銅めっき応力測定法に関する基礎的研究*
(変動応力下におけるすべり帯発生)

泉 沢 正 郎**, 長 瀬 康 男**

A Fundamental Study on the Copper Electroplating
Method of Stress Analysis
(Occurrence of Slip-Bands in Plating Foil under Variable Stresses)

by Masaro IZUMISAWA and Yasuo NAGASE

In this paper, fundamental experiments are carried out to examine the occurrence of slip-bands (flecks) in copper electroplating foil under variable stresses. The following conclusions are drawn: (1) Miner's rule holds for the occurrence of slip-bands under two-level single block stressing; (2) The appearance of slip-bands is dominated by the amplitude of the primary stressing; (3) When different kinds of stresses act continuously on the plating foil, cumulative fatigue damage that causes the slip-initiation and the grain growth in the foil is not dominated by Miner's rule; (4) Both overstressing and understressing reduce the heating duration for the recrystallization of the copper plating foil and then promote the occurrence of slip-bands.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Copper Electroplating Method, Fatigue, Variable Stress, Miner's Rule

1. 緒 言

銅めっき応力測定法⁽¹⁾は、銅めっき層に発生するすべり帯⁽²⁾(はん点)や成長粒子^{*1}が素地表面に働く繰返し応力の大きさと繰返し数に支配されることを利用して、作動中の機械要素に生ずる表面応力を高い精度で測定しようとする手法である。この方法では、めっき層にすべり帯が発生し始める限界応力 σ_p と限界繰返し数 N との関係曲線を求めておき、これをめっき層の較正值として実際の測定に应用する。したがって、使用するめっき層に関しては、 N を指定すれば σ_p が、また σ_p を指定すれば N がそれぞれ一義的に定まることになる。しかるに、作動時の機械要素に作用する応力振幅は一定ではなく、むしろ変動する場合が多い。このような場合には、銅めっき法による測定では振幅の異なる個々の応力を区別して検出することが困難である。しかし、銅めっき層のすべり帯は繰返しひずみの蓄積の結果として発生する性質を持つから、銅めっき層を変動応力下で使用すれば、変動応力の作用がもたらす繰返しひずみの蓄積効果をすべり帯の発生

現象に置き換えて捕えることができ、これに基づいて素地表面に生ずる負荷の累積の程度や負荷の履歴を推定することが可能になるものと考えられる。このためには、変動応力下で銅めっき層に発生するすべり帯や成長粒子の基礎的性質について詳細な知見が必要であるが、この点に関しては大久保⁽³⁾、進士ら⁽⁴⁾による研究のほかにはほとんど見当たらない。

以上の観点から、本研究では変動応力下で銅めっき層に発生するすべり帯の基礎的性質を明らかにすることを目的とし、二段二重重複荷重下において銅めっき層のすべり帯発生限界応力 σ_p を求めて検討を行った。すなわち、二段二重重複荷重下におけるすべり帯の発生に関して、曲げ応力が重複する場合および曲げとねじりの異種応力が重複する場合のマイナー則の成否、過大および過小応力の影響などについて調査した。さらに、種々の繰返し負荷を与えためっき層に対して、予加熱による再結晶の開始時間の差異を測定して、蓄積された疲労被害の度合とすべり帯発生との関連について簡単に検討を加えた。

* 昭和59年10月16日 第62期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和60年7月23日。

** 正員、静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。

*1 繰返し応力を受ける銅めっき層の粒子の中に成長を始めるものが現れ、繰返し数の増加につれて次第に大きな粒子に成長する。この成長した粒子(成長粒子)がめっき表面に達すると成長粒子内に発生する疲労すべり帯がはん点として観察される。

2. 実験方法

2.1 試験機および試験片 試験機には、小野式回転曲げ疲労試験機(60 Hz, 98 N・m)およびシェンク式繰返しねじり疲労試験機(30 Hz, 78 N・m)を使用した。試験片の素材には炭素工具鋼SK-3の丸棒(φ19 mm)を使用し、図1に示す形状・寸法のテーパ付き校正試験片に加工した。

2.2 銅めっきはくの製作および限界応力の測定

銅めっきはくは、バフ研摩により鏡面仕上げを行ったステンレス鋼板を素地とし、これに硫酸銅浴を用いた一層の酸性銅めっきを施した後、板からはがして製作した。ただし、めっき浴の組成、めっき方法などは従来の研究⁽²⁾と同様とした。このめっきはくを3×20 mmの長方形に細分し、図1の試験片のテーパ部の対称位

図1 テーパ付き校正試験片の形状・寸法
(すべり帯発生限界位置までの距離)

図2 σ_p - N 曲線

置に軸に沿って2枚接着して、室温において回転曲げまたは繰返しねじり試験を実施し、すべり帯発生限界応力 σ_p を求めた。ただし、めっきはくは初期電着面がすべり帯の観察面となるように裏向きに接着し、接着方法、限界応力の測定方法などは従来の研究⁽²⁾と同様であり、すべり帯および成長粒子の観察には100倍の光学顕微鏡を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 二段二重重複荷重下におけるすべり帯発生

まず、図1(a)に示す試験片を用いて一定荷重下で回転曲げ試験を行い、銅めっきはくのすべり帯および成長粒子発生に対する σ_p - N 曲線を求めた。その結果を図2に示す。次に、図1(a)のテーパ試験片を用い、清家らの研究⁽⁵⁾と同様な手法を採用して、図3(a), (b)に示すように4種類の負荷形式について、回転曲げによる二段二重重複荷重試験を行った。すなわち、1次応力を n_1 回、2次応力を n_2 回繰返してテーパ部のめっきはくに発生したすべり帯を観察した。すべり帯の発生状態は連続的に変化する試験片直径の大きさに応じて変化しているので、すべり帯がちょうど発生し始める限界の位置を測定して、この位置に作用した1次および2次応力の値を定め、さらに、これらに基づいて図2の σ_p - N 曲線から1次および2次応力の繰返し数比 n_1/N_1 , n_2/N_2 を求めた。応力減少および

(a) 負荷形式I

(b) 負荷形式II

図3 二段二重重複荷重試験(回転曲げ)

増加の場合の測定結果, および累積繰返し数比を表 1 に示した。応力減少および増加の両場合とも累積繰返し数比はほぼ 1 となり, すべり帯の発生にはマイナー則がほぼ成立する。また, 表 1 には $n_1/N_1=0.06 \sim 0.76$ の範囲の結果を示したが, 図 2 から明らかなように, すべり帯発生に対する成長粒子発生限界繰返し数比は 0.4~0.5 の範囲にあるから, この表は 1 次応力下ですべり帯発生限界位置に成長粒子が発生する場合と発生しない場合の結果を合わせて示している。したがって, 二段二重重複荷重下では, 1 次応力下において限界位置に成長粒子が発生するか否かにか

かわらず, すべり帯の発生がマイナー則をほぼ満足することがわかる。

図 4 には, 一定応力下におけるすべり帯の発生状況を示したが, 作用応力はいずれも限界応力よりも約 10% ほど高い値である。また, 図 5 には, 二段二重重複荷重下で発生したすべり帯の一例を示したが, いずれも限界位置に作用した応力値よりも約 10% 高い応力下で現れたものである。図 5 (a) の場合には, 表 1 を参照すれば, 応力減少および増加のいずれも $n_1/N_1 > 0.5$ であるから, 図に示したすべり帯の位置には 1 次応力下で成長粒子が発生したものと推定される。一

表 1 二段二重重複荷重下におけるすべり帯発生に対する累積繰返し数比

(a) 応力減少

No.	σ_1	n_1	n_1/N_1	σ_2	n_2	n_2/N_2	$\Sigma(n_i/N_i)$
1	202	5.0×10^5	0.52	168	2.0×10^6	0.56	1.08
2	200	"	0.49	166	"	0.51	1.00
3	203	"	0.53	174	1.3×10^6	0.48	1.01
4	208	"	0.62	178	"	0.57	1.19
5	198	"	0.46	158	2.5×10^6	0.45	0.91
6	200	"	0.49	160	"	0.49	0.98
7	192	8.0×10^5	0.63	160	1.2×10^6	0.23	0.86
8	199	"	0.76	166	"	0.30	1.06
9	184	3.5×10^5	0.19	159	3.9×10^6	0.70	0.89
10	192	"	0.27	162	"	0.78	1.05
11	196	1.8×10^5	0.13	171	2.9×10^6	0.92	1.05
12	192	1.6×10^5	0.11	167	"	0.73	0.84
13	221	5.3×10^4	0.09	191	1.0×10^6	0.74	0.83
14	228	3.0×10^4	0.06	202	"	1.02	1.08
15	232	2.5×10^4	0.06	202	"	1.02	1.08
Average value							0.99

(b) 応力増加

No.	σ_1	n_1	n_1/N_1	σ_2	n_2	n_2/N_2	$\Sigma(n_i/N_i)$
1	159	3.0×10^6	0.55	200	5.7×10^5	0.57	1.12
2	159	"	0.55	191	6.7×10^5	0.50	1.05
3	162	"	0.64	211	3.5×10^5	0.47	1.11
4	162	"	0.64	211	"	0.47	1.11
5	162	"	0.64	200	5.0×10^5	0.49	1.13
6	162	"	0.64	201	3.5×10^5	0.35	0.99
7	158	"	0.53	196	"	0.30	0.83
8	160	"	0.57	196	4.4×10^5	0.38	0.95
9	164	"	0.68	201	"	0.45	1.13
10	153	3.8×10^6	0.53	176	1.2×10^6	0.50	1.03
11	179	6.6×10^5	0.30	204	7.4×10^5	0.82	1.12
12	193	1.6×10^5	0.13	228	3.7×10^5	0.74	0.87
13	167	2.4×10^5	0.13	195	9.2×10^5	0.77	0.90
14	166	2.1×10^5	0.11	195	9.5×10^5	0.79	0.90
15	176	1.5×10^5	0.06	207	8.5×10^5	1.00	1.06
Average value							1.02

(a) $N=5 \times 10^5$, $\sigma=237$ MPa

(b) $N=3 \times 10^6$, $\sigma=194$ MPa

(c) $N=1 \times 10^7$, $\sigma=168$ MPa

図 4 一定応力下におけるすべり帯発生状況 (矢印は軸方向)

(A) 応力減少
試験片 No. 3
 $\sigma_1=219$ MPa,
 $\sigma_2=188$ MPa

(B) 応力増加
試験片 No. 9
 $\sigma_1=188$ MPa,
 $\sigma_2=230$ MPa

(a) 負荷形式 I

(A) 応力減少
試験片 No. 15
 $\sigma_1=259$ MPa,
 $\sigma_2=226$ MPa

(B) 応力増加
試験片 No. 15
 $\sigma_1=191$ MPa,
 $\sigma_2=225$ MPa

(b) 負荷形式 II

図 5 二段二重重複荷重下におけるすべり帯発生状況 (矢印は軸方向)

方、図5(b)の場合には、いずれも n_1/N_1 が極めて小さいから、1次応力下で成長粒子が発生しなかったものと考えられる。しかしながら、図5(a)、(b)から明らかなように、1次応力下における成長粒子発生の有無にかかわらず、応力減少に比較して応力増加のほうが個々のすべり帯が大きく現れ、その個数は減少する傾向が認められる。一方、図4に示したように一定応力下では作用応力が小さいほど個々のすべり帯は大きく現れ、その個数が減少する傾向が認められる。図5を図4と比較すれば、1次応力の大きさが小さい場合、すなわち応力増加のほうがすべり帯は大きく現れているから、二段二重重複荷重下におけるすべり帯の発生状況は、1次応力下における成長粒子発生の有無にかかわらず、1次応力の大きさの影響を受けることがわかる。

3.2 異種応力の作用下におけるすべり帯発生

二段二重重複荷重試験において、1次応力として回転曲げによる引張り・圧縮応力、2次応力として繰返しねじりによるせん断応力をめっきはくを与えた場合、およびこの反対の順序で繰返し応力を与えた場合について、すべり帯発生に対するマイナー則の成否を検討した。すなわち、図1(b)の試験片を用いて前節と同様な手順ですべり帯発生の限界位置を測定し、回転曲げおよび繰返しねじりに対する σ_p-N 曲線を用いて累積繰返し数比を求めた。表2に測定結果を示す。1次応力の繰返し数比は $n_1/N_1=0.33\sim0.88$ の範囲にあるから、前節でも述べたように、この表には1次応力下においてすべり帯発生の限界位置に成長粒子が既

発生の場合と未発生の場合の結果が合わせて示してある。そこで、1次応力下で限界位置に成長粒子が発生するかが累積繰返し数比に与える影響を明確にするため、すべり帯の代わりに成長粒子の発生に基づいて同様の調査を行い、この結果を表3に示した。表2および表3のいずれにおいても、負荷順序に関係なく累積繰返し数比がほぼ等しくなる。これは、1次応力下において限界位置に成長粒子が発生するかどうかにかかわらず、異種応力が継続して作用する場合の累積繰返し数比が変化しないことを示す。すなわち表2において対象としたすべり帯は、2次応力下で発生し成長した成長粒子に現れたものといえる。また、表2および表3から明らかなように、 $\Sigma(n_i/N_i)>1$ であるから、異種応力が連続して作用する場合にはめっきはくの疲労被害が線形則を満足しないこと； $n_2/N_2<1$ であるから、1次応力は2次応力下のすべり帯および成長粒子の発生に若干の寄与をしていることがわかる。これは、本実験の回転曲げと繰返しねじりでは、すべり変形を起こす最大せん断応力の作用面および作用方向が相違していることが要因と考えられる。なお、限界位置近傍に発生したすべり帯は2次応力下の最大せん断応力方向に細長く伸びる方向性を有し、これが2次応力に支配されて発生したことを示しているのに対し、限界位置近傍の成長粒子は微細であって明確な方向性は認められなかった。

3.3 すべり帯発生に及ぼす過小および過大応力効果

図2に示したように、銅めっき層の σ_p-N 曲線は一般に N の増加につれて傾斜がゆるやかになる。

表2 二段二重重複荷重(異種応力)下におけるすべり帯発生に対する累積繰返し数比

(a) 繰返しねじり→回転曲げ

No.	τ_1	n_1	n_1/N_1	σ_2	n_2	n_2/N_2	$\Sigma(n_i/N_i)$
1	74	1.1×10^6	0.68	172	1.0×10^6	0.56	1.24
2	79	"	0.88	182	"	0.74	1.62
3	74	1.0×10^6	0.63	185	"	0.80	1.43
4	72	"	0.53	182	1.1×10^6	0.74	1.27
5	76	"	0.67	177	"	0.65	1.32
6	71	"	0.50	190	1.0×10^6	0.91	1.41
7	70	"	0.45	187	"	0.83	1.28
Average value							1.37

(b) 回転曲げ→繰返しねじり

No.	σ_1	n_1	n_1/N_1	τ_2	n_2	n_2/N_2	$\Sigma(n_i/N_i)$
1	183	1.0×10^6	0.76	75	1.0×10^6	0.67	1.43
2	187	"	0.83	78	"	0.77	1.60
3	157	"	0.33	78	"	0.77	1.10
4	160	"	0.36	80	"	0.83	1.19
5	186	"	0.83	82	"	0.93	1.76
6	177	"	0.63	75	"	0.67	1.30
Average value							1.40

表3 二段二重重複荷重(異種応力)下における成長粒子に対する累積繰返し数比

(a) 繰返しねじり→回転曲げ

No.	τ_1	n_1	n_1/N_1	σ_2	n_2	n_2/N_2	$\Sigma(n_i/N_i)$
1	83	5.0×10^5	0.71	191	5.0×10^5	0.68	1.39
2	82	"	0.69	188	"	0.63	1.32
3	84	"	0.74	191	"	0.68	1.42
4	85	"	0.78	185	"	0.56	1.34
5	82	"	0.69	191	"	0.68	1.37
Average value							1.37

(b) 回転曲げ→繰返しねじり

No.	σ_1	n_1	n_1/N_1	τ_2	n_2	n_2/N_2	$\Sigma(n_i/N_i)$
1	197	5.0×10^5	0.83	85	5.0×10^5	0.78	1.61
2	191	"	0.68	84	"	0.74	1.42
3	188	"	0.63	80	"	0.63	1.26
4	194	"	0.76	87	"	0.89	1.65
5	198	"	0.85	83	"	0.71	1.56
Average value							1.50

本実験では $N=10^7$ の応力繰返しを与えてもすべり帯が発生しない応力を過小応力と呼ぶことにし、回転曲げにより過小応力を $N=10^7$ 回負荷しためっきはくについてすべり帯発生限界応力 σ_p を求めた。ここで、過小応力は $N=10^7$ における成長粒子発生限界応力 ($\sigma_{pg}=135$ MPa) よりも小さい応力 $\sigma_1=125$ MPa を採用したが、これは限界応力 σ_p の測定時に発生した成長粒子に生ずるすべり帯を観察しようとしたからである。図6には、測定結果を○印で示した。図中の実線は図2に示しためっきはくの σ_p - N 曲線であるが、実験結果はいずれもこの曲線の左側にあり、あらかじめ過小応力を負荷するとすべり帯の発生が促進されることがわかる。そこで、過小応力 σ_1 の大きさを種々変えて一定繰返し数 $N=10^6$ における σ_p を求め、 σ_p に影響を及ぼす限界の σ_1 を調査した。その結果を図7に示す。図示のように、 σ_1 が小さい場合には σ_p はほとんど低下しないが、 $\sigma_1 > 100$ MPa になると σ_1 の増加とともに σ_p の低下が著しくなる。したがって、過小応力の値が限界応力の70%以上になると、過小応力の作用によってめっきはくに疲労被害が蓄積されて、成長粒

図6 すべり帯発生に及ぼす過小応力効果

図7 限界応力に及ぼす過小応力の影響

子発生核生成および粒子成長が起こり、すべり帯の発生を促進する過小応力効果が現れるといえる。

次に、初めに過大応力 $\sigma_1 \approx 197$ MPa を成長粒子が発生しない繰返し数 $N=5 \times 10^5$ だけ与えた後、 σ_{pg} 以下の過小応力を $N=10^7$ 回負荷したとき、過大応力によってめっきはくに生じた疲労被害のため、過小応力の下ですべり帯が発生するかどうかを調査した。表4には、このようにして求めた $N=10^7$ における σ_p を示す。図2に示すように、1次応力を与えない場合には $\sigma_p=147$ MPa であるから、1次過大応力を受けると過小応力の下でも成長粒子およびすべり帯の発生が促進されるものといえる。

3.4 疲労被害と再結晶開始の加熱時間との関係

限界応力の測定から、めっきはくに過大応力、過小応力を多数回与えると疲労被害が蓄積されることが明らかになった。本節では、種々の繰返し応力を受けためっきはくを一定温度に加熱して、再結晶が発生するまでの加熱時間の変化を測定し、はくに蓄積された疲労被害の度合を確かめた。すなわち、めっき直後のはく、回転曲げにより過大応力および過小応力をそれぞれ多数回受けたはくを 100°C の沸騰水の中で加熱し、100倍の光学顕微鏡で再結晶発生の有無を観察して⁽⁶⁾、再結晶が開始する加熱時間を求めた。表5に測定結果を示す。ここに、あらかじめ与えた繰返し応力は、それぞれの繰返し数における成長粒子発生限界応力よりもわずかに低い値とした。表5に示すように、あらか

表4 1次過大応力が限界応力に及ぼす影響 ($\sigma_1 \approx 197$ MPa, $N=5 \times 10^5$)

No.	σ_p MPa at $N=10^7$
1	125
2	122
3	117
4	119
5	121
6	130
Average value	
122	

表5 繰返し応力による再結晶開始の加熱時間の変化 (100°C)

Primary stress		Heating time for recrystallization min
Non-stressed		10 ~ 20
Over-stressed	$\sigma = 208$ MPa $N = 4.3 \times 10^5$	less than 5
	$\sigma = 146$ MPa $N = 4.0 \times 10^6$	less than 5
Under-stressed	$\sigma = 132$ MPa $N = 1.0 \times 10^7$	5 ~ 10

じめ繰返し応力を与えると、再結晶に要する加熱時間は明らかに短くなっている。これは前節で述べた過大および過小応力の作用が成長粒子発生の促進、すなわち、すべり帯発生の促進に効果を持つことの裏付けとなっているものといえる。繰返し予応力によってめっきはくが受けた疲労被害は、いずれも成長粒子発生の直前の状態に達していたが、過大応力を短時間加えた場合に比較して、過小応力を長時間加えた場合のほうが、再結晶開始に要する加熱時間の短縮率が若干小さくなる傾向が認められる。

4. 結 言

変動応力下で銅めっきはくに発生するすべり帯の基礎的性質を明らかにすることを目的とし、二段二重重複荷重下のすべり帯発生の限界応力 σ_p を求めて、マイナー則の成否、過大および過小応力の影響などについて検討を行った。得られた結果を要約すれば以下のようになる。

(1) 二段二重重複荷重下のすべり帯発生に対しては、応力増加・減少および繰返し数比の大小に関係なく、マイナー則がほぼ成立することが確かめられた。この場合に、すべり帯の発生状態は、応力増加および

減少の両場合とも、主として1次応力の大きさに依存する。

(2) 曲げとねじりの異種応力が継続して作用する場合には、すべり帯および成長粒子の発生をもたらす疲労被害に関しては、マイナー則が適用できない。

(3) 過大または過小応力を与えると、その後の応力の繰返しによるすべり帯の発生が促進されるが、これは過大または過小応力の作用によってめっきはくの再結晶開始に要する加熱時間が短縮することからも十分推定できる。

終わりに、本研究を進めるに当たり銅めっきはくの製作について種々ご便宜をいただいた名古屋大学工学部 清家政一郎教授に厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) Okubo, H., *Memoirs Fac. Engng., Nagoya Univ.*, 20-1 (1968), 1.
- (2) 清家・ほか3名, 機論, 48-427, A (昭57), 291.
- (3) 文献(1)の27ページ.
- (4) 進士・国井, 機論, 43-370 (昭52), 2116.
- (5) 清家・ほか2名, 機論, 45-390, A (昭54), 126.
- (6) 清家・北岡, 機論, 50-452, A (昭59), 813.