669.15.26—167 : 539.431.016

電解研摩の 13 Cr 鋼の疲れ強さに及ぼす影響⁽¹⁾大 内 田 久⁽²⁾

Effect of Electro-Polishing Process on the Fatigue Strength of 13Cr Steel

by Hisashi ŌUCHIDA

This paper presents the results of the investigation of the effect of the electro-polishing process on the fatigue strength of 13 Cr steel used for turbine blades. Mechanically polished test specimens, such as those ground and polished by emery paper and super-finishing were compared with those electro-polished by means of the rotating bending fatigue testing machine. The test results were as follows:

- (1) In electro-polishing of the round bar specimens in air or in steam, the endurance limit was reduced by about 10% in comparison with mechanical polishing.
- (2) In electro-polishing of the notched specimens with transverse holes or sharp grooves, the endurance limit was reduced by 13 or 17% in comparison with mechanical polishing.
- (3) The reduction of the endurance limit of 13 Cr steel by electro-polishing is believed to be due to stress concentrated in grooves caused by falling off the melted slag contained in the steel, and by the removal of the outer layer hardened by mechanical process.

1. 緒 言

最近電解研摩が広く機械部品の研摩加工にも用いられようとする機運になってきている。電解研摩した面は光沢を有し平滑で耐食性があり、かつ研摩時間が短い等の利点をもっている。しかし繰返し荷重を受け強度的に問題となる機械部品に電解研摩すれば、その疲れ強さにいかなる影響を及ぼすかについては従来研究されたものが少く、R. Mondon が航空機用材料の Cr-Mo-Ni 鋼について熱処理組織により疲れ強さを上昇させる場合と低下させる場合とがあることを報告し⁽³⁾、また最も新しい研究として M. Hempel が Cr-V 鋼、高抗張力の炭素鋼について電解研摩によって疲れ強さがわずかに低下することを報告している⁽⁴⁾ものがある程度である。

本研究は蒸気噴流を受け一応繰返し荷重も受けると考えられるタービン翼の材料である 13Cr 鋼について電解研摩した場合の疲れ強さを各種形状の試験片で空気中および水蒸気中で回転曲げ疲れ試験によって探究し、種々の機械仕上げ試験片の疲れ強さと比較検討して電解研摩の適用性を判定しようとしたものである。

2. 研究の方法

1. 試 料 蒸気タービン翼材として使用されている 13 Cr 鋼で顕微鏡検査および赤血塩検査により

非金属介在物の少ないものを選んで試験に供した。材料は試験片に加工する前 850°C で 1 時間焼なまし後炉冷、950°C で 30 分保持後焼入油冷、700°C で 45 分間焼もどし油冷された。供試材料の化学的成分および機械的性質は第 1 表に示す。

2. 試験片および試験機 試験片は第 1 図に示す

第 1 図 疲 れ 試 験 片

ような平滑および横穴、V みぞのあるもので、これらを小野式回転曲げ試験機によって試験し疲れ限度を求めた。

試験片の仕上げは旋盤加工の後研削仕上げ、エメリ紙(00000)仕上げおよび超仕上げの各種の仕上げを行った。これらを機械研摩試験片とし、これらの加工

第1表 試料の化学的成分および機械的性質

試料番号	化 学 的 成 分					機 械 的 性 質			
	C	Si	Mn	Ni	Cr	σ_B	σ_s	φ	ψ
1, 2	0.12	0.44	0.10	0.29	15.36	65.5	47.9	26.8	70.0
3, 4, 5	0.21	0.56	0.40	0.56	13.85	73.3	47.6	31.0	67.1
6, 7	0.19	0.04	0.17	0.22	12.82	74.7	62.5	24.4	61.1
8, 9	0.18	0.04	0.16	0.19	13.18	71.5	57.7	28.8	65.2
10, 11	0.16	0.31	0.29	0.38	12.76	63.5	43.6	32.6	66.5
12, 13	0.18	0.45	0.30	0.32	13.70	65.0	43.0	34.0	73.5
14, 15	0.16	0.59	0.35	0.33	13.79	66.7	43.0	33.0	70.5
16, 17	0.19	0.37	0.34	0.09	12.99	67.5	46.5	31.4	72.5
18, 19	0.18	0.73	0.35	0.81	13.25	69.1	49.2	32.0	72.8
20, 21	0.22	0.36	0.29	0.15	12.95	73.2	57.2	30.0	68.0

σ_B ; 引張強さ kg/mm², σ_s ; 降伏点 kg/mm², φ ; 伸び率 %, ψ ; 絞り率 %

試片 B ×100

試片 A ×100

(a) 電解研磨前の非金属介在物

試片 B ×100

試片 A ×100

(b) 電解研磨後の非金属介在物

第2図 電解研磨による非金属介在物の変化

(a) 電解研磨前の表面粗さ

(b) 電解研磨後の表面粗さ

第3図 介在物のある部の あらさ に及ぼす
電解研磨の影響

後更に電解研磨したものを電解研磨試験片とする。

3. 電解研磨法 13 Cr 鋼につき主として平滑度の点から研磨法を種々研究した結果、得られた最適の電解研磨の条件として次のものを採用した。

電解液 硫酸 430 c.c. 磷酸 300 c.c.
水 92 c.c.

試験片を陽極とし陰極には鉛円筒を用いた。

電圧 4~5 V, 電流密度 55 Amp/dm²,
液温 110 °C, 研磨時間 5 分および 2 分

研磨後試験片の水洗は十分行い、研磨液の除去に留意した。

4. 表面のあらさおよびかたさ測定 各仕上げによる試験片の表面のあらさは小坂式触針あらさ測定器により、またかたさは明石製作所の微小硬度計を用いて測定し、加工硬化層の深さも求めた。

3. 電解研磨の表面状態に及ぼす影響

1. 非金属介在物 タービン翼材として用いられている 13 Cr 鋼には厳選されているが多少とも非金属介在物が含まれている。介在物の少ない試料と特に多い試料から 25×20×15 mm の四角な試験片 B, A をつくり、これらを機械仕上げ後パフ研磨し、その表面の状態を顕微鏡およびあらさ測定器でしらべておき、これらを電解研磨後同様な検査を行った。パフ仕上げ後の状態は第2図および第3図の(a)のようなものが、電解研磨後は(b)のように変化した。すなわち非金属介在物のあった部分は電解研磨によって浸食さ

(a) グラインダー仕上と電解研磨面 (2000×10)

(b) エメリー研磨紙仕上と電解研磨面 (10000×54)

(c) 超仕上げと電解研磨面 (5000×30)

第4図 各種機械研磨面とそれらの電解研磨
面のあらさ

れ介在物が溶出脱落して大きなみぞとなり、表面のあらさも大きくなることがわかった。介在物の少ないものもパフ仕上げではあらさからわからなかった欠陥が電解研磨によって露出することになる。

2. あらさ 種々の機械研磨を行った試験片とそれらを更に電解研磨した試験片の表面のあらさを測定した結果は第4図のようになる。電解研磨によって機械研磨で残った細かい凹凸がとれる。しかしエメリー紙仕上げや超仕上げのものは電解研磨と大きなあらさの差は認められない。これらはいずれも介在物のない部分で測定したものであるが、バイト目が少しでも認められる場合は電解研磨によって更に深いみぞあとになる傾向がある。機械研磨でも第3図の(a)のようについていねいにパフ研磨したものでは表面の細かい凹凸もよくとれており、これを電解研磨するとかえって介在物のある部分やわずかの突起部が表面のあらさを大きくする。

3. かたさ 前述の非金属介在物の調査に用いた試験片Bにつき表面のかたさおよび表面近くのかたさを測定した結果は第2表のように求めた。この結果から機械仕上げ後エメリー紙研磨のものは表面近くは

第2表 電解研磨による表面かたさ変化

試 料	仕 上 条 件	荷 重 g	かたさ V. H.
B	機 械 仕 上 げ エメリー紙仕上 パ フ 仕 上	50	276
		100	250
		200	259
		500	254
		1 000	252
B	機 械 研 磨 後 電 解 研 磨	50	242
		100	242
		200	247
		500	253
		1 000	254

圧痕の大きさ 50 g $d=19.6\mu$, 深さ 2.8μ

500 g $d=85.4\mu$, 深さ 12μ

内部よりも かたさ が高くなっており,これを電解研磨したものは表面近くは内部よりもかえってかたさが低下している。結局電解研磨すると機械仕上げのままのものに比し表面で かたさ が約 12% 低下したことになる。これは機械研磨では加工のため表面層は硬化され,電解研磨すると表面層が溶出し,この加工硬化層は除去され酸化皮膜ができるため表面の かたさは低下したものである。

疲れ試験片についての測定結果でも機械研磨したものの表面は 275 V. H. で硬化層の深さは約 12.5μ であるが,電解研磨したものは 218 V. H. となり,約 20%低下し,表面近くの かたさ の低い層の深さは約 4μ であることがわかった。

4. 試験片直径の変化 電解研磨すると研磨時間 5 分の場合直径で 0.06mm , 2 分の場合 $0.02\sim 0.03\text{mm}$ 溶出するのを認めた。なお機械仕上げ後エメリー紙研磨によって除去される量は直径で $0.002\sim 0.003\text{mm}$ であることを確かめた。したがって加工硬化層の大部分は電解研磨によって除去されるが,エメリー紙による軽い仕上げではほとんど加工硬化層は残っているものと考えてよい。

4. 疲れ試験の結果

各種形状の試験片につき空気中および水蒸気中において種々の機械研磨をしたものと,それを更に電解研磨したものの疲れ限度を求めた結果次のような事実がわかった。

1. 平滑試験片 第1表の試料 (1, 2) から直径 10mm , 試料 (3~5) から直径 12mm の試験片をつくり,それぞれ研削仕上げおよびエメリー紙仕上げしたものと更にこれらを電解研磨したものに付き,疲れ限度を求めた結果は第5図および第6図に示す。これらの結果から電解研磨したものは機械研磨したものに比し,疲れ限度が研削仕上げの場合約 12%,エメリー紙仕上げの場合約 10% 低下することがわかる。なお

第5図 平滑試験片(直径 10 mm)の疲れ試験結果

第6図 平滑試験片 (12 mm) の疲れ試験結果

直径 12mm のものにつき機械仕上げ後表面の加工硬化層を軟化させるため, 600°C で約 30 分間真空焼なまし炉冷したものは第6図のように約 8% 疲れ限度が機械研磨のものより低下することも認めた。以上はいずれも空気中の疲れ試験結果であるが,タービンの場合を考え水蒸気中の疲れ試験を行った。

第1表の試料 (6~9) から直径 10mm の試験片をつくり機械仕上げ後エメリー紙仕上げのものとこれを

第7図 水蒸気中の疲れ試験結果

電解研磨したものは空気中において第 7 図に示すようにやはり電解研磨すると疲れ限度が約 10% 低下することを確認した。

水蒸気中の腐食疲れの条件としては、タービン翼では低圧側の翼が強度的に問題になる点から、水道水をフラスコに入れ電熱器で沸騰させ、ノズルから試験片中央に下方から吹付けることにし、この水蒸気噴流の温度を約 93°C にした。腐食疲れの強さは 10^7 回における強さをもって比較した。水蒸気中の疲れ試験の結果は第 7 図の下方の曲線に示すように、機械研磨したものは空気中の疲れ限度に比し約 16.5% 強さが低下する。電解研磨したものは機械研磨のものより約 10.3% 強さが低下することがわかる。なおこれを空気中のエメリー紙仕上げのものに比べると 25% 低下したことになる。

2. 横穴試験片 タービン翼には低圧側ではバイント線穴があるので、横穴のある第 1 図 (b) の試験片につき電解研磨の影響をしらべた。試料 (10~13) から直径 12 mm の試験片をつくり、直径 3 mm の横穴をドリルでいてねいにあけた。疲れ試験の結果は第 8 図のように求まり、機械仕上げの場合平滑試験片に比べ横穴試験片では疲れ限度が約 58% に低下し、更に電解研磨によって約 13% 低下することがわかった。

第 8 図 横穴試験片の疲れ試験結果

平滑試験片の場合より電解研磨による疲れ限度の低下率は大きい。

なお参考までに試料 (14, 15) から作製した電解研磨試験片の横穴の開口部を 3000 kg で圧縮加工すると、第 9 図に示すようにその疲れ限度は約 40% 上昇し、電解研磨による疲れ限度の低下を十分回復し強くなることがわかった。

3. V みぞ試験片 試料 (16, 17) から第 1 図 (c) の V みぞのある試験片をつくり疲れ試験した結果は第 10 図のように求まり、電解研磨によって約 17% 疲れ限度が低下することがわかった。横穴試験片の場合と合せ考え、切欠があり応力こう配の大きい場合ほど電解研磨による疲れ限度の低下率は大きいといえ

第 9 図 穴部を圧縮加工した効果

第 10 図 V みぞ試験片の疲れ試験結果(空気中)

第 11 図 V みぞ試験片の疲れ試験結果
(水蒸気中)

る。

なお前と同じ条件で水蒸気中の疲れ試験を、試料 (18, 19) を用いて行った結果は第 11 図のように求まった。電解研磨したものはやはり機械研磨のものより疲れ強さは弱く、 10^7 回の繰返し数において約 6% 低下するが、平滑材の場合より低下率は小さい。

第 12 図 超仕上げ試験片に及ぼす電解研磨の影響

4. 超仕上げ試験片 試料 (20, 21) より試験片の平行部を超仕上げしたものについて疲れ試験の結果は第 12 図に示す。超仕上げのままのものはエメリー紙仕上げのものより若干高い疲れ限度を示すが、これを電解研磨するとやはり疲れ限度が約 11% 低下することがわかる。

以上の疲れ試験の結果をまとめて第 3 表に示す。

5. 実験結果の考察

13 Cr 鋼を電解研磨すると試験片の表面層が溶出し非金属介在物が脱落してみぞをつくり、表面のかたさの低下と疲れ限度の低下を起すことがわかった。これらの結果から疲れ強さの低下の原因を大きく次の二つにわけて考える。

第 3 表 仕上げ条件と疲れ試験結果

番 号	試験片形状	仕 上 げ 条 件	試 験 条 件	疲 れ 限 度 kg/mm ²	加工の影響 $\sigma_{w0}/\sigma_{w0} \times 100$
1	平 滑	研 削 仕 上 げ	空 気 中	33.7	100
2	(10)	電 研 (5分)		29.6	88
3	平 滑	エメリー紙仕上げ	空 気 中	36.5	100
4	(12)	電 研 (5分)		33.0	90
5		真 空 焼 な ま し		33.5	92
6	平 滑	エメリー紙仕上げ	空 気 中	34.7	100
7	(10)	電 研 (5分)		31.0	90
8	平 滑	エメリー紙仕上げ	水 蒸 気 中	29.0	100
9	(10)	電 研 (5分)		26.0	90
10	平 滑	エメリー紙仕上げ	空 気 中	36.3	100
11	横 穴	ドリル仕上げ		20.7	57
12	横 穴	ドリル仕上げ	空 気 中	19.8	100
13		電 研 (2分)		17.2	87
14	横 穴	電 研 (2分)	空 気 中	19.4	100
15		圧 縮 加 工		27.6	142
16	V みぞ	バイト仕上げ	空 気 中	18.4	100
17		電 研 (2分)		15.3	83
18	V みぞ	バイト仕上げ	水 蒸 気	17.3	100
19		電 研 (2分)		16.3	94
20	平 滑	超 仕 上 げ	空 気 中	37.3	100
21	(10)	電 研 (2分)		33.2	90

括弧中の数字は試験片の直径 (mm) を示す。

σ_w ; 電研, 穴あけ, みぞ切をしたものの疲れ限度。

σ_{w0} ; 機械仕上げのものの疲れ限度。

- (1) 非金属介在物の脱落
- (2) 加工硬化層の溶出除去

1. 非金属介在物の脱落 13 Cr 鋼中には多少とも非金属介在物が存在し、試験片の表面にあるものが電解研磨によって浸食溶出し脱落するため、大きなみぞをつくる。かかるみぞは繰返し応力を受ける場合応力が集中し破損の原因となることは、これらのみぞから疲れのクラックが発達していることを第13図

第13図 介在物より疲れクラックが発達していることを示す(試験片の表面)($\times 20$)

のように試験片の表面のクラック部を拡大してみとめたことから明らかなことである。機械仕上げのものは加工硬化を受けて、たとえ介在物があっても抑制されて疲れ強さには常温ではほとんど影響しないことは石橋、瓜生氏の実験結果もあり⁽⁶⁾、13 Cr 鋼については本実験結果からも認められたところである。すなわち別に介在物の多い材料と少ない材料との疲れ試験を行った結果によれば、その疲れ限度の差はほとんど認められなかった。しかるに電解研磨すると前述のようにこれら介在物による欠陥が露出することになり、大きなみぞ底のかたさも低下しておるため、クラックの発生が容易となり疲れ限度が低下するものである。機械研磨によって残った細かい凹凸は電解研磨によって平滑化されても介在物の部分で大きなみぞを生ずるから、その疲れ限度に及ぼす影響は機械研磨よりも悪くなる。第4図(b), (c)からわかるように機械仕上げ後エメリー紙仕上げまたは超仕上げしたものは、それを電解研磨したものと表面のあらさには大差なく、 0.2μ というこの程度の平滑度の差が疲れ限度にどの程度利くか疑問があり、平滑度の疲れ限度に影響する程度には限界があるものと考えられる。この点は最近 L. P. Tarsov 等⁽⁶⁾ も表面仕上げ程度の疲れ強さに及ぼす影響についての研究で言及しているところである。結局介在物が存在し電解研磨によってその影響が大きく露出することが疲れ限度を低下させる一つの原因である。

2. 加工硬化層の除去 電解研磨によって試験片

の直径が $0.03 \sim 0.06$ mm 溶出減少し、一方表面のかたさが20%低下することがわかった。機械仕上げによる加工硬化層はその硬化度の高い部分は表面から約 50μ と考えられる⁽⁷⁾ から表面層近くでかたさの急激に高くなっている部分が電解研磨によって除去されることになる。かつ表面のかたさは中心部よりかえって低下する。また加工によって多少とも表面に残っていた圧縮残留応力も消失することになる。

機械仕上げによる加工硬化の疲れ限度に及ぼす影響を確かめるために行った前述の第6図の真空焼なましの実験から、焼なましによって加工層を軟化した結果、疲れ限度が低下し、電解研磨による低下に近い値を示した。これは加工硬化層が疲れ限度に相当大きく利くことを示すものである。焼なましによって軟化するため介在物の影響も利いてきたものと考えられる。したがって、この加工硬化層が除去されることは当然疲れ限度に悪影響を与える結果になる。しかも電解研磨によって生成される表面のもろく、かたさの低い酸化皮膜層はクラックの発生に有利な条件となる。

水蒸気中の腐食疲れ試験においても、電解研磨したものが機械研磨のものに比し疲れ限度が低い理由は、電解研磨によって表面にできる酸化皮膜は静的腐食には強いが、かかる繰返し荷重を受ける場合は膜がもろく伸び縮み繰返す内に破損し、一方電解研磨によってできた介在物痕のみぞ底から腐食が進みやすく、皮膜の破損がまた腐食進行の原因となる。なおクラックが生じると表面層のかたさが低く加工硬化層も除去されているため腐食疲れに対して悪い条件となる等が考えられる。試験片が蒸気噴流中で繰返し荷重を受けていると第14図(a)に示すように表面の光沢のある皮膜が破れ腐食が始まり pit が形成される。pit の底に応力が集中し、この部で腐食が進行し易くなりクラックを生じ、(b)図に示すように pit の底からクラックは結晶粒を貫いて進行するようになる。また腐食疲れに対しては表面の仕上状態は応力繰返し数が大きくなると大して利かなくなるという実験結果⁽⁸⁾もあり、電解研磨によってえられる平滑度は前述のように機械研磨と大差なくかえって介在物のみぞを生ずることから腐食疲れに対して良い条件を与えるものではない。

6. 結 言

タービン翼材として用いられる 13 Cr 鋼を電解研磨加工した場合、その疲れ強さに及ぼす影響についてしらべた結果次のことがわかった。

(1) 電解研磨したものは機械研磨のものに比し平滑試験片において約 10%、横穴、V みぞ試験片においてそれぞれ約 13 および 17% 疲れ限度が低下する。

(2) 水蒸気中の腐食疲れ試験においても 10^7 の応力繰返し数において、電解研磨試験片は平滑の場合約 10%、V みぞの場合約 6% 疲れ強さが低下する。

(3) 電解研磨によって疲れ強さが低下する理由は

(a) 試験片の表面 ×100

(b) クラック部 ×100

第 14 図 水蒸気中の腐食疲れによるクラック

13 Cr 鋼中の非金属介在物が脱落し大きな みぞ を生じ応力集中の原因となること、および加工硬化層が大部分除去され表面の かたさ が低下し残留圧縮応力も消失するためである。

(4) 水蒸気中の腐食疲れにおいても酸化皮膜がもろいため介在物のみぞ底から繰返し荷重によって破損し、一方表面の かたさ の低下しているため機械仕上げの場合より腐食によるクラックが進み易い。

(5) 以上の結果から多少とも非金属介在物のある材料を、強度的に問題となる機械部品に用いる場合は電解研摩加工によって疲れ強さがある程度低下するものと考えて注意する必要がある。

終りに本研究に有益な助言を賜った九大石橋正教授、文献等御教示下さった田島栄博士および絶えず御鞭撻いただいた当所馬場博士、兼先所他関係各位に深く感謝の意を表します。

注:—

(1) 昭和 27 年 10 月 19 日 関西工学連合講演会において講演原稿受付 昭和 28 年 2 月 9 日。

(2) 正員、日立製作所日立研究所。

(3) 田島、機械学会誌, 53 巻 383 号, 503 ページ (昭 25—12)。

(4) M. Hempel, Z. V. D. I., Bd. 94, Nr 25, S. 811 (1952)。

(5) 石橋, 瓜生, 機械学会論文集, 18 巻 75 号, 79 ページ (昭 27)。

(6) L. P. Tarasov, H. J. Grover, Porc. A. S. T.M., Vol. 50, p. 668 (1950)。

(7) 明石, 真下, 機械の研究, 4 巻 1 号, 84 ページ (1952)。

(8) A. Thum, H. Ochs, Korrosion und Dauerfestigkeit, p. 36 (1937)。

539.431.3.015.1 : 669.14

円周き裂を持つ炭素鋼試験片の疲れ強さ⁽¹⁾

石 橋 正⁽²⁾ 瓜 生 恒 美⁽³⁾ 佐 藤 栄 一⁽⁴⁾

Fatigue Strength of Carbon Steel Bars with Round-Crack

by Tadasu ISIBASI, Tsunemi URYU and Eiichi SATO

Notch-effects of minute cracks in carbon steel bars of various carbon contents with a round-crack were measured under rotary bending stress. The detrimental effects of post-annealing (annealing after the original crack was made) on fatigue strength of cracked specimens were studied. The notch-factor β_c of a crack seems to be indifferent to carbon content of steel and is about 1.3~1.5, so far as the depth of cracks are shallow (0.25~0.5 mm, dia. of specimens 14 mm). β_c increases, however, to 1.7~1.9 when the specimens are post-annealed. For both specimens, post-annealed and not post-annealed, β_c increases as the depth of crack deepens.