after Exposure

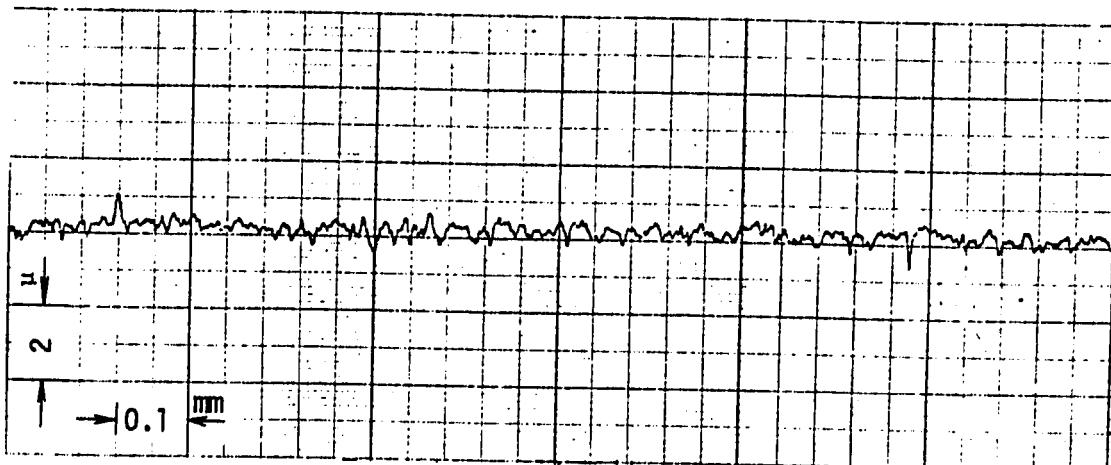
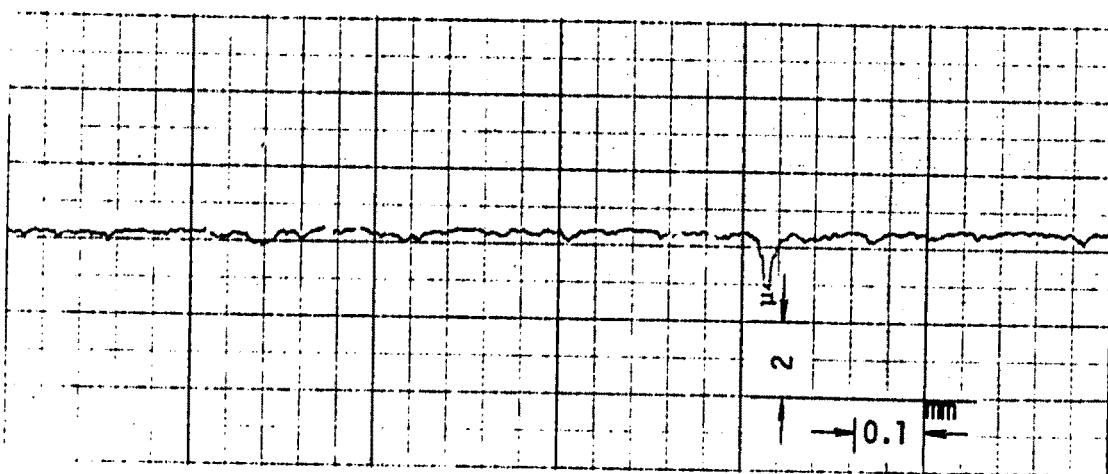


Fig. 8. Surface Roughness of Metco 16C

as Received



after Exposure

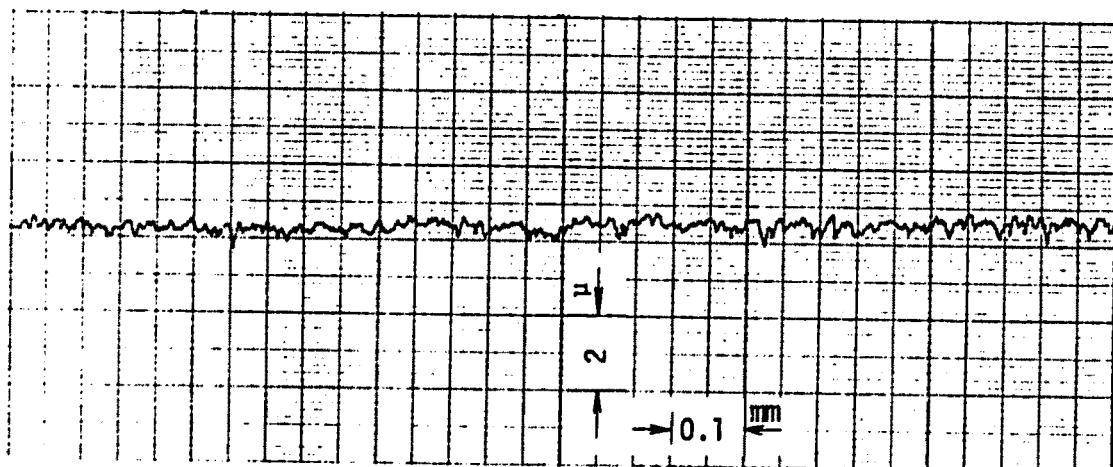
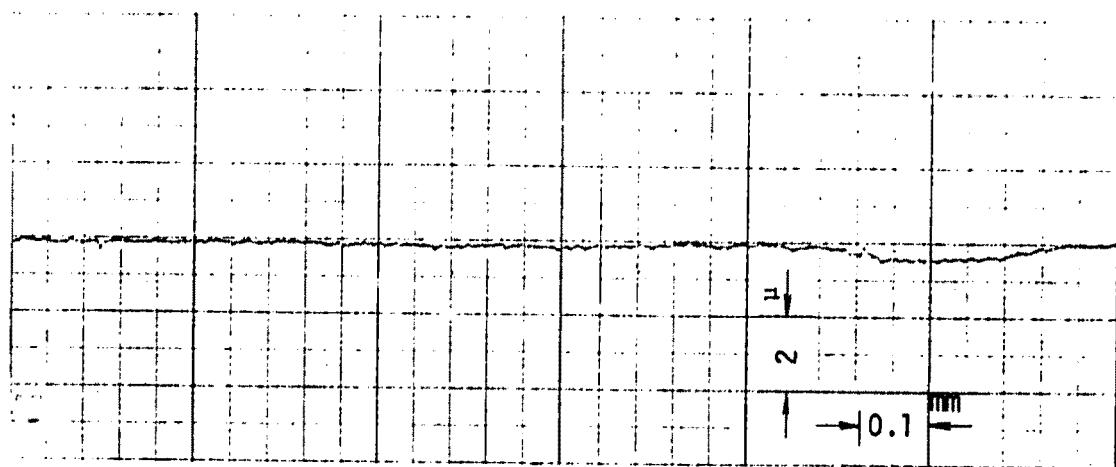


Fig. 9 Surface Roughness of Deloro Stellite SF-60M

as Received



after Exposure

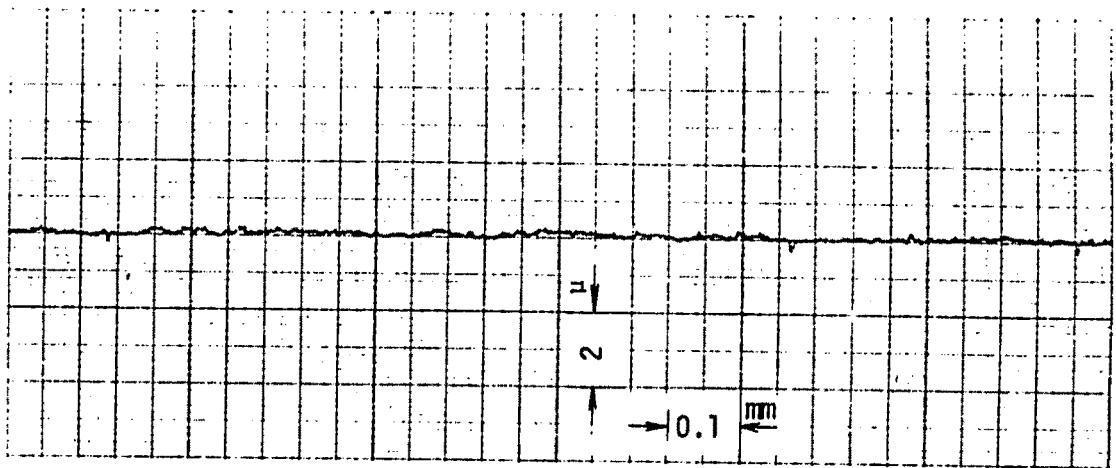
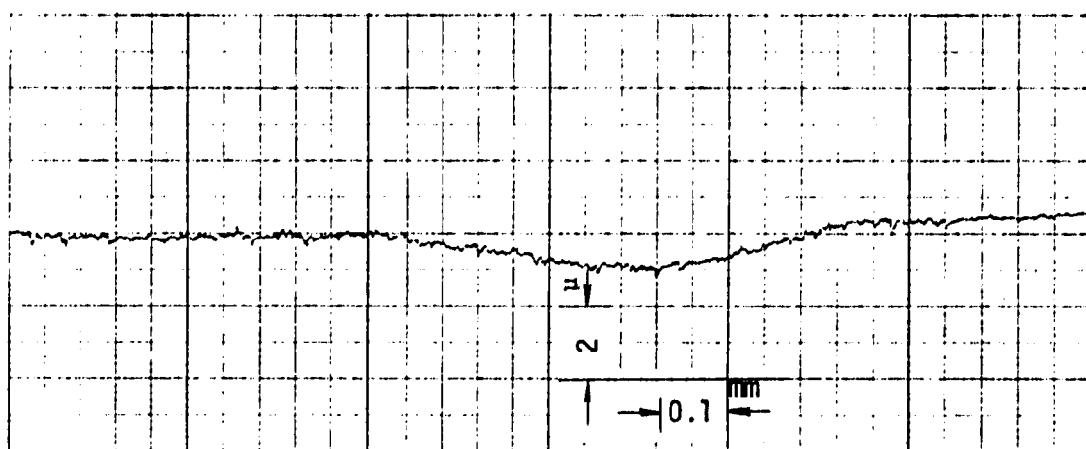


Fig. 10 Surface Roughness of Inconel 718

as Received



after Exposure

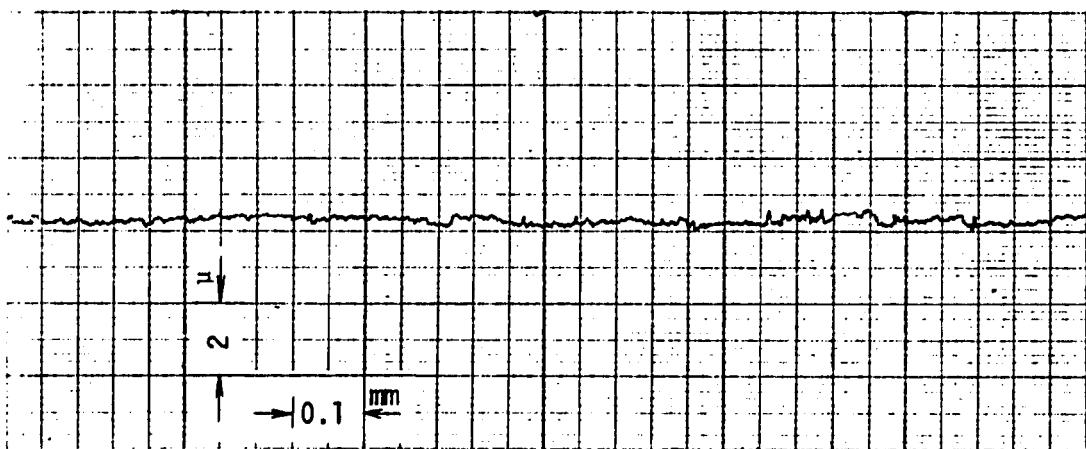
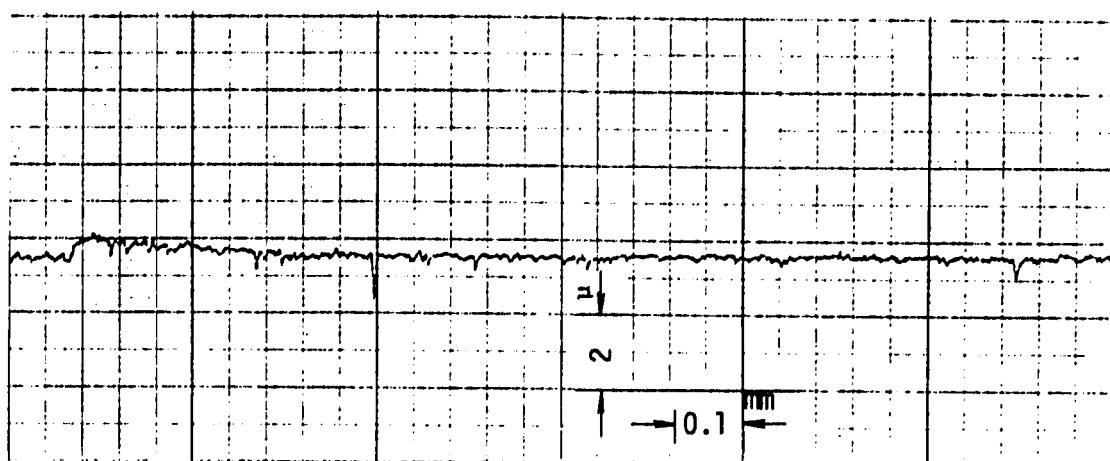


Fig. 11 Surface Roughness of Inconel X750

as Received



after Exposure

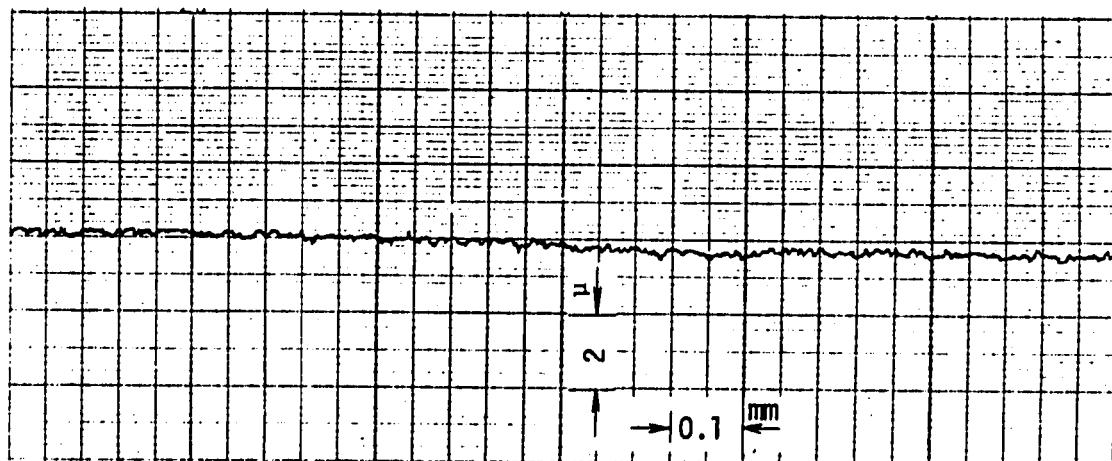
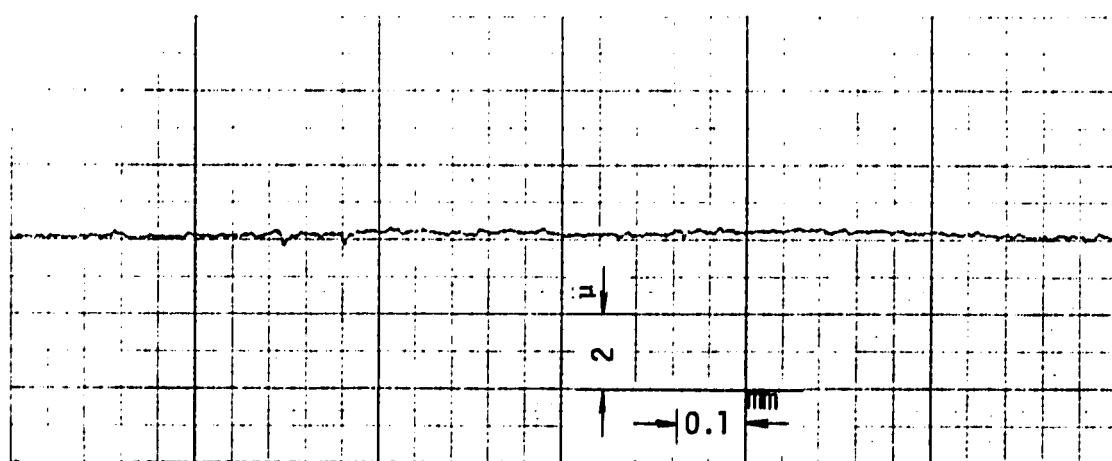


Fig. 12 Surface Roughness of Inconel 600

as Received



after Exposure

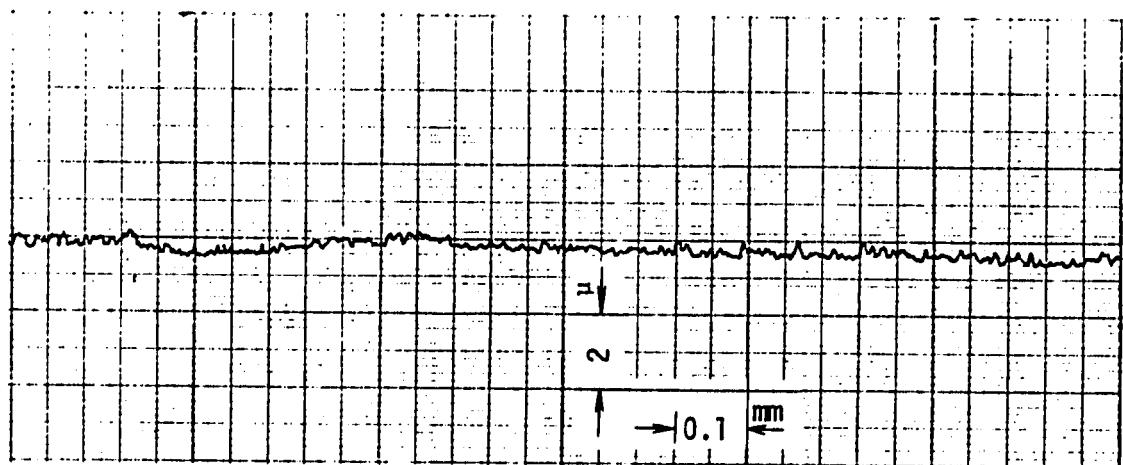
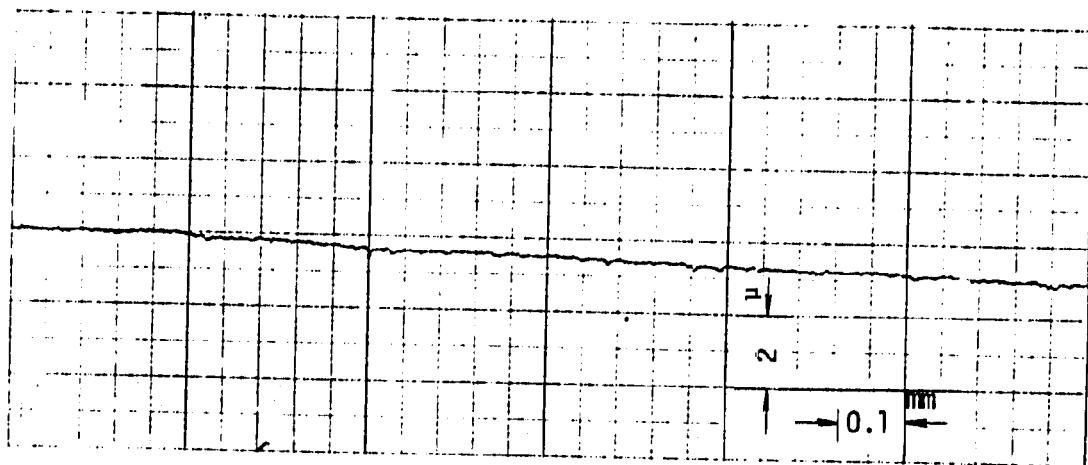


Fig. 13 Surface Roughness of Hastelloy C

as Received



after Exposure

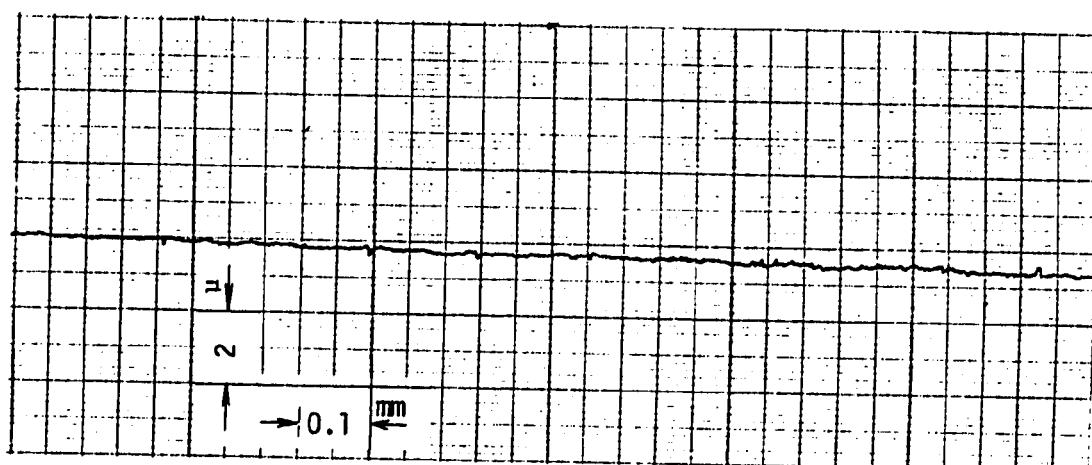
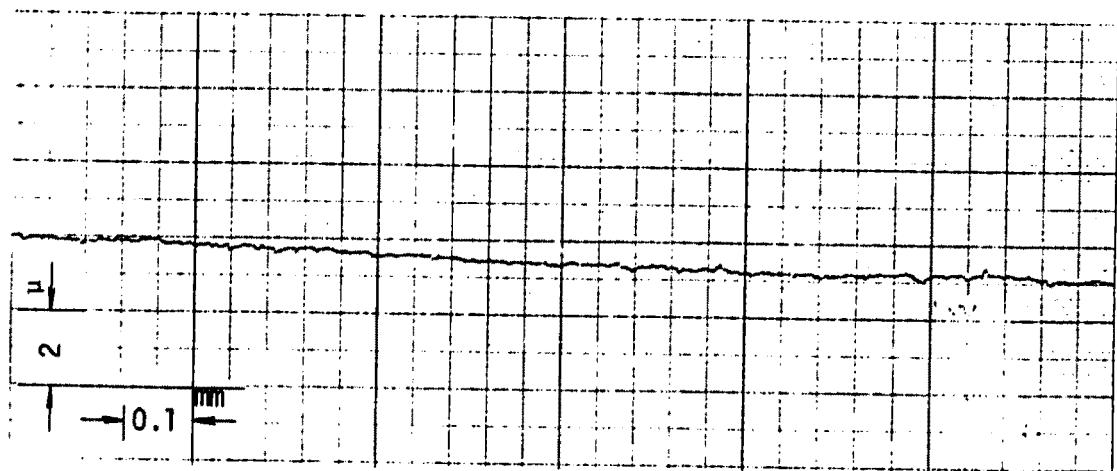


Fig. 14 Surface Roughness of AISI 661

as Received



after Exposure

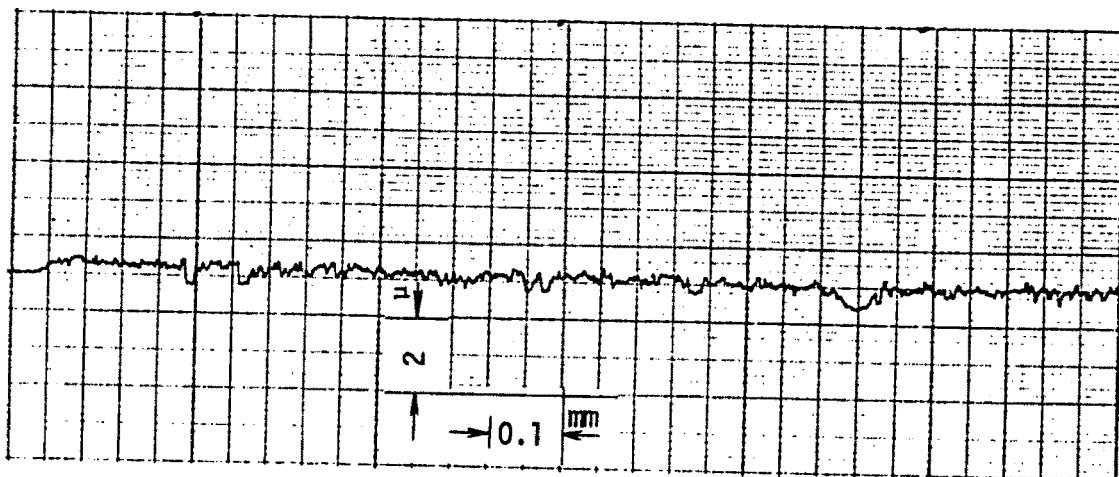
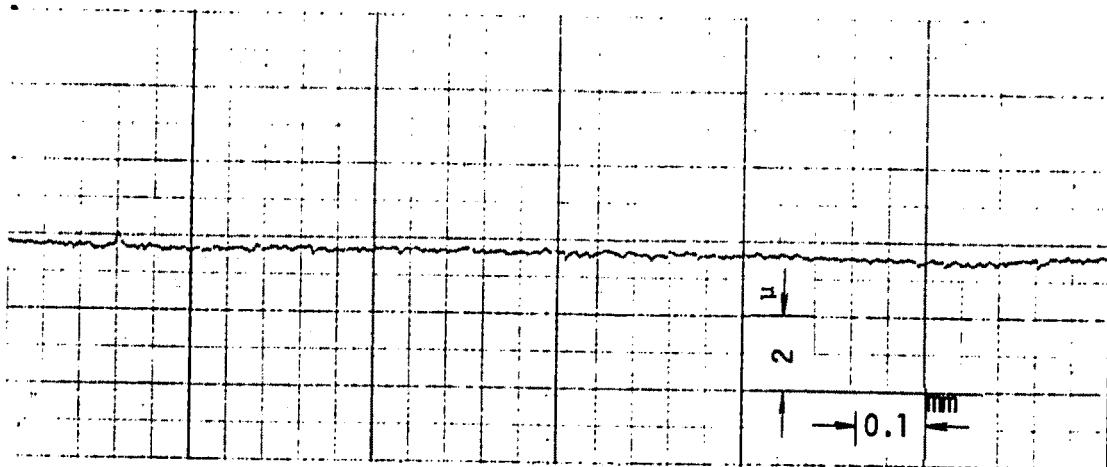


Fig. 15 Surface Roughness of Carpenter 20

as Received



after Exposure

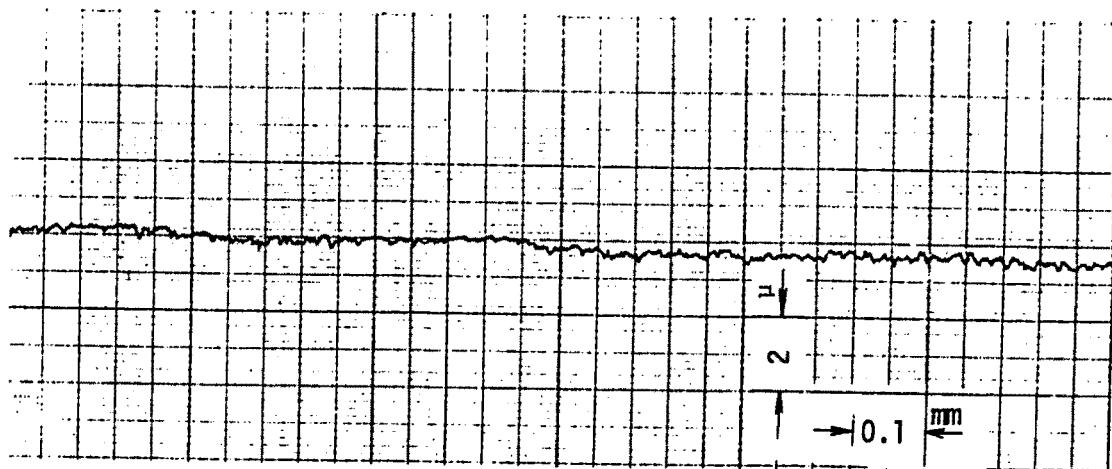
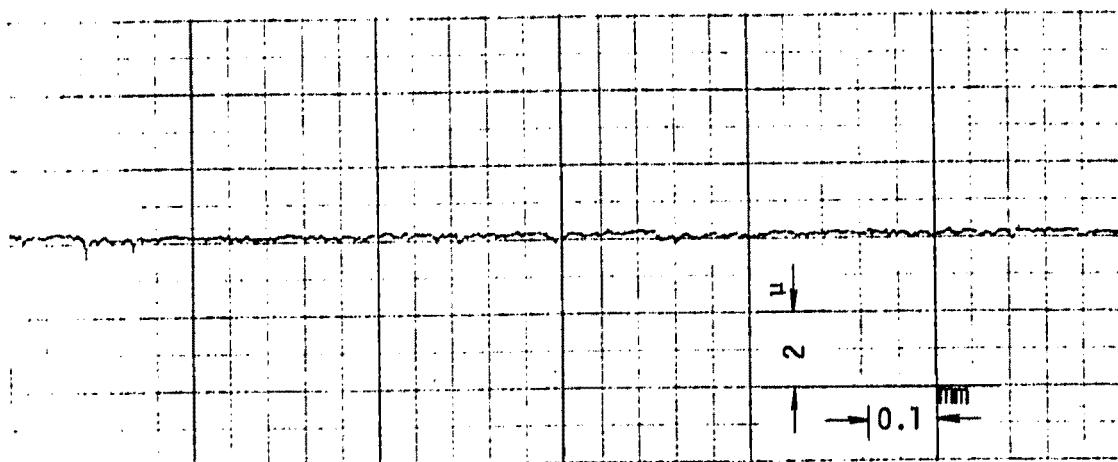


Fig. 16 Surface Roughness of Incoloy 800

as Received



after Exposure

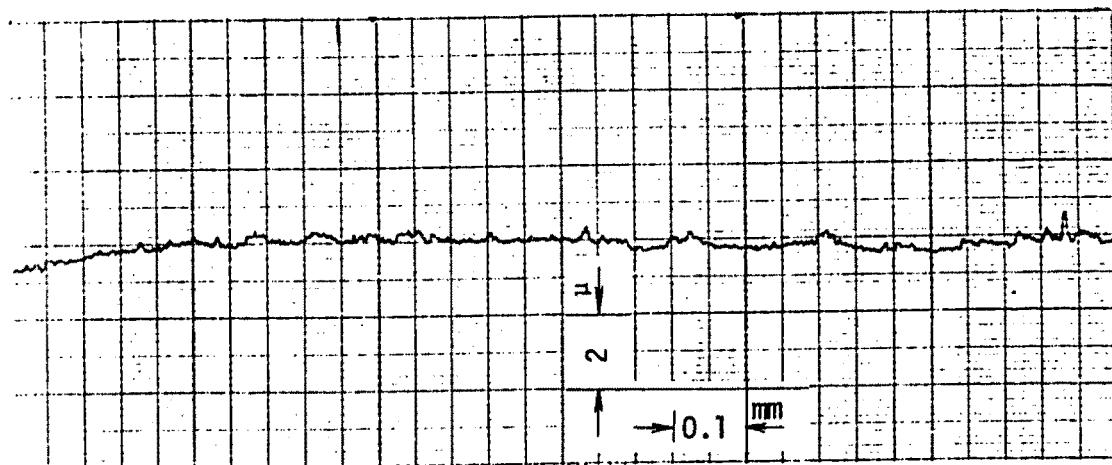
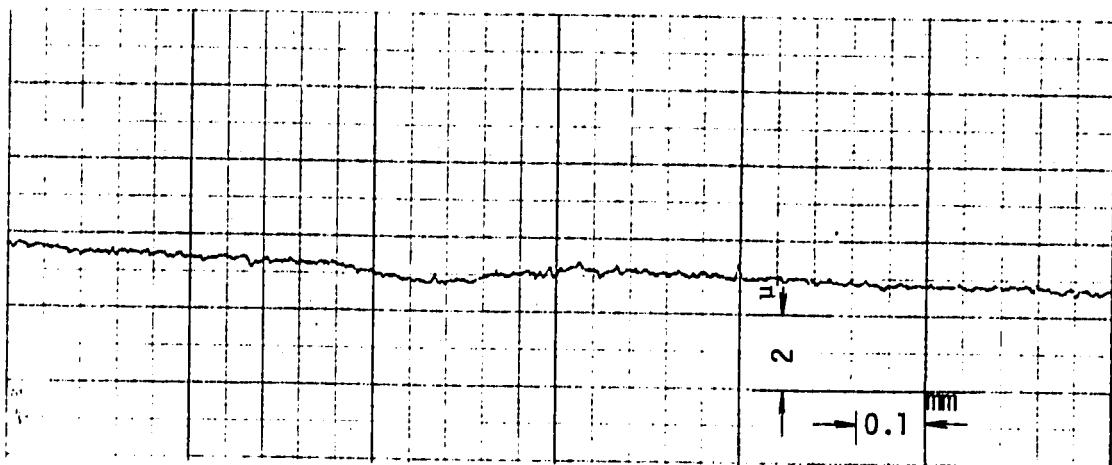


Fig. 17 Surface Roughness of SUS 304

as Received



after Exposure

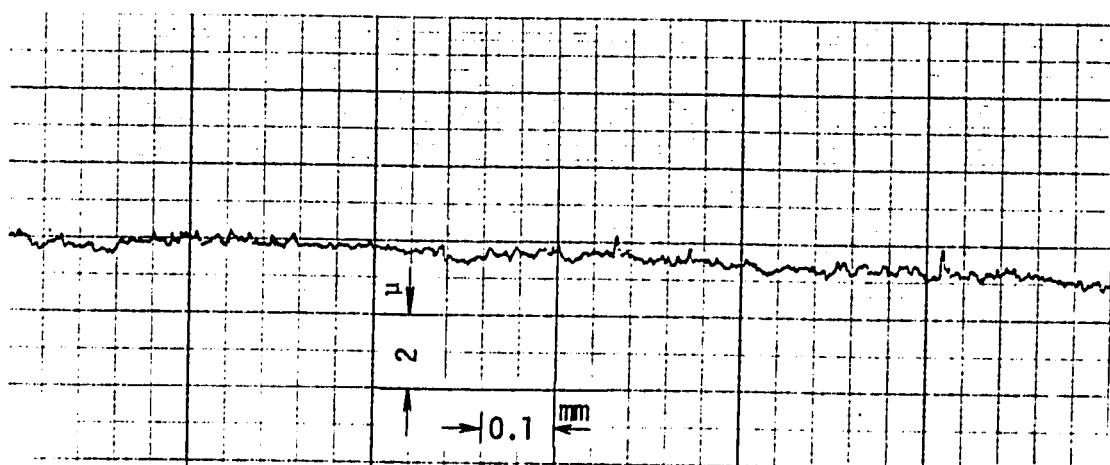
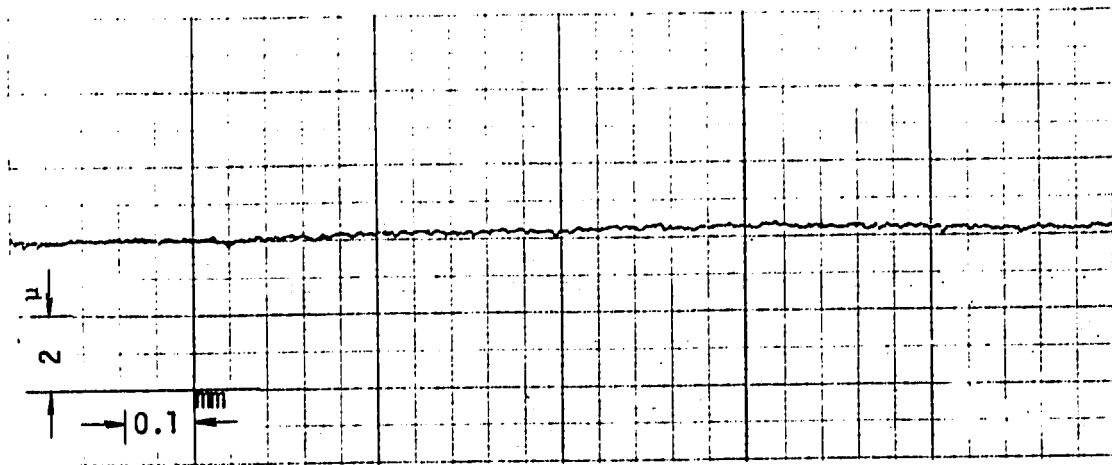


Fig. 18 Surface Roughness of SUS 316

as Received



after Exposure

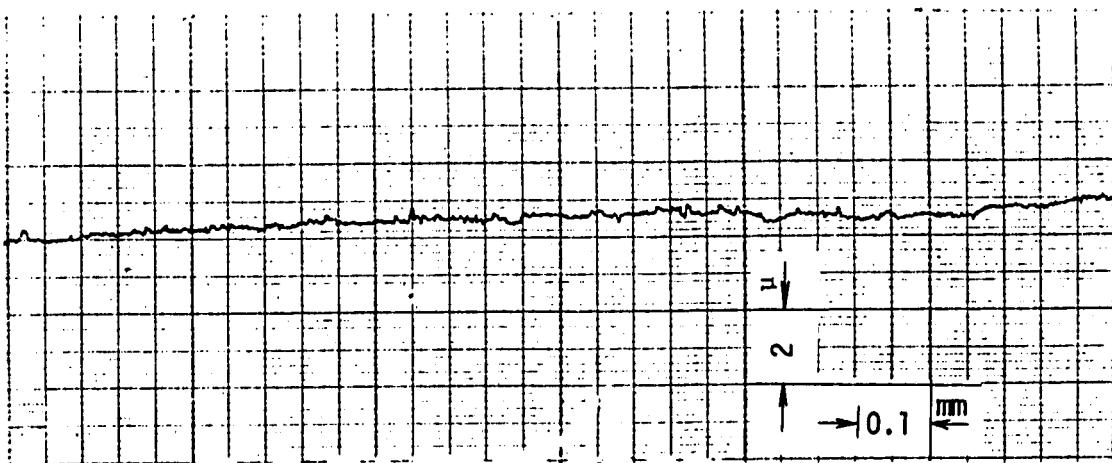
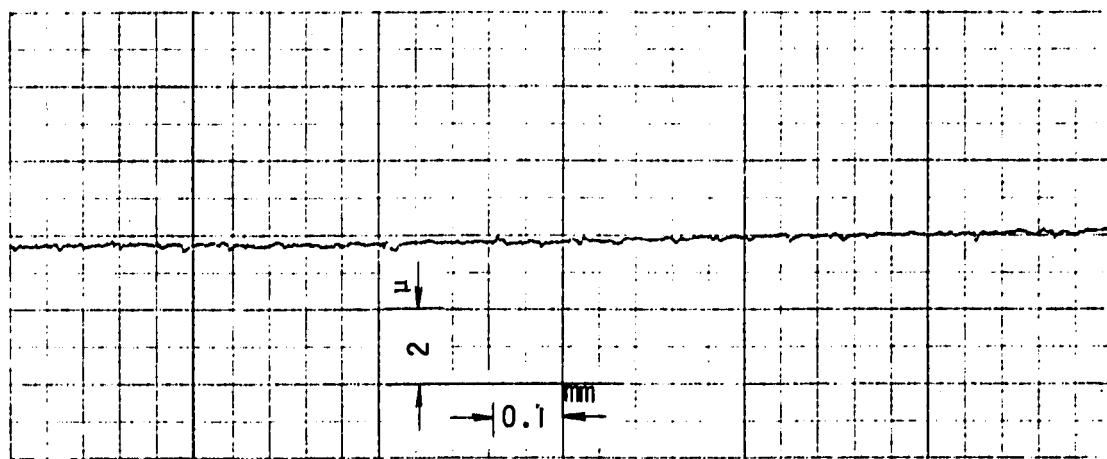


Fig. 19 Surface Roughness of 2 1/4Cr-1Mo Steel

as Received



after Exposure

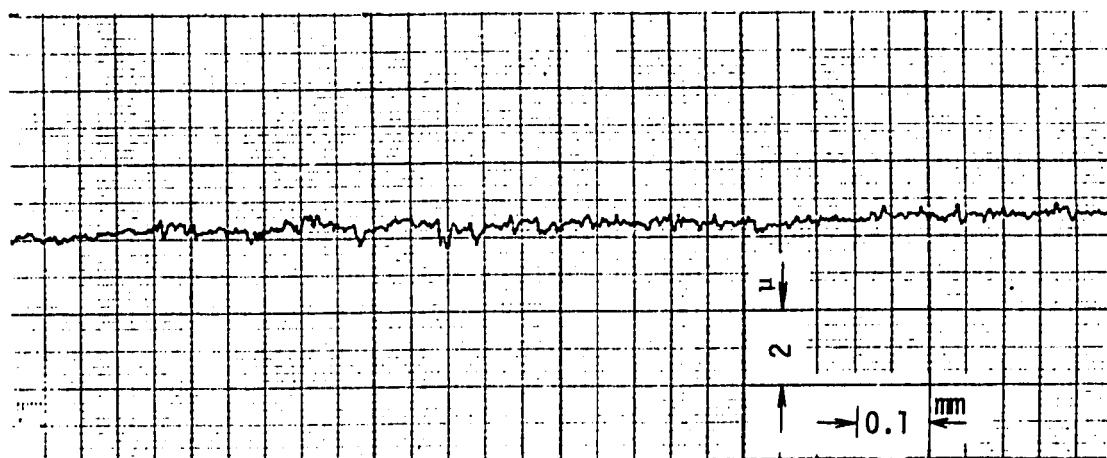
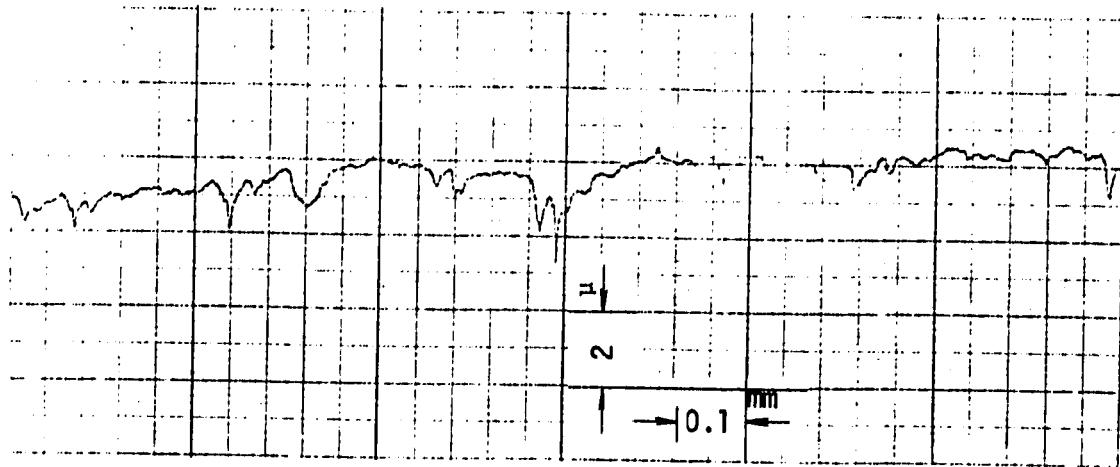


Fig. 20. Surface Roughness of Pure Iron

as Received



after Exposure

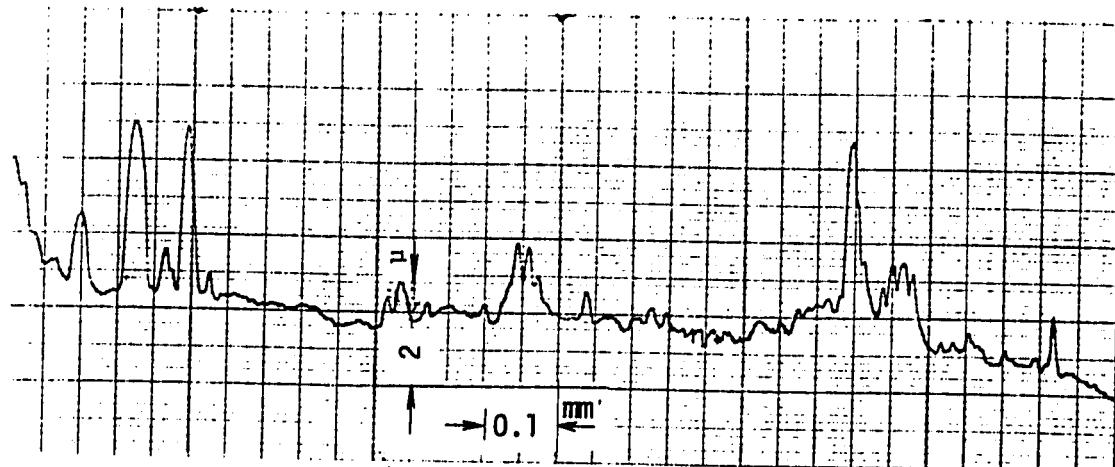
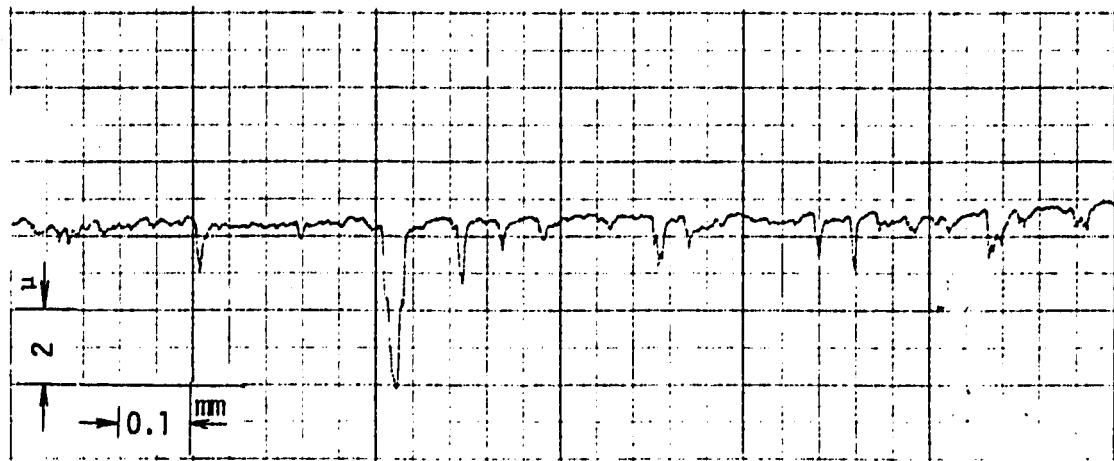


Fig. 21 Surface Roughness of LW-1N40

as Received



after Exposure

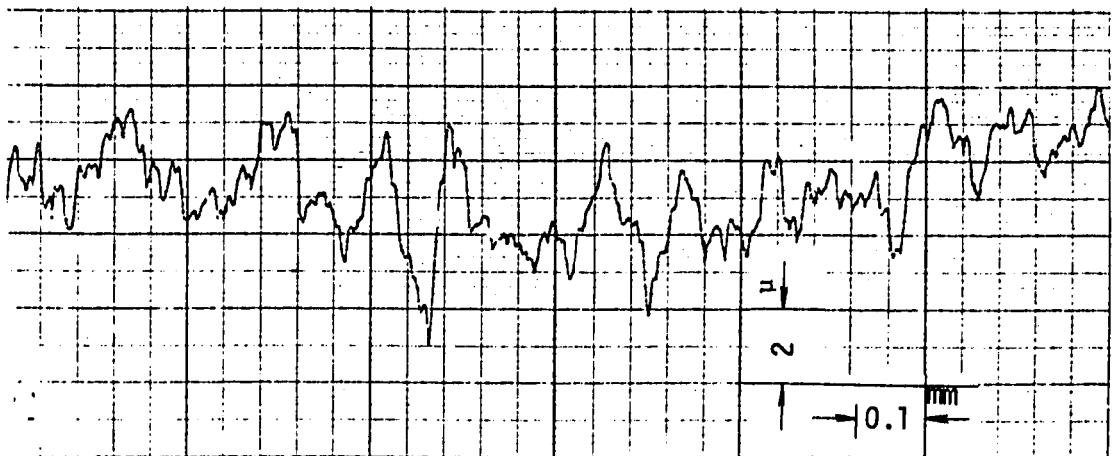


Fig. 22 Surface Roughness of LC-1C

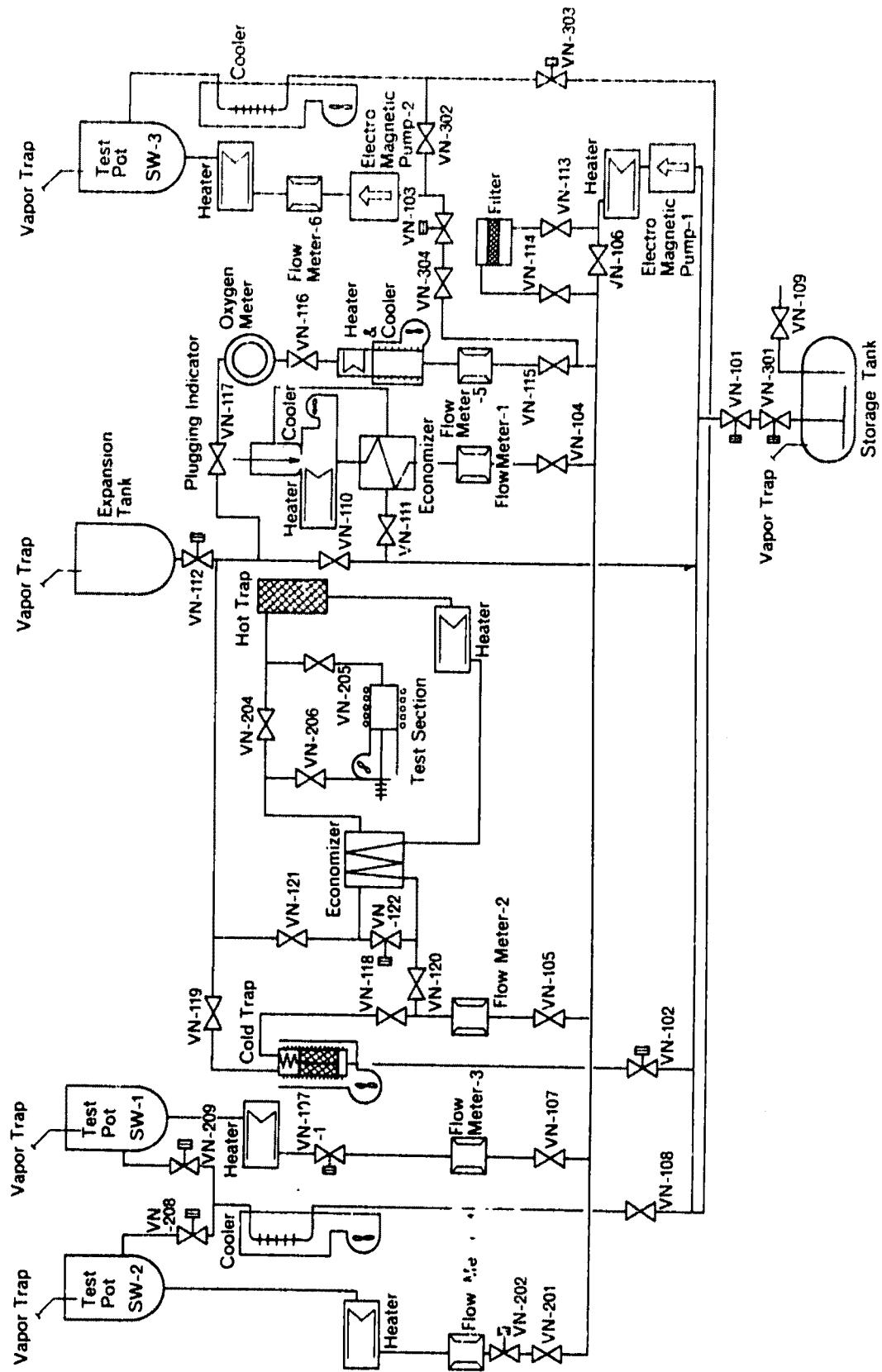


Fig. 2 Flow Sheet of Self-Welding and Wearing Test Loop

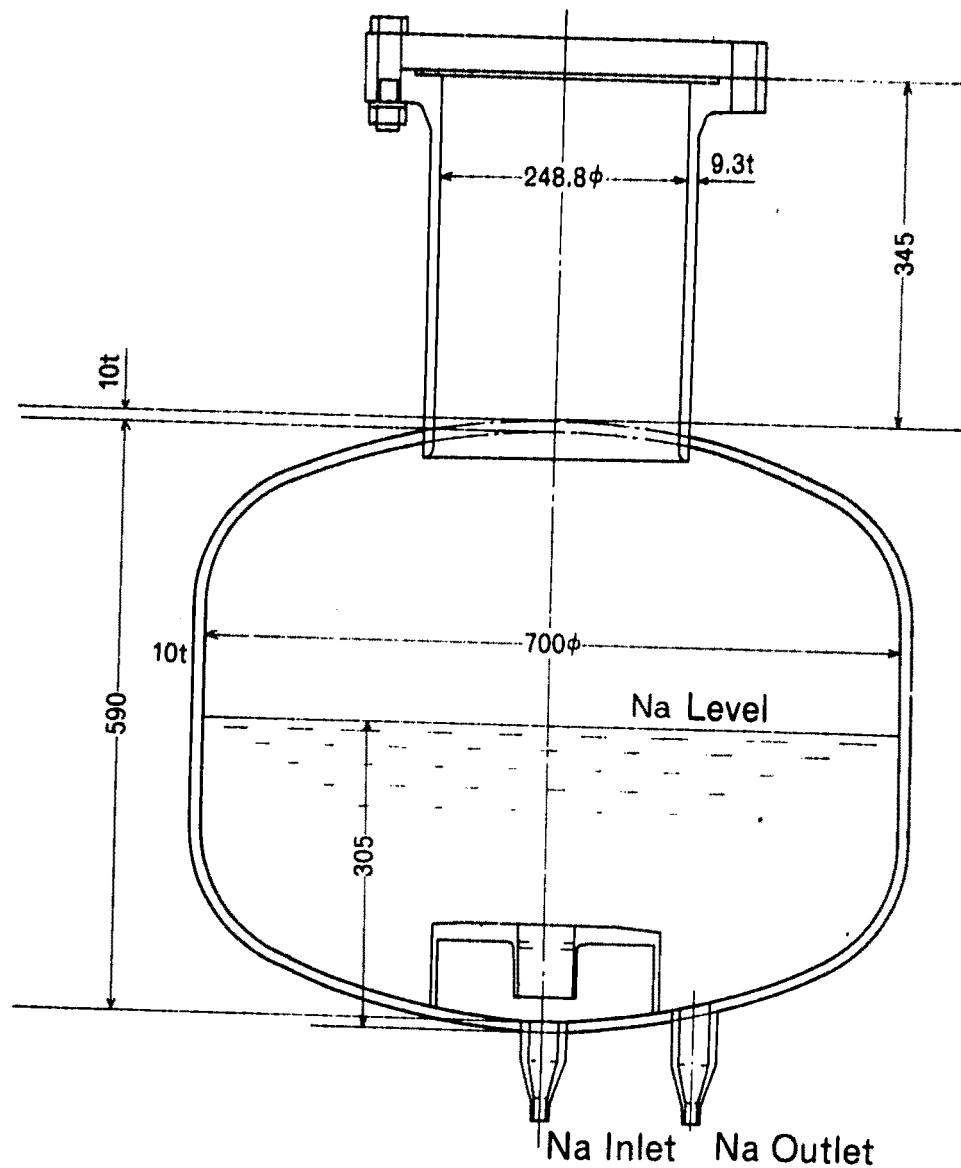


Fig. 3 Test Section (SW-3 Pot)

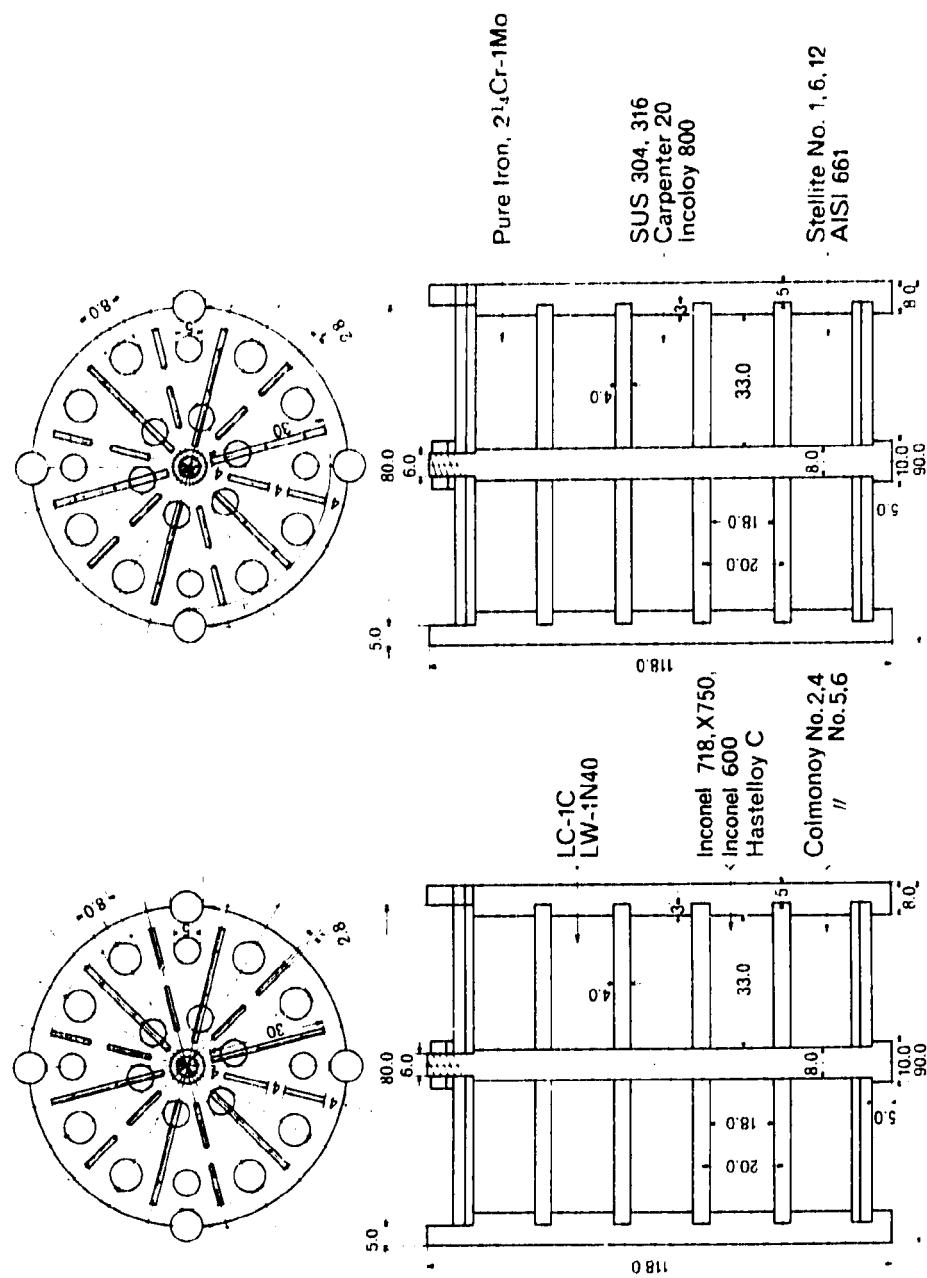


Fig. 4 Test Holder

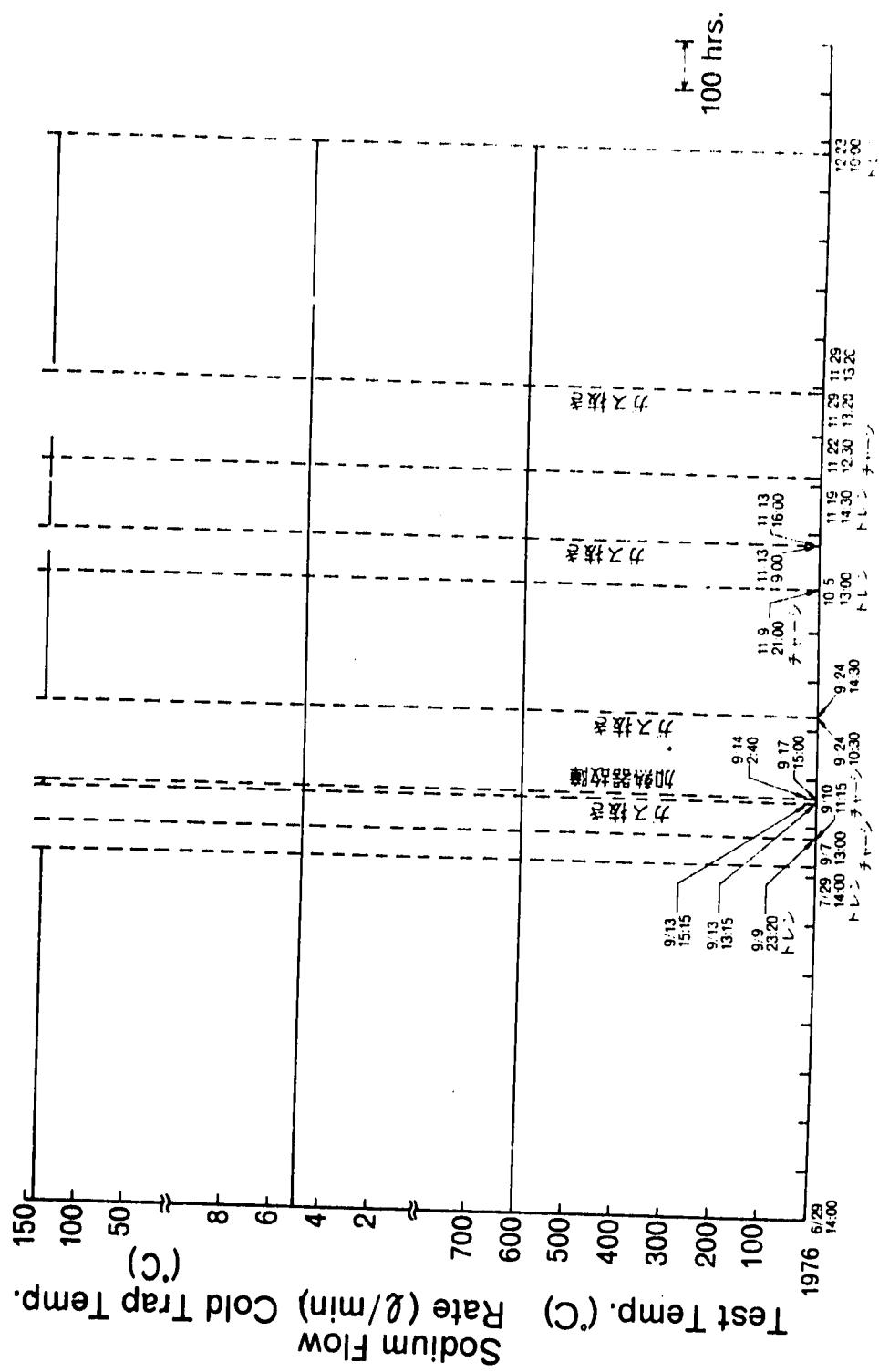


Fig. 5 Progress of Test Loop

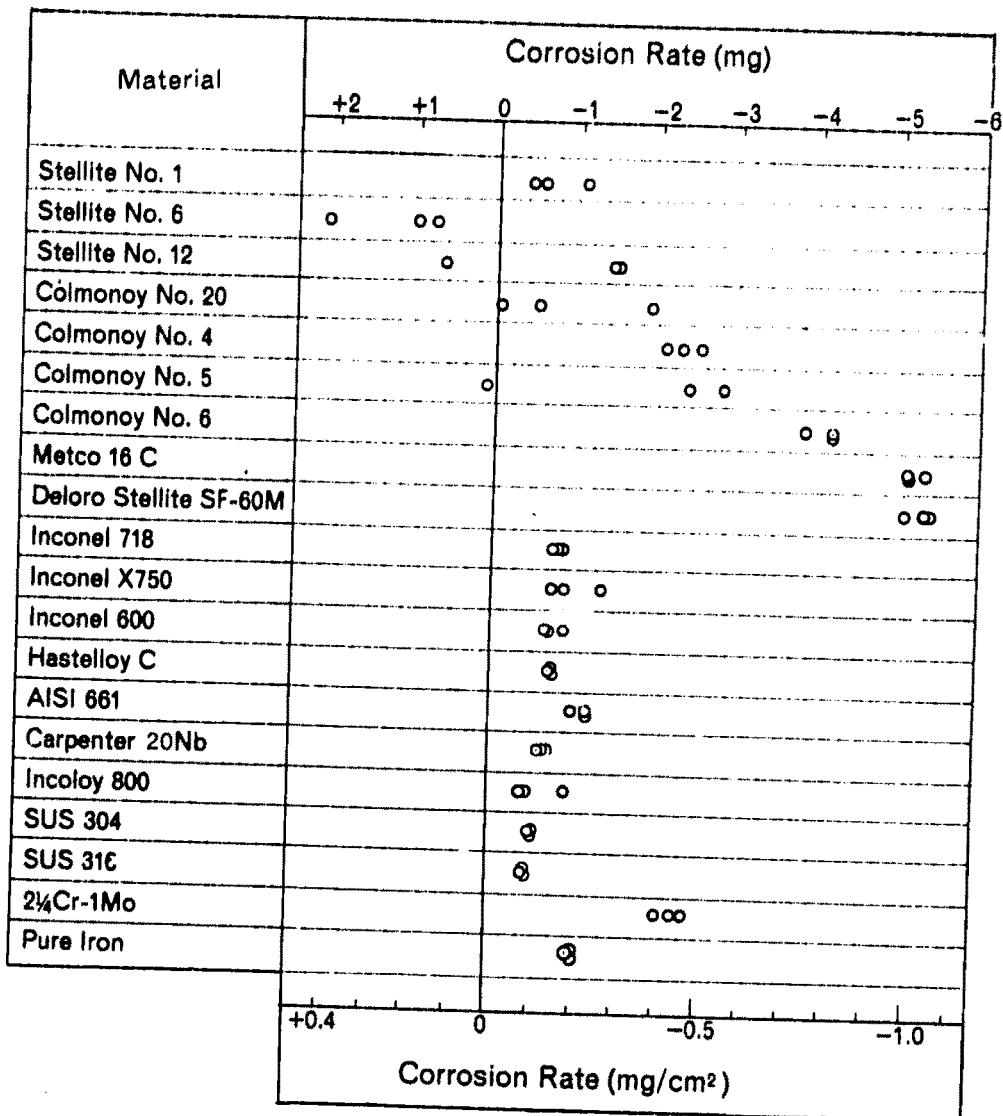


Fig. 6 Weight Change

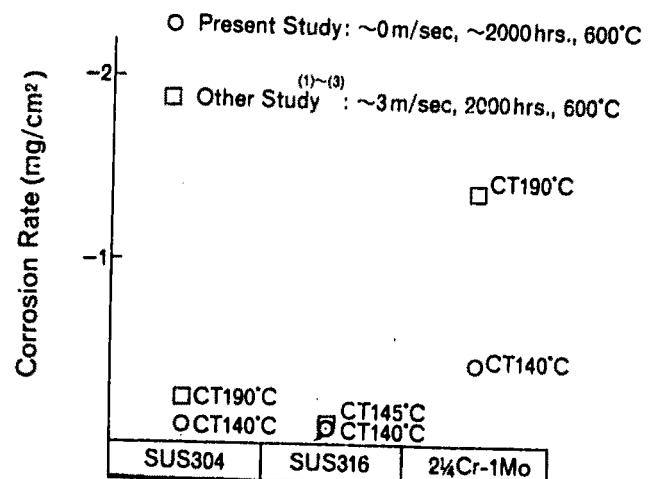


Fig. 7 Corrosion Rate

Material	Surface Roughness Hmax (μm)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Stellite No. 1	∞										
Stellite No. 6	∞										
Stellite No. 12	∞										
Colmonoy No. 20	○ ●										
Colmonoy No. 4	○	●									
Colmonoy No. 5	○	●									
Colmonoy No. 6	○		●								
Metco 16 C	○ ●										
Deloro Stellite SF-60M	∞										
Inconel 718	○										
Inconel X750	○										
Inconel 600	∞										
Hastelloy C	○ ●										
AISI 661	●										
Carpenter 20Nb	○ ●										
Incoloy 800	○ ●										
SUS 304	○										
SUS 316	○ ●										
2½Cr-1Mo	○										
Pure Iron	○										
LW-1N40	○	●									
LC-1C	○							●			

○ as Received
 ● after Exposure

Fig. 8 Change of Surface Roughness

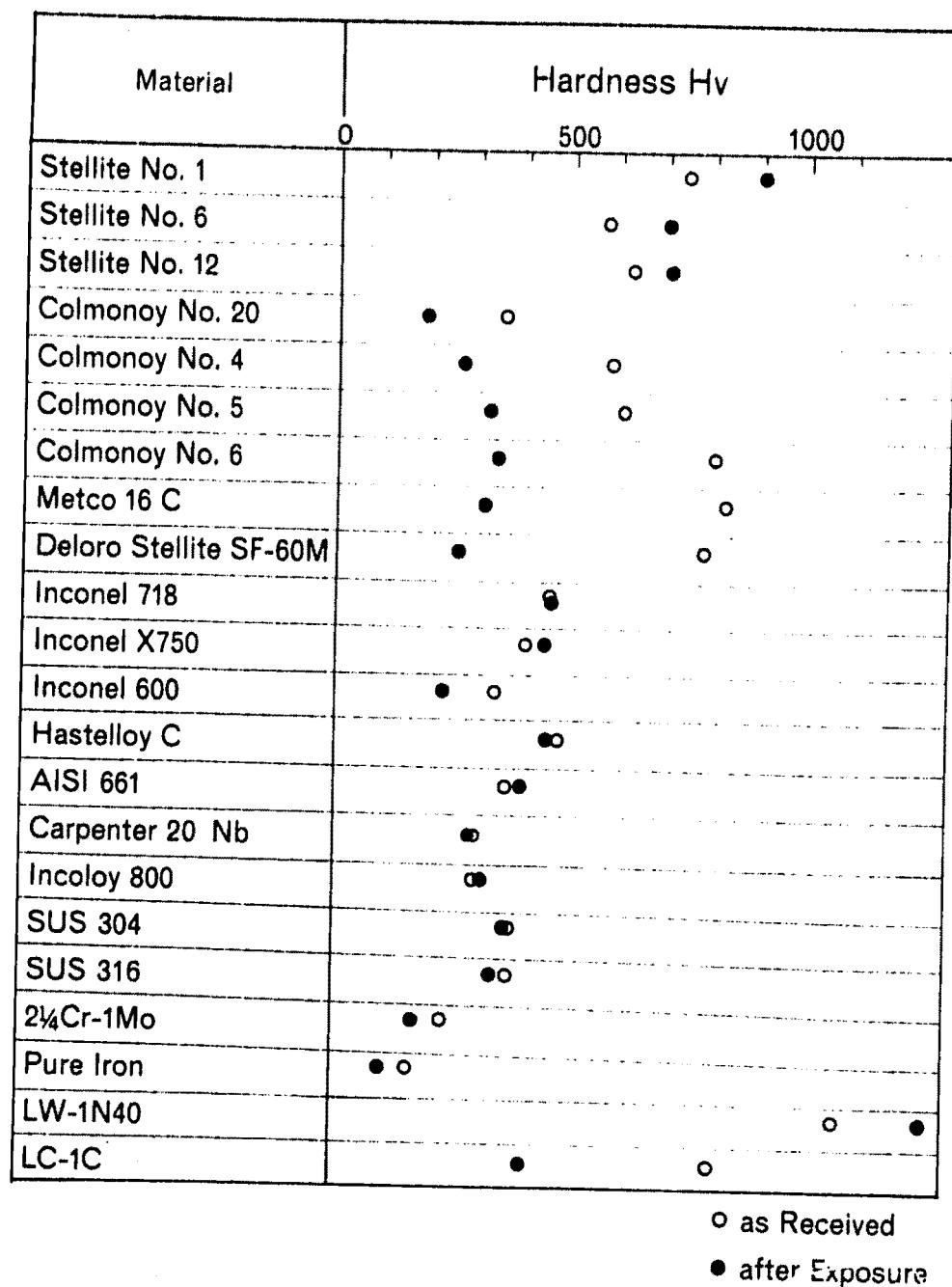


Fig. 9 Change of Hardness

Table 1 Chemical Composition (%)

Table 2 Mechanical and Physical Properties

Material	0.2% Yield Point, kg/mm ²	Tensile Strength, kg/mm ²	Elongation, %	Reduction of Area, %	Hardness	Coefficient of Expansion cm/cm/ ³ /°C($\times 10^{-4}$)	Melting Point °C	Specific Gravity
Stellite No. 1		62	11		H _{RC} 56	12.6	1270	8.45
Stellite No. 6	72	91	1		H _{RC} 46	13.4	1290	8.38
Stellite No. 12		84	11		H _{RC} 49		1300	8.56
Colmonoy No. 20		34~43					1120	8.56
Colmonoy No. 4		49~63			H _{RC} 35~40	15.1	1080	8.20
Colmonoy No. 5		40~57			H _{RC} 45~50	14.6	1050	8.14
Colmonoy No. 6		38~56			H _{RC} 56~61	14.0	1040	7.85
Metco 16 C		35~40			H _{RC} 58~62	14.8	1010	7.5
Deforo Stellite SF-60M					H _{RC} 59~62		964~1003	7.8
Inconel 718	152	191.8	27.6	45.2	H _B 401	12.8	1204~1343	8.19
Inconel X750	28	71	56		H _{RB} 81	16.2	1395~1425	8.3
Inconel 600	29	62	42		H _{RB} 82	18.1	1395	8.43
Hastelloy C	41	84	49		H _{RB} 91	13.0	1270~1310	8.94
AISI 661	42.5	83.3	39.2	44.7	H _B 217	16.9		8.20
Carpenter 20 Nb	42	66	30		H _{RB} 95	16.9	1450	8.02
Incoloy 800	31	55	40		H _{RB} 78		1357~1385	8.02
SUS 304	32	57	64	71	H _{RB} 76	17.3	1399~1454	8.03
SUS 316		60	62	73	H _B 156			
2½Cr-1Mo	45.1	59.4	30.4	76.4	H _{RB} 75	12.0		7.74
Pure Iron								
LW-1N40		70			H _V 1050	8.5		7.74
LC-1C		45.5			H _V 850			13.2

at Room Temperature

Table 3 Coating Method and Heat Treatment

Material	Coating Method and Heat Treatment
Stellite No. 1	Oxy-Acetylene Gas Weld
Stellite No. 6	Oxy-Acetylene Gas Weld
Stellite No. 12	Oxy-Acetylene Gas Weld
Colmonoy No. 20	Oxy-Acetylene Gas Weld
Colmonoy No. 4	Oxy-Acetylene Gas Weld
Colmonoy No. 5	Oxy-Acetylene Gas Weld
Colmonoy No. 6	Oxy-Acetylene Gas Weld
Metco 16 C	Oxy-Acetylene Gas Weld
Deloro Stellite SF-60M	Oxy-Acetylene Gas Weld
Inconel 718	Solution Treatment 954°C×1H, 0°C, Tempering 718°C×8H, 621°C×8H, AC
Inconel X750	Solution Treated
Inconel 600	Solution Treated
Hastelloy C	Solution Treated
AISI 661	Solution Treated (1150~1230°C)700~830°C Tempering
Carpenter 20Nb	Solution Treated (1070°C)
Incloy 800	Solution Treated
SUS 304	Solution Treated (1100°C×30min → W.Q)
SUS 316	Solution Treated (1100°C×30min → W.Q)
2½Cr-1Mo	Full Annealing(920°C×30min-(100°C/hr)→600°C A.C)
Pure Iron	as Roll
LW-1N40*	D-Gun Plating
LC-1C*	D-Gun Plating

* Substratum : SUS 316

Table 4 Test Condition

Test Temperature (°C)	600
Cold Trap Temperature (°C)	140
Sodium Flow Rate (l/min)	5
Sodium Velocity (m/sec)	~0
Test Duration (hrs.)	2174

Table 5 Weight Change

Material	Weight (g)		Material	Weight (g)	
	as Received	Corrosion Rate		as Received	Corrosion Rate
Stellite No. 1	3.40031	-0.00041	Hastelloy C	3.43232	-0.00076
	3.46176	-0.00057		3.42761	-0.00076
	3.52774	-0.00108		3.42644	-0.00072
Stellite No. 6	3.30160	0.00100	AISI 661	3.22272	-0.00119
	3.30907	0.00211		3.22271	-0.00102
	3.29817	0.00077		3.23538	-0.00119
Stellite No. 12	3.43348	0.00064	Carpenter 20 Nb	3.12819	-0.00072
	3.45227	-0.00142		3.12552	-0.00068
	3.41245	-0.00148		3.12544	-0.00065
Colmonoy No. 20	3.23244	-0.00052	Incoloy 800	3.08360	-0.00040
	3.35897	-0.00192		3.08011	-0.00049
	3.26127	-0.00006		3.08586	-0.00097
Colmonoy No. 4	3.17888	-0.00254	SUS 304	3.14002	-0.00052
	3.19570	-0.00231		3.14199	-0.00055
	3.19567	-0.00211		3.10562	-0.00054
Colmonoy No. 5	3.10414	0.00011	SUS 316	3.02531	-0.00046
	3.15890	-0.00283		3.02296	-0.00048
	3.38063	-0.00240		2.98093	-0.00046
Colmonoy No. 6	3.21965	-0.00418	2½Cr-1Mo	3.10792	-0.00243
	3.17584	-0.00387		3.11721	-0.00211
	3.22752	-0.00417		3.09300	-0.00230
Metco 16 C	3.23766	-0.00515	Pure Iron	3.06384	-0.00105
	3.26188	-0.00534		3.05508	-0.00102
	3.22182	-0.00515		3.06263	-0.00104
Deloro Stellite SF-60M	3.3.19981	-0.00529	LW-1N40	3.69969	-0.01793
	3.23854	-0.00532		3.70598	0.00036
	3.21691	-0.00511		3.68460	-0.00185
Inconel 718	3.21872	-0.00096	LC-1C	3.13345	
	3.19094	-0.00088		3.19959	
	3.19068	-0.00090		3.16965	
Inconel X750	3.23055	-0.00077			
	3.22577	-0.00138			
	3.21766	-0.00091			
Inconel 600	3.29258	-0.00091			
	3.28273	-0.00072			
	3.29094	-0.00070			

Material	Corrosion Rate (mg/cm²)		Test Condition of Other Study: Test Loop, Test Temperature, Test Duration, Cold Trap Temperature, Flow Velocity
	Present Study	Other Study*	
SUS 304	-0.10 -0.25	(by A. Maruyama, et al.) ⁽¹⁾	M-1, 600°C 2000 hrs., 190°C, 3 m/sec.
SUS 316	-0.09 -0.11	(by N. Aoki, et al.) ⁽²⁾	M-12, 600°C, 1000 hrs., 145°C, 2.6 m/sec.
2½Cr-1Mo	-0.44 -1.38	(by A. Maruyama, et al.) ⁽³⁾	M-3, 600°C, 2500 hrs., 190°C, 3 m/sec.

* Corrosion rate compensated with a test duration of 2000 hrs.

Table 7 Surface Roughness

Hmax

Material	as Received (μm)					after Exposure (μm)						
	1	2	3	4	5	Average	1	2	3	4	Average	
Stellite No. 1	0.16	0.20	0.20	0.16	0.20	0.18	0.40	0.40	0.40	0.40	0.36	0.39
Stellite No. 6	0.20	0.16	0.20	0.24	0.20	0.20	0.52	0.36	0.40	0.36	0.40	0.41
Stellite No. 12	0.24	0.20	0.20	0.16	0.20	0.20	0.24	0.32	0.32	0.28	0.28	0.29
Colmonoy No. 20	0.28	0.32	0.32	0.28	0.32	0.30	0.68	0.64	0.64	0.72	0.76	0.68
Colmonoy No. 4	0.32	0.36	0.28	0.36	0.32	0.33	1.84	1.80	1.80	1.96	1.80	1.85
Colmonoy No. 5	0.32	0.32	0.32	0.36	0.36	0.34	2.28	2.24	2.28	2.20	2.24	2.25
Colmonoy No. 6	0.40	0.36	0.40	0.44	0.36	0.39	2.92	2.80	2.88	2.84	2.96	2.85
Metco 16 C	0.44	0.40	0.40	0.40	0.44	0.42	0.60	0.64	0.72	0.64	0.88	0.70
Deloro Stellite SF-60M	0.40	0.40	0.32	0.36	0.40	0.38	0.56	0.60	0.52	0.56	0.56	0.56
Inconel 718	0.20	0.20	0.24	0.24	0.24	0.22	0.20	0.24	0.32	0.40	0.36	0.32
Inconel X750	0.40	0.36	0.40	0.32	0.36	0.37	0.32	0.40	0.32	0.40	0.36	0.37
Inconel 600	0.32	0.36	0.32	0.32	0.36	0.34	0.24	0.20	0.24	0.20	0.16	0.21
Hastelloy C	0.24	0.24	0.28	0.28	0.28	0.26	0.60	0.60	0.64	0.60	0.60	0.61
AISI 661	0.20	0.16	0.24	0.24	0.24	0.22	0.16	0.20	0.20	0.24	0.20	0.20
Carpenter 20 Nb	0.24	0.24	0.28	0.28	0.28	0.26	0.64	0.48	0.48	0.52	0.48	0.52
Incoloy 800	0.32	0.28	0.24	0.28	0.24	0.27	0.56	0.60	0.52	0.56	0.56	0.56
SUS 304	0.28	0.32	0.32	0.28	0.28	0.30	0.40	0.44	0.40	0.40	0.48	0.42
SUS 316	0.40	0.32	0.32	0.40	0.44	0.38	0.60	0.68	0.72	0.60	0.72	0.66
2½Cr-1Mo	0.32	0.40	0.40	0.36	0.40	0.38	0.44	0.40	0.36	0.40	0.36	0.39
Pure Iron	0.24	0.24	0.28	0.28	0.32	0.27	0.40	0.40	0.40	0.40	0.36	0.39
LW-1N40	0.84	0.80	0.80	0.80	0.80	0.81	2.32	2.08	2.00	2.00	2.04	2.09
LC-1C	0.72	0.68	0.60	0.60	0.68	0.66	8.80	8.60	9.00	9.00	8.80	8.84

Table 8 Hardness

Micro Vicker's Hardness 100g

Material	as Received (μm)					after Exposure (μm)					
	1	2	3	4	5	Average	1	2	3	4	Average
Stellite No. 1	803	782	673	772	673	741	792	824	1018	1033	824
Stellite No. 6	488	488	542	627	715	572	734	707	673	681	698
Stellite No. 12	681	592	572	642	634	624	649	715	673	743	752
Colmonoy No. 20	309	366	357	397	333	352	176	193	187	170	199
Colmonoy No. 4	715	673	519	409	599	583	264	264	270	270	254
Colmonoy No. 5	579	542	634	634	657	609	312	304	319	336	336
Colmonoy No. 6	772	681	1018	346	606	805	325	397	283	302	394
Metco 16 C	824	752	803	1018	752	830	348	339	306	270	302
Deloro Stellite SF-60M	592	974	858	772	724	784	319	283	258	170	258
Inconel 718	498	478	413	421	464	455	488	429	464	433	464
Inconel X750	390	429	370	450	397	407	459	446	440	455	425
Inconel 600	319	345	401	336	309	342	233	221	249	221	230
Hastelloy C	508	483	468	478	446	477	468	459	433	413	488
AISI 661	380	376	376	339	366	367	417	417	413	397	345
Carpenter 20 Nb	302	294	276	270	297	288	266	312	281	304	260
Incoloy 800	292	283	345	287	276	297	297	336	354	285	302
SUS 304	351	357	383	366	409	373	348	383	373	357	357
SUS 316	397	373	383	357	348	372	345	327	319	380	325
2½Cr-1Mo*	258	213	247	251	268	233	176	180	182	179	166
	268	216	201	191	218		165	166	172	156	164
Pure Iron	164	179	147	159	157	161	96	100	102	109	103
LW-1N40	1064	946	1150	1018	1150	1066	1363	1070	1390	1390	1037
LC-1C	459	1226	894	870	572	804	390	390	473	387	397

* Hardness was determined at both surfaces of test piece.