

Fig. 4. Effect of 5% Co addition on the change of as-tempered hardness of various Cr steels (Tempering time: 1 h.)

である。すなわちこれらの図から、各合金鋼の焼戻しにおよぼす Co の作用をよく知ることができる。しかしこの説明は上に述べた(試験A)の結果と重複する点があるので、ここでは省略する。また以上の結果を整理し、炭化物形成元素に Co の共存が与える焼戻し抵抗性を、焼戻し硬度増加量の立場から比較検討を加えたが、この結果も紙面の都合上省略する。

### III. 焼戻しによる析出炭化物の観察および考察

上述の試験結果から、鋼に Co の単独添加はその耐焼戻し性に対して何等の貢献もなし得ないにも拘らず、炭化物形成元素と共存せしめた場合には Co はさらに耐焼戻し性の向上を与えること、また Co の与える影響は特に W, Mo (および V) 等との共存の場合においていちじるしくあらわれ、炭化物形成能の弱い Cr との場合には僅少であることなどを知った。周知のように Co は主としてフェライト中に存在し、炭化物中へはあまり入らない元素である。かかる点から、Co の添加によつて上記のような現象のおこるのは、Co の炭化物形成元素との共存は  $\theta$  炭化物および特殊炭化物の析出現象に影響を与えるためであると考えなくてはならない。この点を確認するために、各合金鋼の焼戻し組織を電子顕微鏡によつて観察した。

その結果、W 鋼および Mo 鋼の低温焼戻しによつて析出する  $\theta$  炭化物は、Co を共存することによつていちじるしく凝集が阻止され、その分散状態に大きな変化を与えていることが認められた。しかるに Cr 鋼における Co の共存は、 $\theta$  炭化物の分散状態にはほとんど差異を与えていないことが知られた。(これらの組織写真は省略)

すなわちこの観察結果から、W 鋼および Mo 鋼などに Co を共存せしめると焼戻しの第 1 次軟化を阻止することは、Co の存在により  $\theta$  炭化物の凝集が遅らせられたためであり、他方 Cr 鋼の場合には Co の存在は炭化

物の凝集を遅らせる効果がなく、したがつて第 1 次軟化を阻止する作用を持たないことになる。このように Co の存在による炭化物の凝集阻止の様相が、炭化物形成元素の種類によつて異なることは、各元素のセメンタイト中への固溶限の大小と関連があるものと考えられる。なお低温焼戻しにおける Co 共存の作用について、Co は上に述べた  $\theta$  炭化物の凝集阻止作用と関連して、 $\epsilon$  相から  $\theta$  相への移行を遅らせる作用をもあるいは持っているのかも知れない。

つぎに第 2 次硬化におよぼす Co の作用について、例えば Co 共存の影響が最も顕著にあらわれている W 鋼の場合についてその組織を観察した結果、Co の存在は炭化物反応によつて析出した  $W_2C$  炭化物を微細に分散せしめ、その凝集を明らかに阻止していることが確かめられた。

以上の検討結果から、炭化物形成元素に Co の共存が焼戻し抵抗性を増加させることは、主として焼戻しにより析出する炭化物の凝集阻止作用に基くものであり、また Co の共存による焼戻し性の変化が W 鋼および Mo 鋼に顕著にあらわれ、Cr 鋼にあらわれがたい理由は、主として両者の析出炭化物の凝集の難易から説明され得るであろう。No. 62167

### 文 献

- 1) K. Kuo: J. Iron & Steel Inst. (U. K.) 174 (1953), 223.

621.639.536.1669.14.018.2-405

### (167) 原子炉圧力容器用極厚ステンレス・クラッド鋼板の性状に関する研究

新三菱重工神戸造船所

薄田 寛・作本 嘉郎

### Study on Properties of Heavy-Section Stainless-Clad Steel Plate for Reactor Pressure Vessels.

Hiroshi SUSUKIDA and Yoshirō SAKUMOTO.

### I. 緒 言

原子力発電プラントとして最も実用化されている米国の PWR 型および BWR 型発電用原子炉圧力容器においては厚さ 200mm 前後のステンレス・クラッド鋼板が多く使用されている。この中、母材を ASTM A302B のマンガン・モリブデン鋼、クラッド材を AISI 304 のオーステナイト系ステンレス鋼とするものが多いが、原子炉圧力容器用ステンレス・クラッド鋼としては高張力で溶接性、加工性のよい圧力容器用材料の特性を具備する以外に、原子炉特有の現象である中性子による照射損傷が少なく、冷却剤に対する耐食性のすぐれていることなどが要求され、加えてその厚さは 200mm 前後にまでおよぶことを考慮せねばならない。本報告では国内 2 社の試作材と米国 L 社の輸入材とを供試材として極厚ステンレス・クラッド鋼板の機械的性質、接着性、クラッド材における炭素拡散、母材の切欠靱性などに関し実験検討した結果の概要について述べることにする。

II. 供 試 材

供試材としては国内 A, B 2 社から厚さ 50mm および 200mm のクラッド鋼板計 4 種, 米国 L 社から厚さ 167 mm のクラッド鋼板 1 種を用いた。いずれも母材は ASTM A302B, クラッド材は AISI 304L で, 熱処理としては焼なまし・焼もどし処理を行なったものである。各供試材におけるクラッド材と母材の化学成分を Table 1 に示した。

III. クラッド鋼板の機械的性質

ASTM のクラッド鋼板規格 (A264-44T) においては極厚クラッド鋼板に対する配慮が十分でなく, クラッ

ド鋼としての引張試験要領も必ずしも適当とはいえず種々問題点が存在する。そこでクラッド比の異なる試料 5 種につき, クラッド鋼としての機械的性質, 母材およびクラッド材に分けた場合の機械的性質, 試験値と計算値との関係などを実験検討した。その結果の一部を Table 2 に示した。これよりこのクラッド鋼の引張強さは母材よりやや低目に, 伸びはやや高目に表われることがわかる。これはクラッド材および母材の機械的性質が若干相異なるためで十分注意することが必要である。

また極厚クラッド鋼板においても, 試験により得たクラッド鋼の引張強さはクラッド材および母材それぞれの

Table 1. Chemical composition of specimens tested.

Metals	Specimens	Thickness (mm)	Chemical composition (%)								
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
Cladding metals	A 5	4.5	0.035	0.60	0.97	0.028	0.016	11.70	18.60	0.57	0.29
	B 5	8.0	0.035	0.79	1.49	0.012	0.011	11.10	18.60	0.23	0.18
	A 2	9.5	0.031	0.53	0.95	0.025	0.012	11.33	18.94	0.15	0.14
	B 2	7.5	0.035	0.79	1.49	0.012	0.008	11.09	18.60	0.23	0.18
	L	11.0	0.024	0.57	1.00	0.014	0.014	9.42	18.10	tr	0.12
	AISI 304L		<0.03	<1.00	<2.00	<0.045	<0.030	8.00/12.00	18.00/20.00	—	—
Backing metals	A 5	45.5	0.15	0.14	1.24	0.014	0.021	0.05	0.08	0.59	0.020
	B 5	42.0	0.19	0.31	1.08	0.019	0.031	0.03	0.05	0.51	0.018
	A 2	190.5	0.15	0.23	1.15	0.011	0.019	0.18	0.05	0.49	0.020
	B 2	212.5	0.16	0.28	1.09	0.012	0.027	0.05	0.07	0.54	0.019
	L	156.0	0.22	0.26	1.23	0.018	0.028	0.18	0.07	0.47	0.022
	ASTM (check) A302B		<0.25	0.13/0.32	1.10/1.55	<0.035	<0.040	—	—	0.41/0.61	—

Table 2. Mechanical properties of clad steels.

Specimens	Kind	Yield point (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	
A 5	Clad steel	Experimental value	46.0	58.0	26.0
	Backing metal	Experimental value	46.8	59.3	22.5
	Cladding metal	Calculated value	31.1	56.4	48.0
	Clad steel	Calculated value	—	59.0	—
B 5	Clad steel	Experimental value	44.1	60.5	30.5
	Backing metal	Experimental value	47.0	62.1	22.5
	Cladding metal	Calculated value	31.8	57.4	48.5
	Clad steel	Calculated value	—	61.4	—
A 2	Clad steel	Experimental value	43.4	55.7	33.0
	Backing metal	Experimental value	44.4	56.4	31.0
	Cladding metal	Calculated value	24.3	50.8	48.0
	Clad steel	Calculated value	—	56.2	—
B 2	Clad steel	Experimental value	40.5	57.1	32.0
	Backing metal	Experimental value	42.8	58.4	27.0
	Cladding metal	Calculated value	28.4	55.1	52.5
	Clad steel	Calculated value	—	58.2	—
L	Clad steel	Experimental value	49.0	62.4	23.5
	Backing metal	Experimental value	52.9	64.9	26.0
	Cladding metal	Calculated value	27.0	49.4	34.0
	Clad steel	Calculated value	—	63.9	—
ASTM A 302 B			> 35.1	56.2/70.3	> 17

引張強さから求めた計算値とよく一致することを明らかにした。さらに ASTM 規定の引張試験片採取要領について検討しクラッド比が小さく、6.7% 以下の場合にはクラッド材と母材とを別々に試験して計算して計算式より強度を求めるとともに、クラッド鋼として接着状態のまま試験することも必要であるので、クラッド比に関係なくクラッド材 1/8" を含む厚さ 2" 以上の試験片により試験を行なう方法が適当であることを提案した。

IV. クラッド鋼板の接着性

極厚クラッド鋼板では板厚の増加にともない圧延比が小さくなるため接着性の低下するおそれがある。ASTM 規格ではこの接着性を剪断試験または曲げ試験によつて確認する方法をとっているので、各供試材に対しこれらの試験を行なうとともに、接着部の引張強さを直接測定するため板厚方向より引張試験片を採取して実験検討した。さらに上記のような代表試験のみではクラッド鋼板全般の接着性を確認できないので超音波探傷試験を実施し比較検討した。その結果国産試料はすべて ASTM の規格値 14kg/mm<sup>2</sup> の 2 倍以上の剪断強さを有し、板厚増加にともなう圧延比の低下は剪断強さにいちじるしい影響をおよぼさないことを明らかにした。さらに接着部の引張強さを求め、剪断強さと引張強さの比は約 60~70% であること、クラッド鋼板の接着性は超音波探傷法により全面的に確認することが必要で、これによりクラッド鋼板の信頼性をいちじるしく向上させることができることを明らかにした。

V. クラッド材における炭素拡散

ステンレス・クラッド鋼板はその製造および加工工程において高温に加熱されるため、ステンレス鋼表面における加炭ならびに母材からの炭素拡散の問題が生ずる。折角極低炭素型のクラッド材を用いてもこれらによつて炭素量が増加すればその甲斐がなくなることになるのでこれらの実態を炭素量および硬さの分布、顕微鏡組織などにより調査した。Fig. 1 にクラッド材における炭素量の分布を示した。この結果クラッド材表面から深い約 1mm までの範囲および母材との接着部より 1~2mm の範囲は異常に炭素量、硬さが増大し、いちじるしく炭化物の析出していることを認めた。前者は雰囲気ガスなどによる外部よりの加炭現象、後者は製造時の熱履歴に

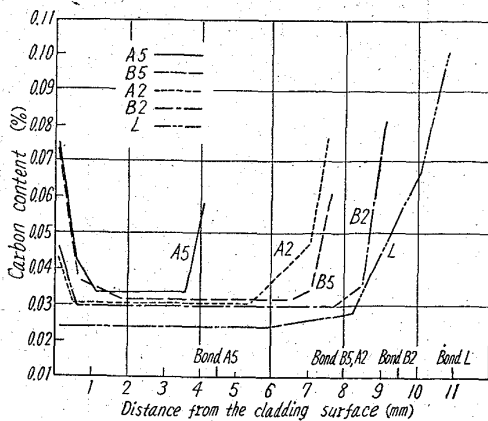


Fig. 1. Distribution of carbon in cladding metals.

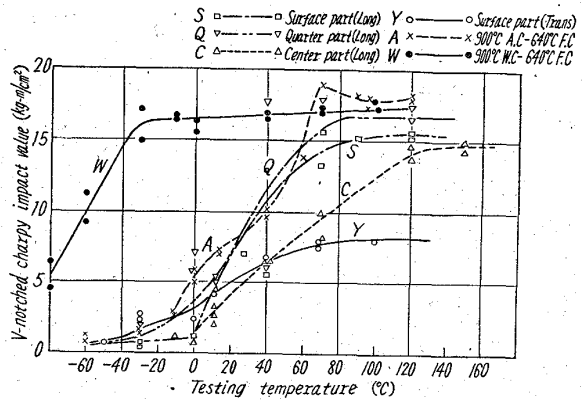


Fig. 2. Comparison of transition curves under various conditions for clad steel "L".

ともなう母材よりの炭素拡散のためと考えられる。とくに表面の炭素量は最大 0.076% にまでおよび、極低炭素型ステンレス鋼の耐食性をいちじるしく害するので、クラッド材表面の炭素量につきチェック分析を行なうなど深甚な注意を払うことが必要である。

VI. 母材 Mn・Mo 鋼板の切欠靱性

原子炉圧力容器用ステンレス・クラッド鋼板の母材に対しては中性子の照射による遷移温度の上昇を考慮してすぐれた切欠靱性が要求されている。そこで母材 Mn・Mo 鋼板の板厚各部の切欠靱性、それにおよぼす熱処理の影響などに関し実験検討した。その結果の一部を Fig. 2 に示した。これより切欠靱性を改善するには水焼入・焼もどし処理が最も有効であり、焼ならし・焼もどし処理では不十分であること、すなわち 30 ft-lb 遷移温度は焼ならし・焼もどし状態では 0°C 以上で基準値 (-10°C, 5.2 kg-m/cm<sup>2</sup>) を満足しないものが多いが水焼入・焼もどし処理を行えば -80°C 以下に低下し、脆性破壊に対する安全度の極めて高いすぐれた切欠靱性を得られることを明らかにした。

VII. 結 言

原子炉圧力容器用極厚ステンレス・クラッド鋼板の性状に関し実験検討し、クラッド鋼およびそれを構成するクラッド材ならびに母材の機械的性質を明確にし、剪断、引張、超音波試験などによりその接着性を明らかにした。さらにクラッド材表面および接着部附近の炭素拡散の実態を究明して注意を喚起し、また Mn, Mo 鋼母材の切欠靱性を向上するための熱処理基準を確立した。なお国産試料は米国製試料に比し、接着性の点ではすぐれており、クラッド材の炭素量や母材の切欠靱性などに留意すれば原子炉圧力容器用ステンレス・クラッド鋼板として十分良質の国産鋼板を得られる見通しをつけることができた。