

討16

炭化物粒子の分散を伴う浸炭硬化

熊本大学工学部 ○千葉 昂, 豊田中央研究所 斎藤 卓
 東北大学工学部 高山武盛, 萩 士明, 西沢泰二

1. 緒言

周知のように従来の浸炭法は、鋼の表面層のオーステナイト中にC原子を侵入型固溶させ、焼入によって硬質のマルテンサイト組織とするもので、表面炭素濃度は通常0.8~1.0% Cの範囲にあった。その理由は、炭素濃度が高すぎると残留オーステナイト量が増大して焼入硬さが低下し、また、粗大な炭化物がオーステナイト粒界に発生して、表面層を脆化する等のマイナス面があるためであり、これを「過剰浸炭」と称して、その防止策が工夫されてきた。

しかし、微細な炭化物粒子の分散は表面層を強化し、耐摩耗性を向上させることが期待される。本研究ではCr, Mo, V, Ti等の炭化物形成元素を含む鋼を浸炭し、1 μ m以下の微細炭化物が分散した浸炭層を得る方法と、その組織の形成機構、硬さ、耐摩耗性等について基礎的な検討を重ねてきた⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。本報告はこれらの結果を総括したものである。

なお、本研究と同様に「過剰浸炭」を有効に利用しようとする試みは、これまでも国内、国外において行われてきた⁽⁹⁾。しかし、いずれも実用化研究であり、広汎な基礎的研究は見当たらない。

2. 炭化物の分散を伴う浸炭法(CD浸炭法)の基本形

本法の原理は、O原子に対する親和力の強い元素を固溶した合金を酸化性雰囲気中で加熱し、炭化物粒子の分散した組織とする「内部酸化法」と本質的に同等であり、Murphyら⁽¹⁰⁾はNi-Ti合金を浸炭してTiCの分散層を得る方法を「Internal Carburization、直訳すれば内部炭化」と称した。しかし、「炭化」は有機物の「炭素化」と混同される懸念があるので、以下ではCarbide Dispersionを伴うという主旨で、「CD浸炭法」と略称することにする。このCD浸炭法は図1にモデル化して示したように3種類に大別される。以下に代表例について説明する。

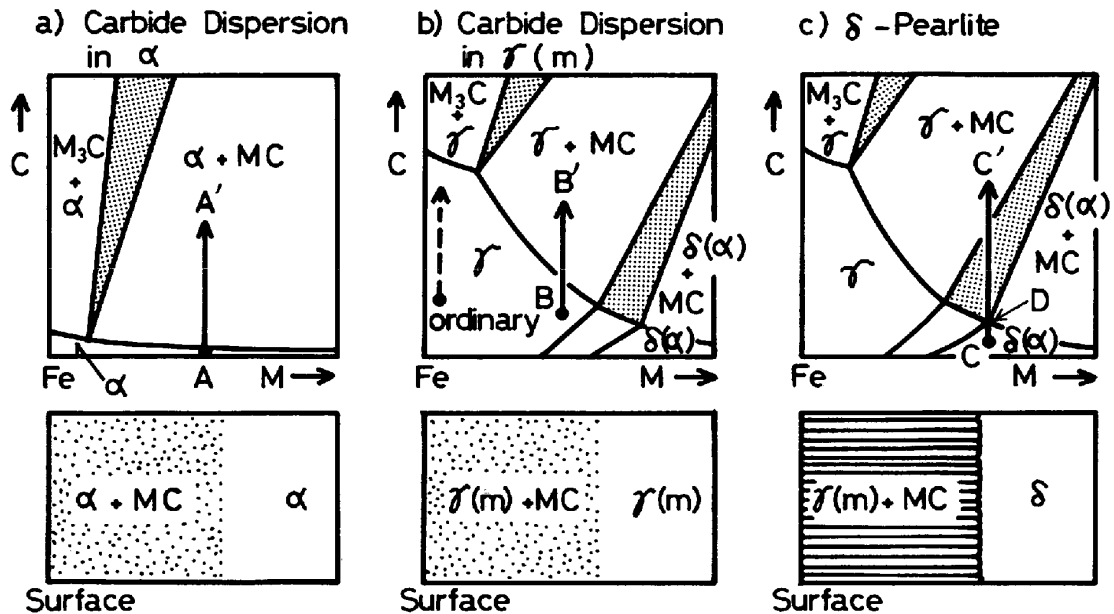


図1 CD浸炭法の基本形；上図は浸炭温度における切断状態図、下図は浸炭組織、

a) α 基質中に炭化物分散, b) マルテンサイト基質中に炭化物分散, c) δ ・パーライト

3. α 域におけるCD浸炭

Ti やV を含む鋼を A_1 点以下の温度で浸炭すると、図1の $A \rightarrow A'$ に沿って浸炭が進行し、その結果、図2のように α 基質中に約 $0.05 \mu\text{m}$ 直径の微細な炭化物粒子が分散した層 (CD層) が得られる。CD層の厚さ ξ は、内部酸化の場合⁽¹¹⁾と同様に、処理時間 t と次式の関係がある。

$$\xi = A \sqrt{t} \quad (1)$$

係数 A は α 相中のC原子の拡散係数 D_C^α 等に依存する。この D_C^α の値は、 r 相中におけるC原子の拡散係数 D_C^r よりもかなり大きいので、浸炭温度が低いにもかかわらず、CD層の成長は割合に速い。

CD層の硬さは鋼のTi, V%が多いほど、また、浸炭温度が低いほど高い。しかし 600°C 以下の温度での浸炭は、炭化水素系の浸炭性ガスを使用しても、鋼表面が酸化されるだけで、C原子を鋼中に侵入させることは困難であり、本研究で得られた表面硬さは、最高でも Hv 700 程度であった。ただし、基質が α 相のままなので、伸び値が高く、浸炭歪みが小さい等の特徴がある。

4. r 域におけるCD浸炭

A_1 点以上の温度で r 相域を起点として、図1の $B \rightarrow B'$ のように浸炭した後、焼入すると、マルテンサイト基質中に微細な炭化物が分散した、非常に硬いCD層が得られる。図3は高Cr鋼を浸炭した場合の硬さ分布と、表面近傍の組織であって、分散炭化物は M_7C_3 である。

この場合の浸炭操作は通常の浸炭法とあまり変わらないが、表面近傍や粒界に粗大な炭化物粒が発生しないように、鋼の組成と浸炭雰囲気とを調整しなければならない。

CD層の厚さ ξ は(1)式と同様に \sqrt{t} に比例し、係数 A は r 相中のC原子の拡散係数 D_C^r に依存する。また、大量に分散する炭化物を形成するために余分の炭素を要するので、CD層の成長速度は通常の浸炭の場合よりは幾分遅くなる。

なお、この形式のCD浸炭法は、従来からしばしば試みられてきたもので、実用化の可能性が高い。内藤⁽⁹⁾や阿部⁽¹²⁾らによる“高炭素浸炭法”もこの形式に属するCD浸炭法とみなされる。

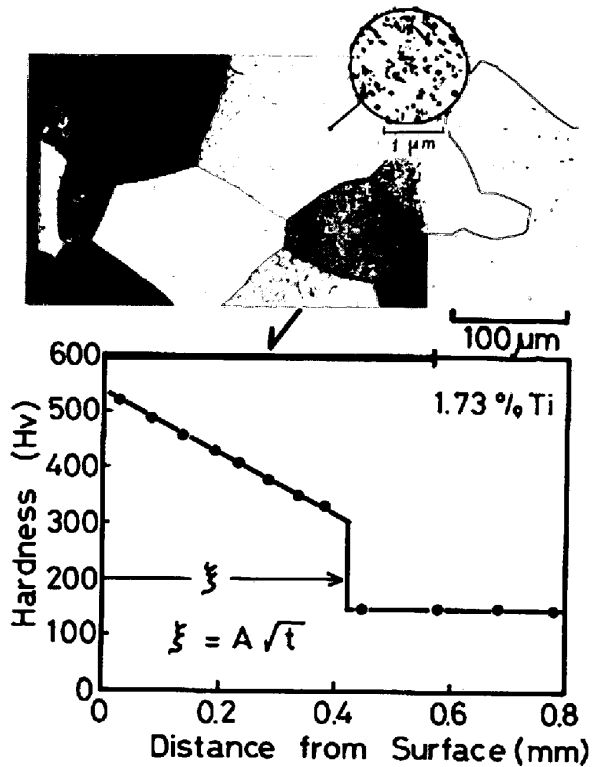


図2 α 域におけるCD浸炭 ($700^\circ\text{C} \times 6.25\text{h}$)
円内はTiCの抽出レプリカ写真

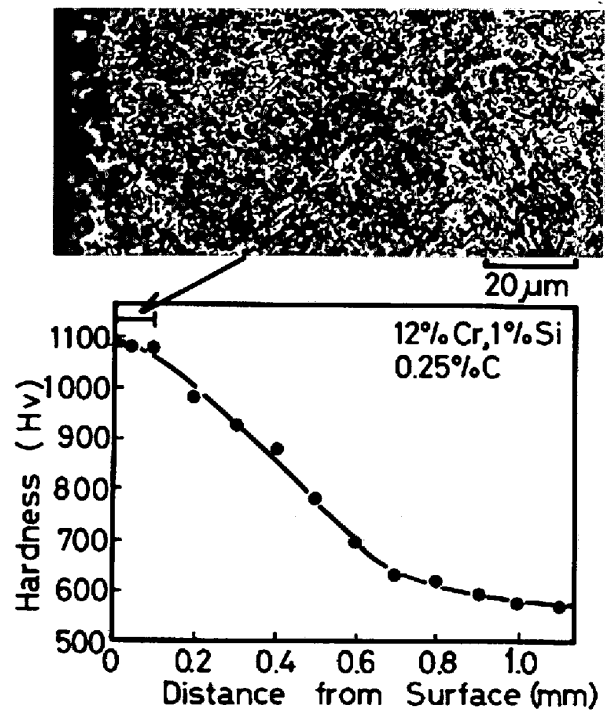


図3 r 域におけるCD浸炭 ($950^\circ\text{C} \times 8\text{h}$)
浸炭温度から焼入

5. δ ・パーライト変態を利用するCD浸炭

図1のC → C'のように δ 相を起点として、D点を経由し、 $r + MC$ 域まで浸炭すると、次式のような δ ・パーライト変態が進行して、 r 相と炭化物とが交互に配列したCD層が得られる。



図4は高Cr鋼を浸炭した場合のもので、焼入れたCD層は板状の $M_{23}C_6$ とマルテンサイトの層状組織であり、極めて硬い。Mo, Wを含む鋼では板状あるいは棒状の M_6C , V, Tiを含む鋼では棒状のMC炭化物が形成される。

CD層の厚さ δ は前と同様に \sqrt{t} に比例し、炭化物の間隔 S は、CD層の成長速度 $v (= d\delta/dt)$ と $vS^2 = \text{const}$ の関係にある。これは共晶組織の層間隔と成長速度の関係に類似している。第3元素を添加すると、CD層と芯部との界面がセル状に変化する点も、共晶凝固と類似している。

このCD浸炭は組織的には最も魅力があるが、浸炭経路が図1のD点をはずれると、初析の r 相または炭化物相が析出する欠点がある。

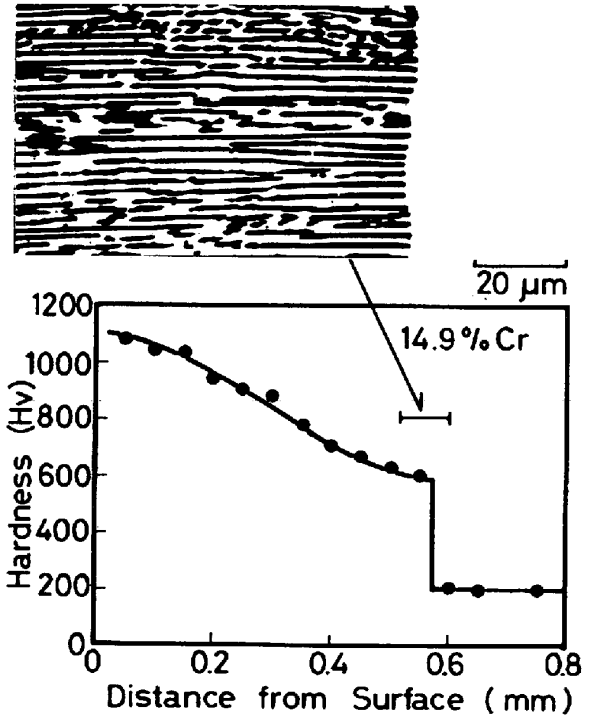


図4 δ ・パーライト変態を利用するCD浸炭 (870°C × 16 h)

6. CD浸炭鋼の耐摩耗性

図5は0~2.3%V鋼を950°Cで3h CD浸炭し、950°Cから焼入、150°C焼もどしたものの耐摩耗試験結果である。試験機は大越式で、SK5 (Q-T材)の回転子をすべり距離100mだけ押しつけた際の摩耗痕の幅から摩耗量を計算した。

V鋼のCD層中には、直径0.2 μ m程度の V_4C_3 が均一に分散している。焼入硬さはHv920程度であり硬くはないが、耐摩耗性はSK5よりもいちぢるしく優れ、SKD11に匹敵する。

No	Before Carburization					After Carburization	
	C %	Cr %	Nb %	V %	others	Max C %	Max Hv
1	0.18	1.04	0.15	<0.01	0.3% Mn 0.2% Si 0.01% Mo 0.006% P, S	1.03	910
2	0.20	0.99	0.15	0.98		1.16	915
3	0.21	1.00	0.15	1.96		1.32	935
4	0.19	0.99	0.15	2.30		1.37	915

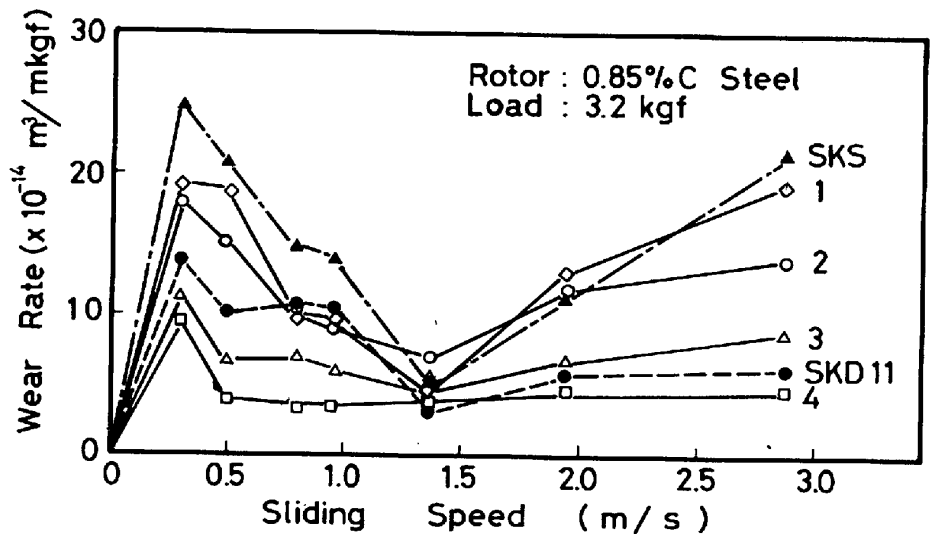


図5 r 域においてCD浸炭したV鋼の摩耗(大越式試験機による) 相手材: SK5, 800°C水冷, 150°C焼もどし

7. CD 浸炭層中の炭化物分散度の安定性

CD 浸炭法によって得られる組織の最大の特徴は微細な、しかも多量の炭化物が均一に分散する点であり、例えば 2.3% V 鋼を 950°C で浸炭すると、前述のように、直径 0.2 μm 程度の V₄C₃ が密に分散した CD 層が得られた。

これと同様の組織を焼入-焼もどしによって得ることは不可能である。その理由は図 6 に明らかなように、1.37% C, 2.3% V (CD 浸炭による表面組成) の鋼を均質化加熱しても、大部分の V₄C₃ は固溶せず、直径 2 μm 以上の未溶解炭化物となってしまふからである。

CD 浸炭の初期に表面部に発生した炭化物粒子は、その後の浸炭の間に、次式のようなオストワルド成長則に律せられながら粗大化する。

$$r^3 - r_0^3 = k t \quad (3)$$

ここで r は炭化物の平均半径、r₀ はその初期値、k は成長定数である。図 7 は各種炭化物のオストワルド成長の実験から求められた k の値をアレニウス・プロットしたものである。

(3) 式によれば半径 r は無限に増大しつづけるが、しかし例えば r の増加率が毎時 1% ともなると、事実上、成長は停つたと見てよい。このときの r の値を飽和半径 r_s と規定すると、r_s ≈ 50 · (k)^{1/3} の関係を得る。図 7 の左端の軸はこの r_s を示しており、例えば V₄C₃ は 1000°C 以下で加熱するかぎり、直径 0.2 μm を越えない。この値は上述の実験値とよく対応しており、CD 層中の炭化物は分散度が極めて安定であると考えられることができる。

引用文献

(1) 佐久間健人 他 ; 日本金属学会誌 38(1974), 192 (2) 斎藤 卓 他 ; 日本金属学会誌 40(1976), 1164 (3) T. Saito et al ; Trans. JIM, 21(1980), 471, 483 (4) 千葉 昂 他 日本金属学会講演概要 ; 1976年4月, p172 (5) 千葉 昂 他 ; 日本金属学会講演概要, 1977年10月 p387 (6) 山口 圭司 他 ; 日本金属学会講演概要, 1978年10月, p364 (7) 山口 圭司 他 ; 日本金属学会講演概要, 1979年10月, p355 (8) 斎藤 卓 他 ; 日本金属学会講演概要, 1979年10月, p411 (9) 内藤武志 ; 浸炭焼入れの実際, 日刊工業 (1979), 112 (10) R. J. Murphy and N. J. Grant ; Trans. ASM, 60 (1967), 29 (11) C. Wagner ; Z. Elektrochem. 63 (1959), 772 (12) 阿部吉彦 ; 金属材料, 16(1977) No 6, p77 (13) 佐久間健人 他 ; 鉄と鋼, 60(1974), 2153 (14) 梶明鑑 他 ; 鉄と鋼, 66(1980) S 1178

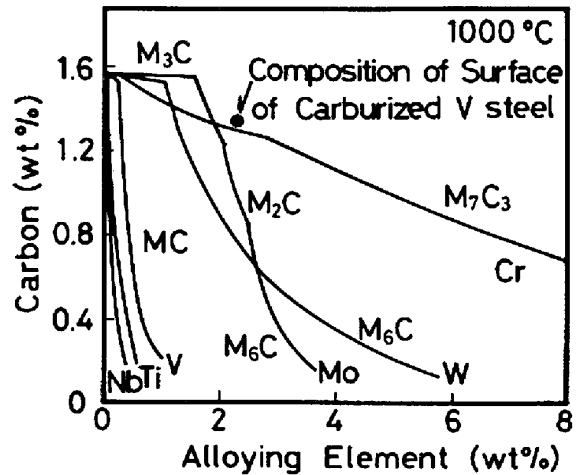


図 6 r 相に対する炭化物の固溶度 (●印は 2.3% V 鋼の CD 浸炭の表面組成)

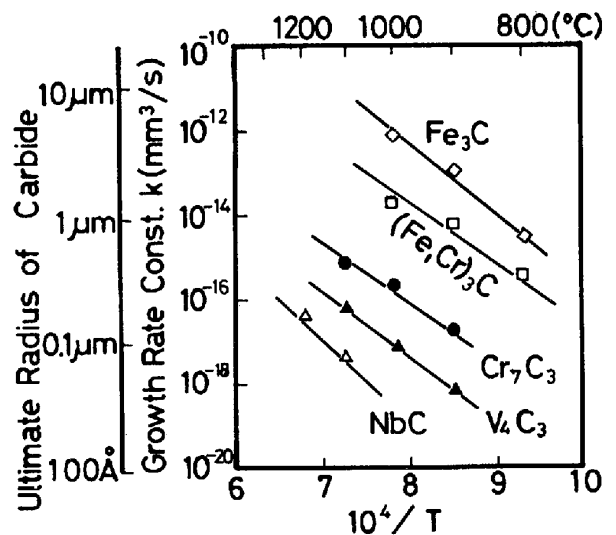


図 7 炭化物粒子の r 相中におけるオストワルド成長定数と飽和半径⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾