

熱 処 理 の 新 技 術*

大 和 久 重 雄**

New Techniques of Heat Treatment

Shigeo OHWAKU

最近の熱処理技術の進歩には、まことにめざましいものがある。この熱処理の新技术を、(1)ストレスを利用する熱処理、(2)変形を少なくする熱処理、(3)表面を硬くする熱処理、(4)超音波熱処理、(5)パック熱処理、(6)その他、に分けて解説する。

1. ストレスを利用する熱処理の新技术

熱処理は「赤めて」「冷やす」操作で、いわば温度と時間の二次元を利用したものである。ところが、新しい熱処理技術はこれにストレスを加味したもので、いわば温度-時間-ストレスの三次元を利用した熱処理技術である。このストレスには熱処理の際、外部からかける外部応力 (applied stress) と熱処理部品の中に自家発生する内部応力 (internal stress) の2つがある。いずれもこれらのストレスをうまく利用することによって、熱処理効果をいちじるしく向上させることができるのである。

1.1 外部からストレスをかける熱処理技術

従来の熱処理が加熱と冷却の2操作のみに依存していたのに対して、これに塑性変形用外力を加味したもので、広く変形熱処理 (deformation heat treatment) といわれている。これには加工熱処理 (Thermo-Mechanical Treatment, 略して TMT) と加工時効処理 (Mechan-

ico-Thermal-Treatment, 略して MTT) の2つがある。TMT は鋼を A_{c3} 変態点以上に加熱してオーステナイト化し、このオーステナイトまたは過冷オーステナイトに塑性変形を与えてから焼入れ、焼もどしする方法である。TMT には過冷オーステナイトを再結晶温度以上で変形処理する高温 TMT (HTMT) と再結晶温度以下で行なう低温 TMT (LTMT) の2種類がある。オースフォーム (ausforming)、オースロール (ausrolling)、オースフォージ (ausforging) などが TMT の代表的なものである。

MTT は再結晶温度以上あるいは以下において、塑性変形を与え、その後で時効する処理である。これには固溶線以上の温度で塑性変形を与え、急冷後時効する高温 MTT (HMTT)、再結晶温度以下の塑性変形と時効処理を行なう再結晶温度下の MTT (SMTT)、低温における塑性変形と長時間の室温時効とからなる低温 MTT (LMTT) の3種類がある。MTT の代表的なものは歪時効である。

1.1.1 加工熱処理 (TMT)

(1) 変則オースフォーム (modified ausforming)¹⁾

加工熱処理の代表的なものは 1958 年フォード会社 (米) の ZACKAY が開発したオースフォームである²⁾。そのやり方は Fig. 1 に示すごとく、

(イ) オーステナイト化温度 (焼入温度) から S 曲線の湾まで熱浴焼入れし

(ロ) この温度で塑性変形させ (変形量約 90%)、

(ハ) そのまま常温まで急冷する

方法である。

しかし、この方法は実験室内においては比較的容易に行ないうるが、工業的には実施しにくい面が多い。そこでフォード会社では最近、変則オースフォームという処理を発表し、これを自社製板ばねの製造に実用化しているということである。つまり、SAE 1052 鋼 (0.52% C) および 5150 鋼 (0.50% C, 0.8% Mn, 0.8% Cr) 製板ばねを 850°C に加熱して、オーステナイト化し、この温度から 730°C までの間で圧延加工 (変形量 30%) (変則オースフォーム) し、そのまま焼入れし、350~400°C に焼もどしするのである。Fig. 2 はこの変則オースフォームの操作図解である。この処理によって、HrC 48~52, $\sigma_B = 165 \sim 189 \text{ kg/mm}^2$ となる。これをハイウェイのトラック用板ばねとして使ったところ、従来の SAE 5160 鋼製板ばねより 25% 軽く、40% 枚数が少なく、しかも寿命が 60% も長いというのである。まことに画

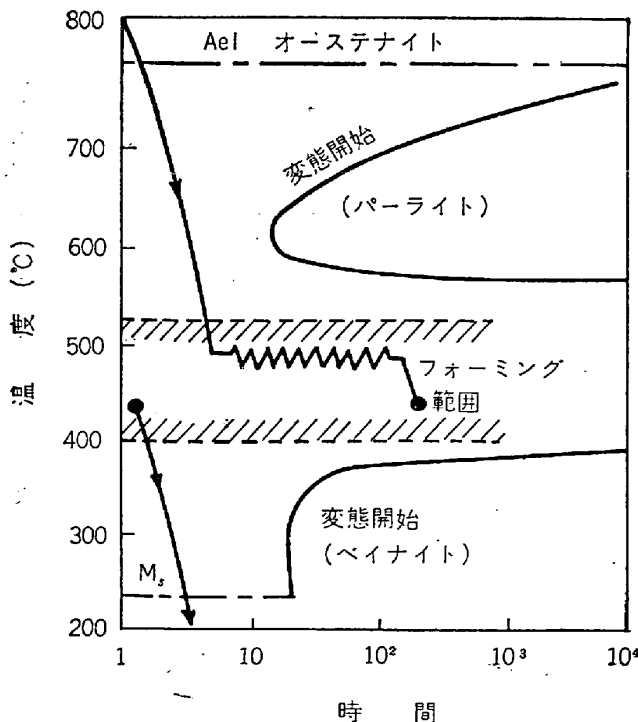


図 1 オース・フォームの操作図解

* 昭和44年 9月10日 受付 (依頼技術資料)

** 八幡製鉄(株) 工博

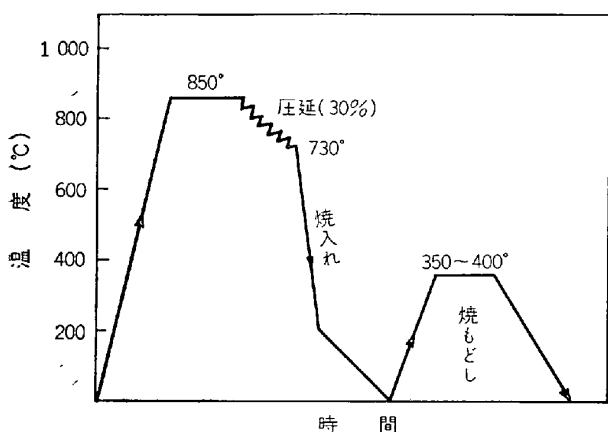


図2 変則オース・フォームの操作図解

表1 レール鋼の高温 TMT

処理	かたさ (HRC)	衝撃値 (kg m/cm ²)	
		高温 TMT せず	高温 TMT
水焼入れのまま	62~64	—	—
150°C 焼もどし	61~59	0.25	0.5
250°C 焼もどし	57~55	0.30	0.6
350°C 焼もどし	51~48	0.32	1.1

期的な板ばねの熱処理方法というべきであろう。

これとよく似た方法をソ連では高温 TMT と称し、レール鋼や Cr 鋼に適用して強力化を試みている。すなわち、レール鋼 (0.67% C, 0.95% Mn) を 850°C で約 24% 塑性変形 (熱間圧延) し、そのまま水冷する。この処理によって耐衝撃性が向上する (表 1) ³⁾。

また、Cr 鋼 (0.44% C, 0.59% Mn, 3.12% Cr) をオーステナイト化し、930~950°C で約 30% 圧延し、そのまま油焼入、焼もどし (200°C) すると、870°C 油焼入、焼もどし (200°C) 材よりも耐摩耗性が 20% 増加するというのである ⁴⁾。ベスレム製鋼会社 (米) で開発したローラクエンチ (roller quenching) ⁵⁾ は鋼板 (厚 50 mm 以下) を熱間圧延後、直ちに高压水を噴射して焼入れする方法で、一種の高温圧延焼入れである。ローラクエンチした鋼板は降伏点が 70 kg/mm² となり、ノッチタフネスが大きいので、圧力容器、ビル、橋梁、トラックフレームなどに賞用されている。

高温 TMT はわが国で開発された鍛造焼入れ (オースフォーム) とよく似ている。高温圧延する代わりに高温鍛造して、そのまま焼入れするのが、鍛造焼入れである。

(2) アイソフォーム (isoforming) ⁶⁾

この方法は等温焼ならしに加工処理を加味したもので英国で開発された新技术である。Fig. 3 はこの操作図解を示すものである。つまり、過冷オーステナイトがパーライトへ等温変態するとき、塑性変形を与える方法である。低合金鋼 En18 (0.48% C, 0.98% Cr, 0.18% Ni) にこのアイソフォームを施すと、強靱性が向上し、調質材よりも耐衝撃性がすぐれているということである。アイソフォームは目下のところ等温焼ならしに適用されているのにすぎないが、オーステンパに適用することも考えられる。この処理によってベイナイトの性質がさらに

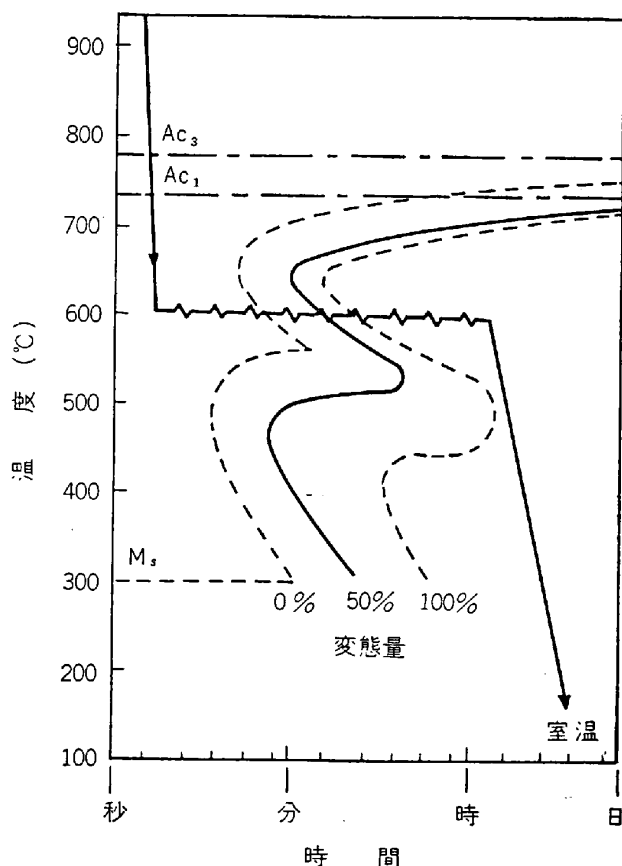


図3 アイソ・フォームの操作図解

向上することであろう。

(3) TRIP (Transformation Induced Plasticity) ⁷⁾
カリフォルニア大学の E. R. PARKER および V. F. ZACKAY が開発した加工熱処理で、クルーシブル製鋼会社 (米) で実用化に着手したものである。オーステナイト系ステンレス鋼 (301 系) を固溶化熱処理した後、Md 点 (塑性変形加工によって上昇した Ms 点) より高い温度、つまり 430~450°C で 80% くらい塑性加工 (温間加工) する処理である。場合によっては TRIP した後、常温加工 (約 16%) して 400°C で時効処理することもある。ステンレス鋼は TRIP 処理によって σ_s 140 kg/mm², σ_B 168 kg/mm², 伸び 35% になるという。超高力鋼としてボルト類、外科用針、防弾鋼板、高力鋼線などに使用される。TRIP とは Transformation Induced Plasticity の頭文字をとったものである。

表 2~4 は TRIP 鋼の試験結果の一例を示すものである。試料は 0.30% C, 2.0% Mn, 2.0% Si, 9.0% Cr, 8.5% Ni, 4.0% Mo のオーステナイト系ステンレス鋼であらかじめ 1150°C から水冷 (固溶化熱処理) したものを TRIP したのである。表 2 から明らかなように温間加工率は約 80% が最適である。また、TRIP 鋼は低温強度も大きい (表 3)。TRIP の後で常温加工と時効を施すと、さらに強靱性が発揮される (表 4)。なお TRIP 鋼は応力腐食や水素脆性亀裂に対しても強い抵抗を示すことが証明されている。

1.1.2 加工時効処理 (MTT) ⁸⁾

塑性変形と時効処理を組み合わせたものが、加工時効

表 2 TRIP における加工率と強さ

TRIP 加工率 (%)	σ_s (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)
53	122	140	49	53
55	116	139	44	52
61	142	155	42	59
65	138	147	40	55
68	147	156	40	58
81	159	172	32	55
84	155	196	40	54

(1) TRIP 温度は 430~450°C,
 (2) 線径 0.100~0.171mm

表 3 TRIP 鋼の引張強度

試験温度 (°C)	σ_B (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	磁気感応
-196	190	8	23	強
-73	215	22	52	強
21	173	34	55	強
93	166	12	46	微弱
204	154	6	32	微弱
316	146	7	42	微弱
427	137	6	39	微弱
538	132	8	38	微弱

(1) TRIP は 430~450°C で 80%
 (2) 線径 2.9mm

表 4 TRIP 板の引張強度

条 件	σ_s (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	伸 び (%)	
			25 mm	50 mm
TRIP TRIP+CR	長手方向 (L)		55	45
	145	154		
TRIP TRIP+CR	横手方向 (C)		15	7
	141	170		
TRIP TRIP+CR	横手方向 (C)		10	4
	177	201		

(1) TRIP.....430°C で 80%
 (2) CR.....常温圧延 16%, 400°C 時効

処理(MTT)である。MTTはソ連の論文に多く見られソ連の熱処理分類にも記号 75~77 として指定されている⁸⁾。ばね鋼や合金鋼に MTT を行なつて、疲労限やクリープ限の向上を試みている。

(1) ばねに対する MTT⁹⁾

0.6% C, 0.90% Mn のばね鋼を常温で 30% 塑性変形させ、これを再結晶温度以下 (270~300°C) で時効させる。この処理によつて、疲労限は焼入、焼もどし (調質) 材の 77 kg/mm² から 95 kg/mm² に向上する。つまりばねを MTT すると、焼入を省略しうるだけでなく焼ひずみもなくなるので、ばね製造上、益するところが多い。ソ連の自動車工場で、クラッチリリーススプリングをすでに 40000 コ製造し、200 エンジンにとりつけ、18カ月間テストしたが、従来の標準スプリングと何ら性能上は変化なしということである。

表 5 繰返し MTT の効果

	MTT の回数	σ_B (kg/mm ²)	σ_s (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)
焼なまし材 (850°C × 6hr)	1	58	53	13.8	58.7
	4	77	77	15	62
調質材 840°C 焼入れ, 440°C 焼もどし	1	143	137	8.5	43
	4	140	139	9.5	54.8

MTT...塑性変形 10%, 時効温度 {280~300°C (焼なまし材)
 {200~250°C (調質材)}

表 6 高合金鋼の MTT

処 理	σ_B (kg/mm ²)	ク リ ー プ 限 (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	疲 労 限	
					室温	575°C
調質	65	21	68	78		
MTT 1	67	30	70	79	+10%	+44%
MTT 2	72	42	59	77	+53%	+88%

(2) 繰返し MTT¹⁰⁾

0.3% C, 0.8% Cr, 0.20% Mo 鋼に繰返し MTT (塑性引張りとし時効を 2~4 回繰り返す方法) すると、焼なまし材では降伏点が 135%, 調質材では 28% 上昇するという (表 5)。

(3) 高合金鋼の MTT¹¹⁾

MTTはクリープ限を向上させるのに有効といわれている。高合金鋼 Kh18N9T (0.1% C, 18% Cr, 9% Ni, 0.4% Ti, 1.1% Mn) に MTT を行なつた結果を示せば表 6 のごとくである。MTTによつて室温ならびに高温 (575°C) の疲労限も向上する。

1.1.3 マルストレインング (marstraining)¹²⁾¹³⁾

TMTはオーステナイトを対象にしてストレスをかける熱処理であるが、マルテンサイトを対象にしてストレスをかける熱処理がマルストレインングである。従来、マルテンサイトが常温加工できるか否かは疑問とされていたが、米国 Lasalle Steel Co. でこれに成功した。AISI 4340 鋼 (SNCM 8), 4140 鋼 (SCM 4) の丸棒、六角棒、平板にこれを適用し、 σ_B 280 kg/mm² (焼入れだけでは約 210 kg/mm²) が得られたという。加工率は 10%以下 (通常 0.4%) で、超硬ダイスを使用する。この処理を施したものは、室温放置 15 カ月でも安定しているそうである。安価な構造用合金鋼の強化に有効であるが、低 C では好結果が得られない。G. E. 社の研究結果によれば、焼入れ、低温焼もどし後、マルストレインングを行なえば、降伏点を 15% 増し、疲労強度や切欠き衝撃値を高めることができる。このときの塑性変形量は約 0.4% が適当で、この後で時効させるのがよいといわれている。Fig. 4 はこのマルストレインングの図解である。マルストレインングの適用鋼種は低合金マルテンサイト鋼、二次硬化マルテンサイト鋼 (SKH, SKD), マルテンサイト系ステンレス鋼などで、水圧容器やミサイル用部品に應用されている。

また、12% Cr 鋼 (0.18% C, 12% Cr, 0.44% Ni) を 2% マルストレインングすると、高温強度や高温かたさ

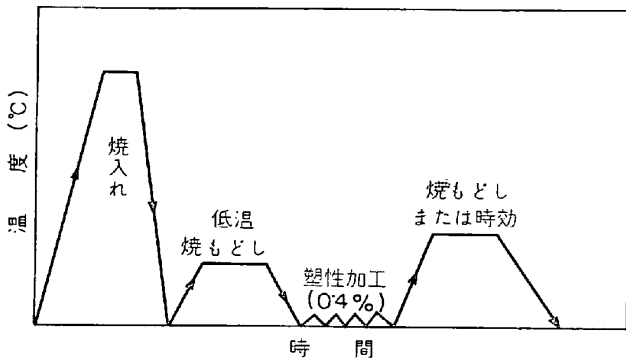


図4 マルストレージングの操作図解

表7 高速度鋼のマルストレージング

処 理	硬 さ (HRC)	曲げ力 kg/mm ²	撓み mm
1 270°C × 1.5 min 油焼入れ 560°C × 1hr 3回焼もどし	64	≈ 235	1.13
マルストレージング 1.5% 540°C 焼もどし	64.5	235	1.54
1 270°C × 1.5 min, 320°C ソルト焼入れ 560°C × 1hr 3回焼もどし	63.5	347	1.64
マルストレージング 1.5% 540°C 焼もどし	63.5	423	2.08

が上昇するという報告もある¹⁴⁾。

最近のソ連の論文¹⁵⁾によると、焼入、焼もどした高速度鋼 R18 (SKH2) に 1~1.5% の塑性変形を与えてから焼もどしすると、曲げ強さおよび、撓みを 20~50% 増し、残留オーステナイトが減少するという、塑性変形量は 1~1.5% が適当で、2.5~4% の変形量は過大といわれている。表7はこの結果を示す一例である。

1.2 内部ストレスを利用する熱処理技術

部品の心まで焼きが入らないような熱処理を有心焼入れ (shell hardening)、心まで焼きが入るような熱処理を無心焼入れ (through hardening) という。有心焼入れにおいては表層部だけ焼きが入るので、外周部に圧縮の残留応力を発生し、これが疲労強度を向上させる原因となる。焼入性の悪い炭素鋼 (S-C 材) の焼入れに活用されている技術である。しかるに、無心焼入れにおいては表面も心部も硬化するが、表層部に引張りの残留応力を生ずる。このために、疲労強度や転動強度が低下する。ボールベアリングのボールやレースにはこれが問題となる。SAE 52100 鋼 (SUJ2) においては、表層部に 7 kg/mm² くらいの引張残留応力を生ずる。したがって表面の残留応力を圧縮に変えるために焼入れの際、表面に窒素を浸透させる。これによつて、表面のマartenサイト変態点 (Ms 点) が下がり、焼入れの際、心部が最初にマarten化し、続いてこれよりもおくれで表層部がマarten化する。心部は遅く冷えるが Ms 点が高いため早く冷える表層部より先にマarten化して焼きが入ることになる (Fig. 5)。このために、表層部のマartenサイ

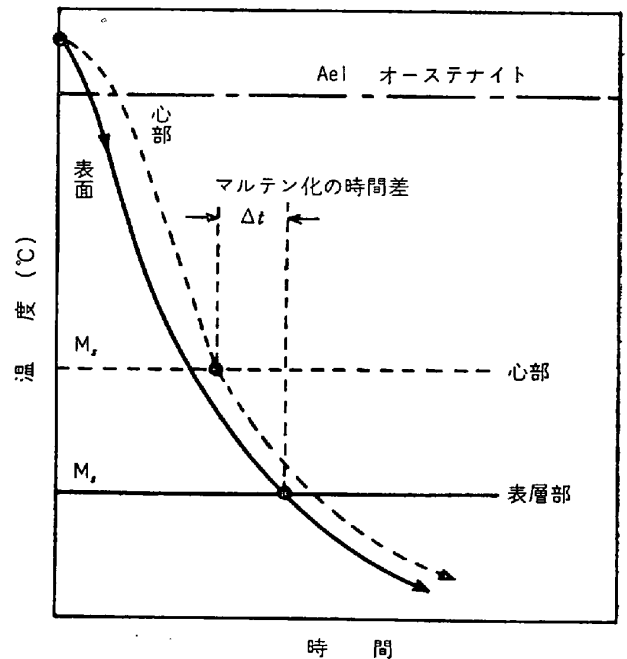


図5 マル・ストレージングの操作図解

トが心部のマartenサイトによつて圧縮のストレスを生ずることになる。つまり、表層部のマartenサイトが圧縮にストレスされるのである。これをマルストレージング¹⁶⁾¹⁷⁾という。いふならば、焼入れに際しては、心部から先に焼入硬化させ、続いて表層部を焼入硬化させるような方法をとるのである。この方法によつて、表層部に 7 kg/mm² くらいの圧縮残留応力を生ずる。このために、ボールベアリングのボールの転動疲労寿命が数倍も長くなるという。ボールベアリング用のボールやローラの熱処理としては、まことに画期的な技術である。別名 NDur. 法ともいう。Nitrogen を入れて Durability を増す処理方法という意味であろう。マルストレージングの考え方は無心焼入れに大切である。

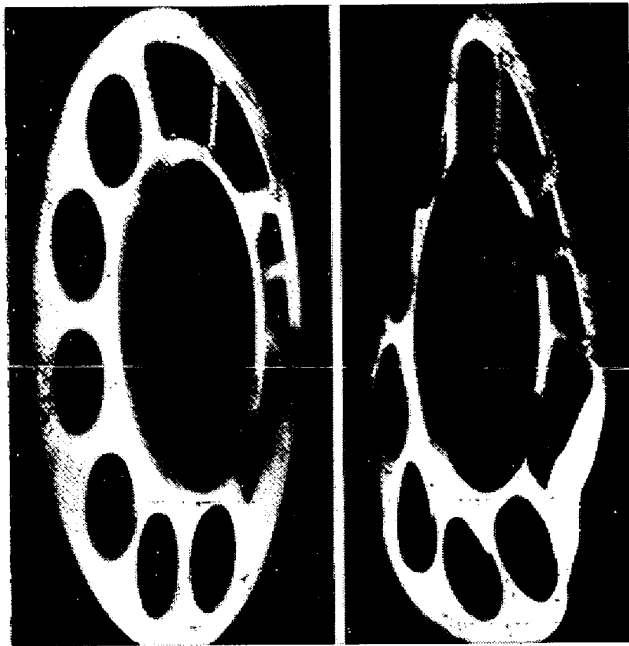
2. 変形を少なくする熱処理の新技术

一般に熱処理部品の最終工程はグラインダ研削と相場が決まっている。グラインダ研削の目的は表面肌をきれいにするとともに、焼ひずみを削正することにある。熱処理部品のグラインダ研削することは研摩焼けやら研摩割れなどのクレームをとめないやすいので、この作業はなるべく不要にするのにこしたことはない。このため、光輝熱処理が盛んになりつつあるし、また焼ひずみを少なくする焼入れが開発されているのである。

焼入れでなく、焼ならしで使用する鋼材も変形が多ければこれを矯正しなければならず、これがやつかない作業である。そこで無変形冷却方法が必要となるのである。

2.1 寒剤焼入れ (cryoquenching)^{18)~20)}

グラマン航空機会社で開発した急冷方法で、液体窒素 (-196°C) を使用して焼ひずみを少なくする技術である。グラマン会社では薄肉の Ti-6Al-4V 製品を液体窒素焼入れしたところ、写真1のように焼ひずみがほとんどゼロになったという。一般に水や油などの液体冷却では Fig. 6 のように3段階冷却となり、いかに均一冷却



水焼入れ 液室焼入れ
写真 1 液室焼入れのメリット

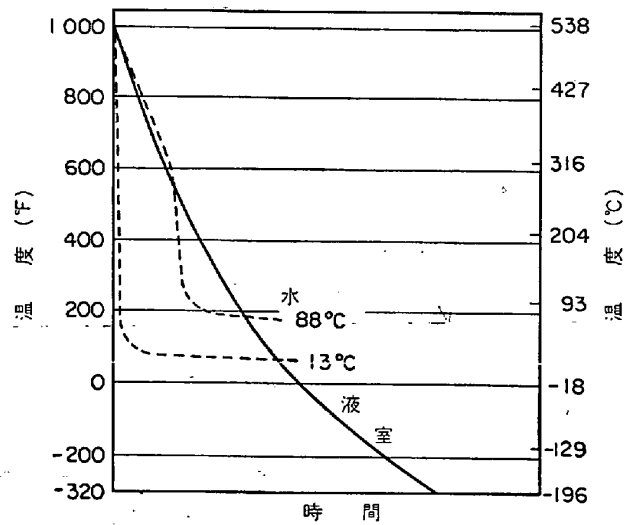


図 7 液室の冷却曲線

アルコールとの混合寒剤に焼入れしても焼ひずみを大幅に軽減することができる。ただし、このときには空気焼入れ鋼か焼入性のよい鋼、あるいは肉薄の小型部品でないといふと十分の硬化が得られない。

寒剤を冷却液に使用する焼入方法は、無変形焼入方法としては誠に新しい技術である。

2.2 有機水溶液焼入れ(organic quenching)^{21)~23)}

有機剤の水溶液焼入れ液としてはかつてポリビニールアルコール水溶液 (PVA) が使われたが、使用上 2, 3 の難点があつた。しかるに、ポリアルカリグリコール水溶液 (商標名ユーコンクエンチャント A) (30~40%水溶液) は水と油の中間冷却能をもっており、焼割れや焼ひずみが少ない特長がある。ボーイング会社において、Al 合金の薄板 (厚 1 mm) をユーコンクエンチャント A に焼入れしたところ、焼ひずみが 55~97% 減少し、矯正費用が非常に節約されたということである。この焼入れ液の濃度は屈折計によつて $\pm 0.25\%$ の精度でコントロールすることができる。

2.3 急冷・復熱冷却法²⁴⁾

高温鋼材を曲りなどの変形が生じないように冷却する方法で、八幡製鉄(株)の特許になるものである。一般に高温鋼材を曲がらないように冷却するには

- (イ) 冷却に際して鋼材各部の温度分布を鋼材の軸線を対称にして等しく保つこと。
 - (ロ) 冷却される鋼材を機械的に変形を防止するように保持して冷却すること。
 - (ハ) 冷却される鋼材の表層部と内部の温度差を小さく保ちながら冷却すること。
- を要するが、(イ)は実用的には実施が困難であり、(ロ)は厚板のプレスクエンチングなどに実用化されているが、設備上大型化し、かつ多大の建設費を必要とする難点がある。(ハ)の場合は徐冷するという事でその目的を達することができるが、能率的には好ましくない。

そこで、第 1 回目の急冷による温度降下幅を 100°C 以内にとり、温度が低くなるほどこの温度降下幅を大きくする。温度降下幅があまり大きいと、鋼材は曲りを生ずるが、温度降下幅が 100°C 以内では全く曲りを生ず

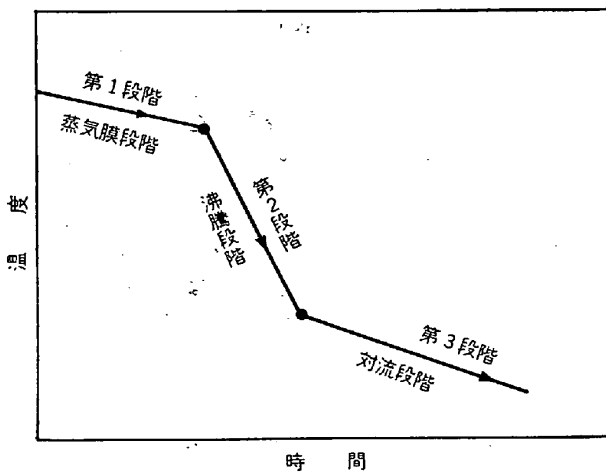


図 6 液体冷却の 3 段階

を行なつても、この 3 段階の徐、急冷のために焼ひずみが発生する。いわば液体冷却のもつ宿命である。しかるに、これが空気などの気体冷却になると、無段階冷却 (輻射と伝熱のみ) になり、冷却にアクセントがつかずに一様な連続冷却となるので、焼ひずみが少なくなるのである。液体窒素は見かけは液体であるが、赤熱物体が投入されると気化するので、実質は気体冷却となるのである。この点、液体酸素でも同じであるが、液体酸素では酸素冷却になるので、酸化の欠点がある。工業的には液体窒素を使用することが好ましい。Fig. 7 は液体窒素の冷却曲線を示すもので、この冷却能は水の約 $1/5$ であるが、超音波振動を与えることによつて冷却がさらに促進されるという。液体窒素のスプレークエンチも有効である。グラマン社の実験結果によると、11b の Al 合金を 510°C から焼入れするのに、液体窒素 4~6 lb を必要とするとのことである。液体窒素でなしにドライアイスと

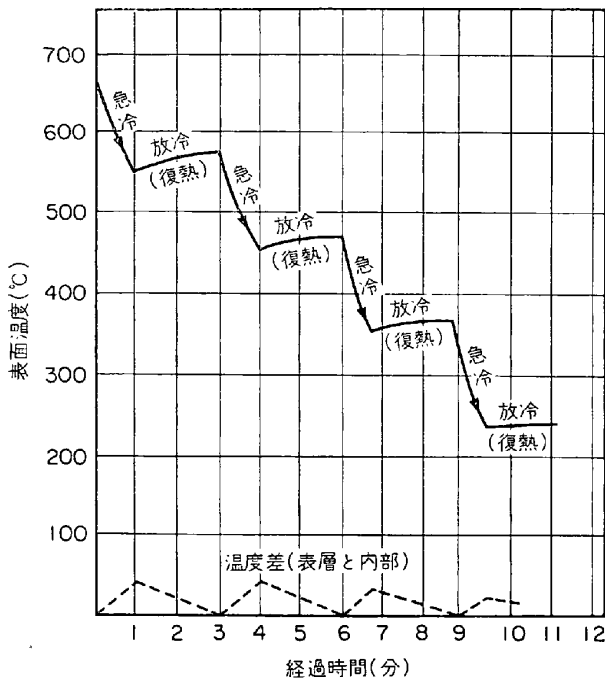


図 8 急冷復熱冷却の作業図解

ることではない。この温度幅まで急冷したら、そこで急冷を中断し、鋼材内部の保有熱によつて表面層を自然放冷しながら復熱させる。鋼材の表面層部が復熱した後、再び急冷するが、この場合の急冷による温度降下幅は第1次冷却の場合より大きくすることができる。この所定温度幅の急冷と自然放冷による復熱とを繰り返しつつ、冷却することによつて鋼材を曲りなしに冷却することができる。鋼材が曲りなどの変形を生じない温度差の範囲内を急冷し、次にこれを復熱させる工程を繰り返しつつ冷却するのがポイントである。Fig. 8はこの作業図解の一例である。

3. 表面を硬くする熱処理の新技术

鋼部品が摩耗、破損、腐食などを起こすのは鋼表面であるから、表面こそ大切にしなければならない。このため、近年、鋼の表面熱処理がいちじるしく進歩し、新しい技術が開発されている。

3-1 Noskuff 法²⁵⁾

英国 Cassel 社の開発になるもので、表面のかたさを増し、焼付きや摩耗に対する抵抗を増す方法として推奨している。この方法は最初ふうのように 800~950°C で浸炭または浸炭浸窒(ガスまたはソルト)し、そのまま直接 Noskuff 槽に移す。この槽はソルトバスで、10%以上 NaCN を含んでおり、温度は 700~760°C である。この中で 3~10 min 保持してから、油または水焼入れする。あらかじめ浸炭されたものとか高Cのものは Noskuff 槽(浴温 700~760°C)に 3~10 min 浸漬してから急冷する。この処理によつて、表面かたさ Hv 800以上が得られ、硬化深度は 0.013~0.025 mm である。この処理を行なった表面層は摩耗や焼付きに強く、疲労強度の大きいことが特長とされている。オイルポンプ、ドライブギヤなど、自動車やトラック部品に適用されている。

3-2 浸硫軟窒化処理²⁶⁾

三菱製鋼(株)の開発になる化学熱処理方法で、ばね鋼の疲労強度を向上させるのに有効である。この処理法はシアン化物(MCN)とロダン塩(MSCN)を主体としたソルトバス中でばね鋼を処理するのである。通常はシアン酸塩(MOCN)を使うのであるが、融点が高い(450°C)ので、処理温度を 550~600°C にしなければならない。この処理温度ではばねの焼もどし温度よりも高いので、ばね硬さが低下する。しかるに、本処理方法においては、融点の低い(260°C)ロダン塩を使っているので、処理温度も 400~500°C と低くできるから、ばね硬さを低下させるおそれがない。とくにロダン塩だと窒素の活性化が促進され、浸硫と軟窒化の効果が高くなるのである。またこの方法で処理した鋼は浸硫、軟窒化と同時に焼もどし操作を与えたと同じ効果があるので、鋼の内部強度を高めることにもなる。実験の結果によれば、Mn-Cr 系ばね鋼(SUP9)を 480°C × 2hr 処理したものは疲労強度が高くなるという。しかし、この処理方法を実用化する場合、公害をおこすシアン化物を使っていることと処理時間が長いことなどの欠点がある。しかし、形状の複雑なものや薄ものなど、ショットピーニングができないものに活用すれば大きな効果が認められる。

3-3 ボロナイジング(boroning)²⁷⁾

鉄鋼の表面にボロン(B)を浸透させて、耐摩耗、耐疲労性を向上させるセメンテーションをボロナイジングという。ボロナイジング温度は 600~900°C で比較的低温で、1~2hr の短時間で十分な硬化層が得られる。その硬さは Hv 1500~2000 で、深さは 80~100 μ である。ボロナイジングにはソルトを使つて液中浸漬または電解する方法(東海大法)と BCl₃ の気相中でボロン化処理する方法(都立大法)とがある。このほか、大阪市大では硼砂を主体とした溶融ソルト中でボロン化処理する方法、日立中研では固体拡散法によるボロナイジング法を研究開発中である。いずれも浸炭、窒化法よりも低温、短時間で表面硬化が可能であり、しかも変形が少ないなどの利点がある。ただ、もろいという欠点もある。この種の研究は米国、ソ連などでかなり進んでおり、実用化もそう遠いことではない。

3-4 TiC コーティング²⁸⁾

西独メタルゲゼルシャフト社によつて開発され、東洋工業(株)がこのライセンスを得て工業化した方法である。四塩化チタン、水素、炭化水素を高温で反応させて鉄鋼の表面に TiC を析出させる方法で、一種の気相メッキ(化学的蒸着とも呼ばれている)である。母材に SKD11、SKD11 のような高C-高Cr工具鋼を使用し、これに TiC コーティングを行なった後、熱処理を施して母材かたさを HRC 60~63 とする。

表面には 5~25 μ 程度の TiC 層が析出され、そのかたさは Hv 3800 にも達する。TiC コーティングは低摩擦係数、超高硬度、強い密着性により、工具の寿命を 5~20 倍以上にも延ばすことができる。現在、板金加工用工具(深絞りダイ、打抜パンチ、曲げダイ、サイジングパンチなど)や耐摩耗機械部品などに適用されつつある。工具鋼の靱性と TiC の超硬度とをうまく組み合わせた工具ということができる。

同じような TiC コーティングが米国でも研究されつつあり²⁹⁾、高温で TiC 層を 5 μ 形成させると、線引きダイスの寿命を数倍延ばすことができると発表している。

3.5 爆発溶射法 (detonation gun process)³⁰⁾³¹⁾

WCを酸素とアセチレンガスの爆発によって生ずる高熱、高圧を利用して溶射する方法で、一名 Ucar coating または flame plating ともいわれている。ユニオンカーバイド社(米)の特許に係るものである。溶射装置 (detonation gun) は小型ガスエンジンのような構造をもっており、この中に正確に秤量された WC 粉末を入れ、所定量の酸素とアセチレンガスを導入してスパーク爆発させる。この高熱、高圧によって半溶融状態になった粉末粒子が噴射され、部品の上に溶着される。爆発速度は 2950m/secにも達する。温度は 4000°Cにもなるので、セラミック(融点 2050°C)や WC (融点 2800°C)も半溶融状態になる。1 sec 間に 4 回の割合で爆射され、1 回の爆射で 6 μ 程度の被覆が形成され、反復溶射によって、0.05~0.5 mm 厚さのコーティングができる。部品の温度は 200°C 以上にはならない。表面かたさは WC の場合、Hv 1000~1300 にもなる。したがって、機械部品の耐摩耗性向上用の処理として有効である。将来性のある表面硬化法というべきであろう。

4. 超音波熱処理の新技术

最近超音波が熱処理に盛んに利用されている。超音波熱処理で、現在実用化されているものは超音波焼入れと超音波浸透である。一般に超音波は固体やガス媒体中よりも液体媒体中のほうが効果的に伝達されるので、焼入れ液(水、油、液体窒素)または溶融ソルトが超音波用媒体として利用される。

4.1 超音波焼入れ (super sonic quenching)

焼入れ液に超音波をかけ、これに物を投入して焼きを入れる方法である。超音波の適用によって、冷却の第1段階(蒸気膜段階)が短くなるので、冷却速度が早くなり、かつ気泡の付着がなくなるので、焼ムラができにくくなる。要すれば焼きがよく入るようになるのである。寒剤焼入れ(液体窒素)に超音波が利用されることはすでに 2.1 において述べた通りである。

4.2 超音波浸透 (super sonic cementation)

一般に超音波振動は化学浸透、たとえば浸炭、窒化、浸硫などを増進する。浸炭用ソルトや浸窒用ソルトに超音波を適用すると、浸透速度が倍増するといわれている。最近浸硫用ソルトバス(570 \pm 20°C)に超音波を通じて、浸硫を促進することが行なわれている³²⁾。この処理によって、高温(570~580°C)における摩耗抵抗を 30~40% 増加することができるという。とくに超音波浸硫は 200~220°C の低温においても可能であると報告されている。すなわち、浸硫ソルト浴温 220°C で、これに 23.5 kHz、強度 1.5 atm/cm² の超音波を通じ、浸硫時間を 3 hr にすると、表面かたさや組織にはあまり大きな変化はないが、耐摩耗性が向上するというのである。

また、この種の研究は英国でも行なわれており³³⁾、25% K₂CO₃、20% BaCO₃ ソルト(浴温 650°C)に周波数 11 KHz の電磁オシレータを付加すると浸炭硬化速度は 50% 以上加速されるし、硬化深さと浸炭時間とは

比例するというのである。

今後はソルトバスを始めとして、各種液体熱処理に超音波が広く利用されることと思われる。

5. パック熱処理(pack heat treatment)³⁴⁾³⁵⁾

非常に薄いステンレス鋼箔(フォイル)製封筒に品物を入れて熱処理する方法がパック熱処理である。封筒に品物を入れたおかげで、スケールや脱炭を生ぜず、寸法変化も少なく、ちょうど真空熱処理と同じ結果が得られるのである。家庭でクッキングフォイルを使つて魚肉を調理するのと同じである。フォイルには 18-8、含 Ti 18-8 (321系)、19-9 ステンレス鋼箔(厚 50 μ および 30 μ)があり、フォイルのままで使用する場合とこれ製の封筒を使う場合とがある。Sentry 会社(米)のセンパック、日本プラズマ工業(日)のヒートパックがこれである。ひじょうに薄い鋼箔からできているので、これで品物をパックして炉の中で加熱すると、中の品物よりもパックのほうが先に加熱され、これがパック内の好ましくないガスと反応し、このガスが品物に作用しないようになるのである。高価な炉気調節炉を使わなくても、光輝焼入れができるのである。なお、光輝度をあげるために、パックの中に粉末の還元剤を封入したり封筒の中の空気を除くために、吸気孔をつけて真空ポンプで排気する式のものもある。

パック熱処理は、目下、高C-高Cr鋼(SKD11)や高速度鋼(SKH)などの無酸化空気焼入れに推奨されている。油焼入れのときはパックのまま油中急冷するか、パックから取出して素早く油中投入すればよい。

フォイルはステンレス鋼箔(オーステナイト系)が大部分であるが、純鉄フォイルまたは極軟鋼フォイルもパック熱処理に好適と思われる。

写真 2 はパック熱処理の方法を示すもので、左端は品物をパックに封入するところ、中央は炉中で加熱されている状況、右端は熱処理後、パックを開いたところを示すものである。

6. そ の 他

6.1 球状化予備処理³⁶⁾

大同製鋼(株)の特許になる熱処理方法で、SK 材や SUJ 材の球状化を完全にするための前処理方法である。つまり、熱間加工後の SK および SUJ などを再結晶温度以下 200°C 以上の温度界域内で、1回 30% 以上の断面縮少率による塑性加工を行なつてから、球状化焼なましをするのである。この予備処理によって炭化物は均一微細となり、しかも球状化焼なまし時間は従来法の 1/4 以下に短縮することができるという。ドイツで開発した球状化焼なまし法も従来法の約 1/2 短縮ということであるが、大同法はそのまた 1/2 以下の短縮ということになる。SUJ 2 を一例にとるならば、この線材を約 400°C に加熱した状態で、1回の断面縮少加工により 40~50% 減面した後、780°C に 5 min 加熱し、680°C まで 30°C/hr の速度で冷やし、以後空冷したところ、微粒均一分布の球状化組織が得られたという。まことに有効な球状化方法というべきで、予備加工処理のメリットが窺える。

表 8 前処理組織とオーステナイト化時間 (0.70% C 鋼, 加熱温度 760°C)

前処理組織	前処理材 かたさ (Hv)	オーステナイト化 開始時間 (sec)	オーステナイト化 終了時間 (sec)	焼入かたさ (Hv)	オーステナイト 化順位
焼なまし	203	15	180	845	5
焼ならし	248	8	60	865	4
焼入, 焼もどし (500°C × 1 hr)	360	8	30	845	3
焼入, 焼もどし (350°C × 1 hr)	465	4	20	850	2
焼入, 焼もどし (150°C × 1 hr)	780	3	15	870	1
焼入れのまま	858	3	15	860	1

6.2 マルテンサイト二重焼入方法³⁷⁾

一般に鋼を急速加熱焼入れ, たとえば高周波焼入れや炎焼入れを行なう場合には, 前処理として調質(焼入, 焼もどし)するのが常識である. 組織はソルバイトである. しかるに, 前処理として焼入マルテンサイトまたは低温焼もどしマルテンサイト組織にしておくと, 急速加熱焼入れの際, オーステナイト化の開始および終了時間が 1/2 以下となる. しかもオーステナイト化終了直後に焼入れすれば微細なマルテンサイト組織が得られ, 均一な高焼入かたさが得られるのである. 表 8 はこの試験結果を示す一例である. ただし, マルテンサイト組織のものを急速加熱焼入れすることは急速時に研摩割れと同じような熱亀裂を生ずるおそれがあることと中間焼なましせずに焼入れを繰り返すことになるので, 焼割れや焼ひずみを生じやすい欠点があるから, 注意しなければならない.

6.3 液体金属による熱処理³⁸⁾

従来の熱処理加熱は一般にガス雰囲気中で行なわれ, 輻射, 伝導によつて熱エネルギーが伝達される方式である. ごく一部の熱処理に, 均一加熱を目的としてソルトバスが使用されているのにすぎない. 熱処理炉をコンパクト化し, 熱エネルギーを有効に利用するには熱伝達係数の大きい加熱方法を考える必要がある. それには液体金属を熱媒体として使用するのがよい. 鋼線のパテンティング法には熔融鉛, オーステンパにも熔融金属が熱媒体に使われている. BISRA (英) ではすでに軟鋼板の焼なましに液体金属を利用して好成績をあげている³⁹⁾. 液体金属を熱処理用媒体として使用した場合の第 1 の利点は大きな熱伝達係数を利用することによつて急熱, 急冷が容易にできることであり, 装置のコンパクト化, さらにラインスピードをあげることができることにある. 第 2 の利点はオーステンパやオースフォームなどの特殊熱処理ができることであり, 第 3 の利点としてはほぼ無酸化熱処理ができることと均熱処理が可能なことである.

鉄鋼材料の熱処理用液体金属として必要な性質は(イ)液体金属と鉄鋼材料との間にぬれ, あるいは合金化が生じないこと, (ロ)低温から高温にわたつて蒸気圧が小さ

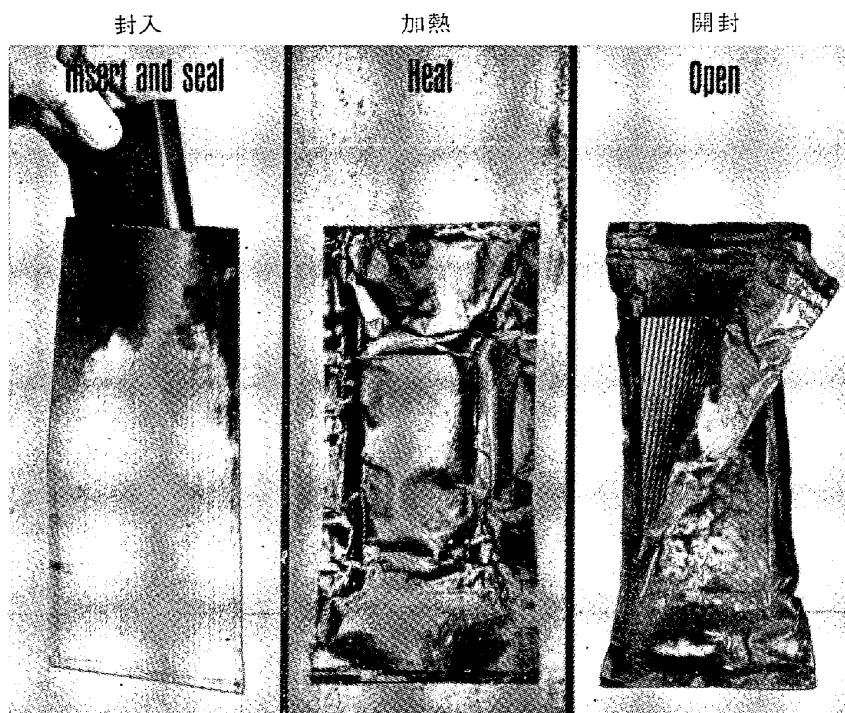


写真 2 バック熱処理の操作

く, 安定な液体状態を保つこと, などである. 最も一般的に使用される液体金属としては Pb または Pb-Bi 合金 (80-20), Pb-Bi-Mg 合金 (80-19-1) などが適当である.

液体金属による熱処理は連続焼なまし, 連続熱浴焼入れ焼もどしなどに応用され, ラインのスピードアップ, 装置のコンパクト化による床面積の減少, 無酸化無脱炭処理にその威力を発揮することと思われる. 今後の新しい加熱, 冷却の形態であろう.

6.4 熱処理の自動化⁴⁰⁾⁴¹⁾

熱処理も他の工業と同じように, 機械化, 連続化, 自動化, 無人化を計画されつつある. 熱処理は高熱作業で環境が悪いので, 労働力が不足勝ちであるため, 省力化が強力にすすめられているのである. 熱処理の自動化にはプロセスオートメーションとメカニカルオートメーションが考えられる. 高周波焼入れは全操作が自動化されており, ギャやボールベヤリングの焼入れに応用されている. ガス浸炭焼入作業はオールケスタタイプを採用してプログラムコントロールが行なわれている. また最近クルーシブル製鋼会社(米)にはコンピュータコントロー

ルされた熱処理装置 (棒鋼の焼ならしおよび調質用) が新設され, すでに活用されている. またハンドリングのロボット化も行なわれている⁴²⁾.

設備の自動化も大切であるが, この装置にかける素材が自動化に適したものでなければならない. 形状寸法が一定で, 焼入性が常にある範囲内にあるような鋼材, つまり H 鋼の普及および活用が望ましい.

6.5 熱処理技術および用語の JIS 化⁴³⁾

熱処理技術の重要性に鑑み, 1969年に焼ならしおよび焼なまし (JIS B 6911), 高周波焼入, 焼もどし (JIS B 6912), 焼入, 焼もどし (JIS B 6913) の3つが JIS 化されている. これによつて, これらの熱処理技術が規格化され, 一定水準の技術が確保されるようになったのである. 熱処理に関する仕様書には MIL (アメリカ軍用仕様書) があるのみで, 国家規格としてはこの JIS が世界でも最初のものである. 今後も浸炭焼入, 焼もどし, 窒化, 炎焼入, 焼もどしなどの技術が JIS 化を予定されている. まことに心強い限りである.

また, 熱処理用語に関しては戦前 JES が制定されていたが, いつしか有名無実となり, 久しく用語の統一が行なわれずに経過してきた. 業界, 学界の要望にこたえ 1969 年熱処理用語の JIS が制定された. これによつて用語が統一され, 技術的意志の疎通が可能になったことは喜ばしいことである. 外国では BS (イギリス規格) および DIN (ドイツ規格) に熱処理用語が標準化されている. 最近, ソ連でも熱処理技術の分類, 用語などを発表している⁴⁴⁾. これによれば鋼の熱処理技術を, (1) 普通熱処理, (2) 化学熱処理, (3) 変形熱処理の3つに大別し, それぞれ焼なまし, 焼入れ, 焼もどし, 時効, 浸炭, 窒化, 脱炭, 加工熱処理, 加工時効処理などに細分している. なお, 各熱処理技術は 2 桁の数字をもつて表わすことになっている.

以上, 熱処理の新技术について簡単に解説を試みた. 日進月歩の熱処理技術であり, 筆者の不勉強から解説漏れになった新技术もあろうかと思われるが, ご了承いただきたい次第である.

文 献

- 1) R. A. BOCK and W. M. JUSTUSSON: Metal Prog., 94 (1968) 6, p. 107~112
- 2) 大和久重雄: 日本機械学会誌, 68 (1965) 552, p. 93~98
- 3) D. M. KHAIT et al.: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 3~4, p. 322~323
- 4) V. Ya ZHARKOV: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 7~8, p. 533~534
- 5) 糸崎頭一: 住友金属, 20 (1958) 4
- 6) J. J. IRANI: J. Iron Steel Inst., 206 (1968) 4, p. 363~374
- 7) E. J. DULIS and V. K. CHANDHOK: Metal Prog., 95 (1966) 1, p. 101~104
- 8) E. S. SAVILOV et al.: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 1~2, p. 33~40
- 9) M. A. KOTKIS et al.: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 1~2, p. 133~136
- 10) V. L. NAGAPETYAN: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 3~4, p. 237~239
- 11) V. S. IVANOVA and M. G. VEITSMAN: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 7~8, p. 625~626
- 12) R. E. YOUNT: Materials in Design Engng., 7 (1963) 7, p. 67~69
- 13) Iron Age, 191 (1963) 6, p. 35
- 14) D. A. WOODFORD: Metallurgia, 75 (1967) 447, p. 3~8
- 15) L. B. ZHITNITSKAYA, et al.: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 1~2, p. 8~11
- 16) D. P. KOISTINEN: Trans. Amer. Soc. Metals, 57 (1964), p. 581
- 17) D. P. KOISTINEN and A. J. GENTILE: Metal Prog., 88 (1965) 4, p. 106~107
- 18) Iron Age, 199 (1967) 20, p. 88~89
- 19) E. G. Ir'yUSHKO et al.: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 1~2, p. 45~47
- 20) E. M. HOLUB: Metal Prog., 96 (1969) 1, p. 62~63
- 21) R. H. LANDERDALE: Metal Prog., 93 (1967) 6
- 22) J. K. SCOTT: Metal Prog., 95 (1969) 3
- 23) Engineering News, (1968) 340
- 24) 特許公報, 昭和 43-8330 (公告昭43-3-30)
- 25) F. D. WATERFALL: Metallurgia, 76 (1967), 455, p. 98~100
- 26) 技術ジャーナル, 昭和43年 5 月 24 日
- 27) 技術ジャーナル, 昭和43年 4 月 5 日
- 28) 篠原忠夫, 佐藤琢男: 金属, 39 (1969) 11, p. 72~76
- 29) Steel, Feb. 24 (1969).
- 30) Industrial Heating, 36 (1969) 5
- 31) 和田仙一郎: 金属別冊付録, 39 (1969) 18, p. 63~66
- 32) S. N. SOLOV'EV et al.: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 9~10, p. 730~731
- 33) J. W. MARTIN and R. BENSON: J. Iron Steel Inst., 206 (1968) 9, p. 936
- 34) J. W. SULLIVAN: Metal Treating, (1967) 6~7, p. 2~6
- 35) American Metal Market, (1969) 3~7
- 36) 特許公報, 昭 41-19283 (公告 昭 41-11-9)
- 37) 特許公報, 昭 42-12349 (公告 昭42-7-13)
- 38) 宇都善満, その他: 金属, 39 (1969) 18, p. 79~81
- 39) W. M. GIBBON: Iron Steel Inst. Spec. Rept., 79 (1963), p. 100~110
- 40) 大和久重雄: 熱処理の自動化, 日刊工業新聞社, (1968)
- 41) 熱処理, 9 (1969) 1
- 42) T. H. LINDBOM: Industrial Heating, 35 (1968) 9
- 43) 鉄鋼の熱処理加工の JIS の使い方説明会テキスト 日本規格協会 (1969)
- 44) E. S. SAVILOV et al.: Metal Science and Heat Treatment, (1968) 1~2, p. 33~40