

高張力鋼及びステンレスクラッド鋼について

川崎製鉄 KK* 今井光雄**

はしがき

科学の進歩は構造物の設計、或いは工作法についても新しい考え方、或いは新技術を産み出し、更に前進を続けているのであるが、主材料である鉄鋼に対しても従来の古い型にとらわれず物理的、化学的により優れた性能を要求し、更にまた単なる素材の生産に止らず、素材を加工した新しい一次製品の生産が望まれてきている。また製造設備の充実はより良い製品をより安価に製造するための手段として大いに活用され、鉄鋼界も新時代の流れに合流して、遅ましき前進をなしつゝある。

さて、こゝ数年来長足の進歩を示している構造用鋼の中筆者の所属する会社で生産している高張力鋼板、クラッド鋼板の特性及び加工上の問題等について述べてみたいと思う。

1. 高 張 力 鋼

溶接技術の発展に伴い、構造物はリベット接合から溶接継手に変りつゝあり、鋼板の良好な溶接性は構造用鋼にとって不可欠の因子となりつゝある。一方設計者にとって応力上の安全性は当然として、同時に経済的な問題は重要な事柄であり、当然強度の大なる鋼材の使用が考えられてきた。従つてこの両者を兼ね備えた高張力鋼は単に自重の軽減による使用鋼材費の節減のみならず、附帯設備、運搬費等を含めて今後益々要望されるところである。

而して、鋼材の強度と溶接性は一般に化学成分の量に関し、相反する傾向を示し、溶接性を損うことが少なくて強度の増大が図られる合金元素の添加が望ましい。

また鋼の機械的性質は熱処理によって大いに改良され、これらの特性を応用すべく大型鋼板の焼入装置がU.S.A.で実用化されてから、焼入焼戻を行なつた調質高張力鋼が時代の脚光を浴びるようになつた。

現在わが国でも高張力鋼を大別すると、圧延のまゝ或いは焼準して用いられるフェライト-パラサイト鋼と焼入焼戻を行なつた焼戻マルテンサイト或いは焼戻ベーナイト鋼に分けられている。これを強度で分類すると引張強さ、 60kg/mm^2 未満には前者のパラサイト鋼を用い、

60kg/mm^2 以上は調質鋼が用いられている。両者の特性は色々と研究されているが総括的に述べれば調質鋼は強度、切欠靱性等ではパラサイト鋼より遙かに優れた性質を有しているが、使用上最も問題となるのは、焼入焼戻という工程から宿命的に附隨する、焼戻温度以上の熱処理、或いは熱間加工が行なえないという最大の欠点を有していることであろう。

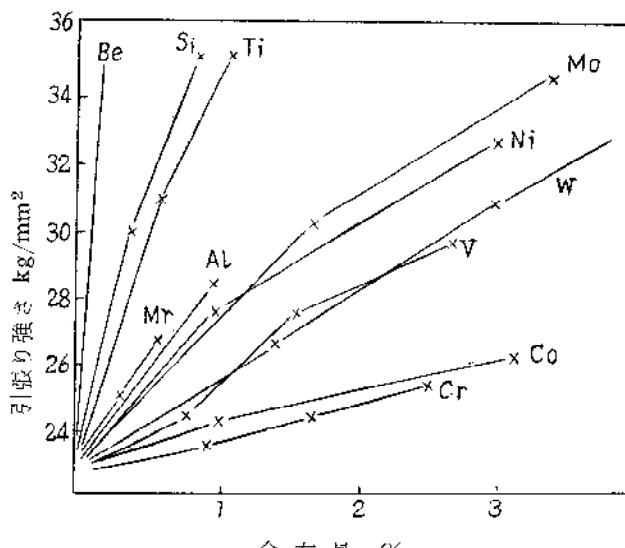
従つて鋼材選定に当つてはこれらの特性を充分理解することが肝要であるので一応両者に分けて諸性質の一例を示し、使用上の参考に供する次第である。

a) 圧延鋼板（焼準鋼板を含む）

圧延鋼板は既にJISの溶接構造用鋼の一部にSM-50なる規格が規定されているが、一般材に近い取扱を受けつゝあり、施工上の問題点は殆んど解決されている。たゞわが国では従来の経過から若干の強度の相異などもあつて、鉄鋼メーカー各社は夫々独自の高張力鋼の規格を作つており、SM-50と平行して生産している現状である。

イ) 強 度

圧延鋼材の強度は、よく知られているように、フェライトに固溶した合金元素及び炭化物の種類、量、結晶粒度等によつて左右されるが、高張力鋼では溶接性の見地からC含有量が約0.20%以下におさえられているので炭化物の量は限定され、特に圧延鋼材では介在元素の最も少なく炭化物の影響よりも一層大きな影響を及ぼすの



第1図 Ferrite 強度に及ぼす合金元素の影響

* 神戸市兵庫区鷹派町3

** 技術研究所技工博

第1表 圧延高張力鋼の化学成分と機械的性質及びJIS-SM-50規格

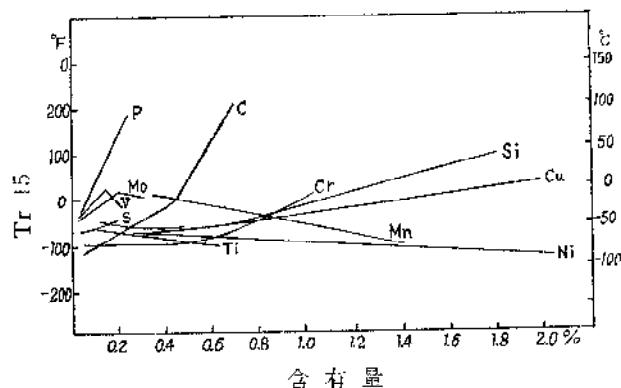
川鉄規格	C	Si	Mn	P	S	Cu	板厚mm	Y.P kg/mm ²	T.S kg/mm ²	E%GL 200mm
HTP-52W	0.14	0.37	1.18	0.013	0.019	0.15	6	41.0	53.8	24*
"	"	"	"	"	"	"	20	37.6	52.0	28
HTP-57W	0.18	0.45	1.22	0.008	0.009	0.14	12	43.0	59.0	25
JIS SM-50 A	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.50	<0.035	<0.035	—	5~9	≥ 32	50~60	≥ 18
B						—	9~50	"	"	≥ 20
規格 C	≤ 0.18	"	"	"	"	—	—	—	—	—

* GL=50mm

はフェライトに固溶する合金元素である。フェライトに固溶した合金元素の引張強さに及ぼす影響は、第1図に示される如く、経済性を考慮すると、Si, Mn が最も適し、一般に圧延高張力鋼では Si-Mn 系が多く J I S の SM-50 もこれに属している。川鉄規格による圧延高張力鋼及び J I S, SM-50 規格の 1 例を第1表に示したが、Si-Mn 系で引張強さ 50kg/mm² 台は充分具現出来ることが示されている。

ロ) 切欠靭性

橋梁及び大型船舶の脆性破壊の事故以来溶接構造用鋼材には良好な切欠靭性がつよく要求されるようになり、種々の切欠靭性試験方法が提唱されているが最も普遍的に用いられるのはシャルピー試験である。シャルピー試験の Tr 15 (吸収エネルギーが 15 ftlb に相当する遷移温度) に及ぼす化学成分の影響は第2図に示される如く、Mn, Ni は増加と共に Tr 15 の低下を来すが、他



第2図 Tr 15 に及ぼす合金元素の影響

の合金元素は何れも Tr 15 を上昇させ、特に C, P はその影響が大きい。

また焼準を行なうと Al の窒化物による結晶粒微細化により切欠靭性が著しく改良される。実例及び SM-50 規格を第2表に示した。

第2表 圧延及び焼準高張力鋼のシャルピー試験結果と JIS SM-50 規格

川鉄規格	C	Si	Mn	P	S	Cu	板厚mm	処理	衝撲値 kg.m/cm ²			Tr15°C
									20°C	0°C	20°C	
HTP-52W	0.14	0.37	1.18	0.013	0.017	0.15	20	圧延のまゝ	6.3	11.0	13.8	-37
"	0.16	0.42	1.17	0.009	0.014	0.16	30	"	4.3	6.7	12.3	-32
"	"	"	"	"	"	"	"	焼 準	7.2	12.9	21.8	<-60
HTP-57W	0.18	0.37	1.16	0.016	0.012	0.17	12	圧延のまゝ	3.6	6.3	9.8	—
JIS SM-50 A	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.5	<0.035	≤ 0.035	—	—	—	—	—	—	—
B	≤ 0.18	"	"	"	"	—	16~25	特に規定なし	—	≤ 3.5	—	—
C	"	"	"	"	"	—	12~20	—	—	≤ 6.0	—	—

ハ) 溶接性

鋼材の溶接性は化学成分によつてほどく決定され、目安としては、J I S, Z3101による溶接熱影響部最高硬さ試験が用いられる。Battle 研究所ではビード下ワレを生ずる限界として、普通鋼に近い成分では 350Hv (荷重10kg) の値を示している。またわが国では Si-Mn 系高張力鋼の合金元素の影響を炭素量に置き換えた等価炭素量なる値で判定することが多く、その換算式としては

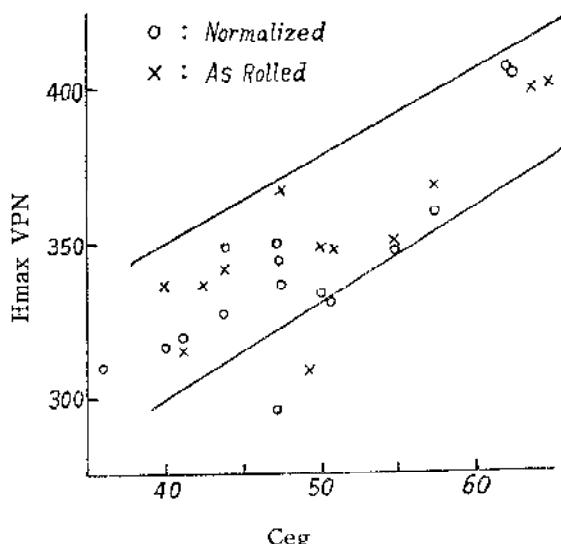
次式が最も広く用いられている。

$$Ceg = C + \frac{1}{2}Si + \frac{1}{4}Mn - \frac{1}{25}Ni + \frac{1}{8}Cr - \frac{1}{4}Mo$$

若干の Ni, Cr, Mo を含むする鋼材をも含めて等価炭素量と溶接熱影響部最高硬度の関係は第3図に示される如くになり、上述の Si-Mn 系高張力鋼の溶接硬化性は安全圏内に入つていることが立証されている。

b) 調質鋼板

調質鋼板は引張強さが 60 kg/mm², 70 kg/mm², 80



第3図 溶接熱影響部最高硬度と等価炭素量の関係

kg/mm^2 と増加するにつれて、合金元素の種類、量が増してくるが、ここでは最も強度の大きい 80 kg/mm^2 調

質鋼板について、その特性と問題点を総めることにする。調質鋼板は圧延鋼板と異り、焼入操作によって針状組織を生ぜしめて強度の増加を図りかつ、焼戻によって韌性の恢復が図られるので化学成分もフェライトに固溶する合金元素の影響と共に焼入硬化性、或いは焼戻による軟化防止等に関する合金元素が選ばれ、また炭化物もこれら合金元素を含有する複合物となり、その形状分離の程度によって機械的性質に微妙な変動を生じることが多い。わが国ではこれら調質鋼板に対する JIS は制定されておらず、溶接協会の WES 案に拠ることが多い。

イ) 強 度

80 kg/mm^2 調質高張力鋼の強度の特性は第3表に示される如く単に引張強さの大きいことだけでなく、降伏点(耐力)の高いことであり降伏比は 90% を上回っている。概して引張の様伸びは少ないが断面収縮率はかなり大きく、また弾性係数は圧延鋼板に比べて大差なく $2.0 \sim 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ の値を示している。

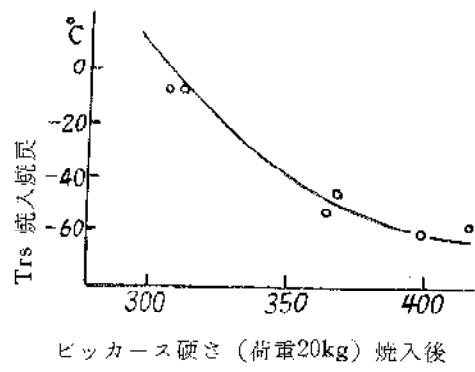
第3表 80 kg/mm^2 調質高張力鋼の引張試験結果

川鉄規格	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	板厚	Y.P mm/kg/mm ²	T.S kg/mm ²	E/50mm GL	R A %
K-O	0.14	0.30	0.43	0.007	0.009	0.27	0.83	0.51	0.43	0.06	0.003	25	76.4	83.3	21	63
WES SH-70	規 定 な し												≥ 70	$78 \sim 95$	≥ 19	—

ロ) 切欠靭性

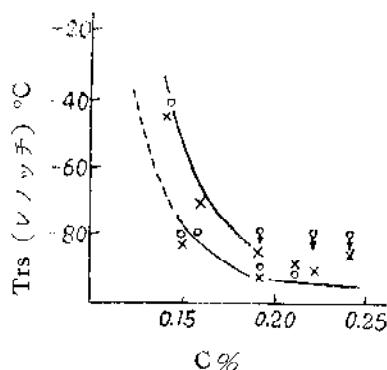
フェライトに固溶した合金元素の影響の外に低炭素系調質鋼では焼入組織によつて、切欠靭性は変動し、マルテンサイトのみの時最も優れ、次いでベーナイト、フェライト、パーソライトの混入と共に脆化が表われており、この組織の変化は焼入冷却速度及び化学成分によつて左右される一例として第4図に 80 kg/mm^2 調質鋼を異つた冷却速度で焼入し、その際の硬度と焼入後のシャルビ

度の高い程またC含有量の高い程Trsは低温側にづれ、圧延鋼材で脆化を示すCの悪影響は焼入組織の相異のために蔽われて反つて切欠靭性は向上し、調質鋼の特性を示していると思われる。



第4図 烧入硬度と Trs の関係

一試験の Trs (50%破面率を示す温度) の関係を、また同一条件で焼入された 80 kg/mm^2 調質鋼の C 含有量と Trs の関係を第5図に示す。図に認められる如く焼入硬



第5図 C含有量と Trs の関係

80 kg/mm^2 調質鋼の標準 V ノッチ、シャルピー試験の結果は第4表に示される如く、前述の圧延鋼材と比べて遷移温度は極めて低く強度の増加に伴い、ますます必要となる構造物の安全性を充分確保している。

ハ) 溶接性

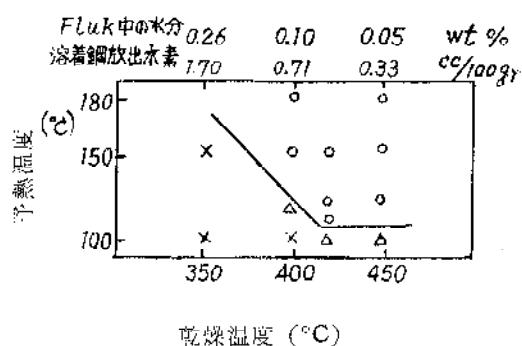
合金元素の增加に伴い、溶接熱影響部の硬化性はますます増加し、熱処理の影響は少なく、ほとんど圧延鋼材

第4表 80kg/mm² 調質鋼のシャルピー試験結果

川鉄規格	板厚 mm	方 向	Tr 15°C	Trs °C	Tre °C	Eo kg/mm ²	E-20 kg.m/cm ²	E-50 kg.m/cm ²
K-O	12	L	-120	-85	-82	14.5	14.0	13.0
	25	L	-100	-61	-65	12.0	11.5	7.5
S H 70	-	--	-	-	-	A≥4.5	B≥4.5	C≥3.5

と同様な関係を示している。事実溶接熱影響部最高硬さ試験では略 430 Hv の値を示し、前述の 350 Hv を遙かに上回った値となっている。従つて溶接施工に当つては当然予熱或いは後熱の熱処理が必要となり、一般に 120°C~200°C の予熱は最低の必要条件となつていて、一方熱影響部の延性は化学成分によつて左右され、Ni, Cr, Mo 等の添加は同一硬度では Si-Mn 系に比べて延性を増加することが熱サイクル再現された試験の引張試験によつて確められている。

従つて溶接施工上最も必要なことは如何なる条件であればワレが発生しないかという点にしばられて來た。一般に溶接熱影響部のワレは組織及び、H₂ 含有量によつて左右されるが、組織は化学成分によつて大略が決定されるので、H₂ 含有量の減少を図るべく溶接棒のフラックス中の水分の減少、或いは溶接部の雰囲気調整を考えられている。後者の雰囲気調整では現場施工には溶着鋼の切欠靱性等他の因子が加わり、また施工も困難が伴うのではほとんどは手溶接で施工されることが多い。そこで 30mm 厚の 80kg/mm² 調質鋼について窓型拘束ワレ試験を行ない、予熱及び放出水素とワレの関係を調査した結果を第6図に示す。図より予熱温度の高い程、放出水



第6図 窓型ワレ試験における溶接条件とワレ感受性の関係

素量の少ない程ワレの少ないことが明らかであり、略 0.5cc/100gr H₂ 含有量にするには、400~450°C 1時間の溶接棒の乾燥が必要である。

印ち、80kg/mm² 調質鋼の溶接は低品位の高張力鋼に比べれば、かなり困難であるが、完全な管理の下では安全な施工の出来ることが示されたのである。

2. 超高張力鋼

抗張力 100~200kg/mm² 級のいわゆる超高張力鋼 (ultra high strength steel) は航空機やロケット用材料として広く使用されるようになつたが、これは AISI 4340 鋼などの既存の鋼を低温焼戻すと非常に高い抗張力を示すことに端を発し、新しい鋼やその改良型が次々に発表されて、超高張力鋼の一派を形成するにいたつた。抗張力が 180kg/mm² 程度になると強度/重量は、いちじるしく大きくなり、Al よりも約 15% 大となるので、低合金鋼であると同時に軽合金鋼にもなるわけである。

第5表に各種超高張力を 4 つのタイプに区分して示す。各タイプについて略述すると熱間ダイス鋼は中炭素に Ni, Cr, Moなどをやゝ多量に含む鋼で自硬性著しく大きく、高温焼戻脆性があり抗張力、降伏点は、それぞれ 200kg/mm², 170kg/mm² を超える強度を有し航空機の降着装置類に主に用いられる。マルテンサイト系ステンレス鋼は、耐酸化性、耐食性大であり、熱処理により硬化できる強力ステンレス鋼として高強度、かつ耐食性を要する化学装置等に用いられているが自硬性が大きく硬くてもらいマルテンサイトを生じ割れ易いので溶接が困難である。抗張力も 150kg/mm² まである。折出硬化性鋼は焼入、焼戻し後の折出硬化により強化しうる点で 400 系と同様熱処理硬化性のものであるが低炭素のため (C < 0.10%) 溶接が容易であり、耐熱性良好である。ジェット機やミサイルの一部に用いられ使用されている。たとえばこのタイプの 1 つ AM 355 では抗張力 190kg/mm²、降伏点 170kg/mm² にも達する。低合金マルテンサイト鋼は、AISI 43×X 及びそれらの改善型であり炭素量 0.25~0.5% で 250~350°C 程度の低温焼戻すと抗張力 200kg/mm² を超える値になる。Cr 5%程度を含む H-11 は抗張力 200kg/mm² 以上を有し 200°C 以上の高温強度を要求される場合に優れた性質を示すといわれている。

抗張力が 150~200kg/mm² の鋼はロケットの燃焼チャーピーとして使われることが多い。この場合には薄肉円筒として使用されるので二軸応力に対する抵抗の高い材料でなければならない。AISI 4137 に Co を 1% 添加した 4137 Co はこの目的のために作られた材料であ

第5表 超高張力鋼の成分

タイプ		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	その他
低合金マルテンサイト鋼	AISI 4340	0.38~0.43	0.60~0.80	0.20~0.35	0.70~0.90	1.65~2.00	0.20~0.30	—	
	17-2 ZAS	0.28~0.33	0.45~0.65	0.55~0.75	1.00~1.50	—	0.40~0.60	0.20~0.30	
	AMS 6434	0.31~0.38	0.60~0.80	0.20~0.35	0.65~0.90	1.65~2.00	0.30~0.40	0.17~0.23	Polaris 130kg/mm ² Y.P
	300M (改良 4340)	0.41~0.46	0.65~0.90	1.45~1.80	0.70~0.95	1.65~2.00	0.30~0.45	0.05 (min)	169kg/mm ² Y.P 197 " T.S
	AMS 6427 (改良 4330)	0.30	0.90		0.85	1.83	0.40	0.08	
	OCX-2 (改良 4137 Co)	0.39	0.70	1.00	1.10		0.25	0.15	Co 1.00
	H-11	0.38~0.43	0.20~0.40	0.80~1.00	4.75~5.23		1.20~1.40		
熱間ダイス鋼	Potomac M	0.40	0.30	1.00	5.00		1.00	1.00	
	Vasco get 1000	0.40	0.30	0.90	5.00		1.30	0.50	169kg/mm ² Y.P
	Hy-tub(AMS6418)	0.25	1.35	1.50		2.00	0.40		204kg/mm ² T.S
	Super Hy-tub	0.40	1.30	2.30	1.40		0.35	0.20	
マトル系鋼 テストサンイレ	410	0.15 (max)	1.00 (max)	1.00 (max)	11.5~13.5				
	419	0.25			12.0	0.5	0.5	0.25	30W 0.10N
	422	0.23	0.75	0.35	12.0	0.8	1.0	0.25	1.0W
折出硬化性鋼	17-7 PH	0.09 (max)	1.00 (max)	1.00 (max)	16.0~18.0	6.50~7.75			0.75~1.50AI
	PH15-7 Mo	0.09 (max)	1.00 (max)	1.00 (max)	14.0~16.0	6.50~7.75	2.0~3.0		0.75~1.50AI
	AM 350	0.12 (max)	0.90 (max)	0.50 (max)	16.0~17.0	4.0~5.0	2.5~3.25		183~197kg/mm ² Y.P

第6表 化学組成(%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	H ₂	O ₂
AMS 6434	0.34	0.29	0.71	0.005	0.015	1.74	0.83	0.36	0.24	0.019	0.32	0.0072
300M	0.46	1.80	0.86	0.006	0.013	1.98	0.87	0.40	0.11	0.10	0.40	0.0052

る。この 4137 Co は 2 段焼戻し(1段は主として残留オーステナイト変態、2段目はマルテンサイトの焼戻し)により良好な機械的性質が得られる。

筆者は数多くの超高張力鋼の中から 150 キロ、ハイテン及び 200 キロ、ハイテンに相当する材料として AMS 6434 と 300M を選びロケットチャンバーとして使用すべく材質調査を行なつたので以下にその概要を示す。

高周波炉で溶解した 2 ton の鋼塊から板厚の 6 mm の板に圧延、長時間の組織均一化焼鉋の後、調質して機械試験及び衝撃試験を試みた。板の分析結果および変態温度は第6表、第7表の通りである。

第7表 変態温度(熱膨張試験による)

	A C ₁ (°C)	A C ₃ (°C)	M _s (°C)
SMS 6434	730	785	290
	765	795	240

焼鉋後及び調質後の機械的性質を第8表および第9表に示す。

これら 2 表をみて分るように、焼鉋状態では、硬度低く十分延性に富み切削、加工も容易であるが焼入、焼戻

第8表 焼鈍後の機械的性質(板厚6mm)

鋼種	試験片方向	硬度	耐力(0.2% offset) (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)	耐力比 (%)	伸び (%)	曲げ半径 (t)	オーステンイト粒度
AMS 6434	L	224	41.5	66	63	24	密着良	6
	C		42	67	63	25	密着ワレ	
300M	L	265	51	84	61	22	0.75	8
	C		52	85	60.5	20	1.0	

試験片 JIS 5号 GL=50mm

第9表 調質後の機械的性質(板厚6mm)

	焼入条件	焼戻し温度	硬度(Hv)	耐力(kg/mm ²)	抗張力(kg/mm ²)	耐力比(%)	伸び(%)	曲げ半径(t)
AMS-6434	870°C O.Q	250°C		140	172	81.4	10	1.75
400M	870°C O.Q	300°C	610	175	206	86.0	7	

試験片 JIS 5号 GL=50mm

後は非常に硬く切削は不能であり、大きな変形を伴う加工は出来ない。従つて切削、加工、溶接等が必要な場合には焼鈍状態において行ない調質は最終段階で行なわなければならない。

衝撃試験は4mm厚、10mm巾、2mmVノッチの特別寸法の試験法でおこなつた。

第10表がその結果である。従来の鋼板に比して著しく相違する点は衝撃値が全般に低く試験温度が上昇しても

衝撃値は余り増加せず遷移温度も判然としない。破断後の破面は全体に黒っぽく、剪断破面、脆性破面の区別がつかず、Trsの測定は出来ない。AMS-6434は、L、C方向差がはつきり現われC方向の衝撲値がとくに低い。300MではL、Cの差は余りみられない。AMS-6434は、300°～400°Cに、300Mは400～500°Cに焼戻脆性が現われる。

一般にSiが高いと焼戻脆化温度を高温側に押しやる

第10表 焼入焼戻し後の衝撃値(kg.m/cm²)

焼入条件	焼戻し温度	(温度°C) 方向	200	100	20	0	-30	-60
			200	100	20	0	-30	-60
870°C O.Q	250°C	L	3.0	2.8	2.8	2.1	2.2	2.0
		C	1.7	2.0	2.0	1.8	1.4	1.5
870°C O.Q	300°C	L	2.9	3.0	2.5	2.7	2.4	1.7
		C	2.5	2.4	2.2	2.2	1.7	1.6

といわれており、300Mはこの目的のためにAISI 4340にSiを添加した鋼であるが、このことは筆者の試験でも確認された。

上述のように低温焼戻すすれば、高い抗張力、降伏点は比較的簡単に得られるが、これを薄肉円筒のロケットチャンバーとして使用するためには、なお多くの問題が残されている。特にチャンバー材料としての問題点を以下に略述する。

ロケットチャンバー材料としては

- ① 強度/重量が高い
- ② 延性、韌性に富んでいる
- ③ 薄板及び鍛造物として使用可能
- ④ 製造が容易
- ⑤ 変形、加工において信頼度が高い
- ⑥ コストが安い

等が要求されるがこれらの要求は互いに矛盾するものであり1つの性質の伸長は他の性質の犠牲において達せられる傾向が強い。たとえば強度を上げるためにCを0.4

多程度にし、更に Matrix を強くするため、Cr, Mn, Ni 等を添加しているが、これらは必然的に溶接最高硬さを高くして、溶接割れを引き起す傾向を強くする。また抗張力、降伏点を高めると切欠効果を高めて材料の脆性破壊の危険性を高める結果となる。また普通鋼や低合金高張力鋼で採用されている材料の試験方法が極度に強度水準の高い材料にあてはめられるか、否かにも問題がある。

溶接性：熱間割れおよび冷間割れは溶着鋼と影響部に発生する。Willkinson と Cottrell によれば拘束状態で冷却する時に粒界に存在する S に富んだ低融点物質が割れの起点となる。C が高いと C が grain 中に固溶せんとして S を boundary にはじき出すために S による割れの傾向は一層強まる。

また S と C の偏析を助長するので好ましからざる元素である。従つてロケット材には S, P の特に低いことが望ましく筆者も (P + S) ≤ 0.015% を目標に溶解した。Mn が S と結合して融点の高い化合物を作り hot cracking を抑える効果のあることはよく知られているが、この外にカーバイト生成元素 Cr, Mo, V は C, S と結合して複合化合物を作るので抑制効果がある。

熱影響部の冷間割れ (cold cracking) は水素、冷却速度、拘束による応力の組合せによつて起る。inclusion、結晶粒界膜、微少熱間割れ (hot cracking) のような不連続点が割れの起点になる。したがつてロケットチャンバー材料には特に非金属介在物、S, P, H の低いこと

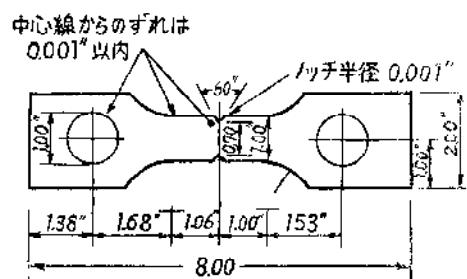
が必須の条件である。

脆性破壊：切欠効果によつて脆性破壊が発生し易いのが強度水準の高い鋼の特徴である。一般に薄板の場合には脆性破面は板厚方向に走るので、塑性変形はほとんどおこらない。塑性変形を制限せんとするいかなるファクターも脆性破壊への傾向を増すものである。降伏点が増すと塑性変形を防げるが降伏点の増加だけでは必ずしも脆性破壊は発生せず、スリップを阻止するような少量の不純物が存在する時に破壊が起る。

析出物、非金属介在物、固溶している原子は塑性変形を防害し、材料の韌性を低下させる。特に S は溶着金属の熱間割れを助長するばかりでなく鋼の韌性をも著しく害するので注意を要する（第 7 図参照）当然のことであるが結晶の微細化は韌性をます。

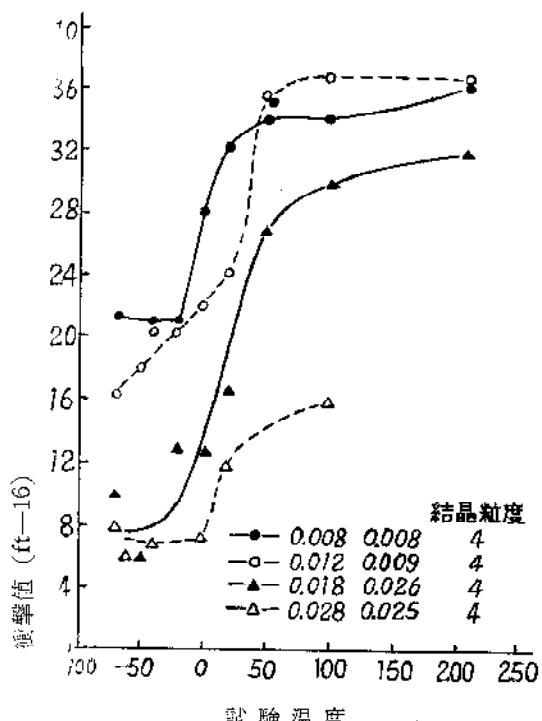
ロケット材の材料試験方法：強度の低い材料の試験に用いた方法はロケットチャンバー材に全面的に適用するわけには行かない。たとえばチャンバーの圧力試験では引張試験値よりも可成り低い応力で破壊することがしばしばおこる。現在のところ使用状態における強度と材料試験方法との関係は確立されていない。チャンバーとして使用する場合には hoop strength は二軸応力を耐える能力を示す指標であるが、140 kg/mm² 以上になると hoop strength と一軸方向の引張り強度との関係はなくなる。また同一の化学組成と引張り強度を持つていながらも脆性破壊の仕方が可成りことなつて現われることも知られている。そこで新しい適切な試験方法の確立されることが望まれる。

従来の衝撃試験方法の代りに A.S.T.M は切欠引張り試験片 (notch tensile test specimen) (第 8 図参照) による方法を提倡している。



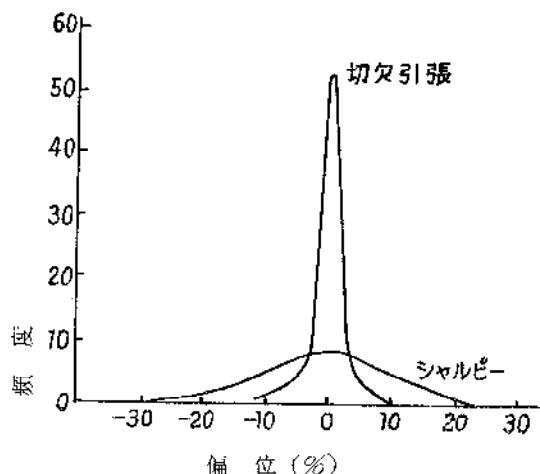
第 8 図 ASTM 切欠引張試験片

抗張力 140 kg/mm² 程度までは切欠つき試験片の抗張力は普通の試験片と同一の値を示すが、140 kg/mm² 以上では切欠引張強度 (notch tensile strength) が韌性 (notch ductility) の指標になる。強度水準の高い範囲で、切欠抗張力 (notch tensile strength) が急激に減少するのは、切欠のため応力集中がおこり、延性が減少するため割れが伝播しやすくなるからである。Klier 等が調べたところでは、この切欠引張試験の方が衝撃試験



第 7 図 S 及び P の衝撃値に及ぼす影響
(P. F. Langstone による)

よりもずっと感度が高い。(第9図)



第9図 衝動試験と引張試験の分布曲線の比較
(Klier et al.による)

3. ステンレスクラッド鋼

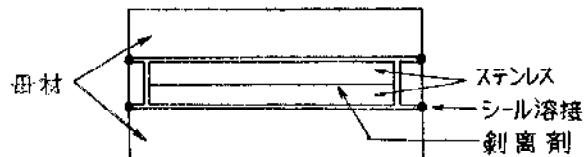
クラッド鋼とは、名前の示す通り軟鋼、低合金、鋼等のように低廉な材料を母材として、その表面により高級な材料を冶金学的に張り合わせて完全に一体としたものである。低廉な材料および高級な材料の選択、組合せ、全板厚に対する各材料の占める比率等により多くの種類のクラッドが可能である。実際に市場に出ているものとしては、ステンレス鋼一鋼、ニッケル一鋼、アルミニウム一鋼、モネル一鋼、銅一ステンレスその他であるが、これらの中で量的にも多く生産され、初用度の高いのはステンレスクラッド鋼であるから、ここではもっぱらステンレスクラッド鋼についてその製造法、特徴について述べる。

ステンレスクラッド鋼に使用されるステンレス鋼としてはJISに規定されているほとんどすべてのステンレス鋼がまた母材には一般構造用鋼、溶接構造用鋼、高張力鋼、ボイラー用鋼などが適当に組合せられて使用されている。

またステンレス鋼を片面にだけ張り合わせるが両面に張り合わせるかにしたがつて片面、両面クラッドができる。クラッド比(全板厚に対するステンレス鋼部分の厚みの比率をいう)を自由に変えることも可能である。ステンレスクラッド鋼はステンレス鋼にくらべて10~50%程度安価で、しかも耐食性は同種のステンレスと同等であり、また切断、溶接も適当な方法を用いればステンレス鋼よりも容易かつ安価である。熱伝導度はステンレス板よりも高く靭性も向上される。(13クローム、18クロ

ーム系ステンレス鋼の場合)等の特徴を有する新しい材料である。

製造法：ステンレス部と母材部を接着させるには、圧延接着法、鋳込法その他数多くの方法があるが、現在広く行なわれているのは圧延接着法である。この方法は第10図に示すように2枚の母材の間にステンレス鋼板を挟み(ステンレス板同志間には密着を防止するため、剥離



第10図 サンドイッチ組立方

剤を塗布し)周囲を密封溶接して、1つのブロックとしたものを加熱後圧延する。圧延後周囲をガス切断して拘束を除くと2枚の片面ステンレス鋼が得られる。接着すべき面に不純物が附着していたり圧延前の加熱時に酸化物が形成されると接着を不能或いは不完全にするので圧延時に清純な面を維持することが、とくに大切である。そこで母材側は機械切削後バフ研磨し、ステンレス側はバフ研磨後ニッケルメッキを施して酸化皮膜の形成を防止し、接着を確実にしている。ステンレス鋼ニッケ

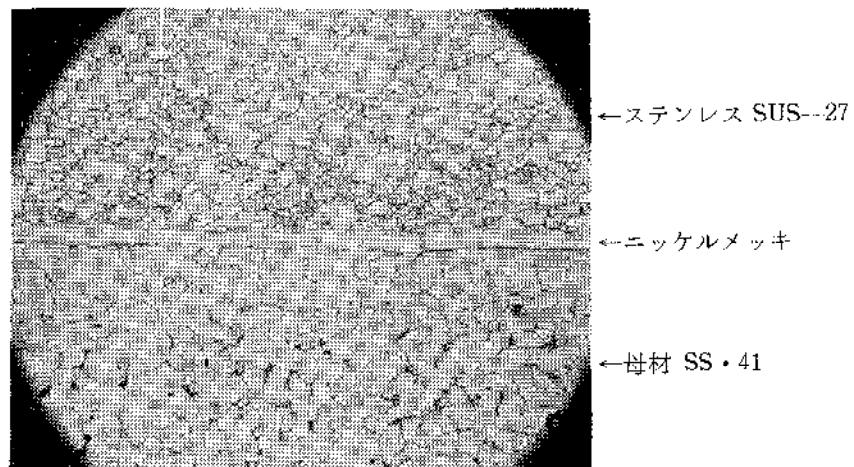


写真1 クラッド鋼の接着状況

ルメッキ—母材の各境界は相互拡散と再結晶により合金層を形成するので圧延後のクラッド鋼は写真1に示すように完全に一個の連続体となる。

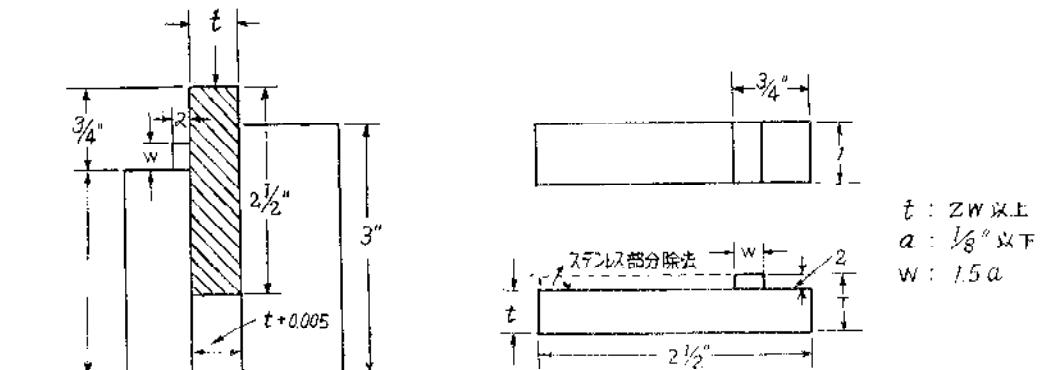
接着強度：クラッド鋼の接着層では異種類の2つの鋼が直接あるいはメッキなどの間接材を介して接着しているがこの接着層は不純物や酸化物を含まず、連続的な合金層を形成していることが必要で適当な強度と延性を有し、高度の変形にも耐えて割れの発生を防止するものでなければならない。接着層の顕微鏡検査、超音波探傷法による接着部検査は静的状況における接着層の良否の調

べるものであり、曲げ試験、引張試験（板厚方向の）剪断試験は接着部合金層の強度や ductility を調べる方法である。日本では J I S その他の規格においてクラッド鋼に対する規格が未だ制定されていないので A S T M 規格に準じた検査をする場合が多い。

曲げ試験はステンレス部に圧縮力を与えるような状態及び張力を与えるような状態で 180° 曲げた時に曲げ部の

両縁に剥離が発生するか否かをみる方法である。クラッド製品についての曲げ試験結果では剥離の発生するものはほとんどない。

剪断試験：クラッド鋼のステンレス部と母材部との接着強度を試験するために A S T M が採用している方法は第11図に示すような治見に試験片をはさみ、接着部に剪断応力を与え、ステンレス部を母材部より剥離させる時



第11図 剪断強度試験装置及び試験片

の力をもつて剪断強度としている。この場合 A S T M 規格では 剪断強度 $\frac{P}{S} \geq 14 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$

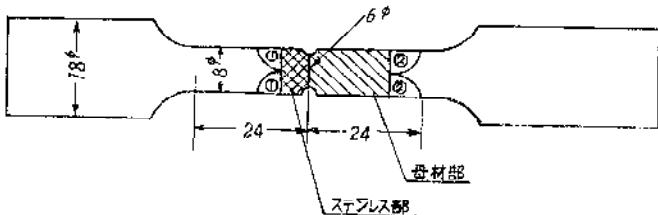
$P \text{ (kg)}$ ……重荷重

$S \text{ (mm}^2\text{)}$ ……ステンレス接着部面積

となっているが、実際には 14 kg/mm^2 よりもはるかに高い値を示している。第11表は筆者が行なった試験結果である。

第11表 ステンレス、クラッド鋼の剪断強度

全板厚 (mm)	ステンレス部厚 (mm)	ステンレス規格	母材規格	剪断強度 (kg/mm ²)
7.0	2.0	SUS—27	S S 41	28.9
9.0	2.0	"	"	31.6
12.0	3.0	"	"	32.9
22.0	2.0	"	S B 42B	32.9
22.0	3.0	AISI 405	"	34.5
35.0	3.0	SUS—28	S M41W	33.5
50.0	5.0	SUS—33	S B 42B	29.0
55.0	4.0	SUS—28	"	30.7
100.0	9.0	"	"	31.5

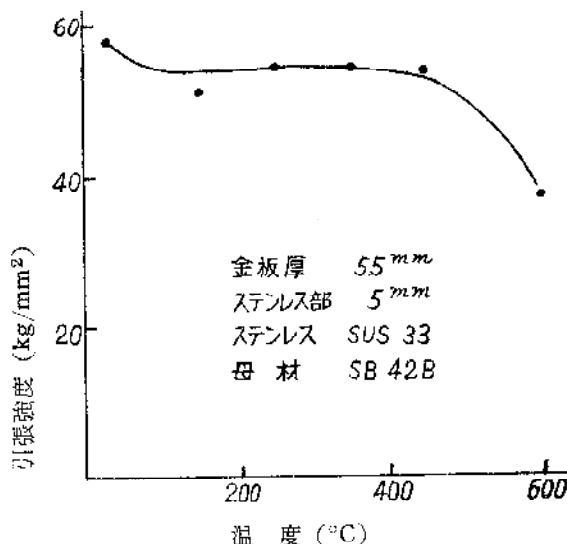


第12図 引張試験片形状

板厚方向の接着強度、ステンレスクラッド鋼を圧力容器、構造物等に使用する場合には接着部には剪断応力のみならず、これと直角の板厚方向にも応力が働き、実際にはこれら 2 方向の合成された力が働いている。したがつて接着強度としては板厚方向の引張強度も重要な要素である。筆者は第12図に示すような形状の引張試験片で引張試験を行なった。

この場合クラッド鋼の母材側には軟鋼丸棒を、ステンレス側にはステンレス丸棒を夫々溶接後 $1,050^{\circ}\text{C}$ で 30 分保持し空冷してから引張試験片を切削した。試験片は丸棒のまゝでは溶接部その他で破断がおこり、接着部での破断が起りにくいため接着部に U 溝を切り試験に供した。クラッド鋼の使用範囲は多方面にわたるが合成塔、石油精製塔等の高圧高温加熱部分に使用される場合がしばしばあるので高温における接着強度が大きいことも大切である。第13図に常温及び高温引張試験結果を示す。ここに使用した材料はステンレス S U S 33、母材 S B 42 B で全厚 55mm、ステンレス厚 5 mm のクラッド鋼である。この結果では常温 $\sim 450^{\circ}\text{C}$ での接着強度は 50 kg/mm^2 以上の破断強度を示し、かつまた温度上昇に伴う強度の低下もあまりみられない。ただし切欠のため平滑な試験片にくらべて接着部の破断強度が見掛け上ある程度高く与えられている点に注意しておく必要がある。

クラッド鋼の機械的性質、ステンレスクラッド鋼を圧力容器として使用する場合、その都度計算には「圧力容器構造規格」（労働省）により母材および



第13図 高温引張試験結果

ステンレス部の強度を加重平均した次式を用いる。

$$\sigma = \frac{\sigma_1 t_1 + \sigma_2 t_2}{t_1 + t_2}$$

σ : クラッド鋼の引張強さ

σ_1, σ_2 : 母材およびステンレス部の引張強さ

t_1, t_2 : 母材およびステンレス部の厚さ

第12表に筆者が行なつたステンレスクラッド鋼の引張強さの実測値を上式による計算値とともに併記する。クラッド鋼の母材側あるいはステンレス鋼側を切削して引張試験をおこない上式の $\sigma_1, \sigma_2, t_1, t_2$ より計算によって求めたクラッド鋼の引張強さ σ は実測値と ± 2 kg/mm² の範囲でよく一致する。

クラッド鋼の耐食性：クラッド鋼のステンレス部の耐食性は同種のステンレス板と同程度の耐食性を行する。普通ステンレス部に最高の耐食性を賦与するため圧延後

第12表 各種ステンレスクラッド鋼の機械的性質

板厚 (mm)	クラッド 比 (%)	ステンレス 鋼種	母 材 種	引 張 試 験				
				試験片 (JIS)	降伏点 (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)	伸 び (%)	GL=(mm)
					実測値	計算値		
7.5	20	SUS-27	S S 41	5号		44.1	45.5	48 50
12	20	SUS-32	"	"		46.7	47.8	50
26	15	SUS-33	S B 42B	1号	32.1	49.9	51.5	26 200
40	10	SUS-33	"	"	37.9	47.1	49.4	26 200
55	9	SUS-28	"	特1号		47.8	45.8	27 200

第13表 ステンレスクラッド鋼の腐食試験結果

板厚 (mm)	ステンレス厚 (mm)	ステンレス規格	熱処理	試験液	試験時 (hr)	腐食減量 (gr/m ² /hr)	減量規格 (JIS)
(ステンレス板)		SUS-27	1050°C × 30' → A.C.	65% HNO ₃ boiling sol	48	0.198	
10	15	"	"	"	"	0.17	
(ステンレス板)		SUS-28	"	"	"	0.15	
260	10	"	as-rolled.	"	"	0.132	
(ステンレス板)		SUS-33	1050°C × 30' → A.C.	"	"	0.4	
55	5	"	"	"	"	0.36	
(ステンレス板)		"	"	5% H ₂ SO ₄ boiling sol	"	0.7	≤4.5
55	5	"	"	"	"	0.8	"

1,050°C から急冷する。勿論この様な熱処理によつて接着が低下する心配はない。第13表に腐食試験結果を示す。何れの場合もステンレス鋼と全く同等の耐食性を示している。

ステンレスクラッド鋼の熱伝導度：ステンレスクラッド鋼がステンレス鋼より有利な点はステンレス鋼の種類およびクラッド比により多少異なるが熱伝導度がきわめてよいことである。第14表に各種クラッド鋼の熱伝導度の計算値を示す。

薄板のステンレスクラッド鋼：今迄クラッド鋼の厚板について述べて来たが片面、あるいは両面にステンレスを張り合せた薄板の製造も当然考えられる、このステンレスクラッド薄鋼板は厨房器具、建築用材、室内装飾用材、ドラム缶等々に広く利用される可能性がある。特に熱伝導性を考慮した使用法はいつそうこの鋼種の利用価値を高める。具体的には18-8ステンレス系については片面クラッド、18クローム系ステンレスについては片面および両面クラッド鋼が製造可能であり、この場合

第14表 ステンレスクラッド鋼の熱伝導度(計算値)

材質	熱伝導度 kcal/hr/ m ² /°C /m	18-8ステンレスの熱 伝導度をし た場合
軟鋼	39	2.8
13Cr	22	1.6
18Cr	23	1.6
18-8(Ni-Cr)	14	1
13Crクラッド鋼 " 20%	36 33	2.6 2.4
18Crクラッド鋼 " 20%	36 34	2.6 2.4
18-8クラッド鋼 " 20%	33 29	2.4 2.1

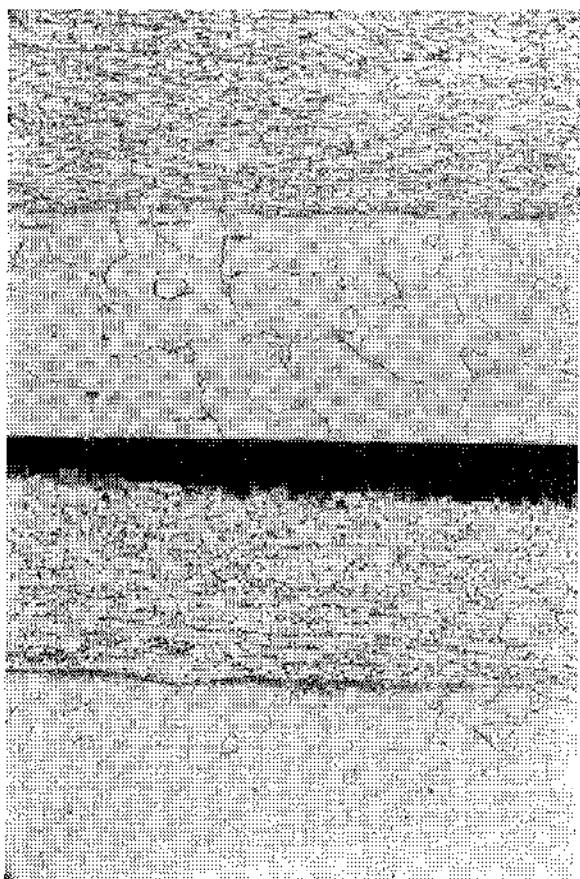


写真2 ステンレスクラッド薄鋼板の接着状況

中心部の軟鋼はJIS規格SPH-1, SPC-1であり、クラッド比は片面10~25%であり全板厚は0.7~2.0mmの範囲である。

製造：ステンレスクラッド薄鋼板の使用分野はおもに厨房、食器等であるから母材としては極軟鋼を使用し、その両面にステンレスを張り合わせる。したがつて普通のステンレスクラッド鋼製造の場合と同様に極軟鋼のスラブの上下に片面ニッケルメッキをしたステンレス鋼を重ね合わせ周囲を溶接して、いわゆるサンドイッチを形成し、これを加熱炉で加熱した後、ホットストリップミルで熱間圧延して適当な厚みのホットコイルを作る。このホットコイルは中間焼純ショット、酸洗の工程を経た後さらに四段可逆圧延機で最終厚みまで冷間圧延する。冷間圧延したコールドコイルは剪断した後焼純、酸洗し

さらに1~2%のスキンパスを行なつて最終製品にする。生産工程を図式的に示すと第14図の通りになる。

板厚 2.6mm

(A) 18-8ステンレス片面クラッド
←SUS 27 ホットコイル

←SPA-1

(B) 18Cr片面クラッド

←SUS 24コールドコイル
→900°C × 5 min A.C 板厚 0.7mm

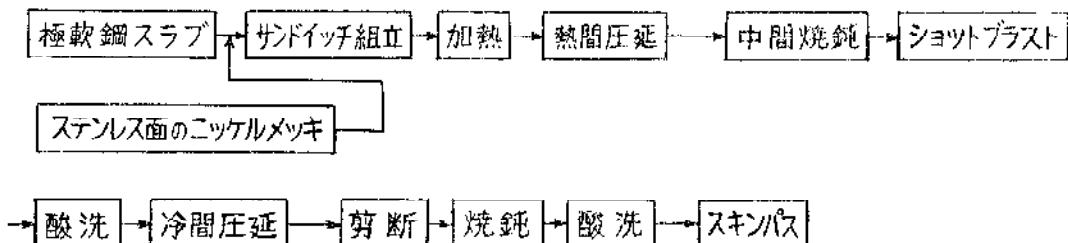
←SPH-1 × 300

薄鋼板の圧延比は厚板よりも一層大きくなるので接着はより一層確実になる。

写真2に18-8ステンレス片面クラッドおよび18Cr片面クラッドの接着状況を示す。

ステンレスクラッド薄鋼板の機械的性質、18-8ステンレスクラッド鋼、18Crステンレスクラッド鋼の機械的性質を第15表に示す。この表に記載してある計算値は、厚板の所で述べた圧力容器構造規格に規定された計算式を用いての結果である。

第5表からわかるように18-8ステンレスクラッドでは引張強さ伸びは単味の



第14図 ステンレスクラッド薄鋼板の製造工程

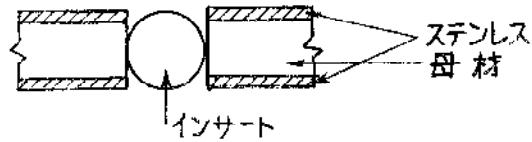
第15表 ステンレス薄鋼板の機械的性質

板厚 (mm)	クラッド比 (%)	ステンレス 材	母材材質 (JIS)	試験片 (JIS)	引張強さ (kg/mm ²)		伸び(%) (GL=50mm)	曲げ試験 0.5T
					実測値	計算値		
1.2	40	SUS-27	SPH-1	5 号	46	44	53	良
0.9	"	"	"	"	46	44	52	"
0.8	"	"	"	"	46	44	54	"
0.7	20	SUS-24	"	"	30	33	30	"

ステンレスに比べれば若干落ちる程度である。18Crステンレスクラッド鋼では単味の場合よりも伸びはよくなる。また機械的性質は板厚には余り影響されない。

加工上の注意：ステンレスクラッド薄鋼板はクラッド厚鋼板の場合ほど酷しい腐食環境において使用されるわけではないが、この鋼の切断面が腐食環境におかれるとときは軟鋼部分は隣接するステンレス部分と局部電池を形成するために腐食は軟鋼が単独で存在する場合よりも一層促進される。したがつてステンレスクラッド薄鋼板を加工するときには、この切断面の処置がとくに大切である。切断面を外部の環境に曝さないようにするための処置（たとえばプラスチックコーティングをするととか、ロウづけあるいは巻込等）が困難な場合には溶接が必要になって来る。溶接の場合にはステンレスクラッド薄鋼板はその断面の60～80%が軟鋼であるため、溶接の仕方によつては、溶着金属は母材の軟鋼に稀釈されて、Ni、Crの含有量が減少、ためにマルテンサイト組織があらわれ、硬度が上昇し伸びが劣化し耐食性が衰えるおそれがある。これを防止するため、クラッド鋼自身の溶込みはできるだけ少なくし、溶着金属を单一の組織、すなわちオーステナイト組織にすることが望ましい。建築用、装

飾材等に使用する場合には同時に外観が美麗である必要があり、そのためにはビードがきれいであまり盛り上がりがないことが必要である。



第15図 ステンレスクラッド薄鋼板の溶接法

このようにクラッド薄鋼板では溶接が大切な要素であるがビードがきれいであり、しかも機械的性質、耐食性の良好な溶着金属を得るのは、厚板クラッド鋼の場合ほど容易ではない。筆者の行なつた溶接試験のうち、最良であった方法は第15図に示すように2枚の溶接すべき板の間に25-20(25% Cr-20% Ni)の板厚よりもやゝ太目の丸棒のインサートを挟み不活性ガス溶接をする。アークは常にトーチとインサートの間で発生するようにする必要がある。この方法で得た溶着鋼は、オーステナイト組織で、硬度は低く、耐食性も良好である。ビードもきれいである。