

## 高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(Ⅳ)

ステライトNo.1, コルモノイNo.6, インコネル718,  
ハステロイおよび $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の摩擦・摩耗

1975年7月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

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)

1975年7月

## 高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(IV)

ステライトNo.1, コルモノイNo.6, インコネル718, ハステロイC  
および2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo鋼の摩擦・摩耗

報告者	加納茂機*
	溝淵庄太郎*
	滑川優*
	中山松一*
	厚母栄夫*

期間 1974年11月～1974年12月25日

目的 原子炉機器摺動部用耐摩耗材の選定

要旨

ナトリウム冷却高速増殖炉機器摺動部に使用する耐摩擦・耐摩耗材を開発選定するため一連のナトリウム中摩耗試験を行なっている。本試験はステライトNo.1, コルモノイNo.6, インコネル718, ハステロイCおよび2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo鋼の各種組合せについて行なったものでその結果次のようなことがわかった。

- (1) コルモノイNo.6だけが試験後かたさが低下し、また温度が高くなるほど静摩擦係数( $\mu_s$ )が低くなった。
- (2) ステライトNo.1同志の動摩擦係数( $\mu_k$ )は約0.5と比較的高かったが相手材がコルモノイNo.6になると0.12に低下した。またコルモノイNo.6同志の $\mu_k$ は0.2と低かった。いずれも殆んど摩耗しなかった。
- (3) インコネル718同志の $\mu_k$ は0.3と低かったが300kg以上の荷重で摩耗が始まった。
- (4) ハステロイC同志の $\mu_k$ は0.23と低かったが低荷重域より摩耗がはじまった。
- (5) 2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo鋼同志は $\mu_s$ および $\mu_k$ とも0.5以上と高くまた摺動面が著しく塑性変形し試験した材料のうち最も大きい摩耗を示した。

---

\* 大洗工学センターナトリウム技術部ナトリウム技術開発室

## 目 次

1. まえがき	1
2. 試験方法	2
2.1 試験装置	2
2.2 試験方法	2
2.3 解析方法	2
2.4 試験片の組合せ, 化学成分, 機械的および物理的性質, 内盛方法および組織	4
3. 試験結果および考察	6
3.1 摩擦係数について	6
3.1.1 静摩擦係数 $\mu_s$ について	6
3.1.2 動摩擦係数 $\mu_k$ について	8
3.2 摩耗量について	9
3.3 金相試験結果	11
3.3.1 ステライトNo.1について	11
3.3.2 コルモノイNo.6について	13
3.3.3 インコネル718について	13
3.3.4 ハステロイドCについて	14
3.3.5 2 1/4Cr-1Mo鋼について	15
3.3.6 かたさ測定	16
3.3.7 表面あらさ測定	16
4. 結 論	18
5. あとがき	19
6. 文 献	20

July, 1975

## Wear Tests of Materials for FBR in Sodium Environment (IV)

Friction and Wear of Stellite No.1, Colmonoy No.6, Inconel 718, Hastelloy C and 2 1/4Cr-1Mo Steel

Shigeaki KANOH\*,  
 Syotaro MIZORUCHI\*,  
 Masaru NANEKAWA\*,  
 Koichi NAKAYAMA\* and  
 Hideo ATSUMO\*

## Abstract

A series of wear tests in sodium have been carrying out to develop and screen friction and wear resistant materials for sliding components of the sodium cooled reactor.

The present study was carried out about various combinations of Stellite No.1, Colmonoy No.6, Inconel 718, Hastelloy C and 2 1/4Cr-1Mo Steel.

The tests yielded the following results.

- (1) Colmonoy No.6 was the only material that decreased in hardness after tested. The higher the temperature was, the lower became the static friction coefficient ( $\mu_s$ ) of Colmonoy No.6 alone.
- (2) The kinetic friction coefficient ( $\mu_k$ ) of Stellite No.1 vs. Stellite No.1 was comparatively as high as 0.5, but it became lower (0.12) in case the mating material was Colmonoy No.6. The  $\mu_k$ -value of Colmonoy No.6 vs. Colmonoy No.6 was as low as 0.2. These material combinations scarcely wore.
- (3) The  $\mu_k$ -value of Inconel 718 vs. Inconel 718 was as low as 0.3, but this combination wore under load more than 300 kg.
- (4) The  $\mu_k$ -value of Hastelloy C vs. Hastelloy C was as low as 0.23, but this combination started to wear under low load.
- (5) Both the values of  $\mu_s$  and  $\mu_k$  of 2 1/4Cr-1Mo steel vs. 2 1/4Cr-1Mo steel were higher than 0.5, and the plastic deformation was raised at the sliding surface. This combination showed the most wear loss of all material combinations tested.

\* Sodium Technology Section, Sodium Technology Division, Oarai Engineering Center.

Table List

Table 1	Condition of Friction Test .....	3
Table 2	Condition of Wear Test .....	3
Table 3	Load, Contact Pressure and $\Sigma P_1$ at Each Step .....	3
Table 4	Material Combination .....	4
Table 5	Chemical Compositions .....	5
Table 6	Mechanical and Physical Properties .....	5
Table 7	Coating Method .....	5
Table 8	Wear Rate .....	12
Table 9	Wear Rate (Borrowed from the Preceding Report(3)) .....	12
Table 10	Microhardness of Materials Described in the Preceding Report(2),(3) .....	17
Table 11	Microhardness of Materials Described in the Present Report ..	17
Table 12	Roughness .....	17

Figure List

Fig. 1	Self-Welding and Wearing Test Loop Flow Sheet .....	21
Fig. 2	Test Equipment .....	22
Fig. 3	Size of Test Piece .....	23
Fig. 4	Load Equipment .....	24
Fig. 5	$\mu_s$ vs. Load at 280°C .....	25
Fig. 6	$\mu_s$ vs. Load at 450°C .....	26
Fig. 7	$\mu_s$ and $\mu_k$ under 1 kg/mm <sup>2</sup> .....	27
Fig. 8	$\mu_s$ vs. Load (Borrowed from the Preceding Report(3)) .....	28
Fig. 9	$\mu_s$ vs. Load (a Pair Coupled with SUS 304) (Borrowed from the Preceding Report(3)) .....	29
Fig. 10	$\mu_k$ vs. Load .....	30
Fig. 11	$\mu_k$ vs. Load (Borrowed from the Preceding Report(3)) .....	31
Fig. 12	$\mu_k$ vs. Load (a Pair Coupled with SUS 304) (Borrowed from the Preceding Report(3)) .....	32
Fig. 13	$W_S$ vs. $W_D$ Relating to Stator .....	33
Fig. 14	$\Sigma W_D$ vs. Load Relating to Materials Described in the Present Report .....	34
Fig. 15	$\Sigma W_D$ vs. Load Relating to Materials Described in the Preceding Report(2),(3) .....	36
Fig. 16	Comparison of $W_D$ Determined by Different Methods .....	37

Photo List

Photo 1	Cross-Sectional Micrographs of Test Pieces as Received .....	38
Photo 2	Cross-Sectional Micrographs of Stellite No.1 .....	39
Photo 3	Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.6 .....	40
Photo 4	Cross-Sectional Micrographs of Inconel 718 .....	40
Photo 5	Cross-Sectional Micrographs of Hastelloy C .....	41
Photo 6	Electron Probe Microanalysis of Hastelloy C .....	42
Photo 7	Scanning Electron Probe Microscopy of Hastelloy C .....	43
Photo 8	Cross-Sectional Micrographs of 2 1/4Cr-1Mo Steel .....	44
Photo 9	Cross-Sectional Micrographs of SUS 304 .....	45
Photo 10	Scanning Electron Probe Microscopy of 2 1/4Cr-1Mo Steel .....	46
Photo 11	Scanning Electron Probe Microscopy of SUS 304 .....	47
Photo 12	Electron Probe Microanalysis of 2 1/4Cr-1Mo Steel .....	49
Photo 13	Electron Probe Microanalysis of SUS 304 .....	51

## 1. ま え が き

47年度よりナトリウム機器摺動部用耐摩耗材および耐摩擦材の選定試験を同一条件で行なっており、49年度前半までにナトリウム中試験した各種材料組合せについて摩擦係数、<sup>(1), (2), (3)</sup> 摩耗量および摺動部近傍の金相状況を明らかにした。

引続き49年度後半はインコネル718、ハステロイC、ステライトNa 1、コルモノイNa 6および2%Cr-1Mo鋼の各組合せについてナトリウム中試験し、摩擦係数、および摩耗量の算出および摺動部の金相試験を行なった。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験装置

Fig. 1 に試験ループのフロ-シートを示す。前回の試験に使用したフロ-シートと異なり新たに自己潤滑試験部 (SW-2)、ホットトラップ、酸素計ラインおよび試料挿入部が取付けられている。コールドトラップにより精製されたナトリウムが試験ポット (SW-1) に供給 (2~4 L/min) される。試験ポットには 3 基の摩擦試験部 (Fig. 2 参照) が付設されており、各々 Fig. 3 に示す 1 対の試験片取付ける。その他については前報と同じであるため省略する。

### 2.2 試験方法

摩擦試験および摩擦試験とともに前回と全く同じ方法である。(前報を参照されたい。)  
 摩擦試験および摩擦試験の条件を各々 Table 1 および 2 に示す。ナトリウム温度 450°C (一部 280°C)、コールドトラップ温度 200°C、試験片の摺動面積 2.2 cm<sup>2</sup> および摺動速度 3.6 cm/sec 一定とした。また荷重増法を Table 3 に示す。摩擦試験は各荷重で 15 分間ずつ試験し最終荷重 390 kg、総試験時間は 25 時間として総摺動距離は 324 m であった。

### 2.3 解析方法

解析項目は次に示す。

- (1) 摩擦係数測定
- (2) 摩擦量測定
- (3) 摺動速度測定
- (4) 表面あらし測定
- (5) かたさ測定
- (6) 断面の組織観察 (光学顕微鏡)
- (7) XMA による組成変化
- (8) SEM による観察

これらすべての解析方法は前報に示したものと同一であるが摩擦量測定のうち摩擦深さについては Fig. 4 に示すように負荷装置のアー-ム先端にとりつけた差動トランスの読みよりロータとステータの念計の摩擦深さも求めた。差動トランスの変位はアー-ム支点同側のアー-ム長さ比により実際の摩擦深さの 5 倍となっている。また差動トランスの出力は 10 mV/10 mm であった。

Table 1 Condition of Friction Test

Na Temperature (°C)	280 and/or 450
Cold Trap Temperature (°C)	200
Apparent Contact Area of Test Piece (cm <sup>2</sup> )	2.2
Load	Incremental Load
Quantity to be Determined	Initial Torque

Table 2 Condition of Wear Test

Na Temperature (°C)	450
Cold Trap Temperature (°C)	200
Apparent Contact Area of Test Piece (cm <sup>2</sup> )	2.2
Sliding Velocity (cm/sec)	3.6
Load	Incremental Load
Quantity to be Determined	Sliding Torque Wear Rate

Table 3 Load, Contact Pressure and  $\Sigma P_i$  at Each Step

Step	Contact Pressure	
	Load (kg)	$\Sigma P_i$ (kg)
1	25	25
2	50	75
3	75	150
4	120	270
5	165	435
6	210	645
7	255	900
8	300	1200
9	345	1545
10	390	1935

Tested for 15 Minutes at Each Step.

2.4 試験片の組合せ、化学成分、機械的および物理的性質、肉盛方法および組織

試験片の組合せをTable 4に、化学成分をTable 5に、そして機械的および物理的性質をTable 6に示す。

Table 7には材料の肉盛方法を示す。ステライトNo.1とコルモノイNo.6以外の材料はすべて素材の機械加工により製作した一体ものである。ハステロイCは溶体化処理したままであり、インコネル718は954°C×1hr.油冷による溶体化処理後機械加工し、その後折出硬化処理(719°C×8hrs, 冷却速度56°C/hr.および621°C×8hrs.空冷)により金属間化合物Ni<sub>3</sub>(Ti, Al, Nb)を析出させた。

各試験片の試験前の光学顕微鏡組織をPhoto.1に示す。ステライトNo.1およびコルモノイNo.6にはカーバイドが析出している。インコネル718には縦延方向に層状にNi<sub>3</sub>(Ti, Al, Nb)が析出している。ハステロイCにみられる粒状物は初析カーバイドM<sub>6</sub>CでMは主にWおよびMoから成り特にMo richである。また双晶が見られるが、これはfccの合金特に加工材では熱処理後よく見られるものである。

Table 4 Material Combination

Stator	Rotor
Stellite No.1	Stellite No.1
Stellite No.1	CoImony No.6
CoImony No.6	CoImony No.6
Inconel 718	Inconel 718
Hastelloy C	Hastelloy C
2 1/4 Cr - 1 Mo Steel	2 1/4 Cr - 1 Mo Steel
2 1/4 Cr - 1 Mo Steel	SUS 304
2 1/4 Cr - 1 Mo Steel	Hastelloy C

Table 4 Material Combination

Stator	Rotor
Stellite No.1	Stellite No.1
Stellite No.1	CoImony No.6
CoImony No.6	CoImony No.6
Inconel 718	Inconel 718
Hastelloy C	Hastelloy C
2 1/4 Cr - 1 Mo Steel	2 1/4 Cr - 1 Mo Steel
2 1/4 Cr - 1 Mo Steel	SUS 304
2 1/4 Cr - 1 Mo Steel	Hastelloy C

Table 5 Chemical Compositions (w/o)

Material	C	Si	Mn	Co	Cr	Fe	Ni	W	Cu	Ti	Al	Mo	V	Nb	Ta	P	S	B
Stellite No.1	2.58	1.16		Bal	31.33	0.28		12.49										
CoImony No.6	0.75	4.25	73.75		13.5	4.75												3.00
Inconel 718	0.06	0.09	52.77	0.03	18.74	Bal	0.14		0.03	1.00	0.65	3.05		4.84	0.010	0.003	0.003	
Hastelloy C	0.07	0.34	Bal		Tr.	14.65	5.92	0.54	3.31			15.46	0.03		0.008	<0.005		
2 1/4Cr-1Mo Steel	0.15	0.34			2.40	Bal	0.50					1.02						0.014
SUS 304	0.06	0.59	8.63		18.64	Bal	1.54											0.008

Table 6 Mechanical and Physical Properties

Material	Yield Point, kg/mm <sup>2</sup>	Tensile Strength, kg/mm <sup>2</sup>	Elongation, %	Reduction of Area, %	Hardness, HRC	Coefficient of Expansion, cm/cm/°C(×10 <sup>-6</sup> )	at Room Temperature	
							Melting Point, °C	Specific Gravity
SUS 304	32	57	64	71	HRC 76	17.3	1359-1454	8.03
Stellite No.6	72	91	1		HRC 46	13.4	1290	8.38
Stellite No.1		62	<1		HRC 56	12.6	1270	8.45
CoImony No.6		38-56			HRC 56-61	14.0	1040	7.85
CoImony No.5		40-57			HRC 45-50	14.5	1050	8.14
DeIoro Stellite SF-60H					HRC 59-62		954-1003	7.8
Metco 16C		35-40			HRC 58-62		1070	7.5
Inconel X750	69.4	114.8	23.6		HRC 40	13.7	1330-1430	8.3
Inconel 718	111.6	137.5	21.3	32.8	HRC 43	12.8	1204-1343	8.19
Hastelloy C	41	84	49		HRC 91	13.0	1270-1310	8.94
2 1/4Cr-1Mo Steel	45.1	59.4	30.4	76.4	HRC 75	12.0		7.74
LC-1C		45.5			Hv 680			
LW-1M40		70			Hv 1050			13.2
LW-5		28			Hv 1075			10.1

Table 7 Coating Method (Substratum, SUS 304)

Coating Material	Coating Method	Coating Thickness (mm)
Stellite No.1	Oxy-Acetylene Gas Weld	2
CoImony No.6	Oxy-Acetylene Gas Weld	2



### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 摩擦係数について

##### 3.1.1 静摩擦係数 $\mu_s$ について

負荷後 30 秒で手動により回転試験片を約  $30^\circ$  ずつ 3 回 回転し、この時の初トルク  $T_g$  (算術平均値) を求めた。以下 Table 3 に示す荷重増法に従い同一試験片組合せについて各荷重での  $T_g$  を求めた。掃速は約  $0.3\text{cm/sec}$  として  $1\text{rev}$  の回転による相対距離は約  $0.9\text{cm}$  であった。  
 $\mu_s = T_g / \text{Load} \times (r)$  : 試験片接触部平均半径より計算した各荷重での  $\mu_s$  を Fig. 5 および 6 に示す。Fig. 5 はナトリウム温度  $280^\circ\text{C}$ 、Fig. 6 はナトリウム温度  $450^\circ\text{C}$  の時の値である。

インコネル 718 同志、ハステロイ C 同志および  $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼同志は  $450^\circ\text{C}$  のみで試験し、 $280^\circ\text{C}$  では行なわなかった。これら以外の材料組合せはまず  $280^\circ\text{C}$  で試験した後  $450^\circ\text{C}$  でも試験した。コールドトップ最低温度は  $200^\circ\text{C}$  一定とした。

Fig. 5 によると  $280^\circ\text{C}$  ではすべての組合せの  $\mu_s$  は  $0.3$  以下と低くなっている。又、荷重により多少  $\mu_s$  が変動しているが面圧  $1\text{kg}/\text{mm}^2$  における  $\mu_s$  を比較すると

$$2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo} \text{ 鋼 vs. SUS 304 } \left\langle \begin{array}{l} \text{ステライイト No.1 同志} \\ \text{ステライイト No.1 vs. コルモノイ No.6} \end{array} \right\rangle \left( \mu_s = 0.22 \right)$$

$$\left\langle \begin{array}{l} \text{コルモノイ No.6 同志} \\ \text{コルモノイ No.6 vs. SUS 304} \end{array} \right\rangle \left( \mu_s = 0.29 \right)$$

の順となる。

Fig. 6 によると  $450^\circ\text{C}$  では  $\mu_s$  が約  $0.8$  にも上昇しているのがわかる。

面圧  $1\text{kg}/\text{mm}^2$  における  $\mu_s$  を比較すると

$$\text{ステライイト No.1 vs. コルモノイ No.6 } \left\langle \begin{array}{l} \text{インコネル 718 同志} \\ 2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo} \text{ 鋼 vs. SUS 304} \end{array} \right\rangle \left( \mu_s = 0.16 \right)$$

$$\left\langle \begin{array}{l} \text{ステライイト No.1 同志} \\ \text{ハステロイ C 同志} \end{array} \right\rangle \left( \mu_s = 0.28 \right) \left\langle \begin{array}{l} 2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo} \text{ 鋼同志} \\ 2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo} \text{ 鋼 vs. ハステロイ C} \end{array} \right\rangle \left( \mu_s = 0.78 \right)$$

の順となる。

Fig. 7 は面圧  $1\text{kg}/\text{mm}^2$  における静摩擦係数  $\mu_s$  を材料組合せと試験温度に關しヒストグラムにしたものである。(なお、同図の動摩擦係数  $\mu_k$  については別項に記述する) ヒストグラムの右端に示した数値は面圧  $1\text{kg}/\text{mm}^2$  における  $\mu_s$  の変動幅を表わす。

$2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼同志および  $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼 vs. ハステロイ C の組合せの  $\mu_s$  の変動が各々

$\pm 0.08$  および  $\pm 0.06$  (相対変動は  $\pm 16\%$  および  $\pm 8\%$ ) であり最も不安定であった。これら以外は  $\pm 0.03$  以下に安定していた。 $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼 vs. ハステロイ C の  $\mu_s$  は温度の影響を明らかにうけており温度上昇のため  $\mu_s$  が  $0.6$  以上増加している。この変化は  $\mu_s$  の変動幅より明らかに大きく有意差があると考えられる。

ステライイト No.1 同志、 $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼 vs. SUS 304 および  $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼 vs. ハステロイ C は温度上昇により  $\mu_s$  が各々  $0.06$ 、 $0.075$  および  $0.5$  増加した。一方、コルモノイ No.6 同志とステライイト No.1 vs. コルモノイ No.6 は温度上昇により  $\mu_s$  が各々  $0.12$  および  $0.07$  低下した。

一般に、温度上昇により空気中で生成した金属表面の酸化膜の還元反応が促進され、金属が直接接触する可能性が増すので  $\mu_s$  が増大することが考えられる。しかしコルモノイ No.6 同志およびステライイト No.1 vs. コルモノイ No.6 は  $\mu_s$  が低下しておりこの理由としては次のように考えられる。Table 11 に示すようにほとんどの材料は  $450^\circ\text{C}$  ナトリウム中摩耗試験後の滑動面のマイクロピッカースかたさ (マトリックス部に圧痕をつけた) が滑動による加工硬化のため試験前より増加するがコルモノイ No.6 では同じかまたは低下している。この傾向は前報で報告した相手材がコルモノイ No.5 の時にもみられ (Table 10 参照) Hv が  $824$  から  $592$  に低下している。この場合、相手材のコルモノイ No.5 は Hv が  $464$  から  $657$  に増加しておりかたさ低下はコルモノイ No.6 特有の現象である。自己融着試験でもコルモノイ No.6 のかたさ低下を観察している。また Table 10 より  $450^\circ\text{C}$  のナトリウム浸漬だけ (非滑動面) の影響をみるとコルモノイ No.6 のかたさ低下が著しい。以上のことから判断するとコルモノイ No.6 は  $450^\circ\text{C}$  ナトリウム中でかたさ低下をひきおこす腐食反応を生じていると考えられる。一方  $280^\circ\text{C}$  という低温では腐食速度は著しく遅いと考えられる。この腐食により生成した腐食現象 (または腐食生成物) が  $\mu_s$  を低下させると予測できる。しかしながらかたさ低下を生ずる腐食現象については推測の域をこさないで今後より長時間のナトリウム浸漬試験が必要である。

$450^\circ\text{C}$  では硬質合金のうちハステロイ C 同志が最も高い  $\mu_s$  ( $0.36$ ) を示した。 $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼同志では  $\mu_s$  はさらに高く、かつ値が不安定となった ( $\mu_s = 0.51 \pm 0.08$ )。しかし相手材の影響が大きく相手材が SUS 304 の時では  $\mu_s$  が  $0.26$  に低下し安定した。一方相手材がハステロイ C の時は  $\mu_s$  が  $0.78$  にも増加した。これらのことから  $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼は強い融着性を有するのかわかる。

Fig. 8 および 9 は前報にて報告した  $\mu_s$  と荷重の関係図を転載したものであるが、これらを見ると SUS 304 同志の  $\mu_s$  が約  $0.6$  で最も高く、また硬質合金同志よりも相手材が SUS 304 の方が  $\mu_s$  が高くなる傾向があり SUS 304 もまた強い融着性を有するのがわかる。しかし  $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼 vs. SUS 304 では  $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼 および SUS 304 の融着性が強くでいていない。この理由は不明確であり今後検討の必要がある。

3.1.2 動摩擦係数  $\mu_k$  について

$\mu_k$  測定を行なった後の各試験片組合せについて  $\mu_k$  測定を行なった。450°C ナトリウム中 (コールドトランプ最低温度 200°C) で回転試験片 (ロータ) を 3.6 cm/sec (平均滑動半徑当り) で回転させながら負荷し 15 分間の滑動トルク  $T_k$  (平均値) を求めた。次に荷重を増加し同様にして 15 分間の  $T_k$  を求めた。以下 Table 3 に示す荷重増進法に従い同一試験片組合せについて各荷重における 15 分間の  $T_k$  を求めた。各荷重における滑動距離は 32.4 m, また最終荷重が 390 kg の時までの (荷重増進率) が 10 番目であるから総滑動時間は 15 × 10 分となる) 総滑動距離は 324 m である。

$\mu_k = T_k / \text{Load} \times r$  (r : 試験片滑動部平均半径) より計算した各荷重での  $\mu_k$  を Fig. 10 に示す。

面圧 1 kg/cm<sup>2</sup> における  $\mu_k$  を比較すると

ステライト No.1 vs. コルモノイ No.6 (インコネル 718) < ステライト No.1 同志  
 (  $\mu_k = 0.12$  ) < ハステロイ C 同志 (  $\mu_k = 0.31$  )  
 SUS 304 (  $\mu_k = 0.22$  )  
 2½Cr-1Mo 鋼 vs. ハステロイ C (  $\mu_k = 0.48$  )

< 2½Cr-1Mo 鋼 vs. ハステロイ C (  $\mu_k = 0.63$  ) の順となる。

2½Cr-1Mo 鋼同志が含まれていないが、これは低荷重域ですでに  $\mu_k$  の変動が著しかつたので 120 kg (約 0.5 kg/cm<sup>2</sup>) で試験を中止したためである。この組合せの 0.5 kg/cm<sup>2</sup> における  $\mu_k$  は 0.57, その変動は ±0.29 (相対変動は ±51%) であった。また、2½Cr-1Mo 鋼の組合せがいずれも高い  $\mu_k$  を示している。

荷重による影響をみると、硬質合金同志の組合せは荷重変化に対し  $\mu_k$  はほぼ一定しており荷重の影響をうけない。一方 2½Cr-1Mo 鋼の組合せは荷重増加とともに  $\mu_k$  が上昇し荷重の影響をうけている。

Fig. 7 に面圧 1 kg/cm<sup>2</sup> における材料組合せ毎の  $\mu_k$  値をヒストグラムで示す。ヒストグラムの右端に示した数値は面圧 1 kg/cm<sup>2</sup> における  $\mu_k$  の変動幅を示す。硬質合金同志の  $\mu_k$  の変動はいずれも ±0.01 以下で非常に安定しているが、2½Cr-1Mo 鋼の組合せは ±0.07 以上で不安定である。2½Cr-1Mo 鋼同志、2½Cr-1Mo 鋼 vs. SUS 304 および 2½Cr-1Mo 鋼 vs. ハステロイ C の組合せの変動幅は各々 ±0.29, ±0.17 および ±0.07 (相対変動は各々 ±51%, ±35% および ±11%) であった。

面圧 1 kg/cm<sup>2</sup> における  $\mu_k$  はコルモノイ No.6 の組合せが最も低くなっている。特に硬質合金同志の組合せのうちステライト No.1 同志の  $\mu_k$  が 0.48 と最も高いが、相手材がコルモノイ No.6 の時は 0.12 に低下している。これは前項で述べたようにコルモノイ No.6 のナトリウムによる腐食のため生じたと考えられる変質層 (または腐食生成物) が  $\mu_k$  を低下させ

たのであろう。

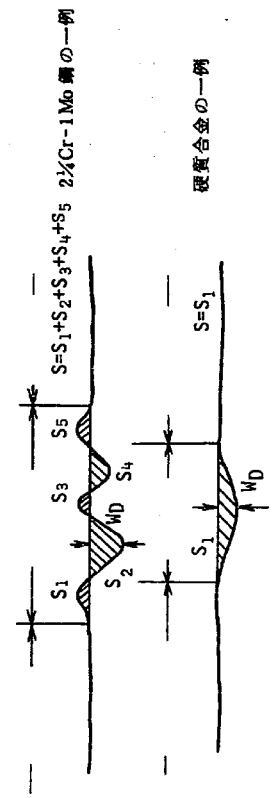
2½Cr-1Mo 鋼と相手材の関係は  $\mu_g$  の場合と同じような傾向がみられる。即ち相手材が SUS 304 の方がハステロイ C よりも  $\mu_k$  が低くなっている。

Fig. 11 および 12 は前報にて報告した  $\mu_k$  と荷重の関係図を転載したものである。両図によると SUS 304 同志の  $\mu_k$  が約 0.45 と高くまたカーバタイト以外の硬質合金に関しては硬質合金同志よりも硬質合金 vs. SUS 304 の方が  $\mu_k$  が高くなり、この事から SUS 304 は  $\mu_k$  を高くする傾向がある。また、ハステロイ C 同志の  $\mu_k$  は約 0.22 と低い相手材が 2½Cr-1Mo 鋼の場合は 0.63 と高くなり 2½Cr-1Mo 鋼も  $\mu_k$  を高くする傾向がある。

3.2 摩耗量について

摩耗試験後の固定側試験片 (ステータ) の滑動部に対し半径方向に軸針式表面あらさを走査することにより得られる摩耗痕の形状より固定側試験片の摩耗深さ  $W_D$ , 摩耗体積  $W_V$  および比摩耗量  $W_g$  を求め結果を Table 8 に示す。

平均的な 2 箇所を走査し  $W_D$  は各最大深さの平均値を、 $W_V$  は下図に示すように摩耗痕両側の非滑動面を基準としてこれよりへりこんだ部分とよりあった部分 (2½Cr-1Mo 鋼にみられ硬質合金ではみられなかった) の面積の絶対値の和より求めた。



$W_g$  即ち単位荷重当りおよび単位滑動距離当りの摩耗体積は試験荷重を試験中に漸増させたので前報に示したような補正計算式を使って計算した。即ち  $W_g = W_V / 900 \times V \times 2\pi R$  ここで  $V$  は滑速,  $2\pi R$  は Table 3 に示す。

ステライト No.1 およびコルモノイ No.6 の  $W_g$  が最も低く  $10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/kg のオーダーでありインコネル 718 とハステロイ C の  $W_g$  が  $10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/kg のオーダーであった。これは Table 9 に示す前報の材料組合せについての  $W_g$  と同じ傾向である。

一方 2½Cr-1Mo 鋼同志は今まで試験した材料と異なり著しく大きい  $1.26 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/kg という  $W_g$  を示した。よって 2½Cr-1Mo 鋼が耐摩耗性に劣ると言えるが相手材を SUS 304 またはハステロイ C にすると  $W_g$  が 2 桁も低くなり耐摩耗性が相手材により著しく変化すること

がわかる。

$W_D$  と  $W_0$  を対数グラフにプロットすると Fig. 13 に示すようにほぼ直線関係が得られた。従ってどちらのデータの比較でも同じような耐摩耗評価ができる。

Fig. 14 (A), (B) および Fig. 15 に試験中オンラインで固定側と回転側の両方の試験片の  $W_0$  (各荷重で15分間ずつ試験した) を差動トランスにより求め試験開始より各荷重での撓動後の  $W_0$  の合計, 即ち  $\Sigma W_0$  が試験荷重に関しプロットされている。このようなデータは本報ではじめて取扱う。Fig. 14(A) および (B) には本報告で問題としている材料組合せについて, Fig. 15 には前回の  $\mu$  および摩耗量について報告済の材料組合せについての  $\Sigma W_0$  を示した。

これらによると荷重増加とともに  $\Sigma W_0$  が増加するのがわかる。特に 2%Cr-1Mo 鋼同志では低荷重域 (~120kg) であっても  $\Sigma W_0$  が急激に増加しており, また 2%Cr-1Mo 鋼 vs. SUS 304 では荷重 165kg まで全く摩耗しなかったが荷重 210kg で急激に  $\Sigma W_0$  が増加 (325  $\mu\text{m}$ ) した。試験後の外観検査よりロータ (各々 2%Cr-1Mo 鋼および SUS 304) 側は座掘しており, 上述の  $\Sigma W_0$  が急増した時にこのロータ側で座掘が起りはじめたと考えられる。

ロータを高温強度のすぐれたハステロイ C にすると全く座掘が起きず  $\Sigma W_0$  の変化がおだやかにになった。

硬質合金のうちインコネル X 750 同志が最も高い  $\Sigma W_0$  を示すついでハステロイ C 同志である。LC-1C (B/F) 同志, LW-1N 40(B/F) 同志, およびインコネル 718 同志は 200kg 以上の高荷重域で急激に  $\Sigma W_0$  が増加している。

相手材が SUS 304 の場合は高荷重域で  $\Sigma W_0$  の増加率が低くなる傾向がみられるがこれは Table 10 に示したように SUS 304 撓動面が撓動による塑性加工により硬化するためと考えられる。

LC-1C (G/F) 同志は一桁高い速度 (35.6 cm/sec) においては低荷重でも高い  $\Sigma W_0$  を示した。

Table 10 および 11 に示すように殆どどの材料は撓動および荷重増加のためかたかたが増すので荷重増加に伴なう摩耗量の増加割合は減少している。

ステライイト No. 6 同志, ステライイト No. 1 同志, コルモノイ No. 6 同志, コルモノイ No. 6 vs. ステライイト No. 1, コルモノイ No. 6 vs. コルモノイ No. 5, およびコルモノイ No. 6 vs. デロロステライイト SF-60M では  $W_0$  が検出されなかった。

Fig. 16 にはナトリウム中摩耗試験後にステータの摩耗痕のうねりより求めた  $W_0$  ( $W_{Dw}$  と表示) と撓動試験中に差動トランスでオンライン測定した  $\Sigma W_0$  の最終値 (ステータとロータの合計値,  $W_{Dd}$  と表示) の関係を示す。図に示した直線と対応する数値は  $W_{Dw}$  と  $W_{Dd}$  の比である。

$W_{Dw}$  はステータ撓動面の最大深さを表わし,  $W_{Dd}$  はステータとロータとの平均的な撓動面

の  $W_0$  を表わしている。ここで  $W_{Dw}$  は  $W_{Dd}$  のうちステータが摩耗した部分より大きいと考えられる。今, ステータとロータの摩耗速度が同じであると仮定すると  $W_{Dw}/W_{Dd}$  が 1/2 以上となるがステータの殆んどがそれより小さくなっている。この理由として考えられるのは, ロータがステータより摩耗しやすいということである。ロータは撓動幅がステータより狭いため半徑方向への変形がより容易に生じると考えられる。したがって前報まではステータだけに撓動面の摩耗量が耐摩耗性を論じてきたが今後は両試験片に関するデータに基づいて論ずる必要がある。

試験後のロータの寸法測定を行なった結果 2%Cr-1Mo 鋼同志では  $0.9 \pm 0.3 \text{ mm}$ , 2%Cr-1Mo 鋼 vs. SUS 304 ではロータの SUS 304 が  $0.4 \pm 0.2 \text{ mm}$  摩耗していた。この時の  $W_{Dd}$  は各々  $0.65 \text{ mm}$  および  $0.5 \text{ mm}$  であった。

### 3.3 金相試験結果

摩耗試験後の撓動面について次のような観察, 測定を行なった。

撓動表面についてかたさおよび表面あらさ測定, SEM 観察, および XMA 面分析を行ない, 撓動断面について光学顕微鏡観察により組成変化をしらべた。

#### 3.3.1 ステライイト No. 1 について

ステライイトはかたさ値が高くすぐれた耐摩耗性を示すので従来バルブシート, ポンプシールリング, カッタ刃先等に使用されてきた。

ステライイト系材料には多くの種類があるがこのうちステライイト No. 1 は鉄素 (C) およびタングステン (W) 量を多くすることによりカーバイドの析出量を増加し, かたさ値が高くなっている。一般によく使用されるステライイト No. 6 にくらべかたさ値はより高いが韌性では劣る。

Photo. 2(A) にステライイト No. 1 同志の摩耗試験後の撓動断面の組織を示す。表面に破断した (特にカーバイド) 状況がみられるがこれはステライイト No. 1 の韌性が低いためと考えられる。ただしこの破断は差動トランスによる  $W_0$  値として検出できないう程小さかった。ステライイト No. 1 同志の  $\mu_k$  が約 0.5 であり, 硬質合金のなかでも高い値を示したが, この破断したカーバイドが  $\mu_k$  を高くとしたと考えられる。前報によるとステライイト No. 6 同志の  $\mu_k$  は 0.3 であり, 組織は安定していた。

Photo. 2(B) に相手材がコルモノイ No. 6 の場合のステライイト No. 1 撓動断面を示すがステライイト No. 1 同志よりも組織は塑性変形をうけておらず, 安定しているのがわかる。この時の  $\mu_k$  は 0.12 と著しく低く, 相手材によって,  $\mu_k$  が変化するのがわかる。また  $W_0$  も検出されなく優れた耐摩耗性を示した。

Table 8 Wear Rate

Material Combination	Sliding Velocity, v (cm/sec)	Final Load, P (kg)	S.P.T. (kg)	Wear Depth, H <sub>0</sub> (μm) (Stator)	Wear Volume, W <sub>0</sub> (mm <sup>3</sup> ) (Stator)	Specific Wear Rate, K <sub>0</sub> (mm <sup>3</sup> /kg) (Stator)
Stator						
Stellite No.1	3.6	390	1935	~0	~0	~0
Stellite No.1	"	"	"	0.7	0.037	5.88×10 <sup>-3</sup>
Colmonoy No.6	"	"	"	2.5	0.11	1.81×10 <sup>-2</sup>
Colmonoy No.6	"	"	"	13.1	1.20	1.92×10 <sup>-2</sup>
Inconel 718	"	"	"	5.1	0.73	1.16×10 <sup>-2</sup>
Hastelloy C	"	"	"	251	111	1.25×10 <sup>-2</sup>
2/4Cr-Mo Steel	"	120	270	104	32.7	5.22×10 <sup>-2</sup>
2/4Cr-Mo Steel	"	390	1935	84	20.7	3.30×10 <sup>-2</sup>
2/4Cr-Mo Steel	"	"	"	"	"	"
Hastelloy C	"	"	"	"	"	"

Tested for 15 minutes at each load step.

Table 9 Wear Rate (Borrowed from the Preceding Report(3))

Material Combination	Sliding Velocity, v (cm/sec)	Final Load, P (kg)	S.P.T. (kg)	Wear Depth, H <sub>0</sub> (μm) (Stator)	Wear Volume, W <sub>0</sub> (mm <sup>3</sup> ) (Stator)	Specific Wear Rate, K <sub>0</sub> (mm <sup>3</sup> /kg) (Stator)
Stator						
Colmonoy No.6	3.6 (35.8)	345 (390)	1545 (1935)	~0 (6)	~0 (1.28)	~0 (2.06×10 <sup>-3</sup> )
Colmonoy No.6	3.6	390	1935	~0	~0	~0
Stellite No.6	3.6	390	1935	4	0.18	2.87×10 <sup>-3</sup>
Inconel X750	3.6	390	1935	96	30.53	4.97×10 <sup>-2</sup>
LC-1C(G/F)	3.6 (35.6)	390 (20)	1935 (270)	11 (86)	1.65 (32.56)	2.68×10 <sup>-2</sup> (3.76×10 <sup>-2</sup> )
LC-1C(B/F)	3.6 (0.7)	390 (390)	1935 (1935)	17 (3)	3.04 (0.41)	4.85×10 <sup>-2</sup> (3.35×10 <sup>-2</sup> )
LW-IN40(G/F)	3.6	300	1200	6	0.13	3.34×10 <sup>-3</sup>
LW-IN40(B/F)	3.6	390	1935	~0	~0	~0
SUS 304	3.6	390	1935	5	0.37	5.90×10 <sup>-3</sup>
Deloro Stellite SF-60H	3.6	390	1935	17	2.35	3.75×10 <sup>-2</sup>
Colmonoy No.6	3.6	300	1935	23	6.36	1.01×10 <sup>-2</sup>
Stellite No.6	3.6	390	1935	8	0.31	4.94×10 <sup>-3</sup>
Inconel X750	3.6	390	1935	20	1.73	2.76×10 <sup>-2</sup>
LC-1C(G/F)	3.6	390	1935	13	0.54	8.61×10 <sup>-3</sup>
LC-1C(B/F)	3.6	390	1935	10	0.99	1.58×10 <sup>-2</sup>
LW-IN40(G/F)	3.6	300	1200	35	2.74	7.04×10 <sup>-2</sup>

Tested for 15 minutes at each load step.

3.3.2 コルモノイノ6 について

Photo. 3に試験後のコルモノイノ6 摺動断面の組織を示す。(A)は相手材がコルモノイノ6、(B)は相手材がステライトNo.1であるがいずれも局部的に摺動面で破断が生じている。しかしW<sub>0</sub>として検出できる程著しくはなかった。(B)にみられる黒点はコルモノイノ6 素材の内盛過程で残留した気孔である。また組織の端部にみられる割れは形状効果の原因していると考えられ、設計する場合、内盛する部分の形状に注意しなければならぬ。摺動面で破断が生じているにもかかわらず、コルモノイノ6 同志ではμ<sub>g</sub>が0.16、μ<sub>k</sub>が0.21であり、コルモノイノ6 vs. ステライトNo.1ではμ<sub>g</sub>が0.15、μ<sub>k</sub>が0.12で他材料とくらべて著しく低かった。この理由としては述べたようなコルモノイノ6 とナトリウムとの何らかの反応が考えられる。コルモノイノ6 はかたくて脆い材料で割れの心配があるが肉盛形状に注意すれば優れた耐摩耗性を示すと考えられる。

3.3.3 インコネル718 について

インコネル718は前報で報告したインコネルX750と同じようにNiにTi, Al, Nbを添加し時効処理により金属間化合物Ni<sub>3</sub>(Ti, Al, Nb)を析出させ高温強度を構す析出強化型合金である。インコネルX750と異なる点はMoを約3%, Nb+Taを約5%添加しさらに強度をあげていることである。

公称引張強さは室温で14.62kg/mm<sup>2</sup>、649℃で125.1kg/mm<sup>2</sup>(SUS 304 およびSUS 316は約34kg/mm<sup>2</sup>、インコネルX750は91.4kg/mm<sup>2</sup>)そして760℃で97.0kg/mm<sup>2</sup>(SUS 304 およびSUS 316は約20kg/mm<sup>2</sup>、インコネルX750は66.1kg/mm<sup>2</sup>)である。

また公称1000時間クリープ強度は649℃で59.8kg/mm<sup>2</sup>(SUS 304は12.6kg/mm<sup>2</sup>、SUS 316は15.4kg/mm<sup>2</sup>そしてインコネルX750は47.8kg/mm<sup>2</sup>)である。

他材料とくらべて著しく強化されており、従来ジェットエンジンあるいはガスタービン用部品材に使用されている。

Photo. 4に試験前後の断面組織を示す。オーステナイト組織内に分散した細かい黒点は熱処理(2.4項参照のこと)により析出したNi<sub>3</sub>(Ti, Al, Nb)と考えられる。インコネル718同志の摺動断面付近には塑性変形した形跡がみられる。

Fig. 14に示したように差動トランスによる摩耗量測定では、荷重が300kgになると急激に摩耗がはじまり(約70μm)、それより低い荷重では全く摩耗しなかった。析出強化型合金では雰囲気温度が析出物が固溶する温度になると強度が急激に低下するので、急激な摩耗進行の原因として荷重増加によって摩擦面温度が析出物固溶温度(約750℃と想われる)近くまで上昇したことが考えられる。しかしFig. 10にみられ

(注) インコネル718およびインコネルX750についての数値は日立金属(株)発行資料より、またSUS 304およびSUS 316についての数値はASME規格曲線より引用した。

るように $\mu_k$ は高荷重域まで約0.3で一定していた。

西独ではSNR 300の燃料集合体パッド用候補材の1つにインコネル718を考えており、GIK(西独)、TNO(オランダ)およびIA(西独)でナトリウム中摩耗試験を行なっている。温度 $473^{\circ}\text{K} \sim 873^{\circ}\text{K}$ 、摺動距離 $0 \sim 100\text{m}$ 、摺速 $\sim 10\text{mm}/\text{min}$ または $\sim 160\text{mm}/\text{min}$ 、面圧 $\sim 10 \times 10^7\text{N}/\text{m}^2$ 、酸量 $10\text{ppm}$ 以下または $30\text{ppm}$ の条件で試験が行なわれ、 $\mu_k$ が設計基準( $\mu_k \leq 0.5$ )をこえる場合があると報告している。詳細なデータは調査報告を参照されたい。

1974年の日独会議交換資料<sup>(7)</sup>でもある条件ではインコネル718の $\mu_k$ が0.5をこえると報告されている。試験片の形状が我々のリング対ディスクと異なり西独ではピン対ディスクであり、このことが $\mu_k$ に差が生じた原因の1つと考えられる。

一方LMBCの報告<sup>(8)</sup>ではピン対ディスク形状の試験片でナトリウム温度 $650^{\circ}\text{C}$ 、面圧約 $0.1\text{kg}/\text{cm}^2$ 、摺速 $3.1 \sim 4.7\text{cm}/\text{sec}$ の時インコネル718同志の $\mu_k$ は $0.26 \sim 0.37$ であり我々の試験より温度が高いたが同じ $\mu_k$ を示している。

### 3.34 ハステロイCについて

ハステロイCはインコネル718と異なりMoおよびWを多く添加し $\text{M}_6\text{C}$ カーバイドをマトリックス中に析出させ高温強度を増すマトリックス強化型合金である。

Photo. 5に試験後の摺動断面組織を示す。相手材がハステロイCおよび $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の両方とも、ハステロイC摺動面近傍には塑性変形した状況が見られる。Table 11に示すようにハステロイCの試験前のマイクロビッカースかたさHvが他材料とくらべ低く、塑性変形しやすいと考えられる。この変形により摺動面のHvは50%以上も上昇した。

Photo. 6には $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼と組合せ試験したハステロイC摺動面のXMA面分析結果を示す。FeとNiの濃度にバラツキがあり、かつ逆転しているが、これは $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼がハステロイC表面に凝着したためである。

Photo. 7は同じ摺動面のSEM写真であるが、相手材の $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の凝着のため面が著しくあれているのがわかる。

Photo. 8には $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼と組合せ試験したハステロイC摺動面のXMA面分析結果を示す。FeとNiの濃度にバラツキがあり、かつ逆転しているが、これは $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼がハステロイC表面に凝着したためである。

Photo. 9は同じ摺動面のSEM写真であるが、相手材の $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の凝着のため面が著しくあれているのがわかる。

Photo. 10に示したようにハステロイC同志の $\mu_k$ は約0.2と低く安定し $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼との組合せは約0.6と高くまた変動した。

日独会議交換資料<sup>(7)</sup>によると、ハステロイC同志は燃料集合体パッド材としての設計基準

( $\mu_k \leq 0.5$ )を満足し、 $\mu$ を低くする原因は約15%含有するMoであるかと推定している。

またLMBCの報告によるとナトリウム温度 $650^{\circ}\text{C}$ 、面圧約 $0.1\text{kg}/\text{cm}^2$ 、摺速 $5.3 \sim 14.1\text{cm}/\text{sec}$ でピン対試験片の多くが破壊あるいはかじり付き初期の $\mu_k$ は $0.1 \sim 0.58$ である。

### 3.35 $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼について

$2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼は高速炉用蒸気発生器の伝熱管に使用されており、また従来の大型炉においても使用される計画である。

伝熱管材としての諸特性のうち高温液体ナトリウムとの共存性に関するもののうちクリープ特性および成分元素の移行現象は従来より行なわれており成果報告がされてきたが、ナトリウム流動および温度分布変化により生ずる伝熱管とサポートの間の振動および摺動から来る諸問題に関しては全く試験が行なわれていない。

特に伝熱管にはナトリウム-水反応の危険性があるので、サポートの摩擦、摩耗およびフレッチング現象をならべ伝熱管の安全性を確かめる必要がある。しかしながら実際の伝熱管-サポートの間の諸条件(摺動速度、距離、荷重、摺動モード等)がよくわかっていないため本試験では、従来より行なっている原子炉機器摺動部材の短時間選定試験と同じ方法で行なったので伝熱管-サポートの設計にはさらに詳細な試験が必要である。

$2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼は一般に用いられる耐摩擦・摩耗材にくらべ強度が低く(引張強さ $59.4\text{kg}/\text{mm}^2$ )容易に塑性変形するので耐摩擦・摩耗性が劣ると予想できる。

Fig. 10に示したように $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼同志の $\mu_k$ は0.5以上と高かった。

またFig. 14に示したように $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼同志の摩耗は試験材料中最も著しかった。Photo. 8に $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の摺動断面組織を示す。 $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼同志では $150\mu\text{m}$ 深さまで塑性変形層がみとめられた。相手材がSUS 304の場合には $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼摺動面に移行したSUS 304がみとめられた(SUS 304は5%ナイタールでエッチングされていない)。一方相手材がハステロイCの場合は $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼表面へハステロイCはほとんど移行していない。いずれの写真からも摺動面の凹凸が著しいことがわかる。

Photo. 9には $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼と組合せ試験したSUS 304の摺動断面組織を示す。摺動によりロータのSUS 304摺動面近傍が塑性変形した試験片形状が試験前と著しく異なっている。また表面に相手材の $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼が凝着しているのがわかる。

Photo. 10に試験前後の $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼表面のSEM写真を示す。摺動後はいずれも著しく塑性流動しており、また摩耗粉が凝着した様子がわかる。

Photo. 11は $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼と組合せ試験したSUS 304の摺動面、これはPhoto. 10(C)と対応するもので双方の状態は非常ににている。

$2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼 vs. ハステロイC組合せの試験後のハステロイC表面のSEM写真はすでにPhoto. 7に示したが、表面があれど、摩耗粉が凝着している様子がわかる。

Photo. 12 および 13 には相手材の凝着をさらへるための XMA 面分析結果を示す。SUS 304 と組合せ試験した 2½Cr-1Mo 鋼では摺動表面および摺動断面とも場所により Ni と Cr の濃度に差がありかつその傾向が一致している。2½Cr-1Mo 鋼と SUS 304 の成分差より Ni と Cr の濃度が高い所には相手材の SUS 304 が凝着し、反対に SUS 304 表面での Ni と Cr の濃度が低い所には相手材の 2½Cr-1Mo 鋼が凝着したと考えられる。これは Photo. 8 および Photo. 9 の断面の組織写真からも明らかである。

3.3.6 かたさ測定

試験前後の摺動面に垂直方向に求めたかたさを Table 10 および 11 に示す。Table 10 は即ち前報で  $\mu$ ,  $W_0$  および金相データを報告した材料組合せについてであり、Table 11 は本報ではじめて報告する材料組合せについてのものである。試験後冷んだ材料のかたさは増加し、摺動により塑性加工をうけているのがわかる。特に SUS 304 および 2½Cr-1Mo 鋼は約 2 倍に増加した。SUS 304 と組合せた 2½Cr-1Mo 鋼では約 3 倍になっているがこれは SUS 304 の凝着のためである。

一方、LW-5 および コルモノイ No. 6 はかたさの減少がみられた。LW-5 は試験中 LW-5 肉盛層全体が変形し肉盛粒子間の結合が破壊したためかたさが低下したと思われる。コルモノイ No. 6 は相手材がコルモノイ No. 5 および No. 6 の時かたさが約 Hv 200 低下した。コルモノイ No. 6 はナトリウム中に浸漬した非摺動面でもかたさが低下がみとめられ(他の材料ではみとめられなかった)コルモノイ No. 6 表面がナトリウムと何らかの反応(腐食、脱炭等)を起しこれによってかたさが低下したと考えられる。

試験進行に伴ない、摺動による塑性加工により生ずるかたさの増加はホルムの法則より摩擦を減少すると考えられる。

$$W = k \cdot \frac{P \times L}{P_m}$$

k : 定数  
P : 荷重  
L : 摺動距離

Pm : 押込みかたさ

3.3.7 表面あらさ測定

試験前後の表面あらさを Table 12 に示す。硬質合金同志の組合せでは表面あらさ変化は殆んどみられなかった。このうちインコネル 718 同志がもっとも変化が大きかった。

2½Cr-1Mo 鋼は試験後著しく表面があれた。2½Cr-1Mo 鋼同志がもっとも著しく 52 μm に達した。2½Cr-1Mo 鋼の表面あらさは相手材が硬いものになると多少低下し SUS 304 の場合 36 μm、ハステロイ C の場合 15 μm となった。

前報で示したように SUS 304 同志では試験後の表面あらさが 9 μm であったことと比較すると、2½Cr-1Mo 鋼は極度に表面がやれやすい材料であるのがわかる。

Table 10 Microhardness of Materials Described in the Preceding Report (2), (3) (Hv) 100g

Material Determined	Matching Material	Microhardness (Hv)	
		as Received	after Tested
Deloro Stellite SF-60M	Colmonoy No. 6	762	894
Colmonoy No. 5	Colmonoy No. 6	464	657
Colmonoy No. 6	Colmonoy No. 5	824	592
Stellite No. 6	Colmonoy No. 6	585	907
Inconel X750	Inconel X750	459	592
LC-1C (G/F)	LC-1C (G/F)	782	1033
LW-1M0(G/F)	LW-1M0(G/F)	1267	1427
SUS 304	SUS 304	298	639
SUS 304	Colmonoy No. 6	298	624
SUS 304	Stellite No. 6	298	579
Stellite No. 6	SUS 304	585	752
SUS 304	Stellite No. 1	298	457
SUS 304	Inconel X750	298	554
SUS 304	LC-1C (G/F)	298	649
SUS 304	LW-1M0(G/F)	298	613
SUS 304	LW-5	298	606
LW-5	SUS 304	1097	579

Determined vertically to the sliding surface.

Table 11 Microhardness of Materials Described in the Present Report (Hv) 100g

Material Determined	Matching Material	Microhardness (Hv)	
		as Received	after Tested
Stellite No. 1	Stellite No. 1	870 1650*	914
Stellite No. 1	Colmonoy No. 6	870 1650*	1035
Colmonoy No. 6	Stellite No. 1	824 1854*	835
Colmonoy No. 6	Colmonoy No. 6	824 1854*	615
Inconel 718	Inconel 718	503	583
Inconel 718	Inconel 718	429	714
Hastelloy C	Hastelloy C	442	456
2 1/4Cr-1Mo Steel	2 1/4Cr-1Mo Steel	232	223
2 1/4Cr-1Mo Steel	SUS 304	232	239
2 1/4Cr-1Mo Steel	Hastelloy C	232	660
SUS 304	2 1/4Cr-1Mo Steel	298	642
Hastelloy C	2 1/4Cr-1Mo Steel	429	479
			627

\* Hardness of Carbide Precipitated

Determined vertically to the sliding surface

Table 12 Roughness

Material Combination	Roughness (μm)				Sliding Velocity (cm/sec)	Fmax Load (kg)
	As Received	After Tested	Stator	Rotor		
Stator						
Stellite No. 1	Stellite No. 1	0.4	6.4	0.6	3.6	390
Stellite No. 1	Colmonoy No. 6	0.4	1	0.7	3.6	390
Colmonoy No. 6	Colmonoy No. 6	1	1	1	3.6	390
Inconel 718	Inconel 718	0.7	0.7	2	3.6	390
Hastelloy C	Hastelloy C	2	2	3	3.6	390
2 1/4Cr-1Mo Steel	2 1/4Cr-1Mo Steel	2	2	52	3.6	390
2 1/4Cr-1Mo Steel	SUS 304	2	0.4	36	3.6	390
2 1/4Cr-1Mo Steel	Hastelloy C	2	2	15	3.6	390

## 4. 結 論

上述の摩耗試験の結果をまとめると次のごとくなる。

- (1) コルモノイ No. 6 だけが試験後かたさが低下し、また温度が高くなるほど静摩擦係数 ( $\mu_s$ ) が低くなった。
- (2) ステライト No. 1 同志の  $\mu_k$  は約 0.5 と比較的高かった。しかし相手材がコレノイ No. 6 になると 0.12 に低下した。またコルモノイ No. 6 同志の  $\mu_k$  は 0.2 と低かった。これらは殆んど摩耗しなかった。
- (3) インコネル 718 同志の  $\mu_k$  は 0.3 と低かったが 300kg 以上の荷重で摩耗がはじまった。(300kg で  $W_D$  が 70  $\mu\text{m}$ )
- (4) ハステロイ C 同志の  $\mu_k$  は 0.23 と低かったが低荷重域より摩耗がはじまった。
- (5) 2½Cr-1Mo 鋼同志は  $\mu_s$  および  $\mu_k$  とも 0.5 以上と高く摺動面が著しく塑性変形した。また試験した材料のうち最も著しい摩耗を示した。相手材を SUS 304 あるいはハステロイ C にすると  $W_D$  が減少した。

## 5. あとがき

47 年度から 49 年度まで短時間材料選定試験を行なってきた。これは材料間の耐摩耗、耐摩耗性の差を簡便、迅速に知るため試験条件をできるだけ一定とすように計画したものである。即ち試験時間 (150 分)、ナトリウム温度 (450°C)、摺速 (3.6 cm/sec) コールドドラップ最低温度 (200°C) および試験片形状 (摺動面積 22 cm<sup>2</sup>) を一定とし、短時間毎 (15 分間) に荷重を漸増させて (漸増法も一定とした) 各荷重での平均摩擦係数および摩耗量を求め材料毎に比較しおおよその材料間の差を知ることができた。しかしこれらの条件は実際のナトリウム機器摺動部の設計条件とびったり一致しているわけではない。また各原子炉摺動部により設計条件が異なるので原子炉摺動部の設計に反映させるために耐摩耗材を推奨するにはいまだ不十分である。そこで、多数の材料に関する短時間試験結果よりいくつかの優れた材料を選定し、これらについて実際の原子炉摺動部設計条件 (特に「もんじゅ」) を満足する条件で 50 年度より試験し耐摩耗材の選定を行なうつもりである。

ナトリウム温度 450 ~ 540°C, コールドドラップ温度 150°C, 摺速 0.2 cm/sec ~ 7 cm/sec, 面圧 0.5, 1 および 2 kg/cm<sup>2</sup> という条件を考えている。さらに長時間の摩耗・摩耗挙動をみるためナトリウム温度 540°C, 面圧 1 kg/cm<sup>2</sup> および摺速 3.6 cm/sec で連続 8 時間試験するとともにナトリウム中で金属表面上に生成する皮膜 (酸化膜あるいは腐食変質層) の効果をしらべるためナトリウムによるフラッシング試験を行なう。

6. 文 献

- (1) 加納茂機, 溝淵庄太郎, 他: 「高速炉材料のナトリウム中摩耗試験Ⅱ」, 硬質合金の摩耗, SN941 73-17
- (2) 加納茂機, 溝淵庄太郎, 他: 「高速炉材料のナトリウム中摩耗試験Ⅲ」, 硬質合金・カーバイドの摩耗・摩耗, SN941 74-12
- (3) 加納茂機, 溝淵庄太郎, 他: 「高速炉材料のナトリウム中摩耗試験Ⅳ」, 硬質合金・カーバイドの金相試験, SN941 74-80
- (4) 溝淵庄太郎, 加納茂機, 他: 「高温ナトリウム中における自己融着試験Ⅲ」, 新型自己融着試験機の試作及び機能試験, SN941 75-13
- (5) E. Wild, et al., "Friction behavior of Inconel 718 and Stellite 6 as Fuel Assembly Duct Pad Material," IAEA/SM-173/Ⅷ-18
- (6) 溝淵庄太郎, 加納茂機, 他: 「ナトリウム中における摩耗・摩耗, および自己融着現象に関する諸外国の試験研究(Ⅰ)」 ZN942 74-08
- (7) E. Wild, "Duct Load Pad Materials Evaluation, The friction coefficient of three nickel base alloys Inconel 718, Nimonic 90 and Hastelloy C", D 024 74-01-20
- (8) N. J. Hoffman, et al., "Friction and Wear Screening Tests of Materials in Sodium," LMEC-70-10
- (9) 袖原俊一, 他: 「高温ナトリウムにおける高速炉用 2%Cr-1Mo 鋼のクリープ特性」, N941 74-62
- (10) 丸山昭, 他: 「高速増殖炉用構造材 2%Cr-1Mo 鋼のナトリウム中質量移行試験(Ⅰ)」, 材料試験ループ 1000 時間連続浸漬試験結果, SN941 72-03
- (11) 丸山昭, 他: 「高速増殖炉用構造材 2%Cr-1Mo 鋼のナトリウム中質量移行試験(Ⅱ)」, 2500 時間連続浸漬試験結果, SN941 73-14

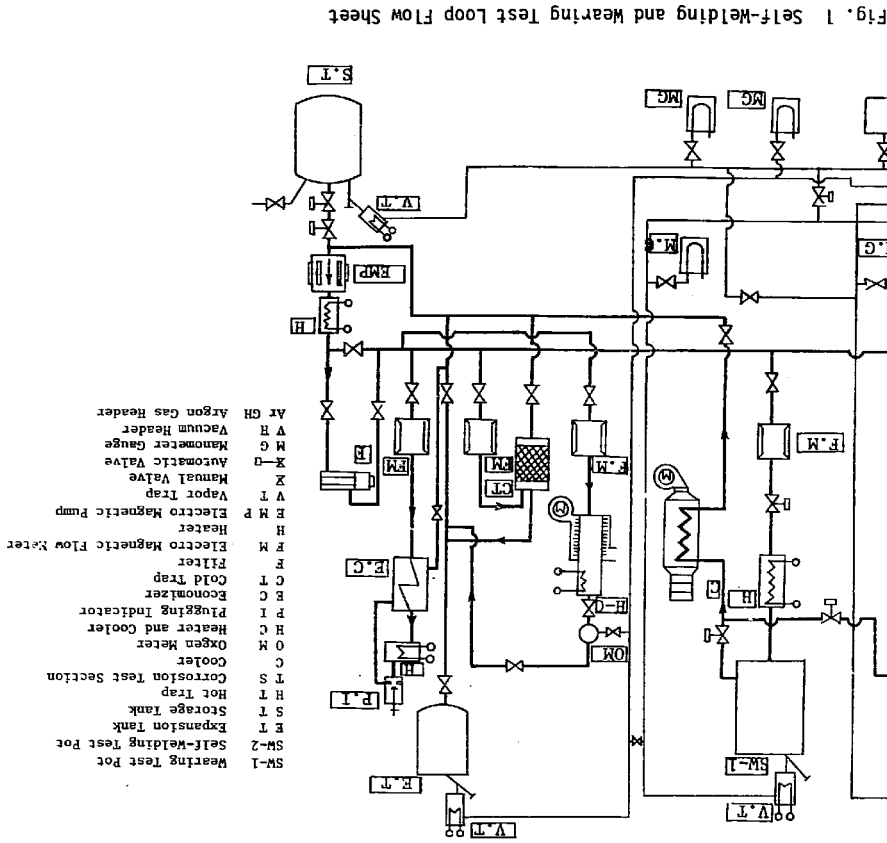


Fig. 1 Self-Welding and Wearing Test Loop Flow Sheet



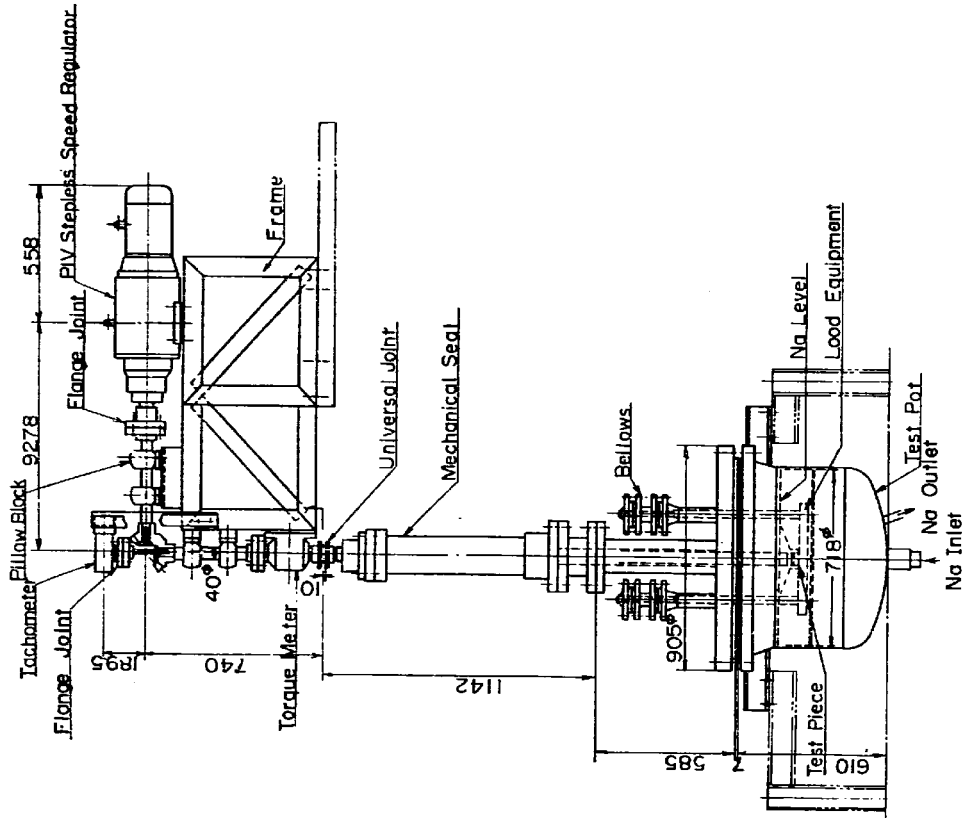


Fig. 2 Test Equipment

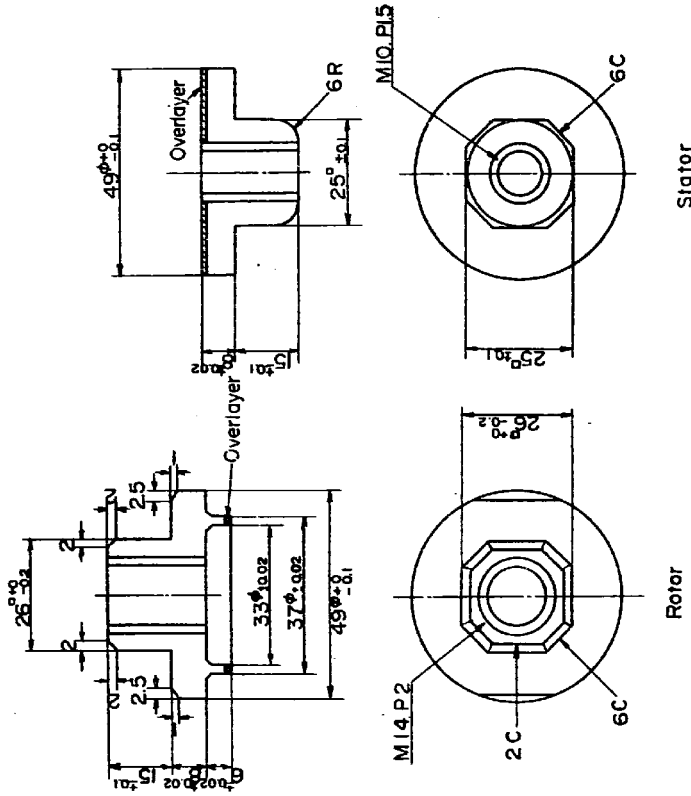


Fig. 3 Size of Test Piece

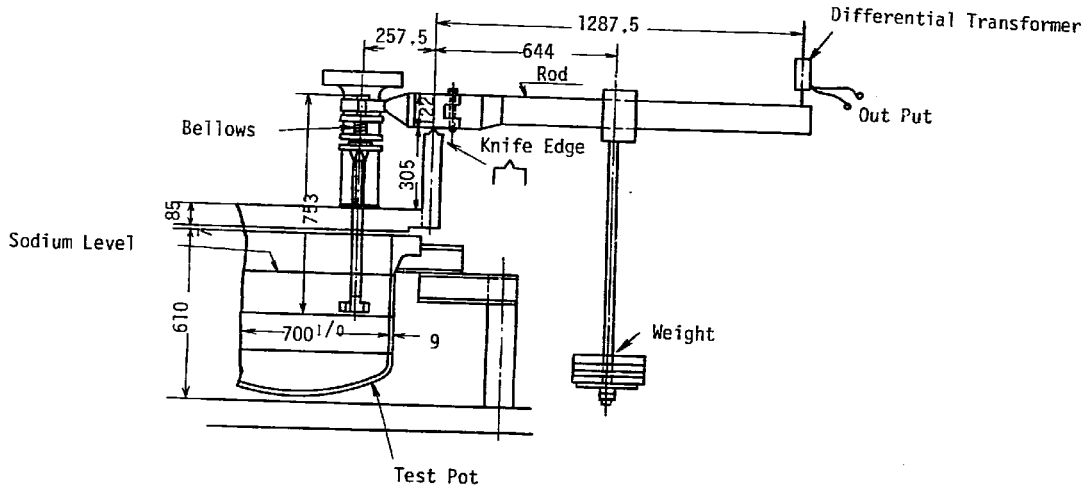


Fig. 4 Load Equipment

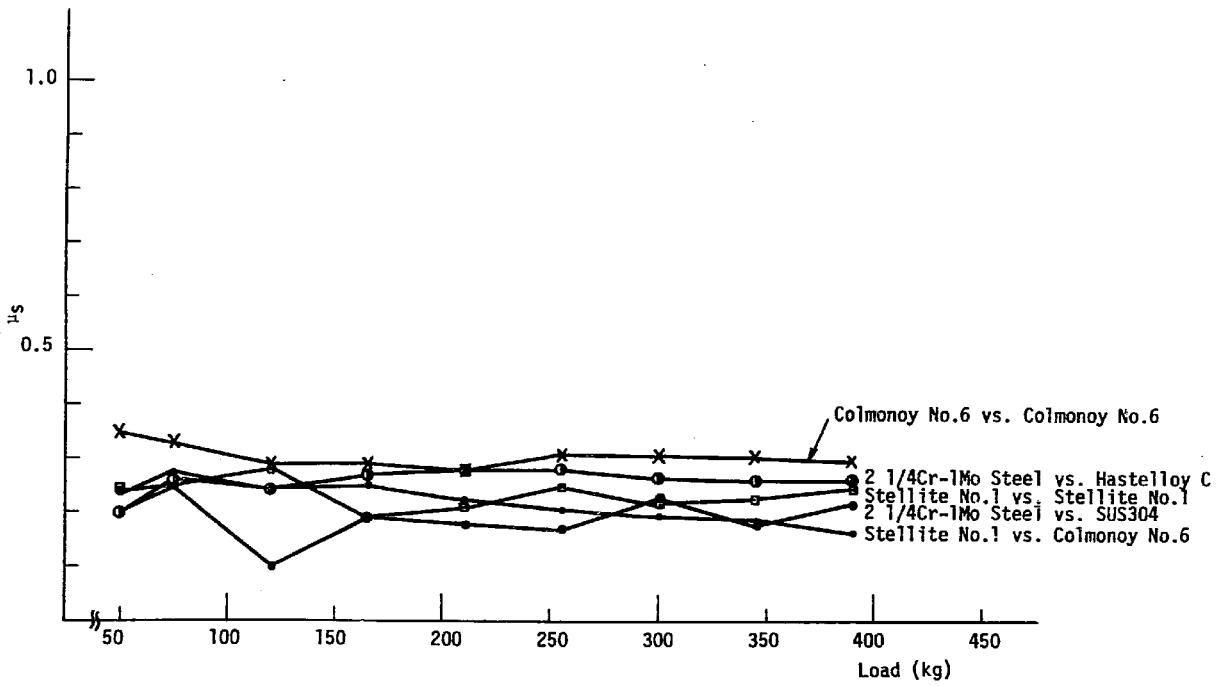


Fig. 5  $\mu_s$  vs. Load at 280°C

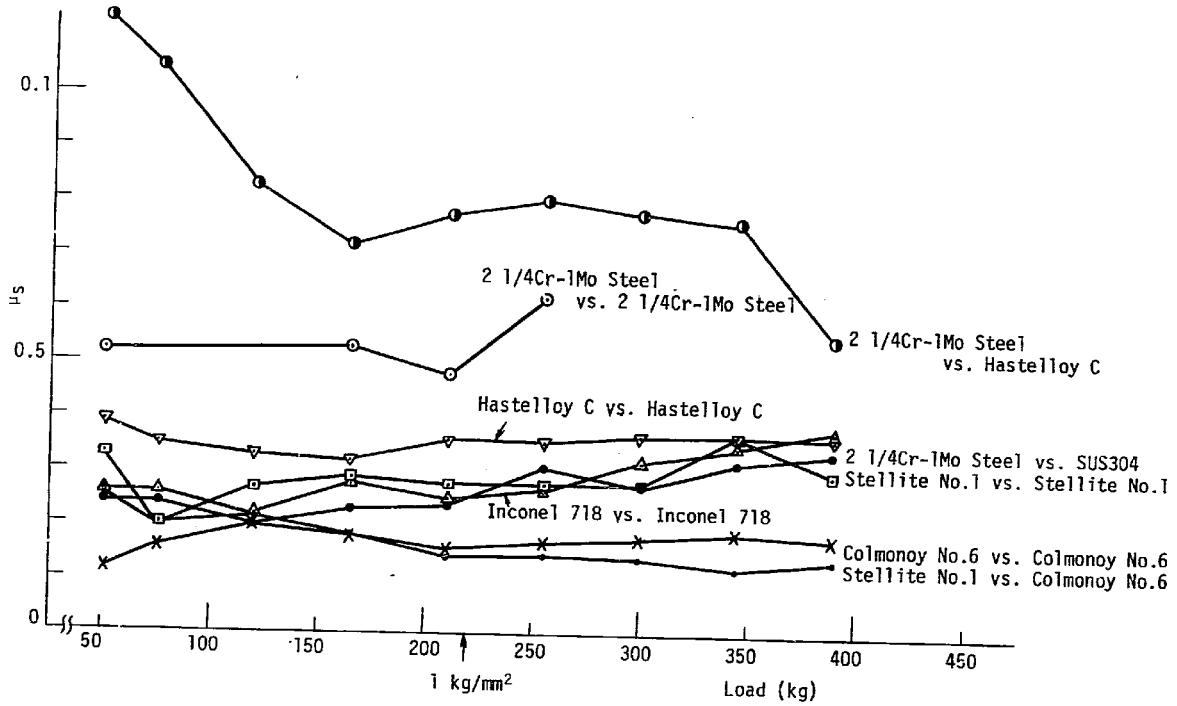


Fig. 6  $\mu_s$  vs. Load at 450°C

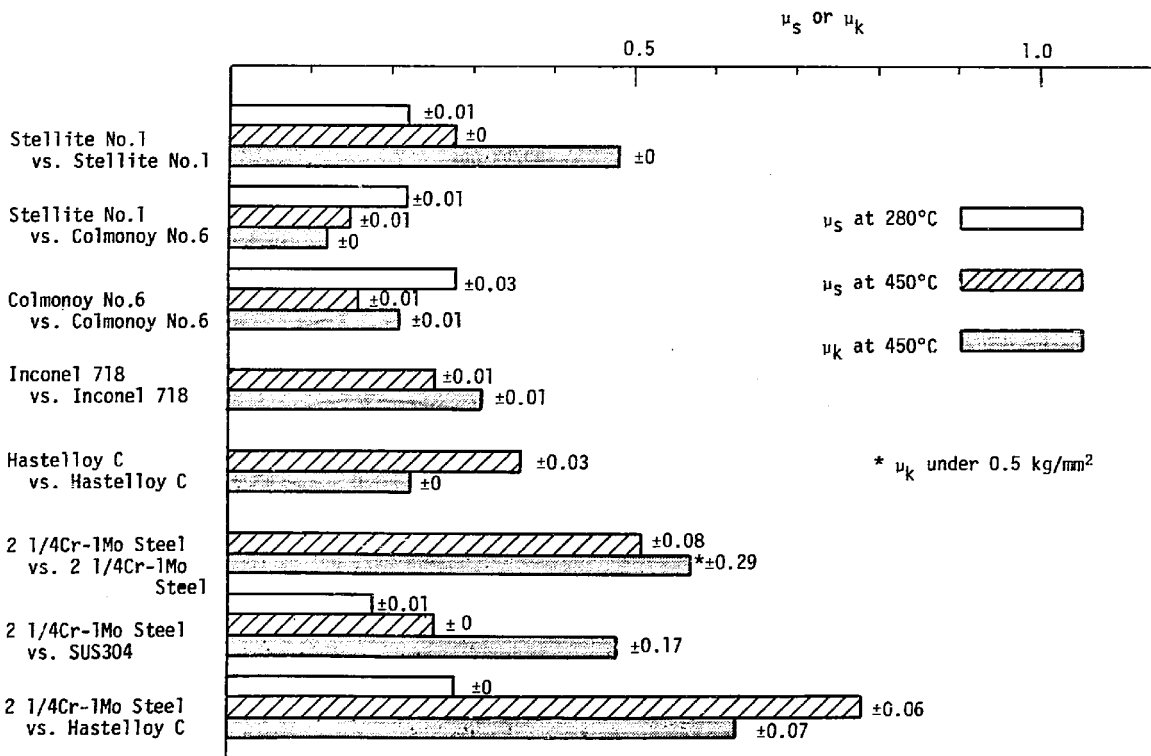
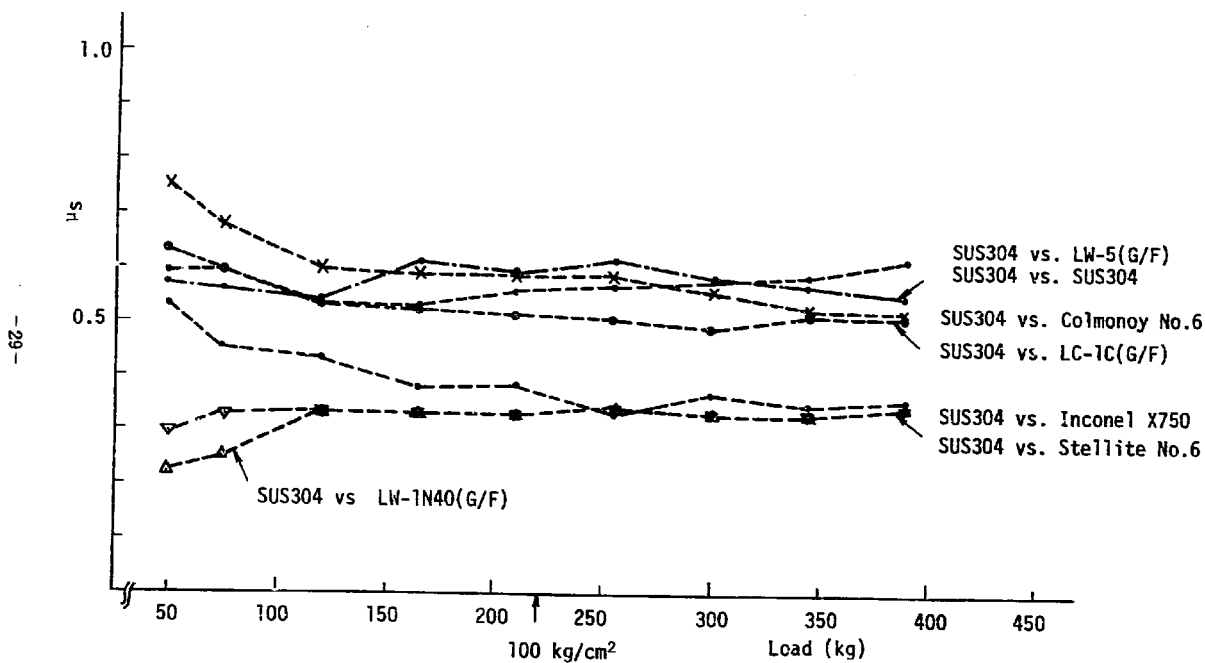
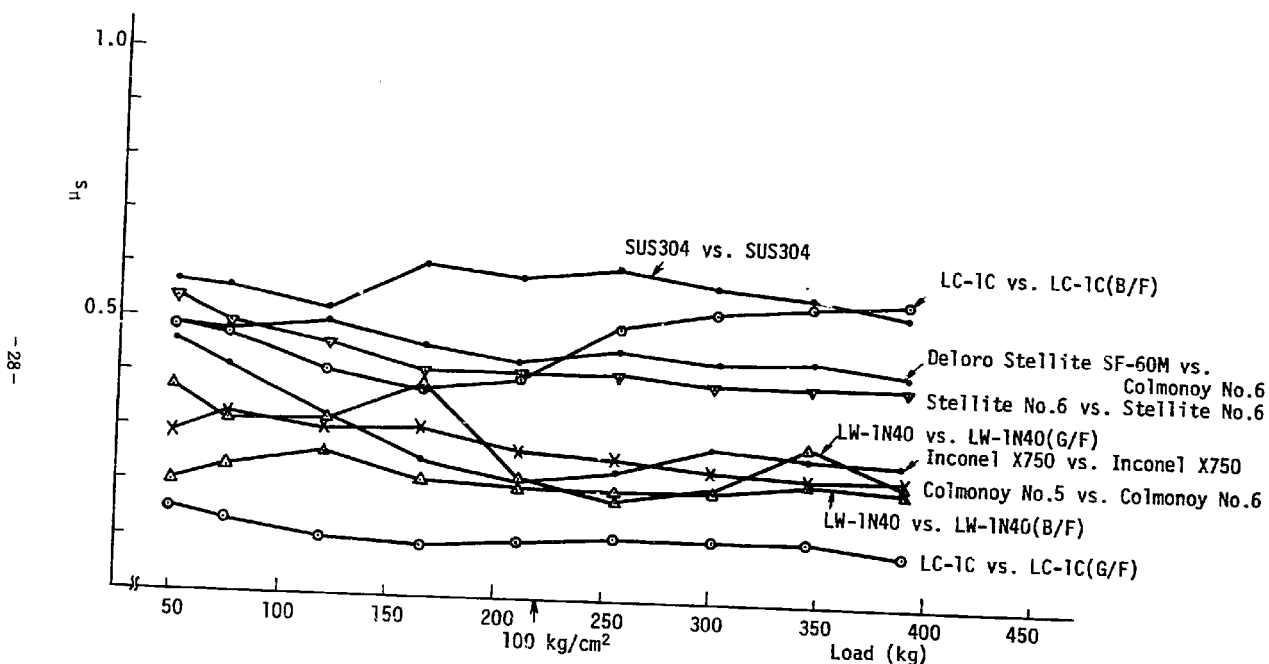


Fig. 7  $\mu_s$  and  $\mu_k$  under 1 kg/mm<sup>2</sup>



-30-

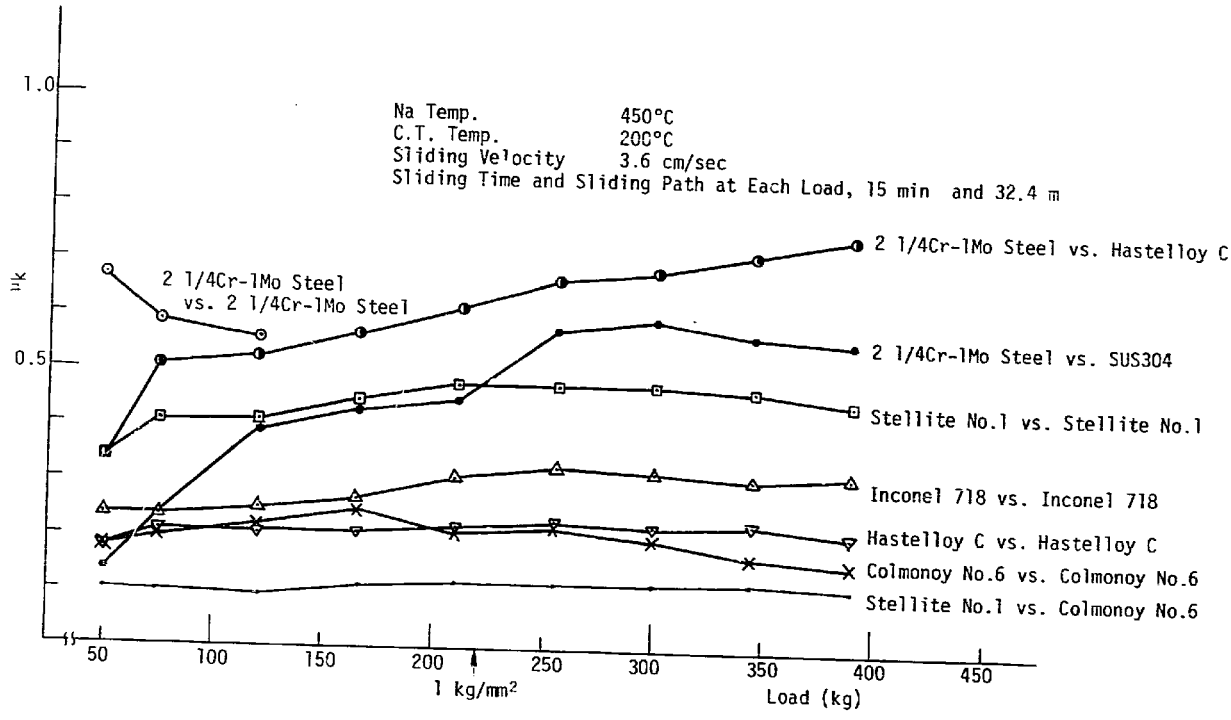


Fig. 10  $\mu_k$  vs. Load

-31-

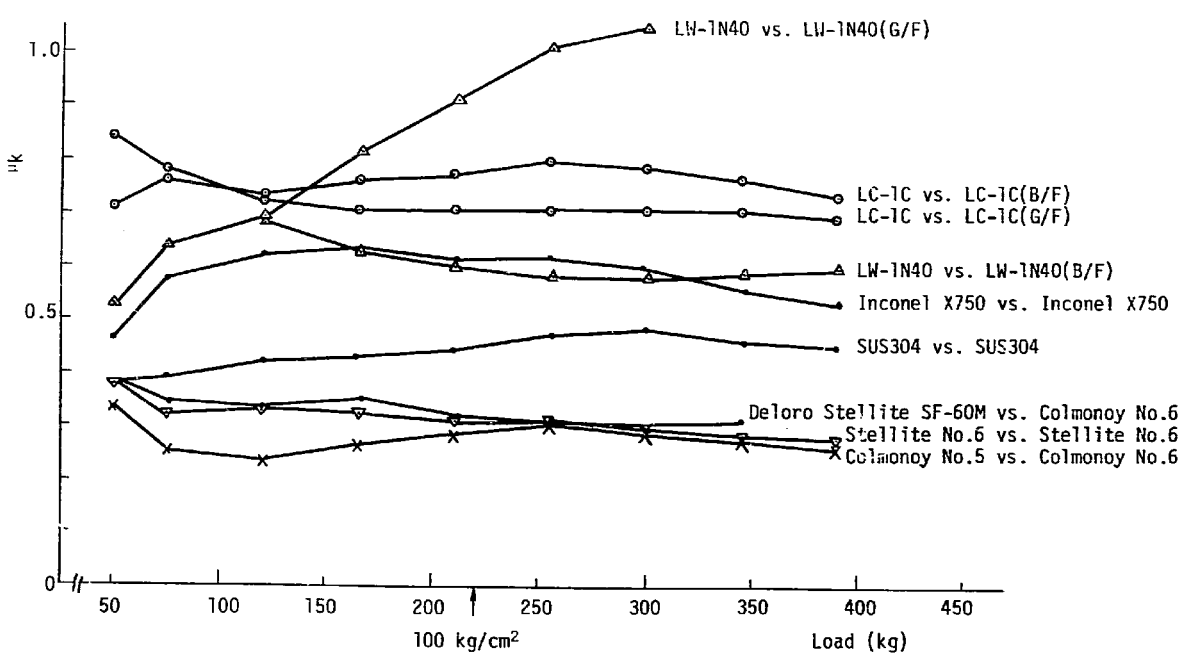


Fig.11  $\mu_k$  vs. Load (Borrowed from the Preceding Report<sup>(3)</sup>)

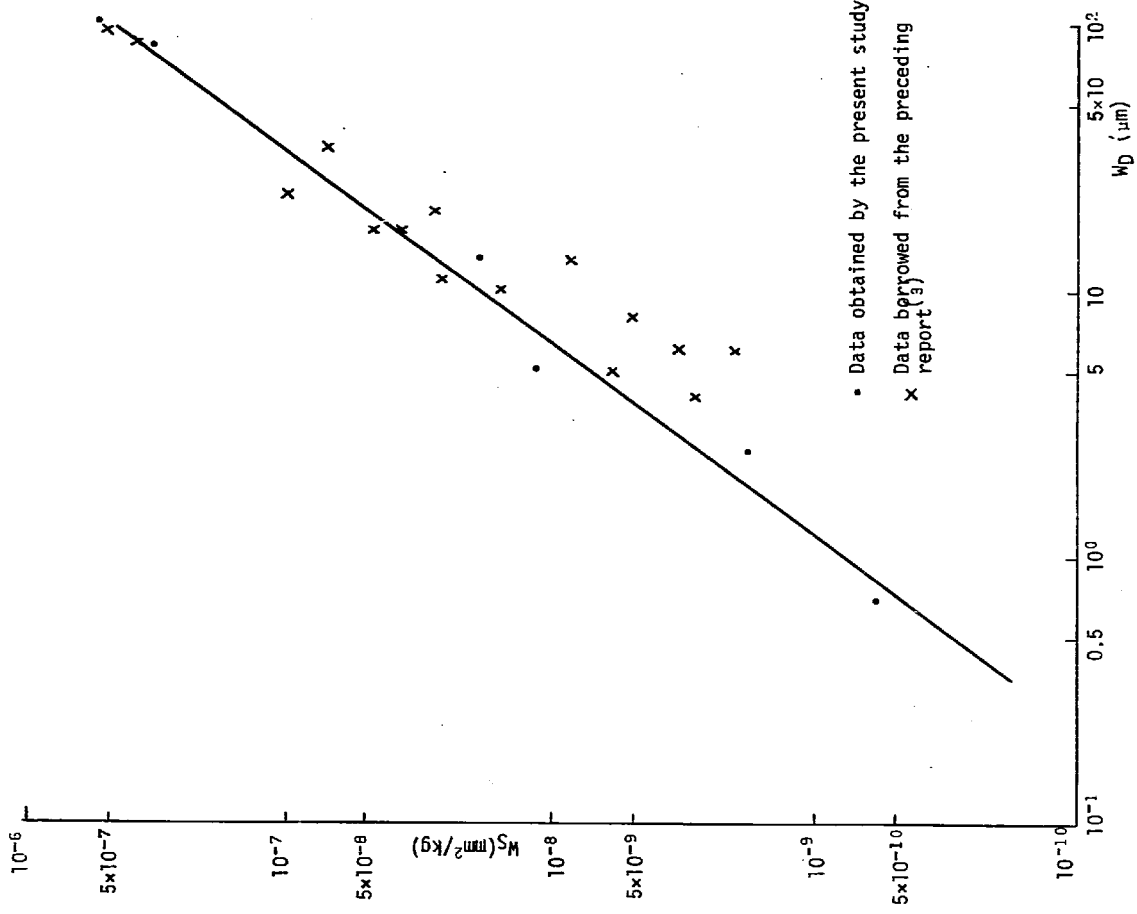


Fig. 13  $M_S$  vs.  $W_D$  Relating to Stator

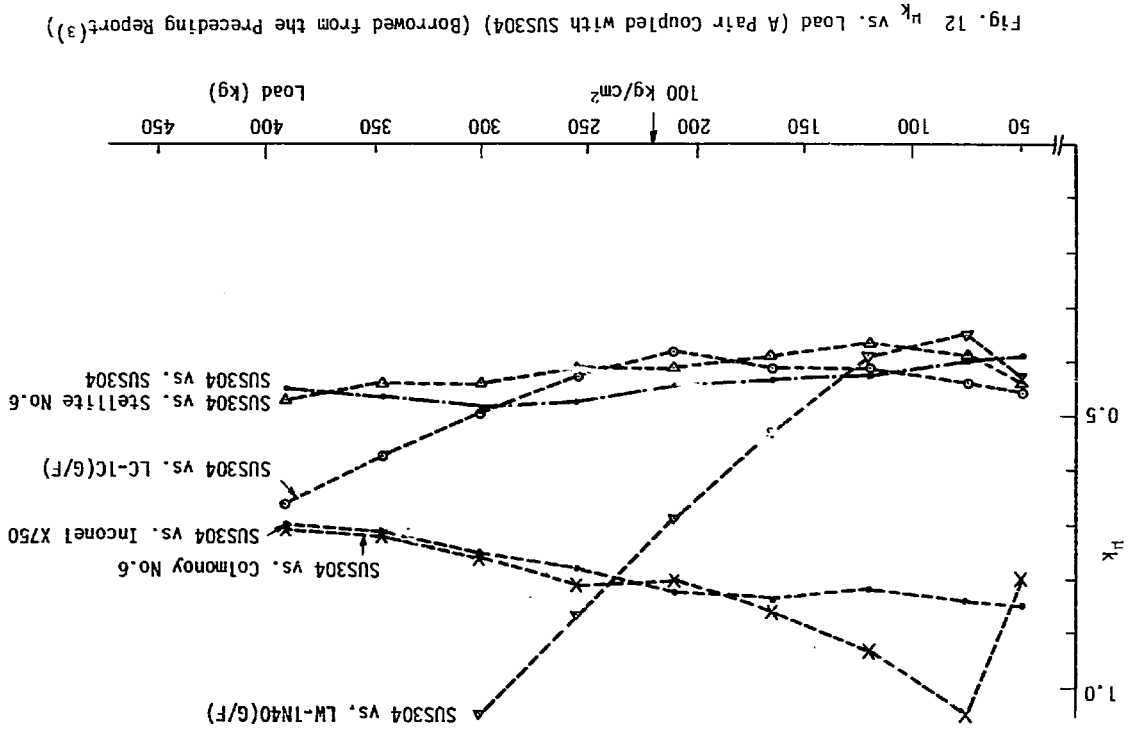
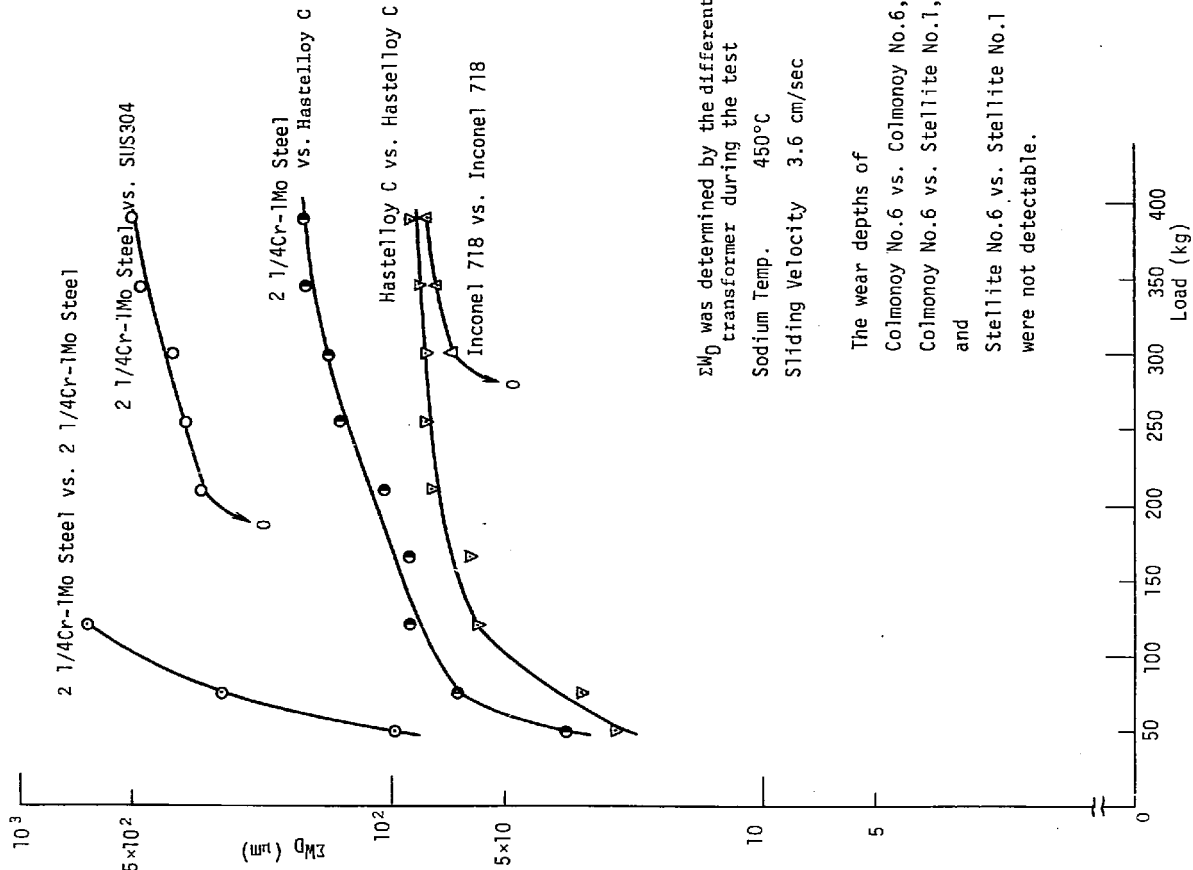


Fig. 12  $\mu_k$  vs. Load (A Pair Coupled with SUS304) (Borrowed from the Preceding Report(3))



$\Delta W_d$  was determined by the differential transformer during the test  
 Sodium Temp. 450°C  
 Sliding Velocity 3.6 cm/sec

The wear depths of  
 Colmonoy No.6 vs. Colmonoy No.6,  
 Colmonoy No.6 vs. Stellite No.1,  
 and  
 Stellite No.6 vs. Stellite No.1  
 were not detectable.

Fig. 14(A)  $\Delta W_d$  vs. Load Relating to Materials Described in the Present Report.

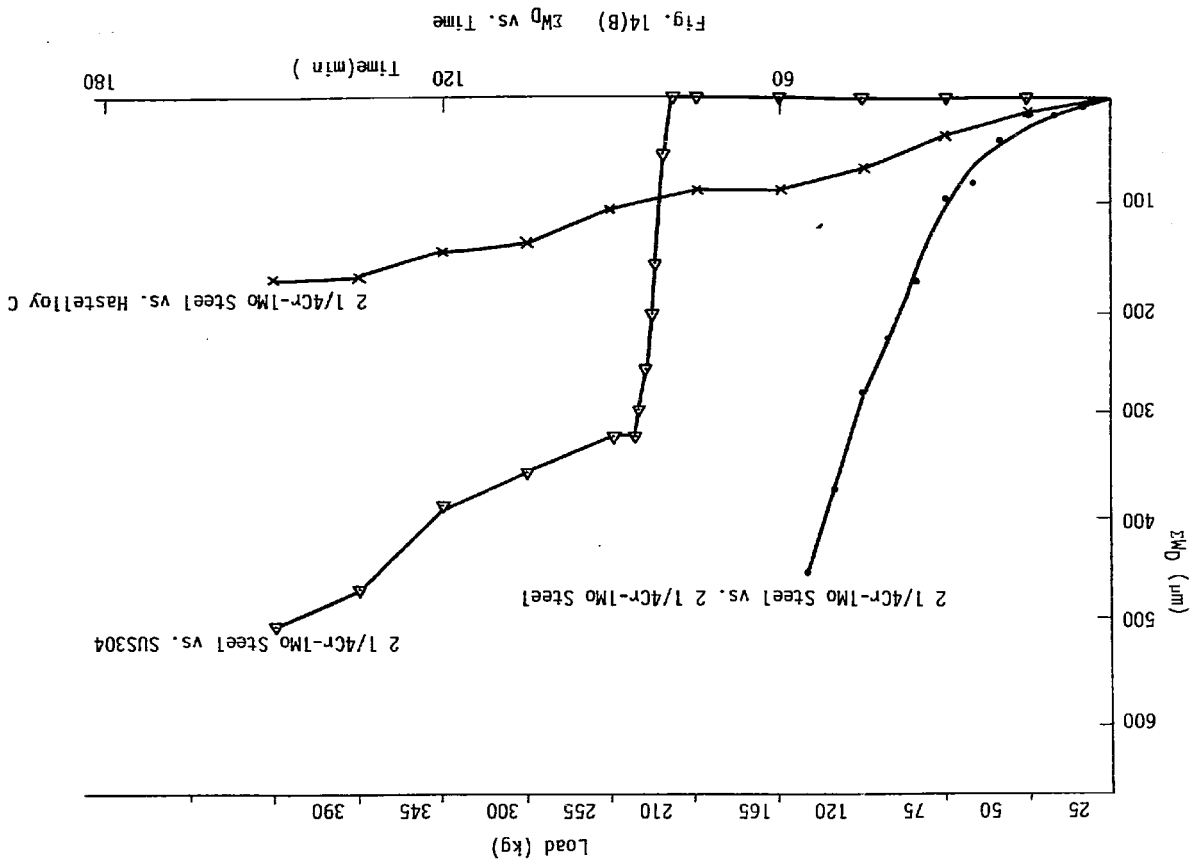


Fig. 14(B)  $\Delta W_d$  vs. Time

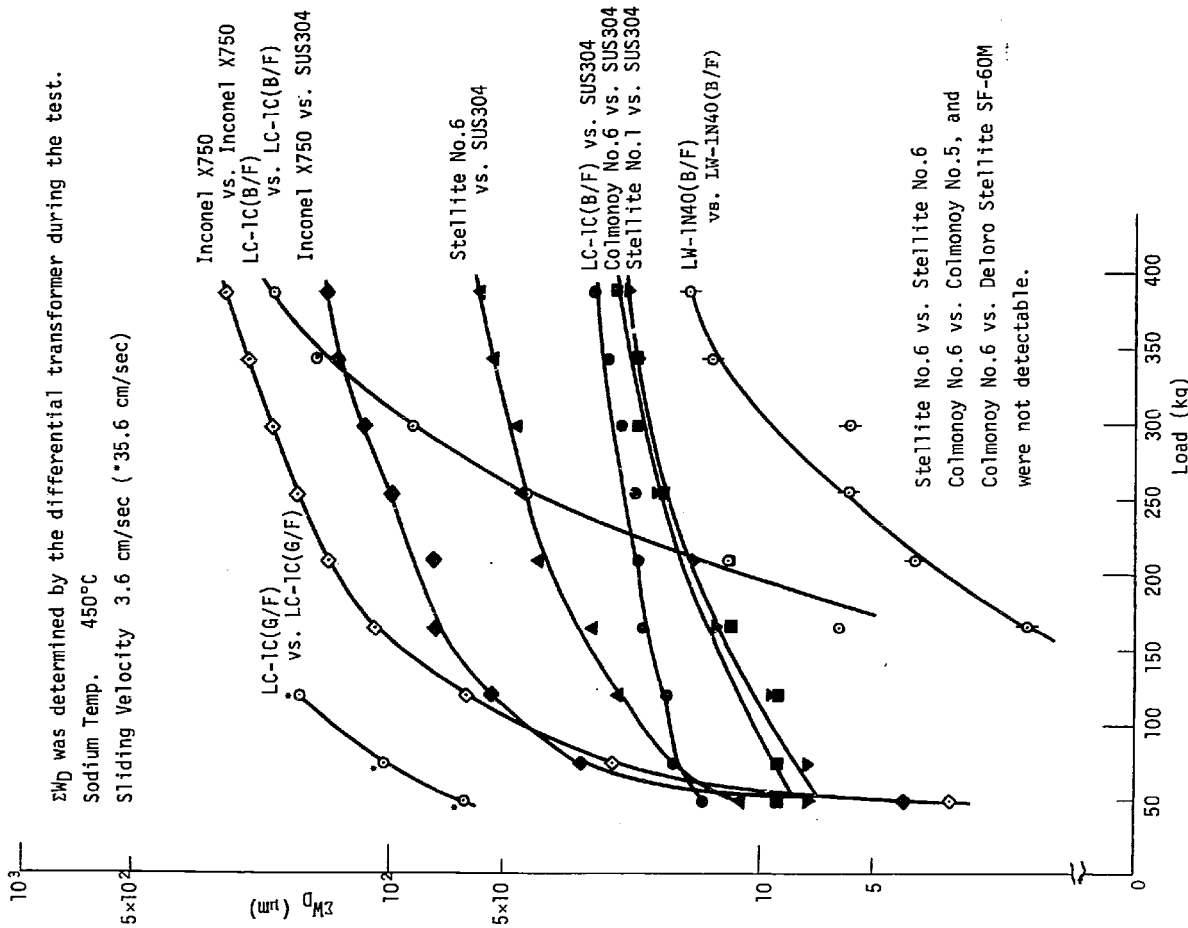


Fig. 15  $\Sigma W_D$  vs. Load Relating to Materials Described in the Preceding Report(2),(3)

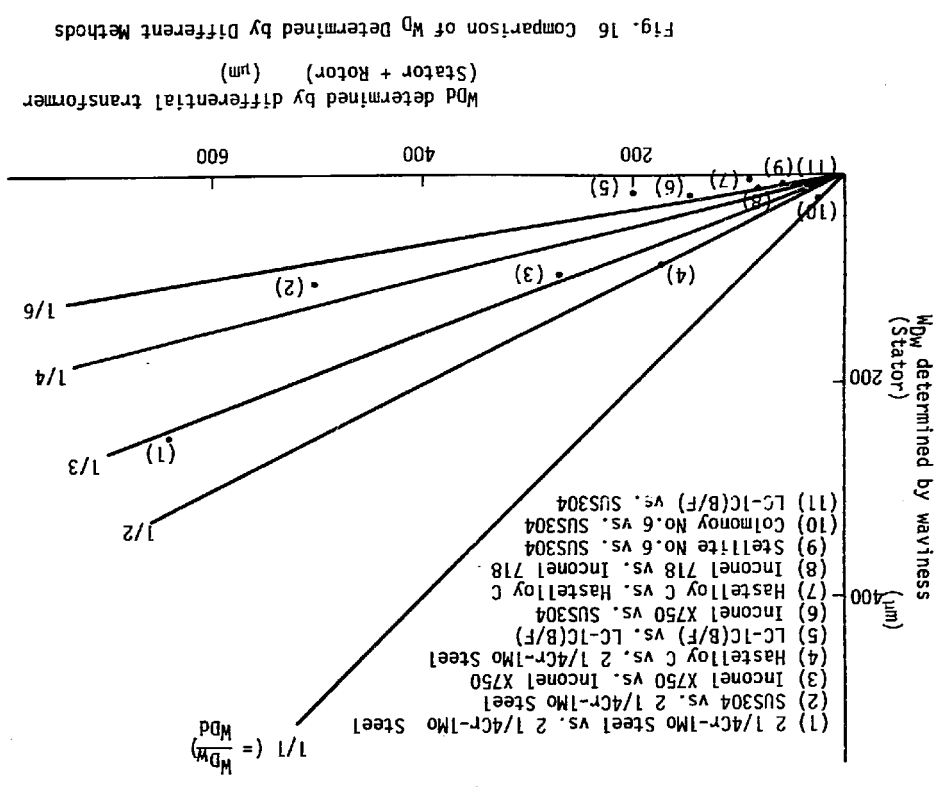
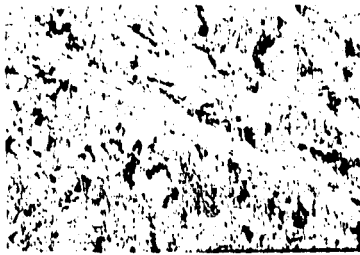


Fig. 16 Comparison of  $W_D$  Determined by Different Methods



Stellite No.1



x100



x400

Etched by Aqua Regia

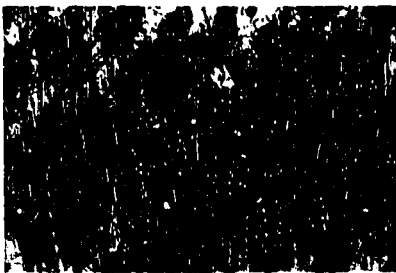
Colmonoy No.6



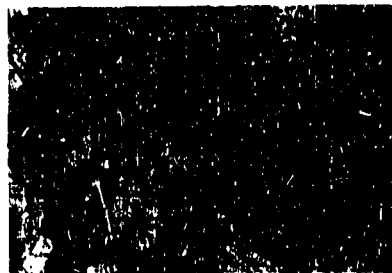
x100

Etched by Aqua Regia

Inconel 718



x100



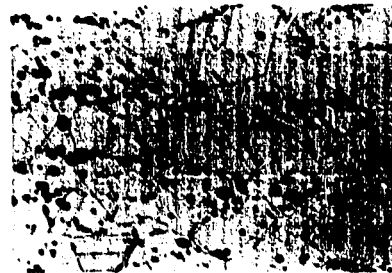
x200

Etched by  $\text{CuCl}_2$ +  
Mixed Acid

Hastelloy C



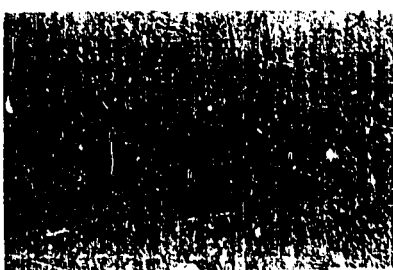
x100



x200

Etched by  $\text{CuCl}_2$ +  
Mixed Acid

2 1/4Cr-1Mo Steel



x100

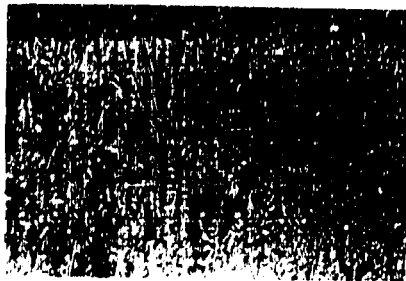


x200

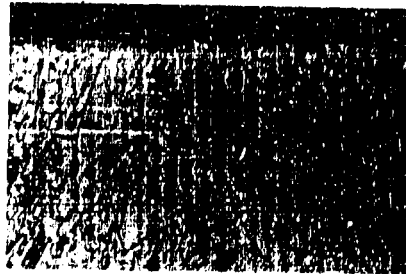
Etched by 10%  
Nital

Photo. 1 Cross-Sectional Micrographs of Test Pieces as Received

(A) vs. Stellite No.1



x100

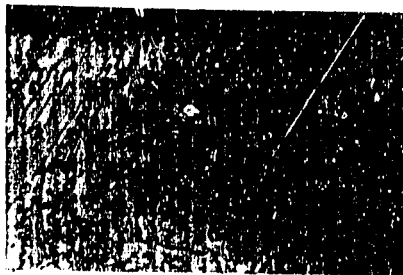


x200

(B) vs. Colmonoy No.6



x100



x200

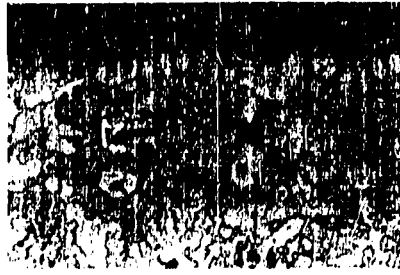
3.6 cm/sec  
max. 390 kg

Photo. 2 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No. 1

(A) vs. Colmonoy No.6

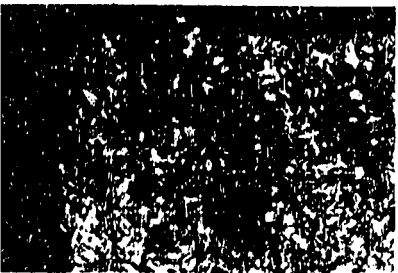


x100



x200

(B) vs. Stellite No.1



x100



x200

3.6 cm/sec, max. 390 kg

Photo. 3 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.6

vs. Inconel 718, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



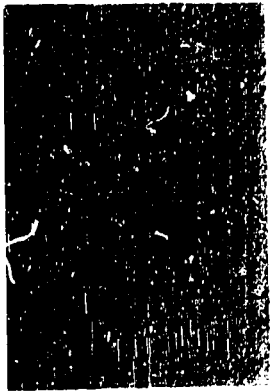
x100



x200

Photo. 4 Cross-Sectional Micrographs of Inconel 718

(A) vs. Hastelloy C, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



x100

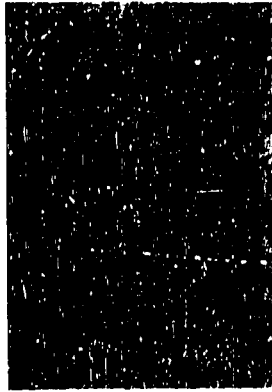


x200

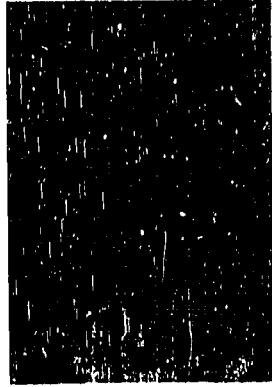
(B) vs. 2 1/4Cr-1Mo Steel, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



x100

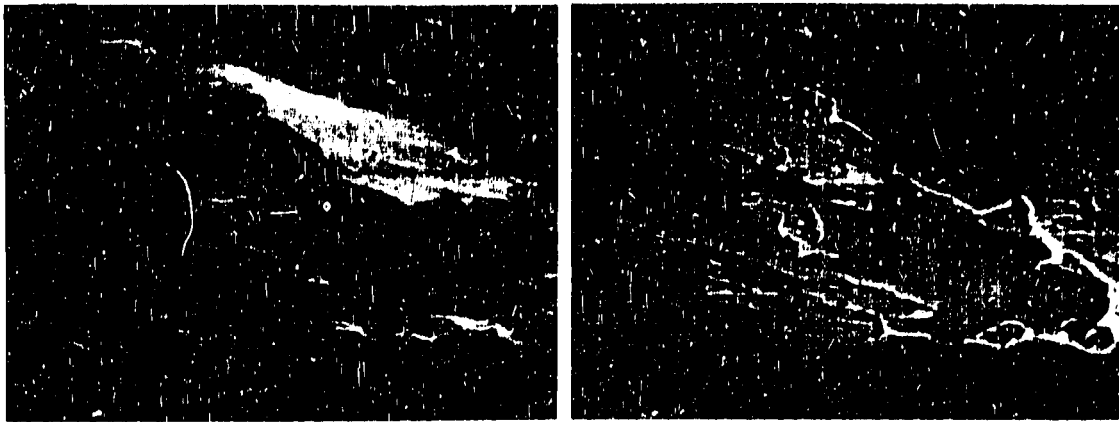


x200



x400

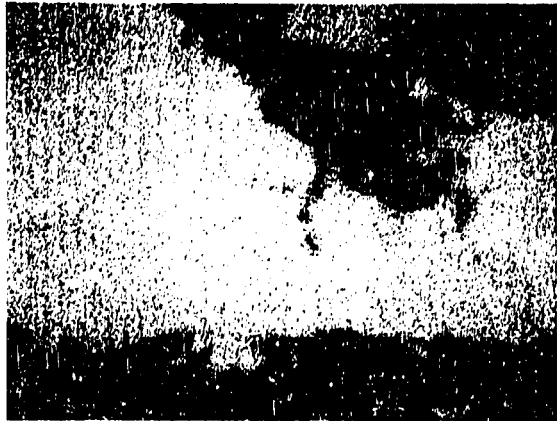
Photo. 5 Cross-Sectional Micrographs of Hastelloy C



Sliding Surface to be Analyzed

Reflected Electron Image

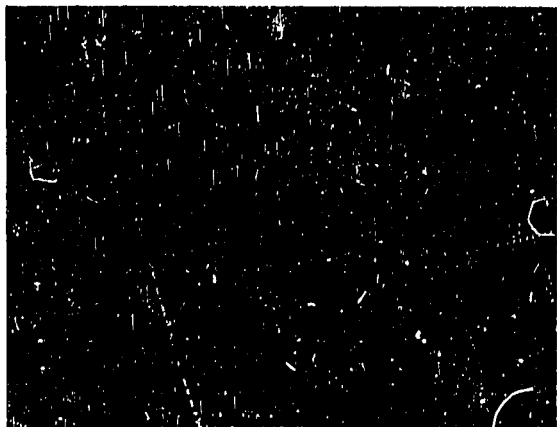
Absorbed Electron Image



Fe



Ni



W

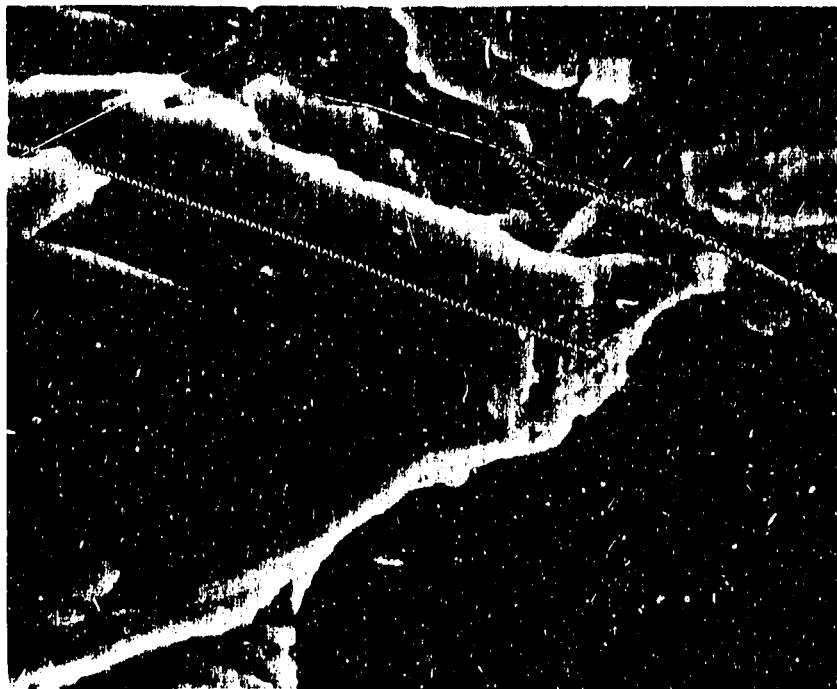
vs. 2 1/4Cr-1Mo Steel

150  $\mu$ m

Photo. 6 Electron Probe Microanalysis of Hastelloy C



×1000



3.6 cm/sec

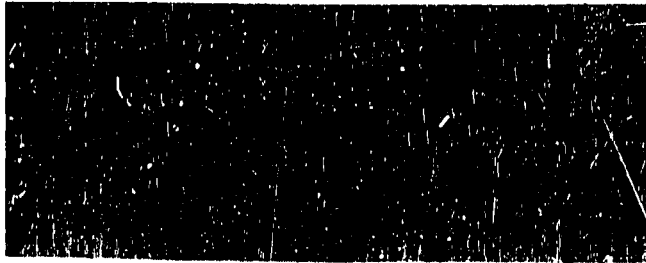
Max. 390 kg

vs. 2 1/4 Cr-1Mo  
Steel

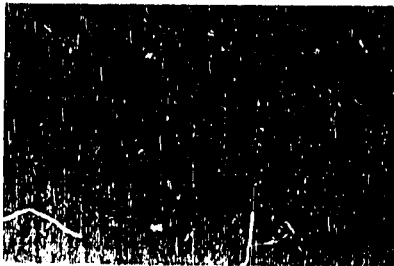
×3000

Photo. 7 Scanning Electron Probe Microscopy of Hastelloy C

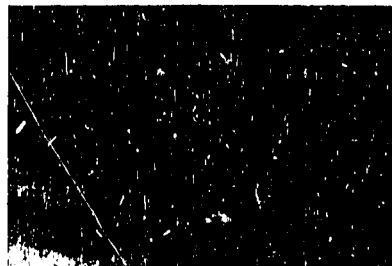
(A) vs. 2 1/4Cr-1Mo Steel, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



x50

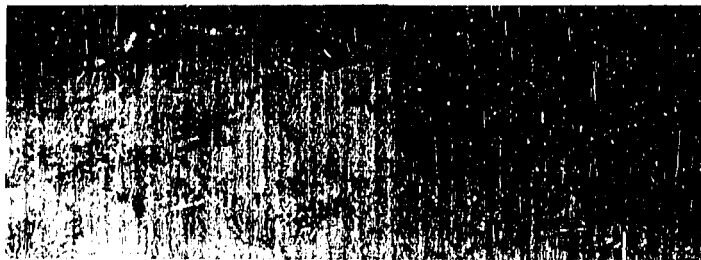


x100

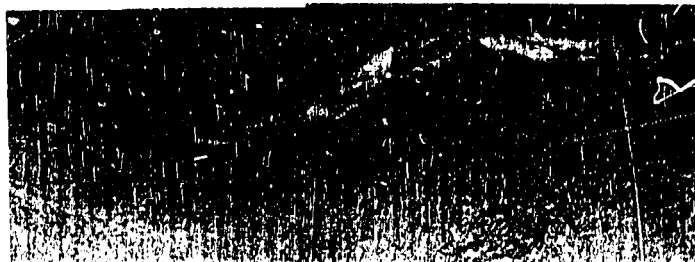


x200

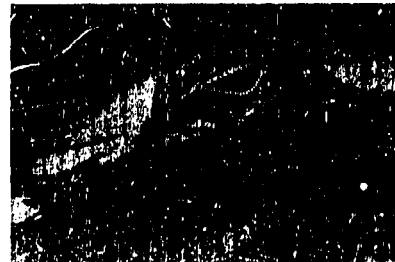
(B) vs. SUS 304, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



x50

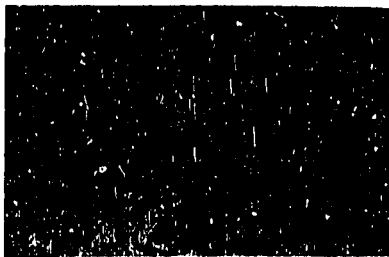


x100

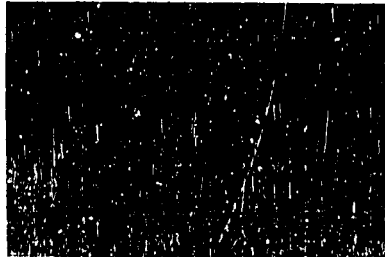


x200

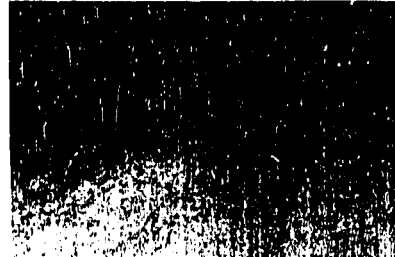
(C) vs. Hastelloy C, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



x50



x100



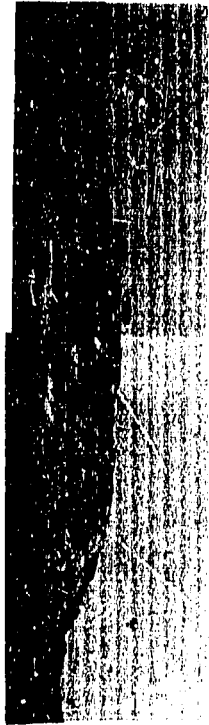
x200

Photo. 8 Cross-Sectional Micrographs of 2 1/4 Cr-1Mo Steel

vs. 2 1/4Cr-1Mo Steel, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



x50, Etched with Aqua Regia

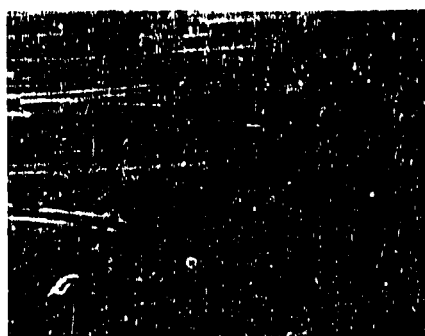


x200, Etched with 10% Nital

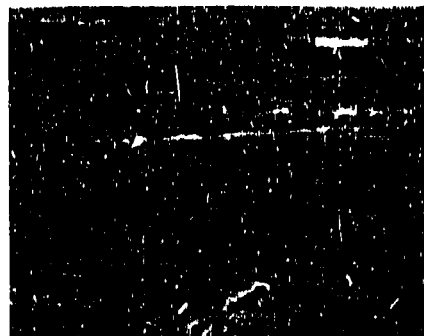
Photo. 9 Cross-Sectional Micrographs of SUS 304



(A) as Received

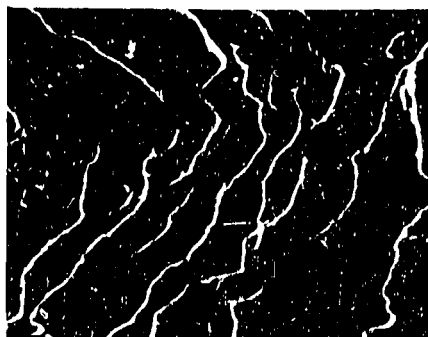


$\times 500$

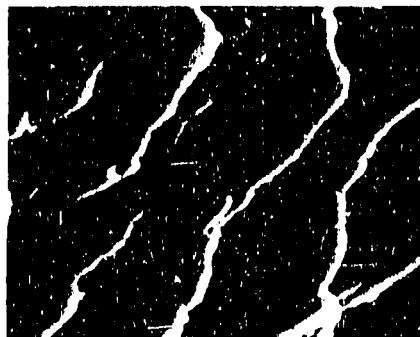


$\times 1500$

(B) vs. 2 1/4Cr-1Mo Steel, 3.6 cm/sec, max. 390 kg

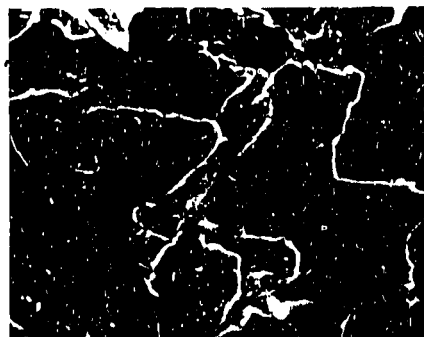


$\times 500$

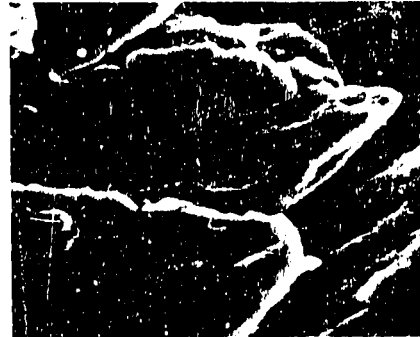


$\times 1500$

(C) vs. SUS 304, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



$\times 500$

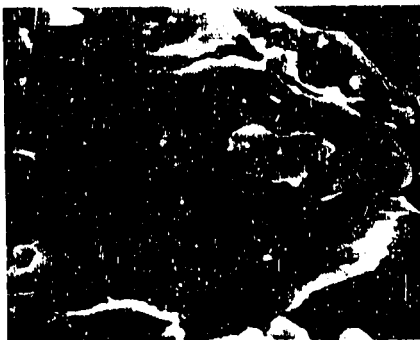


$\times 1500$

(D) vs. Hastelloy C, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



$\times 500$

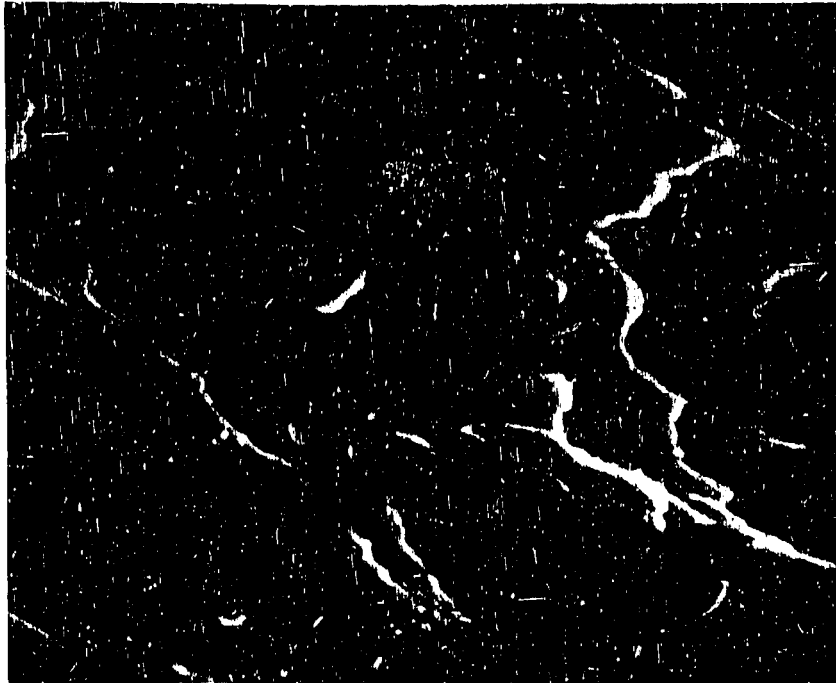


$\times 1500$

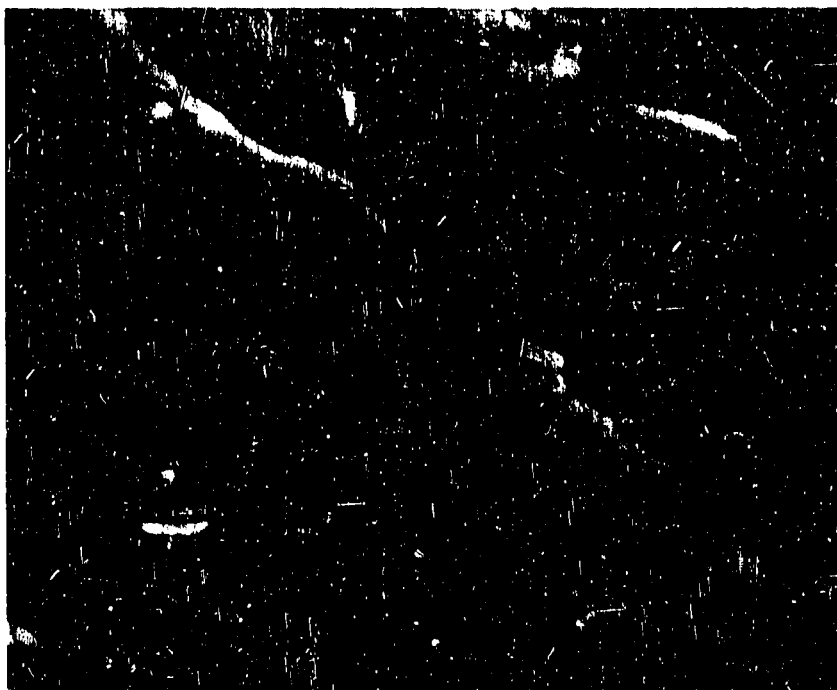
Photo. 10 Scanning Electron Probe Microscopy of 2 1/4Cr-1Mo Steel

PNC TN941 75-73

vs. 2 1/4Cr-1Mo Steel, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



x1000



x3000

Photo. 11 Scanning Electron Probe Microscopy of SUS 304

(A) vs. SUS 304, 3.6 cm/sec, max. 390 kg

(B) vs. SUS 304, 3.6 cm/sec, max. 390 kg

(C) vs. Hastelloy C, 3.6 cm/sec, max. 390 kg



Sliding Surface to be Analyzed

Sliding Cross-Section to be Analyzed

Sliding Surface to be Analyzed

Reflected Electron Image

Absorbed Electron Image

Ni

Ni

Ni

Cr

Mo

Cr

Mo

Fe

Ni

150 μm

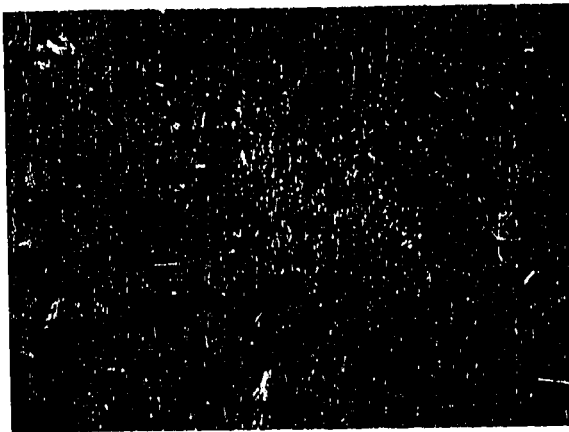
Photo. 12 Electron Probe Microanalysis of 2 1/4Cr-1Mo Steel



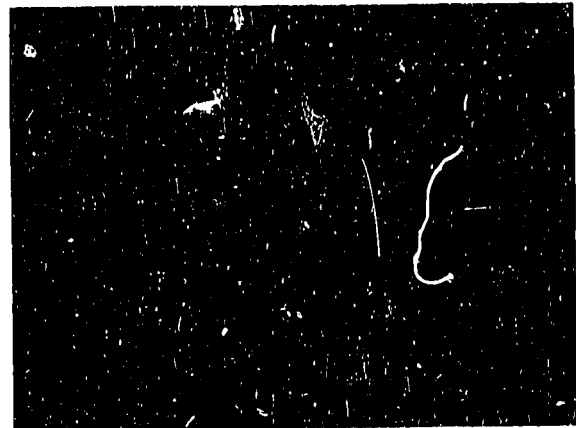
Sliding Surface to be Analyzed



Ni



Cr



Mo

150  $\mu$ m

vs. 2 1/4Cr-1Mo Steel, 3.6 cm/sec  
max. 390 kg

Photo. 13 Electron Probe Microanalysis of SUS 304