含銅鋼線の疲労強度について*

上 田 太 郎** 朝 倉 健 二** 白 井 輝 夫***

Fatigue Strength of the Copper Bearing Steel Wire by

Tarō UEDA, Kenji ASAKURA and Teruo SHIRAI
(Ōsaka University)

Usually the carbon steel wire contains about 0.1% copper, but an investigation was made on copper bearing steel wire in which the copper content was made greater than that of carbon steel wire in order to increase the corrosion resistance of the wire itself. In view of the corrosion resistance and the rolling crack, a copper content of 0.34% was adopted as the copper content of the copper bearing steel wire. In this investigation, the corrosion resistance properties and the mechanical properties, particularly the fatigue property of the cold-drawn copper bearing steel wire and the cold-drawn carbon steel wire containing the same compositions except copper were measured. These wires tested contained 0.46% carbon and the diameters were 1.3 mm.

In the corrosion test and the tensile test, the copper bearing steel wire had an excellent resistance against the rust corrosion and the acid corrosion and also had a higher tensile strength than the carbon steel wire. The fatigue test was carried out with the Hunter fatigue testing machine, and as a result of the test it was proved that the fatigue limit under rotating bending of the copper bearing steel wire was 7% higher in the as-drawn condition and 6% higher in the 250°C annealed condition than that of the carbon steel wire, and also that the fatigue ratio of the copper bearing steel wire was about 3% larger in both condition than that of the carbon steel wire.

From the results obtained by the corrosion test and the fatigue test, it is deduced that the copper bearing steel wire will have remarkably higher corrosion fatigue strength than the carbon steel wire, and consequently that the strand and the rope produced by the copper bearing steel wire will have greater durability.

(Received December 4, 1956)

1. 緒 言

鋼線または鋼索が化学工場・船舶・漁業および鉱山などにおいて使用される場合、腐蝕がその破断の主要原因の一つと考えられ、その対策が必要となる。鋼線の防蝕法としては普通亜鉛鍍金を用い、船舶用・漁業用および吊橋用鋼索のごとく、特に塩分のため錆びやすいところ、あるいは長年月風雨にさらされるところに使用されるものは亜鉛鍍金鋼索を用いる。しかし、普通用いられる熱亜鉛鍍金法では抗張力が減少するので、一般には鍍金せず裸線のまま使用する。鉱山用鋼索は素線を鍍金せず裸のまま使用するが、塩分または酸分の多い鉱山では特に亜鉛鍍金線を用いることもある。このように鋼線の防蝕法として亜鉛鍍金が重要であるが、鋼線自体の耐蝕性はさらに重要である。

特殊元素を用いない低廉な耐蝕鋼としての含銅鋼の

研究は、主として低炭素の構造用鋼について欧洲大戦後世界各国で行われ、耐蝕性および耐酸性にすぐれ、機械的性質がやや向上するとされている。含銅鋼の疲労強度^{1)~5)}に関しては、低炭素構造用鋼について一、二の報告があり、疲労強度にはほとんど含銅の影響がないとしている。また、含銅鋼線の耐蝕性⁶⁾に関しては一、二の報告があるが、その疲労強度に及ぼす含銅の影響に関する報告は見当たらない。

従来使用されている炭素鋼線材の含銅量は0.1%前後であるが、本研究においては線自体の耐蝕性を増加させる目的で、従来のものより含銅量を多くした0.34% Cu の炭素鋼線材を用い、この含銅線材と、これと銅以外の成分の含有量が等しい普通線材とに、同じ処理および加工を施したものにつき（含銅鋼線と普通鋼線につき）、その耐蝕性および機械的性質、特に疲労強度を測定し、含銅鋼線が鋼線、撚線または鋼索として適しているか否かを検討した。

* 原稿受付 昭和31年12月4日、昭和31年5月16日第5期総会講演会において講演

** 正員 大阪大学工学部

*** 大阪大学工学部

2. 実験試料

銅は γ 鉄中に多量固溶されるが、常温における α 鉄の銅固溶限度は約0.5%に過ぎない。従来の研究において、耐蝕性含銅鋼の最適の含銅量は研究者によつて異なり、腐蝕減量の点より0.25%, 0.30%, 0.40%, あるいは1%以上を適量としている。この相違は、常温において鋼中に過飽和に固溶される銅の量が加熱温度、加熱時間および冷却速度によつて異なるためであるとされている。また、含銅鋼を高温に加熱した場合、鉄は酸化されるが、鉄よりも酸化しがたい銅は鋼の表面に多くなり、遂には粒界に析出する。このような銅または銅に富む部分は1100°C以上に加熱すると熔融するから、この温度以上で鍛造または圧延を行うときは、引張応力を生ずる部分に亀裂を生ずる。そして、この亀裂を生ずる含銅量は加熱時間や加工度などによつて変化するため、研究者によつて異なり、0.30%または0.50%とされている。

Table 1. Chemical composition.

Material	Chemical composition (%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
Copper bearing steel wire	0.46	0.28	0.52	0.019	0.014	0.34
Carbon steel wire	0.47	0.26	0.47	0.021	0.011	0.12

本研究の実験試料として用いた含銅鋼線材の含銅量は上述の耐蝕性および圧延性の点より0.34%とし、製鋼および圧延において充分注意を払つて製造されたものを用いた。これに対し、比較として用いた普通鋼線材の含銅量は0.12%で、従来の鋼線材に含有されている程度の量である。これらの実験試料の化学成分はTable 1に示すとおりである。普通鋼線としては、含銅の影響を調べるために、含銅鋼線と銅以外の成分の含有量が全く同一の線材を用いる予定であつたが、その冷間引拔線の表面状態が不良で疲労試験に適さなかつたので、わずかに含有量が異なるが、その影響を無視しうるものとしてTable 1に示すようなものを用いた。

Table 2. Mechanical properties.

Material	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Number of torsion (100 d)	Number of bending (R=5mm)
Copper bearing steel wire	124.5	2.2	45	38.5	55
Carbon steel wire	121.0	2.4	47	41	54

次にこれらの線材を直径5mmにおいて空気パテンチングした後、直径2mmまで伸線を行い、さらに、2mmにおいて950°Cで空気パテンチングした後、仕上線径1.3mmまで伸線を行つた。この加工度は57.5%である。これらの仕上線の機械的性質はTable 2に示すとおりである。これらを比較すると、含銅鋼線は

普通鋼線より抗張力においてすぐれており、伸び、絞り、捻回値および屈曲値においてはほぼ等しい値を示している。この抗張力の増大は、フェライト中に固溶されている銅が固溶体の通例で、その硬度と強度を増加せしめるためである。

3. 腐蝕試験

腐蝕試験は長さ24cmの試片を腐蝕剤の中で水平に保持して行い、試験前後の重量測定より重量減少百分率を求め、腐蝕率とした。Table 3はいろいろな腐蝕剤に対する腐蝕試験結果を示す。

Table 3. Results of corrosion test.

Corrosion agent	Test period (day)	Weight loss (%)	
		Copper bearing steel wire	Carbon steel wire
Air	60	0.95	2.0
City-water	60	8.5	11.0
Sea-water	60	13.0	14.0
3% H ₂ SO ₄	1	8.5	34.0
0.5% HNO ₃	1/3	23.0	23.5
10% NaOH	3	0.02	0.02
5% NaHCO ₃	3	0.035	0.035

大気中の腐蝕試験は湿度の高い室内において行つたもので、含銅鋼線は大気中において普通鋼線の2倍以上の耐蝕性を有することがわかつた。これは銅が鉄よりも貴金属であるために鉄が先に錆びてから酸化し、普通の鉄錆の下にCuOの層を生じ、これが湿気的作用を妨げるので腐蝕が軽減されるのである。そして錆の層が腐蝕を軽減するのであるから、銅の効果がよく現われるまでにかなり期間を要する。

水道水に対する含銅鋼線の腐蝕抵抗は普通鋼線に比しすぐれているが、その効果は大気中腐蝕の場合に劣る。そして水中での塩類含有量が多くなれば含銅の効果が失われるので、海水中での腐蝕にはわずかにすぐれている程度である。これは銅がフェライト中に固溶しているので腐蝕に際し鉄とともに溶け出し、ただちに再析出して鉄面を覆うが、その析出の形が固着性のち密な層となつて保護作用をなすか否かは、水の化学成分や同時に生ずる腐蝕生成物の状態や組織に影響されるからである。

酸については、硫酸に対して含銅鋼線は普通鋼線に比し非常にすぐれた耐酸性を示す。これは銅が鉄とともに酸に溶解した後、ふたたび鉄面に析出するが、銅は鉄に比して硫酸に対してすぐれた耐蝕性を有するので、含銅鋼線の耐蝕性がいちじるしく増大するのである。しかし、酸化性のある硝酸に対しては銅が溶解するので、含銅の効果は認められない。

苛性ソーダ、重炭酸ソーダのようなアルカリ性に対

しては含銅の効果は認められなかつた。

4. 低温焼鈍による機械的性質の変化

時効並びに低温焼鈍における含銅引拔鋼線の銅の挙動を知るために、含銅および普通鋼線を $100^{\circ}\sim 400^{\circ}\text{C}$ に加熱した後、それぞれの抗張力および捻回値を測定した。Fig. 1 にこれらの実験結果を示す。加熱時間はそれぞれ5分である。

Fig. 1. Effect of annealing on the tensile strength and the number of torsion.

Fig. 1 の抗張力曲線および捻回値曲線において含銅および普通鋼線は同じ傾向を有し、含銅の影響は認められない。すなわち、抗張力はいずれも焼鈍温度とともに増加し、 $200^{\circ}\sim 250^{\circ}\text{C}$ で最大値を有し、これ以上の温度に対しては焼鈍温度とともに減少する。捻回値はいずれも焼鈍温度とともに減少し、 $200^{\circ}\sim 250^{\circ}\text{C}$ において極小値を有し、これ以上の温度に対しては焼鈍温度とともに増加し、特にいちじるしい捻回脆性は現われない。この $200^{\circ}\sim 250^{\circ}\text{C}$ に抗張力の最大値および捻回値の極小値が現われるのは、内部応力によるものであるとされている。¹⁰⁾

5. 疲 勞 試 験

5. 1 疲勞試験装置

疲勞試験は Hunter 式回転曲げ線疲勞試験機¹¹⁾を用いて行つた。Fig. 2 はこの試験機の概略図を示す。Hunter 式疲勞試験機はモーター M で駆動されるチャック A と、チャックにつかまれている試片の他端を挿入するための多くの孔を有するプッシングバー B よりなる。

試験方法は試験応力 σ に対応するチャック A とプッシュ B の距離 c および試片の長さ L を (1) および (2) 式より計算し、この長さのまつすぐな試片の一端をチャック A につかませ、次に他端を 180° 曲げて A より c だけ離れた B の孔に挿込む。このようにすることによつて、チャックの軸と、プッシュにおける固定されてい

Fig. 2. Diagram of the Hunter fatigue testing machine.

Fig. 3. Principle of the Hunter fatigue testing machine.

ない試片の他端の回転軸が正確に平行になり、また、この試片によつて作られるループの頂点、すなわち、最大曲率を有する点に試験応力 σ が与えられる。そして試片を水平に保ち振動を防ぐために、ループの頂点より離れた位置に二つの支持ガイドを置く。次にモーター M によりチャック A を回転すれば、固定されていない試片の他端は B の孔の中で軸方向には移動せず回転を行い、試片のループの頂点には所定の回転曲げ応力が加えられる。そして疲勞限度以上の応力に対して、最大曲率を有するループの頂点付近で破断する。ゆえに、水銀スイッチ S_w を図の位置に水平に置けば、破断とともに傾いて回路が開き、モーターは停止し、取り付けた計数器により繰返数を知ることができる。

この試験方法においては、次の関係式を満足させなければならない。すなわち、

$$c = 1.198 E \cdot d / \sigma \quad (1)$$

$$L = 2.19 \quad c = 2.62 E \cdot d / \sigma \quad (2)$$

$$h = 0.835 c \quad (3)$$

$$R_{min} = h/2 = 0.417 c \quad (4)$$

$$P = 0.141 E \cdot d^4 / c^2 \quad (5)$$

ただし、 c : チャックとプッシュ間の距離、 L : チャックからプッシュまでの試片の長さ、 h : ループの高さ、 R_{min} : 最少曲率半径、 P : プッシング荷重、あるいはチャックにおける側面力、 E : 弾性率、 d : 線径、 σ : 試験応力(表面最大応力)。

これらの式は Fig. 3 を用いて、次のようにして与えられる。

梁の弾性曲線の式および任意の曲線の曲率半径の式より、

$$\frac{1}{R} = \frac{d\theta}{dl} = \frac{M}{E \cdot I} \quad (6)$$

ただし、 R : 曲率半径、 M : わん曲モーメント、 I : 慣性モーメント。

(6)式より

$$d\theta = \frac{M}{E \cdot I} \cdot dl = \frac{P(h-y)}{E \cdot I} \cdot \frac{dy}{\sin \theta} \quad (7)$$

$$\therefore \frac{P}{E \cdot I} (h-y) dy - \sin \theta \cdot d\theta = 0 \quad (8)$$

(8)式の微分方程式を解き、 $\theta=0$ のとき $y=0$ なる境界条件を入れて積分定数を決めれば、

$$\frac{P}{E \cdot I} \left(hy - \frac{y^2}{2} \right) + \cos \theta - 1 = 0 \quad (9)$$

(9)式において、 $\theta=\pi/2$ のとき $y=h$ なる境界条件を入れれば、

$$\frac{P}{E \cdot I} = \frac{2}{h^2} \quad (10)$$

(9)および(10)式より

$$y = h(1 - \sqrt{\cos \theta}) \quad (11)$$

(6)、(10)および(11)式より

$$\begin{aligned} R &= \frac{E \cdot I}{M} = \frac{E \cdot I}{P(h-y)} \\ &= \frac{h}{2\sqrt{\cos \theta}} \end{aligned} \quad (12)$$

また、

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{dx}{dl} \cdot \frac{dl}{d\theta} \quad (13)$$

なるゆえ、 $dx/dl = \cos \theta$ 、 $dl/d\theta = R$ 、および(12)式を用いて、

$$x = \frac{h}{2} \int_0^{\theta} \sqrt{\cos \theta} \cdot d\theta \quad (14)$$

$$\therefore c = h \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\cos \theta} \cdot d\theta \quad (15)$$

$dl/d\theta = R$ より、(12)式を用いて、

$$l = \frac{h}{2} \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{\sqrt{\cos \theta}} \quad (16)$$

$$\therefore L = h \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{\cos \theta}} \quad (17)$$

(10)式より

$$\begin{aligned} P &= \frac{2E \cdot I}{h^2} \\ &= \frac{\pi}{32} \cdot \frac{E \cdot d^4}{h^2} \end{aligned} \quad (18)$$

試片の任意の点における表面最大応力 σ_n は

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{E \cdot d}{2R} \\ &= \frac{E \cdot d}{h} \sqrt{\cos \theta} \end{aligned} \quad (19)$$

ゆえに、試片のループの頂点に生ずる表面最大応力 σ は(19)式において $\theta=0$ とおけばよい。

$$\therefore \sigma = \frac{E \cdot d}{h} \quad (20)$$

楕円積分を用いて計算すれば次の数値が得られる。

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\cos \theta} \cdot d\theta = 1.198 \quad (21)$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{\cos \theta}} = 2.622 \quad (22)$$

(21)および(22)式の値を用いて計算すれば、(15)および(20)式より(1)式が、(17)および(20)式より(2)式が、(15)式より(3)式が、(12)および(3)式より(4)式が、(18)および(3)式より(5)式が得られる。

試験応力 σ は試片の中央、すなわち、ループの頂点において与えられるが、破断が中央において起らない場合でも、その試験は無駄ではない。なぜならば、試片の中央より破断点までの距離 l を測定し、試片の全長 L の百分率で表わせば、破断点に作用していた実際の応力 σ_n は次の(23)および(24)式より、楕円積分を用いて計算できる。

$$\frac{l}{L} = \frac{1}{5.244} \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{\sqrt{\cos \theta}} \quad (23)$$

$$\frac{\sigma_n}{\sigma} = \sqrt{\cos \theta} \quad (24)$$

Fig. 4. Bending stress at any point off the center of specimen (apex of the loop) in the terms of the max. stress at that center.

Fig. 4 は l/L と σ_n/σ の関係を示す。実験によれば、破断は普通 $l/L=10\%$ 以内の点に起る。

試片のブッシング荷重 P は(5)式によつて与えられるが、その値はごくわずかであるので、自由端における摩擦による振りは無視することができ、したがつて、試片には純粋の回転曲げ応力に加えらる。

実験誤差は、試片の長さ L およびチャックとブッシング間の距離 c が試験応力 σ より計算されるために、ま

た装置の構造が簡単で操作が容易なために非常に少なく注意深く行えば1%以下に抑えることができる。

5. 2 疲労試験結果並びに考察

この試験機においては、従来のものに比して比較的長い試験片を必要とするが、試験片はまつすぐでなければならない。本実験においては主として手によつて直伸を行い、非常にまつすぐな試験片を得た。疲労強度は試験片の表面状態によつて影響を受け、特に細い線では表面きずや脱炭などによつて、いちじるしい影響を受けるので、試験片は00, 000, 0000のエメリー

Fig. 5. S-N curve of as-drawn wire.

Fig. 6. S-N curve of annealed wire at 250°C.

紙で研摩したものを用いた。

疲労試験は引拔儘の試片と250°Cで焼鈍した試片につき大気中で行い、含銅鋼線と普通鋼線のS-N曲線を求めて疲労強度を比較した。試験速度は2500 r.p.m.を用いた。Fig. 5は引拔儘の含銅鋼線と普通鋼線について得られたS-N曲線を示す。図において、曲線a, bはそれぞれ研摩した含銅鋼線と普通鋼線のS-N曲線を示し、曲線cは比較のために行つた研摩しない普通鋼線のS-N曲線を示す。この図から、引拔儘の状態において、含銅鋼線は普通鋼線に比してすぐれた疲労強度を有していることがわかる。また、研摩しない線は研摩したものに比し疲労強度が低く、これは表面きず部の応力集中や脱炭層の低い強度によりクラックが発生しやすいためである。Fig. 6はFig. 1に示すように、抗張力の最大となる250°Cで低温焼鈍を行つた含銅鋼線と普通鋼線について得られたS-N曲線を示す。この図から、250°Cで低温焼鈍した状態においても、含銅鋼線は普通鋼線に比してすぐれた疲労程度を有していることがわかる。

Table 4はFig. 5およびFig. 6のS-N曲線より求めた疲労限度および疲労比、すなわち、疲労限度/抗張力の値を示す。これより含銅鋼線は普通鋼線に比し、引拔儘の状態において約7%、250°Cで焼鈍した状態において約6%大なる疲労限度を有していることがわかつた。また、疲労比の値もそれぞれおよそ3%大なる値を有していることがわかつた。引拔儘のものと250°C焼鈍のものとを比較すれば、含銅鋼線および普通鋼線のいずれにおいても、250°C焼鈍のものが高い疲労限度を有している。これは疲労強度を低下せしめる引張内部応力が、低温焼鈍によつて減少するためであると考えられる。

次に、腐蝕疲労強度であるが、含銅鋼の腐蝕疲労強度についてはSchulzおよびBuchholzが、含銅量0.2~0.3%の低炭素構造用鋼の水道水に対する腐蝕疲労試験を行い、含銅鋼の錆蝕による疲労限度の減少の割合は25%で、普通鋼の36%に比し僅少であると報告している。

本研究では腐蝕疲労強度は測定していないが、以上の疲労試験結果および3の腐蝕試験結果、並びに

Table 4. Results of fatigue test.

Material	as drawn				annealed at 250°C	
	unpolish		polish		polish	
	σ_w' (kg/mm²)	σ_w'/σ_T	σ_w' (kg/mm²)	σ_w'/σ_T	σ_w' (kg/mm²)	σ_w'/σ_T
Copper bearing steel wire	—	—	46.0	0.37	50.5	0.39
Carbon steel wire	39.0	0.32	43.0	0.36	47.5	0.38

σ_w' : Fatigue limit under rotating bending, σ_T : Tensile strength, σ_w'/σ_T : Fatigue ratio

Schulz および Buchholz の実験結果より次のように推論することができる。すなわち、含銅鋼線は普通鋼線に比して疲労強度が大であり、また、大気中、水中および海水中での錆蝕、並びに酸蝕に対してすぐれた腐蝕抵抗を有するので、当然腐蝕疲労強度において一段とすぐれた特性を発揮するものと考えられる。

6. 総 括

鋼線の耐蝕法としては、鍍金による保護被膜とともに鋼線自体の耐蝕性を向上させることが重要であるので、本研究においては含銅量を従来の約0.1%を0.34%に増加させた含銅引拔鋼線につき、腐蝕抵抗および機械的性質、特に疲労強度を求め、銅以外の成分の含有量がほとんど等しい普通鋼線と比較して、耐蝕鋼線としての適用性を調べた。含銅鋼線の含銅量は、耐蝕含銅構造用鋼について行われている耐蝕性および圧延性の研究より採用した量である。

含銅鋼線の伸線後の機械的性質は普通鋼線に比し抗張力においてすぐれ、伸び、絞り、捻回復元および屈曲値においてほとんど等しく、また、100°~400°Cの低温焼鈍に対しても普通鋼線と同様な変化を行い、捻回復性を示さない。

含銅鋼線はまた、腐蝕試験においても普通鋼線に比し非常にすぐれた耐錆性および耐酸性を有することがわかった。すなわち、大気中における錆蝕に対して特にいちじるしい腐蝕抵抗を有しており、また、水道水における錆蝕に対してもすぐれているが、海水による錆蝕に対してはややすぐれている程度である。酸については、硫酸に対して特にすぐれた耐蝕性を有しているが、酸化性のある硝酸には銅が溶解するので含銅の効果はない。苛性ソーダや重炭酸ソーダのようなアルカリ性に対しては含銅の効果は認められなかった。

疲労試験は Hunter 式線疲労試験機によつて行つたが、含銅鋼線の疲労限度は普通鋼線に比し、引拔盡の

ものにおいても、また、低温焼鈍したものにおいてもすぐれており、疲労比の値も大であつた。

これらの実験結果は、銅以外の成分の含有量が完全に同一の比較試料が得られなかつたために銅のみによる影響であるといえないが、これら含有量の相違は僅少であるので、おもに銅の影響と考えてよい。また、試料の炭素量は0.46%で加工度も比較的lowいが、炭素量が0.55~0.65%で、さらに高い加工度の鋼線についてもほぼ同様のことがいえると思う。この点については現在研究中である。

以上の結果より、従来の鋼線の含銅量を約0.1%から0.35%程度まで増加させることによつて、耐錆性および耐酸性がすぐれ、かつ疲労強度の高いものが得られるので、鋼線あるいはこれよりつくられる撚線、または鋼索の腐蝕疲労強度をいちじるしく高め、その寿命を延長させることができると考えられる。

終りに、本研究に線材を提供された大日製綱株式会社社長山本利一氏にあつく感謝致します。

注：—

- 1) A.S.T.M., Report of Committee A-5 on Corrosion of Iron and Steel (1928) (1930)
- 2) K. Daevs, Stahl u. Eisen, 46, 609 (1926)
- 3) E.H. Schulz, Stahl u. Eisen, 48, 1393 (1928)
- 4) 遠藤, 理科報告, 17, 1255 (1928)
- 5) 村上, 遠藤, 関口, 金属の研究, 12, 430 (1935)
- 6) E.H. Schulz u. H. Buchholz, Z. Ver. Dtsch Ing. 73, 1573 (1929)
- 7) K. Daevs, Stahl u. Eisen, 48, 1170 (1928)
- 8) 児玉, 小平, 八幡製鉄所研究所研究報告, 8, 1, 25 (1928)
- 9) F. Nehl, Stahl u. Eisen, 53, 773 (1935)
- 10) 高橋, 日本金属学会分科会報告, 9, 85 (1952)
- 11) F.A. Votfa, Iron Age, Aug. 162, 78 (1948)
- 12) W.E. Wagenknecht, Mitt. Kohle-und Eisenforsch. 2, 157 (1940)
- 13) F. Bollenrath u. W. Bungardt, Arch. Eisenhüttenw. 12, 213 (1938/39)
- 14) E.T. Gill and R. Goodacre, Iron and Steel Inst. 130, II, 293 (1934)
- 15) R. Goodacre, Engineering, 139, 457 (1935)
- 16) D.G. Watt, A.S.T.M. 40, 717 (1940)