

Si-Mn 系鋼におよぼす V および二、三の元素の影響*

(構造用高抗張力鋼の研究—I)

浅野栄一郎**・須関 昭二***

Effects of Addition of V and other Elements on Si-Mn Steel.

(Study on high strength structural steel—I)

Eiichiro Asano and Akizi Suseki

Synopsis:

Si-Mn high strength structural steel has been developed in Japan these few years, being supported by the recent tendency of lightening the weight of structure. In this report, the effect of addition of V and other elements such as Zr, Cr, Ti, Si, on Si-Mn structural steel were studied. In the case of laboratory test, there were 13 grades of samples. In the first group, containing 6 grades steel, the effect of V on Si-Mn structural steel were researched. In the second group, containing 4 samples, the effect of V and Zr or Cr or Ti were tested. In the third group, the effect of V addition on lower C-higher Si-Mn steel were studied. All samples were melted with a high frequency electric furnace and cast into 5 kg ingots, then rolled to bars (9 mm ϕ).

Specimens were tested under three conditions such as rolled, heated and as air-cooled or furnace-cooled after heating and as-quenched and-tempered. Tensile strength, yield strength, elongation, and reduction of area were determined by tensile test. Hardness test, V-notched Charpy impact test, and microstructure test were also made. It was concluded as follows:

(1) Tensile strength and yield strength rose, and elongation and impact value were decreased, with increasing V content. V also unified the microstructure and made ferrite grain-size refined. V behaved as anti-softening by tempering, which was seemed to depend on carbide formation.

(2) Adding Cr or Ti in Si-Mn-V steel resulted in increasing tensile strength, but gave no effect on elongation and low-temperature impact value. Ti and Zr made ferrite grain-size refined, but Cr did not do so.

(3) Even if C content was decreased from 0.2% to 0.1%C, the tensile strength was invariable when the Si was increased from 0.4% to 0.65%. The second, angle shape steel was made by Si-Mn-V steel, and special shape steel for the use of mine props was made by Si-Mn-Cr steel on production line. Si-Mn-V steel angle was determined by mechanical tensile test and by welding maximum hardness test. In the case of Si-Mn-Cr mine props steel, the effect of C content on heat-treated tensile properties were studied.

I. 緒 言

現在わが国で用いられている構造用高張力低合金鋼は Si-Mn 系が主で、その強さは一般構造用炭素鋼 SS41 に比し約 3 割強化されて、通常 50~60 kg/mm² の引張り強さを有している。最近にいたつて、構造物の性能向上と大型化により、その軽量化の必要性が増大し、それに伴つて一段と強靱な材料への要望が高まつている。現用の高抗張力鋼の強度の増加をはかるにはさらに有効な元素の添加が考えられるが、これに伴つて高抗張力鋼として重要な 熔接性、加工性、経済性などがはなはだしく損われてはならない。わが国の現状から見れば、60~

70 kg/mm² 以上の高抗張力鋼の製造を考慮する場合においても、現在の Si-Mn 系を基として行く方法がもつとも得策と思われるので、まず Si-Mn 系を基として、これに 2, 3 の元素を加えて、その効果を調査研究することとした。われわれはまず Si-Mn 鋼に少量の V を加え、その影響を調査しさらに、これに関連して V の他に Zr, Cr, Ti, Si などを併用添加した場合の影響についても実験を行つた。V は比較的少量の添加で引張り強さ増し、降伏点を高め、脱酸性があつて鋼質を改善す

* 昭和 33 年 10 月本大会講演会にて発表

** 東都製鋼株式会社技術部, 工博

*** 東都製鋼株式会社技術部

Table 1. Chemical compositions of samples.

Series	Mark	C	Si	Mn	V	Other element.
I	MV 0	0.16	0.386	1.22	0.00	—
	MV 1	0.16	0.400	1.53	0.07	—
	MV 2	0.15	0.446	1.31	0.14	—
	MV 3	0.16	0.436	1.09	0.39	—
	MV 4	0.15	0.398	1.15	0.48	—
II	MV Zr	0.15	0.357	1.31	0.12	Zr 0.14
	MV Cr	0.14	0.390	0.99	0.12	Cr 0.83
	MV Ti	0.18	0.412	1.24	0.11	Ti 0.25
	MV HC	0.20	0.406	1.27	0.07	—
III	SV 1	0.10	0.648	1.54	0.13	—
	SV 2	0.09	0.650	1.35	0.20	—
	SV 3	0.10	0.662	1.23	0.27	—
	SV Zr	0.10	0.640	1.47	0.15	Zr 0.24

るほか、組織を微細化し、高温クリープ限を高めるといわれているが、従来の研究は主として発条鋼、工具鋼、の補助元素としての場合にとどまっております。高抗張力鋼においては Mn-V 系 (Vanty 鋼), Mn-V-Ti 系³⁾, T-1 鋼⁴⁾, あるいは比較的高級な Mn-Ni-Cr-Mo 系⁵⁾ および Mn-Mo-B 系⁷⁾, に V を主要元素として添加した場合について若干研究されているにすぎず, Si-Mn を主体にしたものの研究はほとんど見られないので, まずこれについて実験した。つぎに Si-Mn-Cr 鋼について調査した。ここでは C 量が機械的性質におよぼす影響を調べた。Cr は鋼の焼入性, 硬度, 引張り強さを増大し, 結晶粒を微細化し, また C と化合して炭化物を形成する性質を有するといわれているが, わが国状から見ても Ni, Mo など比し入手しやすい元素であるので Si-Mn-Cr 鋼ははなはだ有望な高張力鋼である。Si-Mn-Cr 鋼については, 少量試験溶解の域を脱して, 実際に異形鋼に試作した場合の製品についてその性質を調査した。

II. 試料および実験方法

本実験に使用した試料の内 MV 系, SV 系は高周波電気炉によつて熔製し, 約 5 kg の小形鋼塊として, これを条鋼圧延機で 9 mm 径の丸棒に圧延した。試料の化学成分は, Table 1 のごとくである。これを大別すると I 系は 0.15~0.16% C に V を 0~0.5% 添加し, V の効果を見るためのものであり, II 系はさらに Zr, Cr をあわせ加えた場合の効果を見ようとしたものである。III 系は C の低い (0.10%) 鋼におよぼす V, Zr の影響を調べる目的のものである。なお, いずれも Si (0.35~0.45%)—Mn (1.1~1.6%) を基としているが, III 系のみは C を低くしその代りに Si を 0.60~0.70% に増加した試料である。本実験は研究目的が本試料の諸性質,

とくに強度の増加状態, 加工性の低下状況の傾向を知ること主体があつたので, 実験方法としては圧延のままの状態, 再加熱後, 空冷あるいは炉冷処理, および焼入焼戻し処理を加えたものについて引張り試験を行い, さらに主な試料について, 低温 V ノッチシャルピー試験, 硬度測定, 顕微鏡組織の観察などを行なつた。

さらにこれらの実験結果にもとづき, 過去の諸経験をも加味して圧延製品に試作を行い工業的研究に供した。試作材は Si-Mn-V 系のもの 1 種と Si-Mn-Cr 系のもの 3 種でありその化学成分を Table 2 に示す。Si-Mn-V 系は高周波電気炉で熔製し, 350 kg 鋼塊としたもので, これを鍛造により 81×87 mm 角ビレットに半成し, さらに ∠13×75 山形鋼に圧延して材質の機械試験に供した。また Si-Mn-Cr 系は 3 トン電気炉で熔解精錬し 170 kg 型鋼塊をつくりこれを圧延によつて異形鋼に試作したものより試片を採取して試験に供した。Si-Mn-Cr 系は熱処理材として使用価値を調査するため, 圧延のままの機械的性質のほか, 焼入焼戻しによる性質の変化も調査した。

Table 2. Chemical compositions of test products.

Mark	C	Si	Mn	V	Cr
Si-Mn-V	0.16	0.322	1.12	0.18	—
SMCR 1	0.19	0.446	1.57	—	0.47
SMCR 2	0.24	0.400	1.50	—	0.53
SMCR 3	0.27	0.394	1.59	—	0.46

III. 実験結果

(1) Si-Mn 系高張力鋼におよぼす V の影響。

Fig. 1-(1), は Si-Mn 系高張力鋼に加えられた V

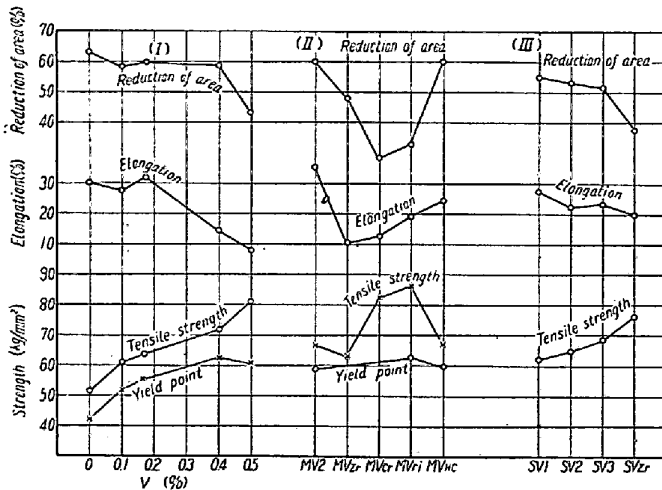


Fig. 1. Tensile properties of MV and SV steel (as rolled condition).

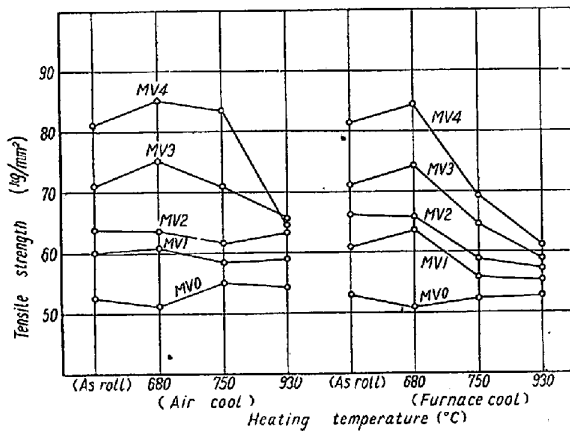


Fig. 2. Tensile strength of MV steel after heating.

と引張り試験値の関係を圧延のままの試料について試験した結果を示す。Vの添加は0~0.6%の範囲では、V量の増加に伴って引張り強さ、降伏点は上昇し、伸び、絞りには低下する。とくにVが達すると、この傾向が顕著となる。Fig. 2は加熱温度と引張り強さの関係を示すものである。圧延製品を一旦680°C、750°C、あるいは930°Cの各温度に15分間再加熱後、大気中放冷、および炉中冷却したものについて加熱温度および冷却方法の相違により引張り強さがどの程度変化するかを見たもので、これは熱間加工終了時の温度が変化した際に機械的性質に大きな変化があるかどうか、および鋼材の構造物成形熱間加工後の性質を調べることが目的である。なお熱間加工終了時の製品の温度は加熱温度のほかに製品のサイズによっても圧延工程などの原因で変化し得るものである。Fig. 2に示す結果によると、Fig. 1-(I)の傾向と同じくV%が増加するほど引張り強さが高くなっている。ただし930°C加熱の場合はV%の相違による強さの差が小さくなる。またV含有量の少ない試料、

MV0, MV1, MV2の試料では再加熱による影響は空冷したものではほとんど認められない。炉冷したものは加熱温度の上昇とともに徐々に引張り強さが低下している。しかし、V添加量が高い試料、MV3, MV4では680°Cの加熱で一旦引張り強さが増加している。この原因についてはV炭化物の析出の影響が考えられる。

この場合の顕微鏡組織はフェライトとパーライトよりなる通常の組織である。680°C加熱処理した試料について、フェライト結晶粒度を見ると、一般にV添加量が増加すると結晶粒が微細になり、均一化して行くが、試料MV2程度のVが入ると、結晶粒の微細化がきわめて顕著となる。680°Cの温度域では α 域、750°Cでは $\alpha + \gamma$ 域、930°Cでは γ 域に入るが、930°C加熱処理すると、結晶粒の成長がいちじるしくなる。たとえばMV0とMV3とを比較すると680°CではV添加の効果でMV4の方が遙かに細かい粒度を示している。再加熱温度が750°C、950°Cとなつて $\alpha + \gamma$ 域または γ 域に一旦保持した試料ではMV0, MV4の差はほとんどなくなっている。

つぎに同一試料を焼入焼戻した際の機械的性質の変化をFig. 3, 4に示す。この場合も添加V含有量が増加するにしたがい強さを増している。試料MV0, MV1では焼戻し温度が上るにつれて引張り強さは低下し、伸び、絞りが増加している。V含有量が増加してMV2, MV3, MV4程度

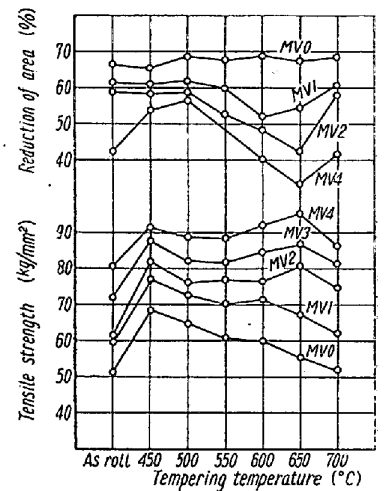


Fig. 3. Tensile properties of MV steel after quenching and tempering.

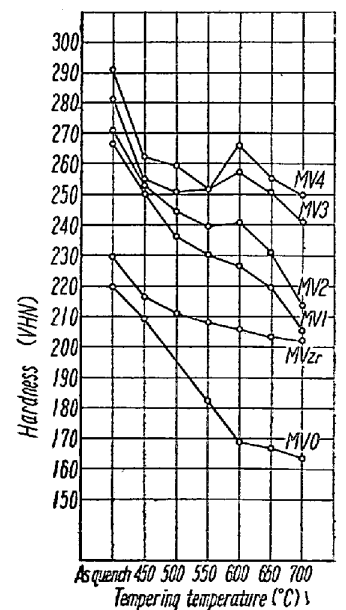


Fig. 4. Hardness of MV steel after quenching and tempering.

となると、焼戻し硬化現象があらわれて、500~550°C に焼戻した場合より、600~650°C に焼戻した方が引張り強さが高くなる。これは V の炭化物による二次硬化作用のためと考えられ、硬度測定によつて一層明らかになっている。すなわち Fig. 3 に示すごとく試料 MV0, MV1 では焼戻温度が高くなるにしたがつて軟化するがその程度は V 含有量が少いほど、いちじるしい。しかし試料 MV2 程度に V が含まれると、500~600°C で一旦軟化が中止する現象があらわれてる。さらに V 量が試料 MV3, MV4 程度となると、600°C で硬度が増加する。同一条件における硬度は V 含有量の多いものほど高い。かように V の添加により、いわゆる焼戻軟化抵抗の現象が見られ、再加熱時の硬化と一致している。これは V 炭化物の析出によるものと考えられる。硬度試験ではこの硬化現象のピークが 600°C 焼戻し処理した場合に見られ、引張り試験における引張り強さでは若干ずれて 650°C 焼戻処理に現われている。この際の V 炭化物の析出は顕微鏡試験では確認できなかった。また焼戻し硬化域では絞りは悪くなるが、伸びは 450~500°C 焼戻のものにくらべて、いちじるしい差は認められなかった。焼戻し組織を顕鏡した結果、V の添加により通常と異つた特別の変化は認められない。

(2) Si-Mn 系高張力鋼におよぼす V+Cr, V+Zr, V+Ti などの影響

V を 0.2% 添加した Si-Mn 系高張力鋼 (MV2 に相当) に Zr, Cr, Ti を添加したものおよび C を 0.20% にした試料につき試験した。

圧延状態における引張り試験結果は Fig. 1-II のごとくである。これによると、V のみを添加した場合の試料 MV2 に比較して、試料 MVZr 以外では引張り強さ、降伏点は顕著に増加し、伸び、絞りは減少している。この傾向は Fig. 5 に示す再加熱冷却後の場合にも認めら

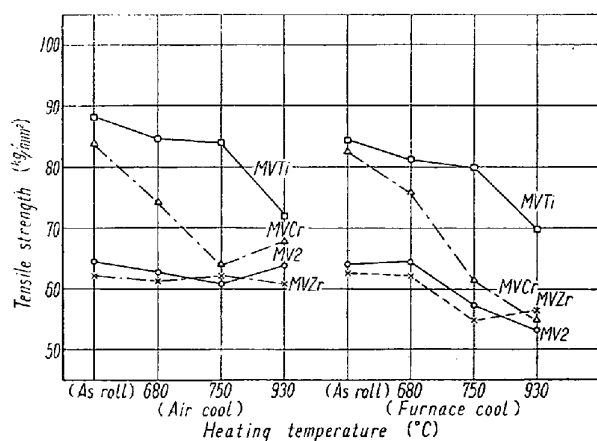


Fig. 5. Tensile strength of MV, Cr, Zr, Ti, steel after heating.

れる。しかし、加熱温度が 930°C になると、Ti 含有の試料を除いては添加元素の影響は余り認められなくなる。なお試料 MV Ti は Si が他より多く入つているので上記結果も Ti だけの影響とは断定できない。また、C をやや増した試料 MVHC について、低 C の試料 MV1 と比較すると両者の成分の相違は Table 1 のごとく C 量の差だけであるが、MVHC の方が引張り強さは全般に数 kg/mm² 高い値を示している。試料 MVHC の強さはほぼ試料 MV2 に匹敵する。さらにこの場合の顕微鏡組織におよぼす影響を試料 MV2 と比較してみると Cr の添加はフェライト結晶粒を微細化しないが、Zr あるいは Ti を添加したものは結晶粒がいちじるしく微細化している。すなわち、圧延状態のままおよび 680°C 再加熱処理後のフェライト結晶粒の状態を比較すると、Ti がもつともいちじるしく微細化をもたらす、Zr の作用はそれよりやや少ない。750°C まで加熱温度を上げてフェライト粒の大きさはいずれもほとんど変化しない。930°C に加熱すると試料 MVTi では結晶粒の成長が見られるが、試料 MVZr ではほとんど変化せず、930°C 加熱後のフェライト粒度では試料 MVZr の一方が逆に試料 MVTi より細い粒度を示している。なお Ti 添加により特有の TiN が随所に認められた。また Ti, Zr, Cr の添加による V の二次硬化作用促進は見られなかった。

(3) 高 Si-Mn 系高張力鋼におよぼす V, V+Zr の影響

構造用高張力鋼は低温脆性、溶接加工性などの面からも成可く低 C であることが望ましいとされている点を考え、C を若干低減して 0.10% C とし、このために生ずる強度の低下を防ぐべく Si を増加して 0.6~0.7% とした鋼種について V, Zr の影響を調べた。

圧延のままの状態における引張り試験の結果は、Fig. 1-III のごとくである。すなわち V 0.1~0.3% および V 0.2%+Zr 0.3% 添加したところ V の増加に伴い、引張り強さは増し、伸び、絞りは低下する。試料 MVZr では Zr 添加により、強度の増加はほとんど認められなかったが、高 Si の試料 SVZr では Zr 添加による引張り強さの増加が相当顕著に認められ、かつ伸びの低下は少ない。しかし絞りの低減はいちじるしい。

つぎに再加熱後冷却した場合の強さを見ると Fig. 6 のごとく成分の影響は圧延のままの状態の場合と同じ傾向を示している。V 炭化物によると思われる二次硬化は本試料では認められなかった。低 C—高 Si の影響を見るために試料 SV1, SV2 を MV2 と比較して見ると

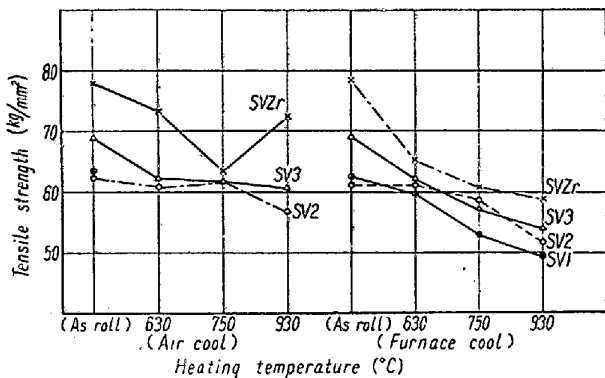


Fig. 6. Tensile strength of SV1, SV2, SV3, SVZr steel after heating.

MV 2の方がいずれの処理においても若干 (2kg/mm²程度) 高い引張強さを示す傾向にある。また Zr を加えた試料についても、SVZr と前掲の MVZr の2つを比較して見ると、Zr の添加の場合では低 C 高 Si の試料 SVZr の方が MVZr より可成り高い引張強さを示すことがわかり、Zr の添加のものでは Si 量の増加が引張強さに効果があるといえる。この場合の顕微鏡組織を調査したところ、試料 SV1, SV2, SV3 をくらべると V 添加量によつてもフェライト粒度に変化はほとんどない。Zr を含んだ試料 SVZr ではフェライト粒度が若干細くなるが 930°C の加熱によつて逆に成長する傾向を示している。試料 SV1, SV2, SV3 を MV2 と比較すると SV 系、つまり低 C 高 Si 系のものの方が MV2 よりもフェライト粒度が細かく 930°C 加熱後の成長程度も少いようである。SVZr と MVZr との間には顕微鏡組織ではあまり相違は認められない。

(4) Si-Mn-V 系成分による高張力山形鋼の試作

以上の実験結果にもとづき V 約 0.2% 添加せる Si-Mn 系高張力鋼を高周波電気炉で熔製し、350kg 鋼塊をつくつた。これを鍛造により 81×87mm 角ピレットに加工後、さらに圧延機により ∠13×75 山形鋼に圧延した。その化学成分は Table 2 に示すごときものである。山形鋼製品は元来圧延のまま用いるべきものなので、圧延のままの機械的性質およびピレットに半成時の材質と比較しながら調査した。その結果は Table 3 のごとく

であり、少量(5kg)溶解時の試験結果より改善された結果を示している。しかし低温衝撃値では溶接用高抗張力鋼で一般に必要なとされている。0°C で 3.0~3.5 kg-m/cm の V ノッチ 衝撃値基準に達しなかつた。溶接部最高硬さ試験の結果では溶接棒神鋼 LB-26(低水素型)を用いたものでは最高硬さは V.H.N. 310 以下で、高張力鋼の基準とされている V.H.N. 350 以下である。

(5) Si-Mn-Cr 系成分による異形鋼の試作

Si-Mn-Cr 鋼は圧延製品ではあるが、調質して用いる炭坑用異形鋼として試作した。C 量は実際の製鋼においても若干の変動があり、かつ調質鋼の機械的性質および溶接性にもつとも影響してくる成分でもあるので、ここでは Si-Mn-Cr

鋼における機械的性質におよぼす C 量の影響を調べた。試片の化学成分は Table 2 のごとくで C 量を 0.19, 0.24, 0.28% と変えて見た。焼入は 880°C から油焼入し、300°C ~700°C にわたつて 1h 焼戻した。その際の引張り試験の結果は Fig. 7 のごとくである。これによると抗張力におよぼす C 量の影響は可成り多く、C 量

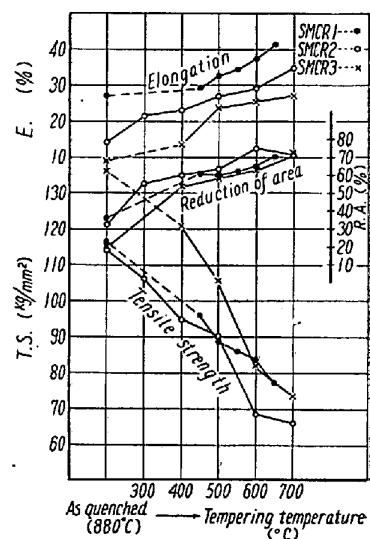


Fig. 7. Tensile properties of SMCR steel after quenching and tempering.

の多いほど抗張力が高く、伸び、絞り低い傾向にあるが焼戻し温度が高くなるにつれてその差は少なくなる。通常の焼戻温度 500°C を例にとつてみると、C 0.19~0.24% では 90 kg/mm² 近い抗張力と 22~23% の伸びが得られ、C 0.27% では 105 kg/mm² の抗張力と 24% の伸びが得られている。伸びをもう少し犠牲にすればさらに高い抗張力が得られる。なおこの場合の硬度変化の一例を示すと Fig. 8 のごとくである。焼入焼戻に伴

Table 3. Mechanical properties of Si-Mn-V steel (billets and angles).

Products	Tensile test			Bend test (180°)			Hardness (B.H.N)
	Yield point kg/mm ²	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %	Specimens	R=1.0 t	R=1.5 t	
Billets	59.6	75.1	26.6	JIS No. 4	OK	OK	210
Angles ∠13×75	61.6	75.9	17.4	JIS No. 1	OK	OK	—

う顕微鏡組織の変化は、通常の Si-Mn 鋼に比し焼入性が若干改善されたことが認められるほかは特記すべきことは見られなかった。

IV. 総括

わが国における代表的な低合金高張力鋼の一つである Si-Mn 系高張力鋼にも

つとも有望と思われる補助元素VあるいはCrを加えて、その効果を調査しさらにV添加に対してZr, Ti, Cr, Siを併用添加した場合の影響について実験した結果を総括すればつぎの通りである。

(1) Si-Mn系に対するVの影響はVの増加により、降伏点、引張強さは増加するが他方、伸びを低下させ、低温衝撃値をいちじるしく低下する。顕微鏡組織では組織を均一化し、フェライト粒度を微細化する。この傾向は、圧延のままの状態ではもちろんのこと、再加熱処理および焼入焼戻状態のいずれでも同一で、Vが0.3%を越えるととくに顕著となる。しかしVによる結晶粒の成長阻止および強度の低下防止は再加熱温度がいわゆるオーステナイト域に達すると予期したほど効果を示さない。

(2) Vを0.3~0.6%添加した試料では680°Cに加熱保持した場合および550~600°Cに焼戻した場合、焼戻軟化抵抗の現象が認められ、これはV炭化物の生成に起因するものと思われる。

(3) Vを0.2%添加したSi-Mn系高張力鋼に、さらにZr, CrあるいはTiをあわせ添加した場合Cr, Tiはさらに引張強さを増加するがVの増加にともなうて伸び、低温衝撃値の低下を防止することはできない。Zrはあまり大きな影響は示さなかった。また

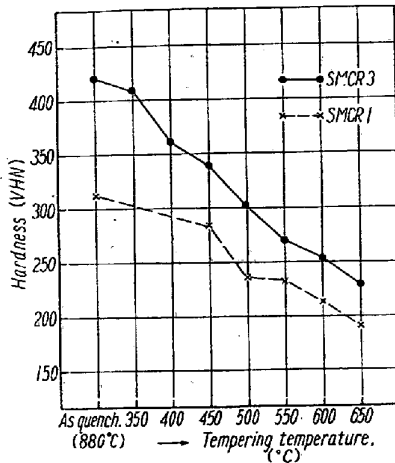


Fig. 8. Hardness of SMCR steel after quenching and tempering.

フェライト粒度をTi, Zrは微細化するがCrはあまり影響がない。

(4) C量を0.1%に下げSiを0.6~0.7%とした試料では前者同様Vの添加により強度は増加する。その強さはC 0.2%, Si 0.3~0.4%のものと同じである。

(5) 上記試験でV 0.2~0.3%添加すれば伸びの低下はわずかで引張強さ60~70 kg/mm²程度のものが作られることがわかったのでV 0.3%添加したSi-Mn系高張力鋼で350 kg鋼塊を試作し、ピレットおよび山形鋼に圧延して諸試験を実施したところ、機械的性質および溶接部最高硬さ試験では、低合金構造用高張力鋼としてほぼ満足な成績を示したが、溶接性の良否を判定する場合もつとも利用されているVノッチ低温衝撃試験ではあまり良好な成績は得られなかった。結局Si-Mn系高抗張力鋼においては諸性質におよぼす効果より考慮してVは0.3~0.4%にとどむべきでさらに有効な第三補助元素の選定が必要と思われる。

(6) Si-Mn-Cr鋼についても、炭坑用異形鋼に試作圧延しその機械的性質を調査し、とくにCの影響を実験した。Si-Mn系におけるCrの添加は比較的低廉優良な調質用高抗張力鋼の製造を可能にし、その強度は量C量および調質温度によつて可成り影響を受けるが、炭坑用異形鋼としてほぼ満足な成績が得られた。

(昭和33年12月寄稿)

文 献

- 1) G. G. Luther, 他: The Welding Journal, 7 (1949), p. 289
- 2) A. B. Kinzel: The Welding Journal, 5 (1948), p. 217
- 3) C. M. Offenaver, 他: The Welding Journal 5 (1948), p. 234
- 4) 桂, 他: 石川島技報, 42 (1953) p. 23
- 5) B. T. Bradstreet: BWRA, Welding Research. 5 (1953), p. 107
- 6) C.L.M. Cottrell 他: British Welding Journal. 1 (1954), p. 82
- 7) W. E. Bradgett: Journal of Iron and Steel Inst., 163 (1949), p. 277