

技術資料

鉄鋼の粉末冶金

窪田 治夫*

POWDER-METALLURGY OF IRON AND STEEL —REVIEW—

Haruo Kubota

I. 緒言

粉末冶金工業はドイツにおける戦時中の異常な発達に次いで現在米国にて劇しい発達の過程をたどっている極めて新しい工業分野である。既に発達の古いタングステン、モリブデン等の高熔融金属から超硬質合金、耐熱材料へと特殊金属分野の粉末冶金については新材料の発達に結び付いて、極めて広範多岐に亘る興味ある材料の分野が広められつつある一方、新しい粉末冶金技術を従来の材料へ応用した新しい加工技術の分野も拓かれつつある。非常に多くの人々がこの方面で活躍しておるため、未だ揺らんの域にある広い分野の巧みな展望をするのは非常に困難な仕事であるが、今回は鉄鋼の粉末冶金の中でも特に構造用鋼、就中機械部品を対称としてその発達の梗概をのべる。

II. 工業としての鉄鋼の粉末冶金

粉末冶金は従来粉末冶金技術（製造法）を用いねば製造できない金属材料の分野で主に発達して来たし、また今後もこの方面への発達は目覚ましいものと思われる。

高熔融金属は金属が粉末状でしか得られず現在の所粉末冶金の方法しか無く、多孔質金属は任意の均一な多孔性を得るために、またダストコア等は粒子を細くかつ粒界に特殊な性質を付与するために、また金属—黒鉛、銅—タングステン等は比重の異つた物質を均一に混合させるために粉末冶金技術を用いなければならなかつた。

最近の粉末冶金は上の如き特殊性能の材料を製造する分野より進んで従来は鑄造、鍛造、切削加工の工程を経、或いは鑄造のみで作られていた製品の分野に進出すると共に、特異な性質である多孔性を利用した新種の金属材料をも加えて機械部品の量産に対する新しい技術を確立するに到っている。

即ち粉末を金型に入れて高能率（1分間 10~30ヶ）の速度でプレスし、これをコンベア式の連続式トンネル

炉で次々と焼結する。精度の高い歯車等も更に一回乃至二回のプレスおよび焼結操作を入れる事によつて製造できるのであつて、全く機械加工はなく、材料歩留は 100%で単位時間の生産高は問題にならぬ位大きい。この方法は鉄、非鉄を問わず行われるが、鉄鋼の粉末でつくられる品物の種類は年々その種類と量を増している。部品の一例を Fig. 1 に示した。金型に粉末を装入して成型

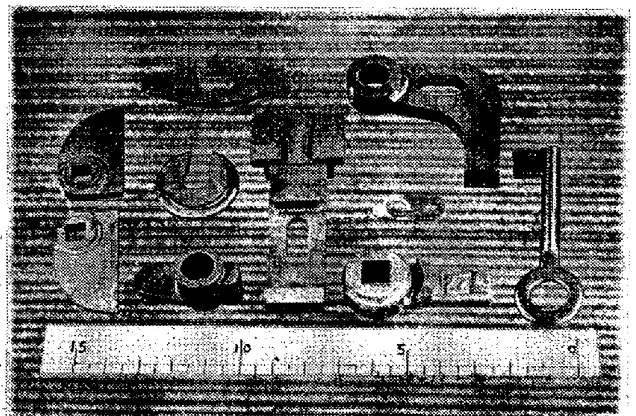
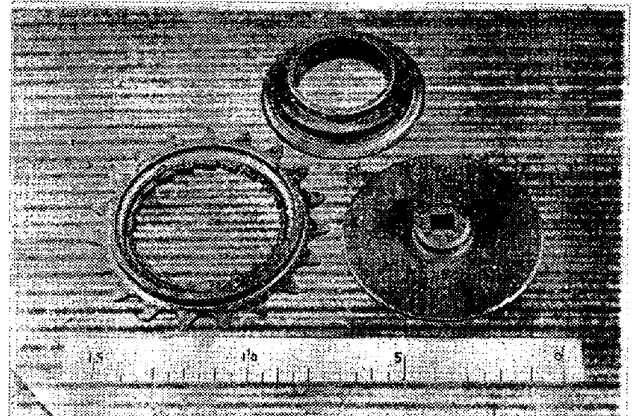


Fig. 1. Some sintered products of iron and Steel.

するため部品の形状および大きさに制限をうける事はいうまでもないが、金型の製作が可能でありかつ型押後抜取可能なものであればすべての部品を粉末冶金技術によつて製造することができる。粉末冶金法によつて現在製

造されている製品の種類は極めて広範多岐であるが多孔性材料としては焼結鉄軸受の他ベアリングコンテナ、オイルポンプ油車、ピストンリング、一般機械の摺動部等の自給油性を特徴とするもの、ステンレスのフィルター航空機翼の脱水器等の内部流通を特徴とするものがあり緻密な材料としてはタイプライター、計算器、金銭登録器などの小さい歯車、小型の磁石、小型のナット、等から自動車、自転車の部品、家具の部品、置時計柱時計の歯車、玩具類の部品、小型電気器具の部品、ミシンの部品、その他量産の対称となる機器の各種の小型部品の製造が行われている。これらは殆んど全部が全くプレスのみのものであるのは勿論である。

一般に粉末冶金法で製造する公差は最小次の如く報告¹⁾されている。

直径方向寸法: $\pm 0.1\%$ または $\pm 0.001in.$

外周寸法: $\pm 0.0005in.$

厚さ寸法:

部品の大きさ $0.1in$ 迄 $\pm 0.0015in$

$0.1 \sim 0.375in$ $\pm 0.001in$

$0.375in$ 以上 $\pm 0.002in$

真円度: $0.001in$ (インジケータの読み)

孔間寸法 ($3/16in$ 以上の孔) $\pm 0.001in$

直径公差は $3in$ 径では $\pm 0.001in$ であり $1/2in$ 径では $0.0004in$ になるが厚さ寸法は $0.375in$ 以上になつても上表の公差が限界である。焼結後の比重によつても公差は少しく変動し密な程小さい。タービン翼の如き複雑な形が鉄鋼合金を用い American Electrometal Corp. および Thomson Product Co. (米) によつて次のような精度²⁾ で作られている。

巾 $\pm 0.008in$

翼の厚さ $\pm 0.003in$

翼の輪郭 $\pm 0.005in$

翼の真直度 $\pm 0.005in$

振り $\pm 1/2^\circ$

工業上最も問題なのは金型であつて一組の製作費は数万円乃至 10 数万円であり、精度の低い小型の部品の型押には通常 1 組を必要とするに過ぎないが、精度の高い大型部品になると通常 2 組乃至 3 組を 1 種類の部品について必要とするため、少量の製作の場合は金型費のために原価高となるのが普通である。金型の寿命は個々の場合で異なるが大体 10,000~30,000 ケであり、超硬合金を用うれば 50,000~100,000 ケが可能である。また寸法精度高く公差の少ないもの程、金型の再研磨代が小さいために寿命までの型押個数が少ない。また一つの部品を新

規に製造する場合、金型を 2,3 回作り直すことも多い。従つて一般に粉末冶金法は量産を行う場合にのみ最もその偉力を発揮できる。

工業分野における競走者としてはダイカスト法、精密鑄造法、精密鍛造法があり夫々現在なお発展の過程であり、明瞭な分野を区切るに到っていない。

ダイカスト法は低融点金属で比較的精度の悪い複雑な形状に対しては粉末冶金より得であるといわれるが、鉄鋼の如き高融点金属に対しての応用は未だ将来の問題であろう。精密鑄造法は粉末冶金と興味ある競走をするものと思われるが、工程の単純さ、寸法精度の高さ、製造の速さにおいて粉末冶金法に一日の歩があるように思われる。精密鍛造法は現在の粉末冶金製品が鑄造品に近い性質のものが多いことから一応異なる分野である如くみられ易いが、事実一部の精密鍛造部品は既に粉末冶金製品によつて置換えられており、また今日鍛造品に近い性質を有する材料が生れている上、高温型押を加味した方法で全く鍛造品と同等な性質を付与する方法があることよみても、将来粉末冶金が精密鍛造の分野に少なからず入り込む事が期待できるであろう。

前述の如く現在の粉末冶金技術で作り得ない金属材料は皆無であり、専ら経済的な生産の面で制約され、他の方法に比して経済性の秀れた部分のみが転換しているに過ぎない。他に粉末冶金法の独自の分野があることはいうまでもない。

粉末冶金法によつて工業的に製造されているものは純鉄、低高炭素鋼、高、低合金鋼の全分野に亘つているが製造されている部品の多くは鑄造物に近い性質を有するものである。鋼塊を粉末よりつくりこれを鍛造加工する方法は一部真空管材料の分野で僅かに行われるにすぎないが、粉末をロールによつて圧縮し焼結し更に圧延、焼結する如き方法で薄板が既に製造されており、同様な考え方で管、棒なども製造されておる。また深絞用の素材を粉末冶金法で製造し歩留を向上させる試みなども報告されている。原料鉄粉が鋼塊より安価になればこれらの二次製品の製造分野へも広く進出することになる。

ドイツでは大戦中鉄鋼粉末冶金の発達に伴い鉄粉の生産が増大し 1944 年には年間 32,000tons を出している。1938 年には 200tons であつた。この中最大の用途は弾帯であつて 1943/4 には年間 1000tons を用いておる。現在は昔日の面影はなく輸出を含めて少量の生産を行うにすぎない。一方米国では 1944 年における粉末冶金による鉄鋼機械部品は 1720tons であつたが 1954 年には 7500tons と推定されている (Table 1)³⁾。これに

Table 1. Annual shipment of powder-metal-lurgical products in U.S.A. (net ton)

Year	Total	Bearings & parts	Friction materials	Magnetic cores	Miscellaneous products
1944	1,720				
1945	1,950				
1946	2,485	1350	30	415	690
1947	3,115	1560	30	600	845
1948	3,520	1685	25	990	820
1949	3,235	1746	14	935	540
1950	3,942	1570	23	1611	738
1951	3,651	2150	1.5	900	600
1952	4,048	2109	1.0	336	1602
1953	6,255	3457	14.4	1599	1189
1954 (Estimate)	7,493	3250	80.0	913	3250

比し銅系粉末冶金製品の生産は 1945年に 6,550tons であつたが 1953 年には 11,515tons におよんでいる。米国金属粉末協会の報告によれば粉末冶金工業全体の売上額は 1949 年に 125,百万\$, 1953 年には 2 億\$ と発表されている。発達の様子は急速である。General Motors では 1953 年において 160lbs の粉末合金部品を一車当り使用しているが 1955 年にはこれを 300lbs にする予定であるといひ、Newjersey の Lionel Corp. (玩具汽車のメーカー) では 1945 年に年 50tons の部品を製造し初めたが 1953 年には年 600tons 170 種を製造している。(この数字に何れも鉄鋼以外の金属を含む)。

金属粉末の価格はコストを主体とする粉末合金部品には極めて重要な要素であり、Sweden の海綿鉄粉が最も廉価で約 10cts/lb, 電解鉄粉は約 50cts/lb, カーボニル鉄は 100~150cts/lb である。Table 2⁴⁾ に米国の鉄粉価格を示した。一方ドイツの価格は噴射鉄粉 0.8 D.M./kg. 電解鉄粉は 1.5~2.5D.M./kg, カーボニル鉄粉は 1.5\$/kg. である。

III. 粉末冶金製品の製造工程

鉄鋼粉末冶金製品の製造工程は銅、青銅その他の粉末冶金と同一の工程であつて鉄粉の製造、混合、焼鈍、篩

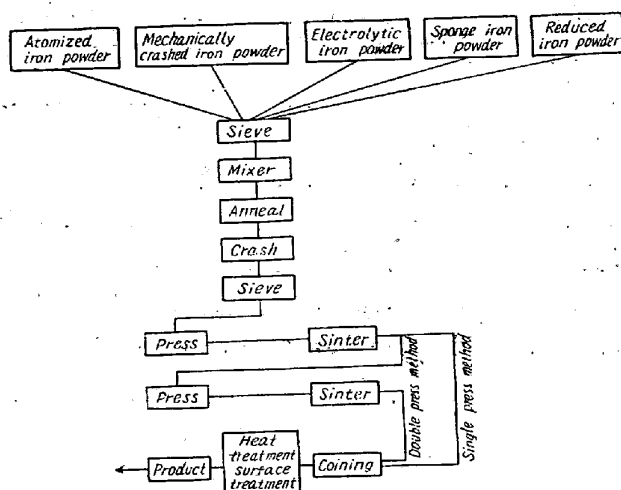


Fig. 2. Process diagramme of powder metallurgical products of iron and steel.

成型、焼結、整形工程の組合によつて行われる。Fig. 2 に工程組合の一例を示す。これは主として機械部品を作る工程であるが、線、鋳について原則的には同様であり、線にはスウェーディング、鍛圧或いは押出工程が、鋳にはプレスの代りにロール圧延が入る点が異なる。

原料鉄粉は製品の形状、要求される機械的性質、物理的性質、型押性等の選択要素によつて噴射粉、(R.Z粉, DPG 粉等) 機械的粉砕粉 (Hametag 粉) 電解粉、海綿鉄粉、還元粉、カーボニル鉄粉等が使い分けられる。これらは適当な粒度に篩分され、必要に応じて混合され還元気圏で焼鈍される。更に焼鈍された半焼結塊は粉砕され篩分される。この間に炭素、混合元素、滑剤が混合されて粉末の準備が終る。粉末は金型に入れ機械プレスまたは水圧プレスで成型する。圧力は通常 2~5tons/cm², 成型の速さは小型部品では毎分 30 ケ, 大型でも毎分 5~10 ケである。粉末は自動的に金型に装入され、粉末は一定の見掛比重を持つ如く調合され、成型品は自動的に取出される。圧縮成型された部品は連続式トンネル炉で 900~1400°C にて焼結される。焼結気圏には分解アンモニア、水素、CO/CO₂ 混合ガス等が用いられる。寸法精度の低いもの或いは多孔性製品などは焼結後

Table 2. Price of iron powder in U.S.A. (cents per lb)

Year Average	Swedish sponge iron -100mesh	Domestic sponge iron over 98% Fe -100mesh.	Electrolytic iron, annealed over 99.5% Fe -100mesh	Electrolytic iron, over 99.5% Fe -100mesh	Hydrogen reduced iron, over 98% Fe -100mesh	Carbonyl iron 99~99.8% Fe 5~10μ
1949	7.8 ~9.0	9.0 ~15.0	31~39.5	48.5	63.0~80.0	90.0~175.0
1950	7.4 ~9.0	9.0 ~15.0	38.0~39.5	48.5	63.0~80.0	70.0~135.0
1951	7.4 ~9.0	12.65~16.16	40.45	51.48	63.0~80.0	80.64~14.60
1952	8.57~9.79	15.5 ~17.0	43.1	56.2	63.0~80.0	83.0~14.80
1953	11.5	16.98	44.2	60.00	63.0~80.0	63.0~14.80
1954	11.25	16.35	40.75	56.48	63.0~80.0	83.0~14.80

直ちに製品となるが一般には更にプレスにより整形（コイニング）され精度が上げられる。比重が大きい部品は強度も大であり、且つ精度も高いが、このためには1回のプレスおよび焼結では不十分であり2回、3回のプレスおよび焼結をくり返す。1回プレス法および2回プレス法と呼ばれる。これらの方法は精度のみならず、部品の形状、プレスの能力、粉末の性質などによつて適当に選択されるものである。製品は更に滲炭、熱処理、銅滲透を行い或いは精度を更にあげるものは研磨加工等を行つて使用される。

IV. 鉄 粉 の 種 類

良質な適した原料鉄粉を安価に得ることは低コストを最大の利点とする機械部品の如きものの製造には最も重要なことの一つである。特種な物理的性質、機械的性質を要求する磁性材料等には高価であるがカーボニル鉄粉等が選択されるのは当然である。鉄粉の製造法には種々あるが専ら機械部品の対称となつてゐるもののみについて述べる。

(1) 海綿鉄粉

海綿鉄粉の製造はスウェーデンに発達し現在は米国内にも工場を持つてゐる。良質の鉄鉱石を粉砕し炭素と混合して大きな煉瓦状のブリケットとしてピットに埋め高温のガスを通じて海綿鉄を作り、粉砕磁選、焼鈍等を繰返して鉄粉とする。スウェーデンのヘガネス社では月産1000 tons を製造しヘガネス鉄粉として欧米に輸出している。この性質は次に示す如くであり、形は不整形のスポンジ状であり、型押性よくかつ廉価であるのが特徴である。

化学的組成

C:	0.15% 以下
SiO ₂ :	0.3% 以下
P:	0.015% 以下
S:	0.015% 以下
O ₂ :	0.1% 以下

物理的性質 (-100mesh)

充填容積:	40cc/100 g
鼓打容積:	31cc/100 g
流動性:	30sec/50 g

(2) 噴射法鉄粉

D. P. G. (Deutsche Pulvermetallurgische Gesellschaft) および R. Z (Roheisen Zunder Verfahren) と呼ばれる方法並びにこれと原理的に略々同一な2, 3の方法がある。何れもドイツに発達したが現在R. Z法は英国内でも工場が建設されている。何れも熔融し

たズクの細流に空気或いは蒸気を噴射させて粉末とする方法である。R. Z 法について梗概をのべる。この方法はドイツのマンネスマン会社で開発したもので一定組成の軟鋼スクラップを Cupola 状の小さい炉でコークス CaO と共に熔融し約 4% C のズクとし一度取鍋に取つた後細いノズルを通して流出させると同時に圧搾空気によつて水中に噴射させ粉末とする。この粉末は燃焼によつて表面に Fe₃O₄ の層ができ、内部は 4% C に止まるため全体として 3.0~3.5% C の鉄粉となる。形状は球状乃至芋状であつて内部は C の燃焼により中空である。水中に沈積した鉄粉はコンベアで運び出され乾燥炉を通り還元炉へ入れられる。炉は CO/CO₂ の雰囲気中で約 1000°C において粉末の C は Fe₃O₄ の酸素と結合して除去され鉄粉は 0.1% C 以下の組成となる。R. Z 粉末の性質を次に示す。この粉末はヘガネス粉と共に廉価であり広く応用されている。

化学的組成

化学的組成	篩分析
C: 0.10 以下	>0.4 mm... < 2%
Mn: 0.20 "	0.3~0.4... 15%
Si: 0.05 "	0.15~0.3... 28%
S: 0.03 "	0.06~0.15... 35%
P: 0.35 "	<0.06... 20%
O ₂ : 0.80 "	

物理的性質 (-100mesh)

充填容積:	38~42cc/100 g
鼓打容積:	32~35cc/100 g
流動性:	21sec/100 g (乾燥)

(3) 電解鉄粉

スクラップを陽極とし塩化第一鉄と塩化カルシウム溶液⁵⁾ 或いは硫酸第一鉄と硫酸アムモン溶液⁶⁾ を電解する方法で鉄は泥状または板状で作られる。泥状のものはこれを乾燥、還元するが板状のものは粉砕、還元焼鈍する方法が取られる。1916年 Siemens & Halske では月産 200 tons の Plant を作つたことが報告されている。電解鉄粉は一般に R. Z 粉の 2~3 倍の価格であり広くは用いられない。近年昭和電工会社の製造する電解鉄板は米国で粉砕されて試験されその優秀性が認められた。この価格はヘガネス鉄粉と米国の電解鉄粉との中間で密度の大きい機械部品には適しているといわれる。電解鉄粉の性質は次に示す。粉末の形状は樹枝状乃至針状であり流動性は極めて悪く型押性も悪いが、微粉となり易く純度もよく焼結品の質は秀れている。

化学的組成

C: 0.01%	Si: 0.01%
----------	-----------

Mn: 0.01%	P: 0.005%
S: 0.003%	O ₂ : 3.5%
H ₂ : 0.007%	N ₂ : 0.014%

物理的性質 (-100mesh)

充填容積:	35cc/100g
敲打容積:	23cc/100g
流動性:	不良

(4) 還元鉄粉

ヘガネス鉄粉も還元鉄粉の一種であるが、焙焼硫化鉄や圧延スケール等を炭素や水性ガス、天然ガス、CO ガス、水素等で還元して鉄粉を作ることが工業的に行われる。この鉄粉は比較的微細で廉価であり、形状は海绵状であつて型押性よく、米国では可成り広く使用される。米国の Pyron 会社の例は次のような性質を持つ

化学的組成	篩分析 (-100mesh)
C: 0.02%	+100.....tr
O ₂ : 0.8%	-100+150.....14.5%
酸不溶渣: 0.34%	-150+200.....21.5%
S: 0.05%	-200+270.....14.5%
P: 0.012%	-270+325.....10.8%
	-325.....38.7%

物理的性質

見掛密度:	2.41gr/cm ³
流動性:	31sec/100g

V. 鉄粉の選択要素

各種の鉄粉それぞれ目的に応じて使い分けられるのであるが、選択の要素として鉄粉の純度、圧縮性、粉末の粒度分布、粉末の流動性、焼結性、型押強度、焼結体の強度があげられ、これらの要素については、米国では Metalpowder Association による標準測定法が推奨されている。実際には種々な形状の製品をつくるに適する鉄粉か否かをこれらの要素のみで知るのには困難であり、実際の製造テストが最も重要であり、上述の要素は作業の再現性についての指針を得るにすぎない。粉末の性質の把握には未だ多くの未開の分野が残されている。

技術的要素以外に価格もまた選択の大きい要素であるのはいふまでもない。

要素の測定については他の標準を参照すべきであるが本文ではそれらの意味について若干説明することとする。

(1) 純度

鉄粉の純度は 97~99% 程度のものが用いられ不純物としては酸素、炭素、珪素、マンガン、リン、硫黄の如き通常の鉄中のものが問題となる。酸素は粉末表面の清浄度

を害するため粒子の接触が不完全となり型押品の強度を害しかつ型押時の滑りなどの原因を招く。炭素以下の不純物は粉末を硬くし、圧縮時の加圧力を大にしかつ粉末相互の面接触を害し滑りの原因ともなる。

(2) 見掛比重 (充填容積, または敲打容積)

粉末はその大きさ、形状、粒度分布によつて見掛比重を異にする。見掛比重の異なるものは一般に粉末冶金的な粉末の性質の差を示す。また製造上重要なものは毎分30ヶの型押を行う如き場合、金型の空隙に粉末を舂秤して速く秤量せねばならないが、一定の条件で金型を満たすとき常に一定量を装入するためには粉末の見掛比重の一定なことが重要な要素であることは容易に理解されよう。若し舂秤を用いず重量秤によつて金型に装入しても見掛比重の異なるものは焼結後の収縮変形量が異なるため、整形 (コイニング) 時の変形量が異り精度の高い製品は得難い。また圧力の分布も異り部分的な変形量の差を生ずる。工業的には見掛比重は一定の範囲が要求される。

(3) 型押性

圧縮性は無負荷の時の容積と一定圧力で型押後の容積との比によつて表わされる。この性質は粒形、粒度分布純度によつて定まる。一般にはできる丈小圧力で所定の比重、型押塊の強度、収縮性をもつた型押塊を得る性質の粉末がよい。

(4) 粒度分布

粒度分布は粒形と共に最も重要な要素の一つであつて厳重に規定されるが、微粒子については未だ測定自体に困難な問題を持つている。篩による測定は -325 メッシュまでである。粒度分布は、標準篩によりその篩の運転状況を規定して篩い、篩上、篩下の数区分を分ちとり重量%で表わす。

粒形、純度が同一の場合は粉末の性質は多く粒度分布により左右される。即ち製品の比重、機械的性質、焼結温度等が著しく影響される。一般には 40 メッシュより粗い粉末は用いられず、その分布は粗粒子がつくる空間を微粒子が次第に埋めて行く如くなつている。特に密度の大なる焼結鉄を製造するには粒度分布の適正な事が重要とされている。一定の粒度分布をもつ粉末をつくる事は可成り困難な技術であり、場合によつては数 tons を混合して Lot の性質を均一化す製造方法もとられる。

(5) 流動性

一定の角度を持つた漏斗の一定径の底孔より一定量の粉末が流下する時間で流動性を表わす。この速度は粒子の形状、粒度分布、および吸湿水分の量によつて影響される。工業的には金型へ自働的に粉末を挿入する際の安

定性の指標であつて、金型の空隙を十分に満たすに要する時間が不定であると型押粉末量が不定となり、成品の比重、寸法、機械的強度等の性質が一定にならぬ。また粉末が流入し難いような薄細部分のある金型ではその部分へ粉末が廻り難くなり弱点を形成し易い。現在発達している機械プレスでは毎分数十個を型押ししうるものがあるが、薄肉、細長のものでは粉末が型に流入するために要する時間により型押の速さが制限される状況に立到つている。また流動性の悪い粉末では装入装置に振動を与える等の特別な考慮を払わねばならない。明らかなように粉末の廻り難い金型には流動性のよい粉末が必要であり、一般的にも流動性のよいことは極めて望ましい性質である。

(6) 焼結性

型押品の焼結条件は粉末の粒形、粒度分布、純度により異なる。焼結条件は最も低温、短時間で、而も、できる丈広い焼結温度範囲で一定の比重、強度、収縮率等が得られるのがよい。焼結条件の範囲が狭い粉末は製品の不同を招き易い。焼結気圏は一般には水素、分解アンモニアガス、CO/CO₂ ガスが用いられるが場合により真空が用いられる。焼結性は圧力と比重、強度、収縮率の曲線を温度別に画いて比較される。

(7) 型押強度

型押直後の成型塊 (Green Compact) は自動プレスによる跳出し等の成型塊に加えられる力に耐えねばならない。できる丈小さい圧力で十分な成型塊の強度を得ることが望ましい。この強度には粒形、粒度分布、純度の何れもが強く影響する。粉末が冷間加工を受けて硬化している場合には粒子面の密着が悪く強度が弱い。粒形は不整形な程、粒度は大なる程、また純度も悪い程、成型塊の強度は小さい。

(8) 製品の性質

製品の性質は粉末が一定の場合でも部品の部分により若干異なる。部品の各部分が同一の圧力で型押し得られぬ場合が多くかつ粉末の流入も厳密には一定でないためである。そのため機械試験片の強度、比重が満足なものであつても各部分の性質は別に試験することが必要となる。この為、機械部品などでは強化する傾向のある部分へは特別な試験を加えている。

粉末冶金製品の比重は特に鉄と同じ密度で気孔の皆無な材質の必要な場合は別として、一般には 7.6~7.2g/cc (95%~92%) であり若干の気孔を有する。軸受、多孔性含油歯車の如きものは 5.5~6.5g/cc で故意に気孔をもたせる。

比較的気孔の多い材料の硬度試験にはショーア、ヴィッカーズ、Rockwell を用うるのは誤差を生じ易い。粒子自体の硬度は Micro Vickers 硬度を用いるのが最も正確であるが、Vickers, Rockwell の Superficial 硬度、10mm 球のブリネル硬度もこれに次いで海綿体全体としての硬度を表わすに用いられる。この間の硬度換算には非常に注意を要する。

抗張力は一定形状の金型でプレスし焼結したものについて比較されるが、前述の如く異なる状態でプレスされたものについては粉末、他の製造条件が同一でも同じ性質を示さないことに注意すべきである。即ち部品の形状によつて材料の性質が異なることは粉末冶金製品の性質を理解する上に重要な事項である。

以上の如き要素によつて粉末の選択が行われるが、これらの要素の基本となるものは粉末の形状、粒度分布、純度の三者である。粉末の形状は塊状、樹枝状、球状等に大別できるとはいえ何れの粉末もマイクロには更に細かい変動を示しておくため、粉末の形状のみで使用の可否を定めるのは実際には不可能である。同様に粒度分布、組成純度等の要素も選択の十分な条件とは成り得ないために焼結性、型押性、等の実際製造条件に近い或いは実際の製造を併せ行つて粉末の適否を定めるのが一般であり、上述の各要素は一定粉末を得るためのコントロールの要素とされているにすぎない。

VI. 焼結鉄及鋼の性質

粉末冶金によつて作られる鉄鋼材料の性質は比重、使用粉末の性質、(粒形、粒度分布)、組成、組織(熱処理)冷間加工度、粒界拡散の度合等によつて影響される。通常の金属材料に比して比重を考える点が著しく異なる点である。

焼結鉄は軸受、歯車の如き多孔性材料として用いられる場合と、できる丈密な材料として種々な部品に用いられる場合とある。オイルポンプ歯車では次の如き性質の材料が用いられている。

比 重	6.0~6.8g/cm ³
全炭素量	0.8~1.4%
遊離炭素	0.5~1.0%
ブリネル硬度	60~85kg/mm ²
抗張力	15~25 kg/mm ²
伸	僅小
耐圧力	80~90 kg/mm ²
衝撃値	鋳物と同様

この材料は硬度は低いが表面はバーニッシングされて

極めて平滑でありかつ含炭含油されるために耐摩性は良好である。

強度的に高度な要求に対しては比重高く気孔度の少ない材料が用いられるが歯車用の材料の例を取ると次の如くである。

- 比重……………7.2~7.4g/cm³
- 結合炭素……………0.65~0.80%
- ブリネル硬度……………170~200kg/mm²
- 抗張力……………50~65kg/mm²
- 伸……………4~5%
- 衝撃値……………2.2~3.0m-k/cm²

粗密を問わず焼結鉄は滲炭鋼と同様滲炭、熱処理が行われ Micro Vickers 900 kg/mm²、ヴァイッカース硬度 500~600 kg/mm² を多孔性材料で得ることも容易である。

Ni, Cr, Mo 等の合金元素を加えることも行われるが、低合金構造用鋼への進出はむしろ今後の問題である。ステンレス鋼、磁石鋼の如き高合金鋼に対しては既に多量の製造が行われている。機械加工が困難であり、かつ材料歩留のコストに大きく響くものに対しては極めて有効である。部品の性能も殆んど従来の材料に比し変わらない。

以下焼結鉄の性質とそれを支配する要素について若干説明を加えよう。

(1) 比重と焼結鉄の性質

焼結鉄の比重は材料の強度を強く支配する。比重と抗張力、伸、衝撃値の関係は A. Squire によれば Table 3⁹⁾の如くである。これは市販の還元粉により行われている。比重 6.0g/cm³ と 7.5g/cm³ とにおいて伸、衝撃値は 10 倍、抗張力は 2.3 倍になる。

Table 3. Relations between density and tensile strength, elongation, impact value.

Density g/cm ³	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %	Impact value m-k/g
6.0	14.06	2	0.28
6.5	17.58	5	0.7
6.75	21.9	7	1.05
7.0	24.61	10	1.4
7.25	28.12	14	2.1
7.5	31.64	20	2.8

比重と機械的性質との関係は原料鉄粉が同じならば 1 回プレス法、2 回プレス法でも同一の値が得られる。A. Squire⁹⁾による比重と衝撃値、剪断強度との関係を Fig. 3 に示す。また同氏により剪断強度と抗張力との

関係が Fig. 4⁹⁾の如く報告されている。

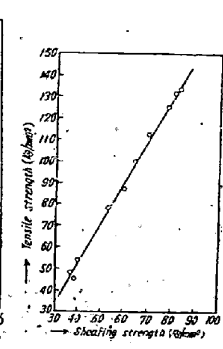
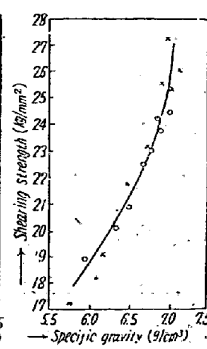
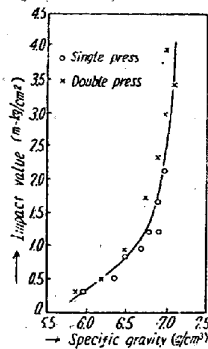


Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 3. Relations between specific gravity and impact value, shearing strength in single and double press method.

Fig. 4. Relations between tensile strength and shearing strength of sintered iron.

(2) 鉄粉の履歴と焼結鉄の性質

鉄粉は製造法によつてその性質が大区分される。

それらは夫々粉末の形状、粒度分布、純度を異にするため焼結体の性質も異なる。製造条件を調整してある範囲内の鉄粉に同じ性質を付与し、同一の部品に用いることは可能である。同じ条件で 5 種類の粉末から製造した焼結鉄の性質を Table 4⁹⁾ に示す。これは何れも一次焼結を 850°C×2h (水素中)、二次焼結は 1250°C×2h (水素中)で行っている。同一の比重に対しても機械的性質は鉄粉の性質により異なる点に注意すべきである。純度高く微粉な電解鉄粉が比重が同じでも伸が秀れている。

1125°Cにおいて 2h 分解アムニアガス中で焼結した 1%C を含有する 3 種の鉄粉を用いた焼結鉄の性質を Table 5¹⁰⁾ に示す。最も微細な D.P.G. 鉄粉が強度大で粒度の粗い電解鉄粉が最も弱い。これらの鉄粉は何れも工業的に普通使用されているものである。

(3) 粉末粒度と焼結鉄の性質

同種の鉄粉を用いる場合でも焼結鉄の性質は粒度分布により支配される。一般に抗張力、降伏点、伸、および硬度は粒度分布が粗粒になると共に減ずる。この関係の大梗を W. Eilender, R. Schwalbe による Fig. 5¹¹⁾ に示す。Hametag 鉄粉(渦状ミルによる機械的粉碎粉)につき I (<0.075 mm), II (0.075~0.1 mm), III (0.1~0.5 mm), IV (0.0~0.5 mm) の 4 分野に分ち、夫々を同一の比重を得る如く型押し 1130°Cにて 2h 水素中で焼結した。微粒である程焼結後は比重が大となる。

(4) 炭素量と焼結鉄の性質

焼結鋼においても通常の炭素鋼と同様に炭素含有量に

Table 4. Properties of sintered iron according to the kind of iron powder.

Kind of iron powder	Forming pressure t/cm ²		Specific gravity g/cm ³	Hardness Brinell	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %
	First	Second				
D.P.G iron powder	4	4	6.81	80	16.6	7.8
	6	6	7.15	90	24.1	13.2
Hametag iron powder	4	4	6.91	66	18.1	7.5
	6	6	7.28	89	24.8	14.5
Electrolytic iron powder	4	4	6.93	66	20.8	13.4
	6	6	7.33	78	24.1	23.0
Hägameons sponge iron powder	4	4	6.05	64	16.6	5.0
	6	6	7.05	80	72.6	9.7
Reduced iron powder	4	4	—	—	—	—
	6	6	7.31	94	34.2	14.9

Table 5. Properties of sintered iron from 1% C steel powder.

Kind of iron powder	Pressure t/cm ²	Hardness H _v	Tensile strength σ _B kg/mm ²	Elongation %	Particle size distribution μ				
					>152	152~104	104~76	76~60	<65
Electrolytic iron 1% C	3.1	70	12.6	0.3	7.0%	14%	12%	16%	51%
	9.4	160	42.5	3.0					
Sponge iron 1% C	3.1	105	23.6	0.6	1	19	21	3	56
	9.4	180	50.4	2.0					
D.P.G iron 1% C	3.1	90	30.0	0.5	—	6	9	2	83
	9.4	205	69.3	2.9					

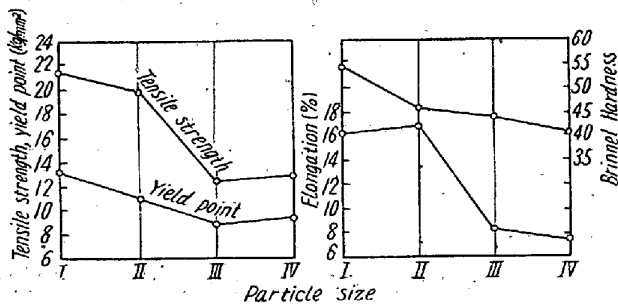


Fig. 5. Relations between particle sizes and mechanical properties.

応じて性質が変る。金属組織は比重の少ないものは炭が一面に存在する他は通常の鉄鋼組織と原則的には変らない。D.P.G. 鉄粉 0.15mm 以下の粒度の粉末をグラフアイトと混じて 6t/cm² (1回プレス) および 6+6t/cm² (2回プレス法) で製造したものについての硬度と炭素量との関係は Fig. 6¹²⁾ に、抗張力と炭素量との関係は Fig. 7¹³⁾ に示される。試料の比重は1回プレス法では 5~6.6g/cm³, 2回プレス法では 7.06~7.10g/cm³ で夫々ほぼ一定であると見做される。硬度、抗張力は炭素量と共に上昇し伸は減少する。

(5) 製造法と焼結体の性質

焼結体は製造法によつて機械的、物理的性質が異なる。熔融鉄および鋼を含めての相互の比較を Table 6¹⁴⁾ に行つた。No. 1 は電解鉄のインゴットを圧延、焼鈍した

ものでこれに比し単に圧縮、焼結したのみの No. 2 は比重小さいために硬度、抗張力は高いが伸が小さい。然し乍ら焼結体を高温で圧延した No. 5 は比重も 100% となり電解鉄インゴットより製した No. 1 と類似の性質を示している。また熱間押出を行つた No. 7(d) もこれに類似の性質となる。比重の小さい多孔性の焼結体は伸

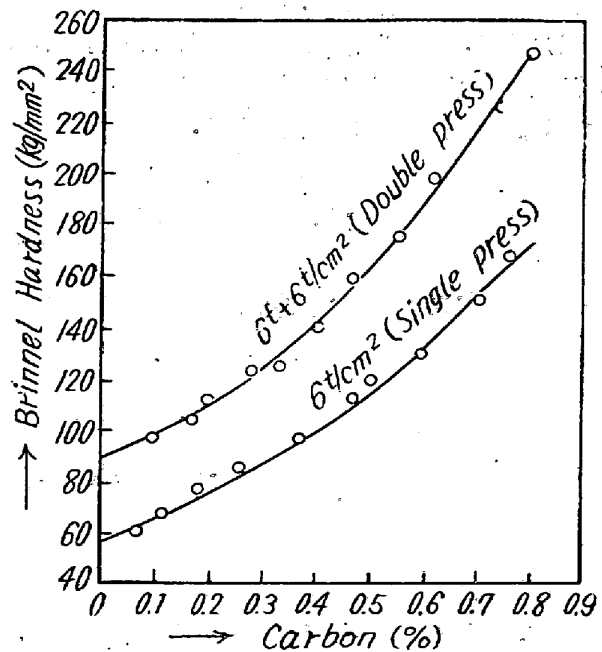


Fig. 6. Relations between hardness and carbon contents of sintered iron.

Table 6. Properties of sintered product according to the states of Material.

No.	Worked state of material	Densification %	Hardness (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation %
1	Electrolytic iron (cast, rolled and annealed)	100	45~60	24.5~28	40~60
2	Sintered iron (single press method) (<0.3mm iron powder)	83~88	60~70	17.5~21.0	8~12
3	" (Double press method) (//)	90~93	85~95	23.0~26.0	15~20
4	" (Hot press method) (//)	95~98	90~120	32.0~37.0	17~23
5	Carbonyl iron (after sintering rolled to 0.5mm sheet and annealed)	100	56~80	18~25	30~40
6	" (as rolled)	100	170~180	63~65	1~2
7 a	Carbonyl iron (hot extruded)	94	113	35~38	12~16
7 b	" (Hot extruded, sinter at 1300°C)	92	113	33~39	37~39
7 c	" (Hot extruded, cold worked 50%)	99	182	53~61	9~11
7 d	" (Hot extruded, cold worked 50%, sinter at 1300°C)	99	100	33~34	32~37
8 a	Sponge iron (Hot extruded)	91.5	112	34~36	10~12
8 b	" (Hot extruded, sinter at 1300°C)	91	120	33~35	21~23
8 c	" (Hot extruded, cold worked 50%)	95	182	55~56	1~3
8 d	" (Hot extruded, cold worked 50% sinter at 1300°C)	94	109	33~34	20~23

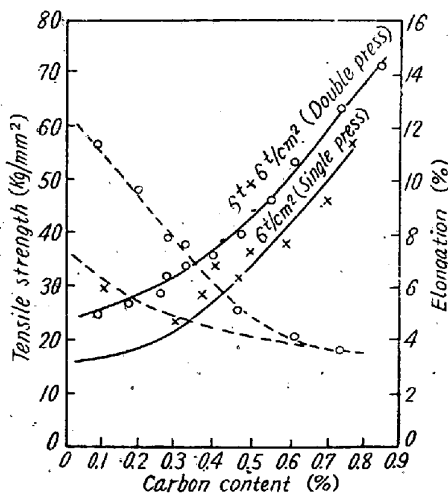


Fig. 7. Relations between tensile strength, elongation and carbon contents of sintered iron.

小さく鑄造材に相当し、鍛造材と完全に匹敵する伸を出すためには圧延、熱間押出等の加工が必要である。これらの方法を粉末冶金法と組合せて鉄、管、棒などが独自の工程により製造される。

VII. 銅 滲 透 鋼

多孔性の鉄鋼材料に銅または銅合金を滲透させると、銅は毛細管現象によつて焼結鉄の気孔を満す。従つて気孔率は著しく減少し1%以下となる。抗張力、伸が増大しかつ重要な特長は部品の部分的な強度の差をなくする点である。この効果を Flywheel effect と呼んでいる。銅含有量と焼結鉄銅合金の性質との関係を Fig. 8¹⁵⁾ に示す。比重は25%Cまで増大して100%に達する。伸

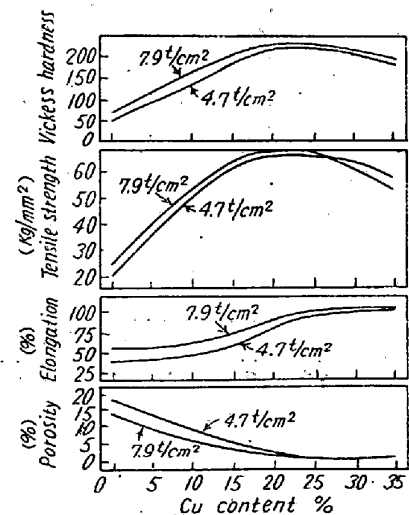
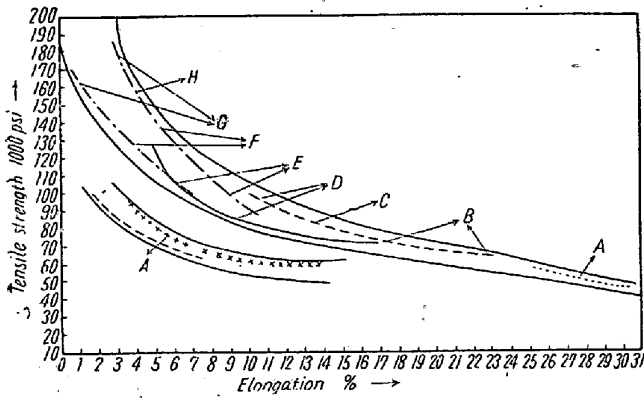


Fig. 8. Properties of Cu infiltrated sintered iron according to Cu content.

抗張力、硬度は20~25%において最大値を持ち、その値は極めて高い。最近この材料は広く機械部品に応用を見出しており、タービン翼も本材料で作られている。

鉄は1100°Cで約8%Cuを固溶し20°Cでは殆んど固溶しないためにFe-Cu焼結合金は時効性を有することが知られている。E.S.Kopecki¹⁶⁾によればCuおよびCu合金を浸透させた焼結鉄では熱処理による変化はFig. 9の如く紹介されている。即ち抗張力60,000~100,000 psi, 伸4~10%, アイソット衝撃値8~4ft-lbの焼結鉄銅合金が適切な熱処理によつて抗張力60,000~185,000 psi, 伸3~23%, 衝撃値14~6ft-lbに改良されている。Fig. 9においてA~Hは夫々の熱処理条件に依ず



Key	Material	Carbon	Nonferrous	Density
---	537*	none	Cu	all above 7.8
---	537	0.7	Cu	
---	537	none	Cu-alloy	
---	537	0.7	Cu-alloy	
.....	Electr.	none	Cu	7.5~7.8
++++	Swedish**	0.7	Cu	
xxxx	Swedish**	none	Cu	

* Trade name of American Elect. Metal Corp.
** Reduce sponge iron.

Heat Treatment

- A No heat treatment
- B 1475°F, Slow cool, 930°F for 4h.
- C 1475°F, Slow cool, 1550°F, H₂O quench.
- D 1475°F, Slow cool, 930°F-1292°F for 2h.
- E 1475°F, Slow cool, 1200°F for 18h.
- F 1475°F, Slow cool, 1550°F, H₂O quench, 930°F for 2h.
- G 1475°F, Slow cool, 1550°F, H₂O quench, 600°F for 1h.
- H 1475°F, Slow cool, 1550°F, H₂O quench, 1100°F for 1h.

Fig. 9. Curves showing tensile strength v. elongation properties of sintered iron and steel with Cu and Cu alloy infiltrater.

る抗張力、伸の値を示し線図は材質を示す。銅滲透を行わぬ通常の材料では A の範囲以下の性質しか持ち得ない。炭素を含まぬ焼結鉄では 930°F×4h の時効 (B) により抗張力の低下なしに伸が増大し、1550°F より水冷 (C) すればこれに比し伸が減少し抗張力は増大する。更に時効温度を上昇させた場合 (D E) は同じ傾向に進行する。0.7% 炭素を含有する場合は焼入後の時効温度 600°F×1h (G) では930°F×2h (F) より抗張力大きく伸は小で、時効による強度最大を示しているが 1100°F×1h (H) は F より強度大で伸が小さい。

VIII. 焼結鉄及鋼の熱処理

比重の如何に係らず焼結鋼は通常の鋼と同様に熱処理ができる。但し多孔質な材料は加熱中に脱炭し易くかつ焼入液の滲入等のために操作に特別な注意を必要とする。

一般の熱処理鋼と異なる点は焼入硬度であつ

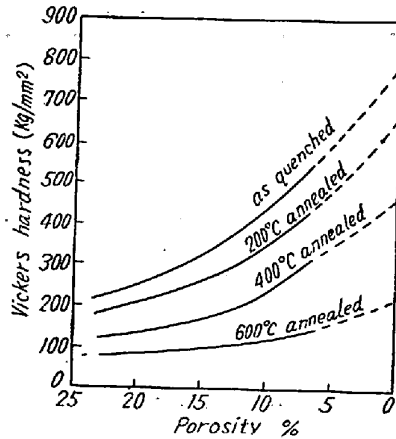


Fig. 10. Hardness and porosity of heat-treated sintered steel.

て、気孔度によつて同一の組織でも硬度が異なる。R. Chadwick の実験によれば種々の比重の電解鉄に 1% C を加えた焼結鋼を油焼入し 200°C、400°C、600°C で焼戻したものは気孔度 (比重) に応じて Fig. 10¹⁰⁾ の如き状態を示す即ち ヴィッカース硬度に示される値は気孔度によつて著しく影響され 20% 以上の気孔度では硬度の上昇は顕著でないが 5% 気孔度になると 600Hv にまで硬度が上がる。勿論各粒子の組織はマルテンサイトであつて、硬度 (ヴィッカース) の変動が気孔度の影響であることは焼入した材料の Micro Vickers 硬度値が ヴィッカース硬度の如何に拘らず 500~900Hmv を示すことで立証される。またショア硬度には一層鈍感である。また焼戻温度と抗張力、ヴィッカース硬度との関係は Fig. 11¹⁰⁾ の如く 350°C 附近に

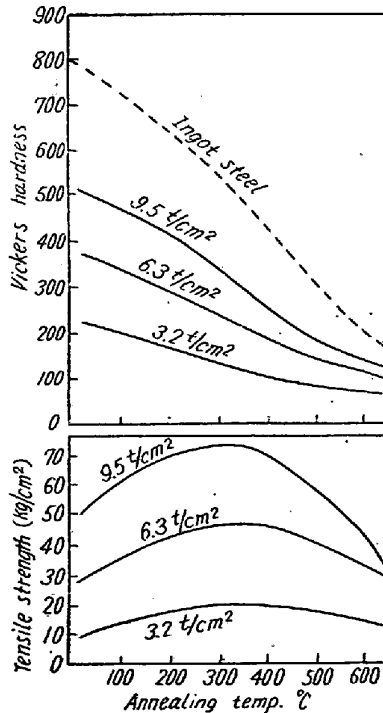


Fig. 11. Properties of sintered steel according to annealing temp.

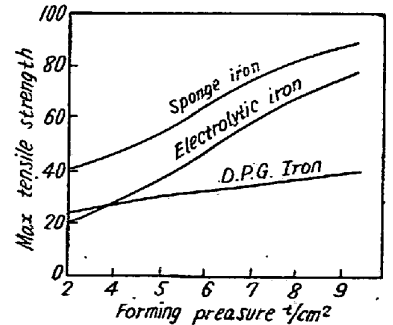


Fig. 12. Maximum tensile strength of some kind of iron powder.

抗張力の最大が存在するという。硬度は焼戻温度の上昇と共に漸減する。最大抗張力の値は Fig. 12¹⁰⁾ の如く鉄粉の種類により異なり、D.P.G. 鉄粉が最低であり、海綿鉄粉は最大、電解鉄粉は中間である。この理由は明瞭でないが報告されている。斯の如く調査後においても原料鉄粉の履歴の消えぬ事は経験さ

Table 7. Properties of normal steel and sintered steel after heat treatment

Material	Heat treatment	Sintering temp.	Tensile strength kg/mm ²	Yield point kg/mm ²	Elongation %	Brinell hardness kg/mm ²
Heat treatable steel (0.19~0.25%C)	a) Anneal		42~50	>24	>27	120~143
	b) 860°C water quench, 450°C anneal		62	38	18	177
	c) " , 700°C anneal		53	32	24	152
Sintered steel 0.275%C specific gravity ~7.54g/cm ³	a) Furnace cool after sintering	1100°C	40	27	23.5	124
	b) 860°C oil quench, 320°C anneal		47	36	22.5	134
	c) " , 704°C anneal		37	25	34	120
	d) 830°C water quench, 320°C anneal		58	46	13	158
Heat treatable steel (0.42~0.52%C)	a) Anneal		60~72	>34	>17	171~206
	b) 840°C water quench, 450°C anneal		84	50	10	240
	c) " , 700°C anneal		65	32	19	185
Sintered steel 0.52%C specific gravity ~7.47g/cm ³	a) Furnace cool after sintering	1100	47	29	17	137
	b) 830°C oil quench, 320°C anneal		59	41	14.5	146
	c) " , 740°C anneal		41	29	25	126
	d) 830°C water quench, 320°C anneal		86	72	8	311
Heat treatable steel (0.57~0.65%C)	a) Anneal		70~85	>39	<14	200~243
	b) 800°C water cool, 450°C anneal		97	60	9	277
	c) " , 700°C anneal		72	41	17	206
Sintered steel 0.64%C specific gravity ~7.43g/cm ³	a) Furnace cool after sintering	1100	49	30	11.5	132
	b) 830°C oil quench, 427°C anneal		68	51	13	161
	c) " , 704°C anneal		46	33	16	132
	d) 830°C water quench, 320°C anneal		96	77	8	218
Heat treatable steel (10.8%C)	a) Anneal		85~95	40~50	5~10	240~270
Sintered steel 0.87%C specific gravity ~7.33g/cm ³	a) Furnace cool after sintering	1100	59	44	7	158
	b) 830°C oil quench, 427°C anneal		77	61	5.5	177
	c) " , 704°C anneal		49	38	9.5	135
	d) 830°C water quench, 320°C anneal		107	93	4.0	245

れる所である。

通常の圧延した鋼材と焼結鋼との調質後における差異について種々検討が行われているが、Schwarzkopf¹⁸⁾による Table 7 を引用する。

0.3%C において、焼鈍状態では焼結鋼、普通鋼が両者略々同一の性質を示すが調質後は焼結鋼は伸が大きい抗張力、硬度はやや下っており、0.5~0.6%C でも同様な傾向がみられるが一般的には炭素鋼では焼結鋼は略々普通鋼と同等な機械性質を有し得ると考えられている。

IX. 結 言

焼結鉄および鋼の粉末冶金の全般に亘り略述し特にその材料的性質についてやや詳しく述べた。鉄鋼の粉末冶金の全容を知るには極めて不十分であるが、通常の鉄冶金学との差異についての概要を伝え得れば幸である。なお特殊鋼の分野は殆んど割愛したが、現在ますますこの分野に延びている事を記したい。

金属材料の部面以外に粉末冶金の技術には粉末の製造型押、金型の設計、焼結気圏、またはそれらの工業的設備に極めて興味ある分野が広いが、今回は記述を省略した。

鉄鋼の粉末冶金は既に広く実用化の域に達し今後益々新しい材料の開発に、あるいは新しい製造技術の開拓に進んで行くものであり、未だその限界すら窺知し得ない。(昭和 30 年 3 月寄稿)

文 献

- 1) Materials & Method, July, 1953, p. 67.
- 2) G. Stern: Iron Age, Feb. 23, 1950, p. 77.
- 3) Iron Age, Feb. 23, 1950, p. 77.
- 4) Iron Age, Jan. 6, 1955, p. 349.
- 5) Anonym, Z. Elektroch. 15, 1909, p. 595.
- 6) Gardam: Iron Steel Inst. Spec. Rep., No. 38, London, 1947, p. 3.
- 7) R. N. Okuno, L. H. Mott, Iron Age, 8. Aug. 19, 1954, p. 133

- 8) A. Squire, Office of Technical Serv., U. S. Dep. Com., Washington. 1945, Rep, PB 4410, PB 4047, PB 4073, PB 4418.
- 9) R. Kieffer & W. Hotop: Sintereisen & Sinterstahl, 1948, p. 206.
- 10) R. Chadwick & E. R. Broadfield: Iron Steel Inst. Spec. Rep., No. 38, London, 1947 p. 128.
- 11) W. Eilender & R. Schwalbe, Arch. Eisenhüttenwesen, 13, 1939~1940, p. 267.
- 12) (9) p. 229.
- 13) (9) p. 230.
- 14) (9) p. 262.
- 15) (9) p. 151.
- 16) E. S. Kopecki: Iron Age, 2, May, 1946.
- 17) (9) p. 123.
- 18) (9) p. 406.

工 学 会 手 帳 予 約 申 込 御 案 内

例年の如く本年も昭和 31 年(1956年)用日本工学会手帳を下記に依り発行致しますから何卒予約御申込下さい。

記

- | | | |
|------------|---|--------------------|
| 1. 寸 | 法 | 15 纏×9.5 纏 |
| 2. 定 | 価 | 170 円 (送料共 180 円) |
| 3. 予約申込期日 | | 昭和 30 年 10 月 25 日迄 |
| 4. 予約申込場所 | | 日 本 工 学 会 |
| 5. 予約金支払期日 | | 昭和 30 年 11 月末日迄 |
| 6. 手帳発送期日 | | 昭和 30 年 12 月 1 日より |

日本工学会の住所等は次の通りです。

社団法人 日 本 工 学 会

東京都千代田区丸の内 1 の 2 日本工業倶楽部 2 階

電話 (東京 28 局) 0706 番 振替口座 東京 5055 番