鉄鋼の疲労強度に及ぼす Ni メッキの影響*

砂 田 久 吉**

The Effect of Nickel Plating on Fatigue Strength of Steel

by

Hisakichi SUNADA

(Himeji Institute of Technology, Himeji)

It is well known that the fatigue strength of machine parts is generally reduced by electroplating. This paper describes the summary of the data of fatigue strength for nickel plated steels obtained recently. The main results are as follows :

- (1) When carbon steel is nickel plated, the fatigue strength decreases as the current density or the thickness of plating increases.
- (2) The baking treatment at 200~550°C after plating causes the reduction in the hardness of plating, but does not affect the fatigue strength.
- (3) The corrosion fatigue strength in 3% NaCl solution is slightly smaller than in air. Nickel plating gives only a little protective effect under the repeated stress condition, but prolongs the fatigue life of plated steel as compared with that of bare steel.
- (4) The fatigue strength of notched steel is also reduced by nickel plating, and the degree of loss can be estimated from the product of the individual reduction effects caused by plating and by notch.
- (5) The loss of fatigue strength of plated steel can be decreased by diffusion treatment at 700~850°C.
- (6) Shotpeening, either before or after nickel plating, increases the fatigue strength considerably.

These results suggest that the main cause for fatigue strength loss by nickel plating is not the internal stress nor absorbed hydrogen in the plated layer, but the low fatigue strength of the plated layer itself. The fatigue crack tends to form easily in plated layer, and acts as the source of stress concentration for crack propagation into steel similar to the double notch effect.

(Received Mar. 16, 1973)

1 緒 言

鉄鋼材料の疲労強度はその表面状態によって影響を受けるため、これまで各種表面処理法の疲労強度に及ぼす効果について数多くの報告が行なわれてきている。これらの中でショットピーニング・高周波焼入れなどの表面硬化処理法は疲労強度を向上させる表面処理法であるため、その系統だった報告も多い。しかし溶射・メッキなどの表面処理法は一般に疲労強度を低下させる傾向があるため、その報告も少ない。

鉄鋼材料に用いられるメッキ処理法には電気メッキ、溶融メッキ、無電解メッキなどがあるが、機械部品には電気メッキがよく用いられている。また被覆金属には Cr, Ni, Al, Cd, Zn などが用いられている。こ

こでは電気メッキの影響を取りあげてみる。メッキの疲労強度に関する最初の報告は1930年の R. D. Barklie¹⁾らの Cr, Ni, Pb メッキの影響をとり扱ったものかと思う。その後航空機の発達に伴い、これら部品にメッキ処理が多く施されるようになり、次第に報告も数多くみられるようになる。これまでに公表されたデータよりメッキによる疲労強度の変化をメッキ条件(メッキ浴組成、陰極電流密度、メッキ厚さ、浴温など)を無視して、メッキしない鋼の疲労限を横軸に、メッキした鋼の疲労限を縦軸にとり両者の関係を図示すると Fig. 1 となる。図より一般にメッキによってその疲労限は低下する傾向があり、特に Ni メッキはその影響が大きいようである。あるいは低ヤング係数の金属を被覆するとその影響は少ないともいえよう。

このメッキによる鋼の疲労強度の低下理由について

* 原稿受理 昭和48年3月16日

** 正 会 員 姫路工業大学 姫路市書写

Fig. 1. Effect of plating on fatigue limit of steels.

はいまだ定量的には解明されていないのが現状であるが、巨視的には(1)内部応力、(2)水素ぜい化、(3)メッキ層の低強度、(4)メッキ層の表面効果(表面あらし、疲労き裂による切欠き効果)などの重量効果によるといわれている。

本報告では筆者がこれまでにやってきた炭素鋼の疲労強度に及ぼす Ni メッキの影響についてその試験結果をまとめたので報告する。試験材は市販の普通炭素鋼で、図表中炭素量は数字で、熱処理の区別は焼なまし材は A、焼入れ焼もどし材は QT と添字して行なった。メッキ浴は標準ワット氏浴($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 240 g/l, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 45 g/l, H_3BO_3 ; 30 g/l)を用いた。疲労強度は小野式回転曲げ疲労試験機により求めたものである。

2 メッキ条件の影響

メッキ材の疲労強度の大小はメッキ層の内部応力によってよく論じられている³⁾。一般にメッキ層の内部応力はメッキ条件によっても変化するが、巨視的には引張残留応力の存在する場合が多く、これが疲労強度の低下理由によくあげられてきている。

この内部応力の発生はメッキ層の成長機構とも密接な関係があり、(1) crystallite joining theory, (2) hydrogen theory, (3) change in foreign substance theory, (4) excess energy theory, (5) lattice defect theory などの種々の説があるが⁴⁾いまだ定説がない。

このように内部応力の発生はこれら因子の重量効果によるものであるが、特に発生水素量は電流密度によって、メッキ層の構造はメッキ厚さによって変化する。そしてこれら2因子の疲労強度に及ぼす影響は大きいといわれている。

2・1 陰極電流密度の影響⁵⁾

メッキの際の電流密度の大小によって陰極への Ni

Fig. 2. Relation between internal stress and current density

の析出量は変化し、その密度が少ないと析出量も少なく、組織は海绵状になり、その内部応力は変化する。Fig. 2は薄板の片面に抵抗線ひずみ計を貼り付け、裏面に Ni メッキを施した場合の薄板の弯曲ひずみより、その応力値と電流密度の関係を示したものである。これよりメッキ層内には引張残留応力が存在し、電流密度が大きくなるほどその値は大きくなる傾向がある。

Fig. 3はメッキ厚さ(60 μ)を一定にして電流密度と疲労限の関係を示したものである。これより電流密度の増加とともに疲労限は低下し、鋼の疲労限の大きいものほど Ni メッキによる低下率は大きくなっている。これは表面層の作用応力が負荷応力とメッキ層の内部応力の和で決まるので、その疲労強度は低下したと考えられる。しかし内部応力は繰返し応力によって低下することもあるので、これにのみその原因をもとめるのは早計であろう。

Fig. 3. Relation between fatigue limit and current density.

2・2 メッキ厚さの影響⁵⁾

電流密度(1 A/dm²)を一定としてメッキ厚さと疲労限の関係を示したのが Fig. 4 である。これで見るとメッキ厚さが厚くなるほど疲労限は低下し、メッキ厚さが 90 μ 以上で鋼の疲労限に関係なく一定値に近づいている。しかし鋼の疲労限が大きくなるほどメッキによる低下率は大きくなっている。

Fig. 4. Relation between fatigue limit and thickness of Ni plating.

一般にメッキ厚さが薄いと両金属の結晶構造、粒径、格子定数の差、電着金属の配向性などによる結晶配列の乱れによって微視的ひずみを増加させるため、その内部応力は大きくなるが、メッキ厚さが増してくるとその結晶配列も一様となるためその応力値は減少するといわれている。したがってメッキによる疲労限の低下理由をその内部応力のみで説明することは困難である。そこで他にその理由を求めるとメッキ層に生じた疲労損傷の素地(鋼)への影響が考えられる。

以上の試験結果より炭素鋼に Ni メッキを施すとその疲労強度が低下し、その程度は鋼の強度・メッキ条件などによって変化することが明らかになったので、以下のメッキ条件は陰極電流密度を 1 A/dm^2 、メッキ厚さを 90μ 前後一定として鋼種を変えながら、メッキによる疲労強度の変化を検討することにした。

3 ベーキングの効果

これまで Ni メッキによる疲労強度の低下理由に内部応力や水素の影響をあげてきた。この中で内部応力は再結晶化によって、吸着水素は加熱によって除去すれば、その疲労強度の回復が期待される。たとえば Cr メッキでは $200 \sim 300^\circ\text{C}$ ベーキングによって水素は除去され、疲労強度は少し改善される。 300°C 加熱では内部応力は完全には解放されないが、 400°C になると圧縮残留応力が生じるようになり疲労強度は回復する。しかし加熱温度が 400°C 以上では両者の熱膨張差によってメッキ層に微細なき裂が発生するといわれている。

Ni メッキに関してはベーキング効果を調べた報告が見当たらないようである。しかしメッキ層中に吸着された水素の拡散速度は大きく、低温加熱によって短時間で試料表面に抜け出すか、あるいは鋼内部へ平均的に拡散して表面層の水素の影響は除去されるといわれている。

Fig. 5 は Ni メッキ後種々の温度に大気中で 1 hr 保持後のベーキング温度と疲労限の関係を示したものである。 550°C までのベーキング処理では各鋼とも疲

Fig. 5. Relation between fatigue limit and baking temperature.

労限はほとんど変化しない。かたき測定結果では 550°C 加熱した Ni メッキ層は軟化し、顕微鏡観察からは再結晶することが認められる。したがってこのベーキングによって内部応力および吸着水素は除去されているであろうにもかかわらずその疲労限は回復していないので、この両者による疲労限の低下の影響の程度は少ないものと結論される。

以上の試験結果と一般に疲労の発生は表面層から起こる場合が多いことから、メッキ材の疲労強度の低下に及ぼす因子には Ni メッキ層自身の低疲労強度やメッキ層中の疲労き裂などの表面層の欠陥が考えられる。

4 腐食疲労強度

Fig. 6 は Fig. 1 と同様にして(メッキ条件を無視して)これまでに報告されてきているメッキ処理材の 3% NaCl ふん囲気中での疲労限の変化をまとめたものである。これより一般的な傾向として図中の破線帯中にプロットされた腐食疲労強度は大気中のそれよりもかなり低下している。○印はメッキしない裸材であり、他の印はメッキ材の腐食疲労強度を示し、●印よりもわずかながら大きな疲労強度を有している。これよりメッキによってその腐食疲労強度は裸材のそれよ

Fig. 6. Effect of plating on the corrosion fatigue limits of steels.

りも改善されているので、腐食疲労寿命の延命策としては有効であろう。

Ni メッキした鋼の3%人工海水中での腐食疲労強度に及ぼす鋼の疲労限の関係を図示するとFig. 7のようになる。Fig. 6と同様に腐食疲労強度は鋼の疲労限に無関係にほぼ一定値を示している。いま繰返し応力下でもメッキされたNiが完全な耐食性を有するものとすれば、この低腐食疲労強度はメッキ層の低疲労強度あるいはメッキ層中の微視的な疲労き裂の存在を暗示していると考えられる。

Fig. 7. Effect of Ni-plating on the corrosion fatigue limit of steel.

Fig. 8. Relation between corrosion fatigue limit and thickness of Ni plating.

Fig. 8はメッキ厚さと腐食疲労限の関係をまとめたものである。腐食疲労強度は鋼の疲労強度と同様メッキ厚さに対して無関係のようである。

5 切欠き材の疲労強度

これまで平滑材の疲労強度について述べてきたが、実用部品は切欠きなどの応力集中部を有することが多い。またNiメッキはCrメッキに比べて軟質のため、表面きずの補修に用いられることもある。

そこで応力集中係数(外径 $D=10$ mm, 切欠き底半径 $\rho=0.16$ mm, 切欠き深さ $t=0.05, 0.10, 0.97$ mm)の異なる3種の切欠き材にNiメッキ(約80 μ)を施した場合の疲労限の変化を求めた。Fig. 9は

Fig. 9. Relation between fatigue limit of smoothed and notched steel.

を施したものの疲労限を取り、切欠き深さをパラメータとしてまとめたものである。図中実線は各切欠き材の疲労限を示し、破線はこの切欠き材にNiメッキを施した場合の疲労限を示し、これは実線より低い値となっているので、切欠き材にNiメッキを施すとその疲労限はさらに低下することがわかる。

いま平滑材に切欠きのみを付した場合の低下率を α_1 、Niメッキのみを施したときの低下率を α_2 とすれば、切欠き材にNiメッキを施した場合の低下率 α は $\alpha \cong \alpha_1 \alpha_2$ によっておおそ推定される。また切欠き係数 β_1, β_2 の環状切欠きみぞ同志が重畳された場合の切欠き係数 β が β_1, β_2 があまり大きくない場合に $\beta \cong \beta_1 \beta_2$ で求められる¹⁶⁾。そこでメッキ層を一種の切欠き(欠陥層)と想定すれば切欠き材のメッキによる疲労強度の低下はちょうど2重切欠き材の場合に類似している。このように考えればメッキ層中の疲労き裂は機械的な切欠きと同様な役割をしていることになる。

6 拡散処理材の疲労強度

これまでの試験結果からNiメッキによる疲労強度の低下は従来から考えてきた内部応力や水素ぜい化によるのではなく、メッキ層の低疲労強度およびメッキと母材(鋼)の不連続な境界域をもつためにメッキ層に生じた疲労き裂の鋼への切欠き効果によるものであることが明らかとなってきた。この不連続性を緩和させる方法として両者を拡散接合させて表面層の組織の均一化を試みた。Fig. 10は切欠き材にNiメッキを施したのち、700および850℃に200 hr保持し、拡散加熱処理を施した疲労限の変化を示したものである。図より拡散処理された切欠き材の疲労強度の改善されることがわかる。

これには合金接合層の固溶体硬化、熱膨脹差による圧縮残留応力などの効果が考えられる。これは鋼のAl高温浸し材が合金層のぜい化により疲労強度の低下を起こす現象と逆になっている¹⁷⁾。

*1 投稿中, 砂田久吉, 泉 久司, 材料.

Fig. 10. Relation between fatigue limit and diffusing temperature.

7 ショットピーニング・下地メッキ処理材の疲労強度

高周波焼入れの疲労強度に対する効果は表面層の圧縮応力による荷重実応力の軽減とき裂伝は阻止効果があげられている。これを利用して Ni メッキ層中に生じた疲労き裂の鋼への伝ばを阻止すれば、メッキ層の役割は別として疲労限の低下は緩和されるであろう。

ここでは圧縮残留応力を発生させる方法としてショットピーニングによる方法を用いて、表面硬化処理した鋼の Ni メッキによる疲労限の変化を鋼種を変えて示したのが Fig. 11¹⁸⁾である。図よりショットピーニング加工によって低疲労強度材のそれは回復するが、疲労強度の大きな鋼ではわずかながら低下している。また Ni メッキに対するショット加工の前後による差異は少ないようである。このショットピーニング加工による効果は表面層の圧縮応力の発生とこれによるき裂伝は阻止効果によるものであろう。

Fig. 1 で述べたように被覆金属のヤング係数が小さい場合にはその疲労強度の低下率は少ない。この現象を応用して Ni と鋼の中間層にこれらの金属層を挿入することによりき裂先端の応力を緩和させることによって疲労強度の低下を防止することも可能かも知れな

Fig. 11 Effect of shotpeening on fatigue limit of Ni-plated steel.

*2 未発表, 砂田久吉

い。(なお Ni メッキでは Ni と鋼の密着性をよくするため、Cu を下地メッキすることは行なわれている。) Fig. 12 は Cu および Pb を下地メッキしたのち Ni メッキを施して、両メッキ層の厚さが 90 μ になるように Ni と下地メッキ厚さの割合を変えた場合の疲労限の変化を示したものである。図より軟らかい金属を下地メッキすることによって疲労限の低下を軽減することは可能なようである。

Fig. 12. Effect of substrate plating on fatigue limit of Ni-plated steel.

8 む す び

炭素鋼に Ni メッキを施した場合の疲労強度について十分にまとめたものではないが、主としてこれまでに筆者の行ってきた試験結果について述べてきた。これらを要約すると次のようになる。

- (1) 炭素鋼に Ni メッキを施すとメッキ材の疲労強度は低下し、素材の強度・メッキ電流密度・メッキ厚さの増加とともにその低下率は大きくなる。
- (2) メッキ後のベーキング処理によっては低下した疲労強度は改善されない。
- (3) 3% NaCl ふん囲気中の腐食疲労の強度は大気中のそれよりも数 kg/mm^2 大きくなる。
- (4) 切欠き材に Ni メッキを施すと切欠き、メッキ個々の低下率の相積でほぼ推定される。
- (5) メッキ後拡散加熱処理を施すと疲労強度は改善される。

この他ショットピーニングや低弾性率金属を下地メッキすることによっても Ni メッキによる疲労強度の低下は防止できる。

今後メッキ処理材の問題として、特にき裂の発生・伝ばについて実験を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) Barklie, R D H., and H. J. Hammond, Proc. Inst. Mech. Eng., 1, 731 (1930)
- 2) 機械学会表面処理資料分科会, 機械学会誌, 67, 544 (1964).
- 3) Williams, C., and R. A F. Hammond, Trans. Inst.

- Metal Finishing, **32**, 101 (1949).
- 4) Weil, R., Plating, **57**, 1231 (1970).
- 5) 砂田久吉, 材料, **15**, 230 (1966).
- 6) 平 修二, 村上裕則, 材料試験, **7**, 591 (1958).
- 7) Kushner, J B., Metal Finishing, **56**, 47 (1958).
- 8) Logan, H. L., J. Research Nat. Bur. Stand., **48**, 101 (1949).
- 9) 砂田久吉, 材料, **16**, 865 (1967).
- 10) 西川精一, 生産研究, **18**, 16 (1966).
- 11) Foremann, G, and E. Lundin, Proc. 1st. World Congress, **1**, 606. (1951).
- 12) 河本 実, 水上嘉明, 材料試験, **3**, 427 (1954).
- 13) 中沢 一, 金属表面技術, **16**, 12 (1965).
- 14) 砂田久吉, 日本材料学会第16期総会学術講演会前刷, 35 (1967).
- 15) 砂田久吉, 材料, **16**, 728 (1967).
- 16) 河本 実, 関 護雄, 材料試験, **5**, 414 (1956).
- 17) 嵯我卓郎, 宮川大海, 戸部省吾, 機械学会論文集, **38**, 1654 (1972).
- 18) 中村 宏, 高周波焼入れと疲労強度 (1963) 日刊工業新聞社
- 19) Almen, J. O., Product Eng., **22**, 109 (1951).
- 20) 砂田久吉, 日本材料学会第 15 期総会学術講演会前刷 (1966).