

- 16) K. H. JACK: J. Iron & Steel Inst., (U.K.) 169 (1951), 26~36
 17) F. MARION, R. FAIVRE: Rev. Mét., 55 (1958) 459~469
 18) E. HERZOG: Rev. Mét., 54 (1957), 23~56
 19) G. DELBART, F. MARATRAY: Rev. Mét., 53 884~896
 20) M. A. GROSSMANN: Trans. Met. Soc., Amer Inst. Min., Met & Pet. Eng., (1946), Tech. Pub. No. 2020

高 Cr-Ni オーステナイト鋼の高温変形能*

(高 Cr-Ni オーステナイト鋼の研究—I)

塚本富士夫**・鈴木 隆志**

Hot-Twist Ductility of High Cr-Ni Austenitic Steels.

(Study on high Cr-Ni austenitic steels—I)

Fujio TSUKAMOTO and Takashi SUZUKI

Synopsis:

The "hot-twist ductility" of highly alloyed austenitic steels such as AISI type 309, 310 and 330 was studied. Effects of alloying elements, melting practices, and grain size of these steels on the "hot-twist value" at testing temperatures ranging from 1,000 to 1,300°C were mainly investigated by torsion testing at a rate of 200 rpm.

Fully austenitic specimens showed twist value curves of a convex type at testing temperatures, while two-phase specimens had much lower twist values than the former, nearly constant through all testing temperatures. With the former specimens, a transcrystalline fracture was observed at temperatures lower than that showing maximum twist value, while an intercrystalline fracture was shown at temperatures higher than that.

In the case of type 310 steel, the higher the carbon content of specimen, the lower was its twist value. On the other hand, the maximum twist value was obtained with 0.2% C specimen in the case of type 309 steel. This difference was attributed to the fact that the ductility of these steels depended upon the stability of austenitic structure.

Besides, effects of Si, Ni, Cr, N and Nb contents on twist value were explained. Comparing vacuum-melted with air-melted specimens, the effect of melting atmosphere was not so clear than that of alloying elements. Addition of small quantity of Al improved hot-twist ductility, while addition of large amount of Al as well as B up to 0.01% in the form of Fe-B much impaired ductility.

In the case of high-C steels, the increase of annealing temperature which resulted in grain-coarsening decreased the hot-twist value owing to the increase of solubility of C atoms, while no change of the hot-twist value were observed with very low-C steels. Therefore, it was concluded that grain size itself did not affect the hot ductility.

I. 緒 言

一般にステンレス鋼の熱間加工性は炭素鋼あるいは低合金鋼に比べて劣っているが特に高 Cr-高 Ni の耐熱オーステナイトステンレス鋼においてこの傾向がいちじるしく、鍛造、圧延などの熱間加工において不良を生じやすいことはよく知られている。

ステンレス鋼の熱間加工性にはいろいろの因子が影響するが特に変形抵抗が大きいことと、変形能が悪いことが重要な問題であつて、含有元素量、金属組織、微量不純物などの量およびその均一性がこれに影響をおよぼしていると考えられる。

変形抵抗はもちろん材質、温度、変形速度、加工度などによって支配されるが、高合金オーステナイト鋼は加工に要する力が大きく、変形抵抗が大であることはよく知られている。ステンレス鋼の高温変形能に影響する冶金学的因子としては成分的な面と材質的な面の二つが考えられ、前者に対しては成分バランスにより高温でフェライトを生じ二相組織を呈するものが変形能を阻害し、後者に対しては鋼中の O₂ 量が高いほど加工性が悪く、Al, Ti, Ca などの脱酸剤および稀土類元素の

* 昭和 36 年 4 月本会講演大会にて発表

** 日本金属工業

添加によつて変形能が改善せられることはすでに報告^{2)~6)}されている。

これらはおもに 18-8 系ステンレス鋼を研究対象としたもので AISI 309, 310, 330 鋼のごとき、高合金オーステナイト鋼に対する系統的な研究が見当らない。

本研究はこれら高 Cr-高 Ni オーステナイト鋼の高温変形能におよぼす合金元素、溶解条件、脱酸剤および結晶粒度などの影響を多数の試料により調査を行なつたものである。

II. 試料および実験方法

実験に供した試料は AISI 309, 310 および 330 型標準鋼およびこれらに各種合金元素を添加した約 50 チャージで、代表的な試料の成分を Table 1 に示す。いずれも 200 kg 塩基性高周波炉および 100 kg 真空高周波炉溶製の 16φ 熱間圧延丸棒から採取し、1,100°C 1h 水冷焼鈍を行なつた。目的元素以外の他成分の変動をなるべく少なくし、溶解条件をできるだけ一定にするため 1 チャージの溶解で目的元素のみを順次高めつつ 75 kg~100 kg に分割注型を行なつた。なお脱酸は Fe-Ca-Si 0.2% 添加に一定した。

高温変形能の測定には 10kg-m 型高温捻回試験機を用い、1,000~1,300°C の温度範囲で試験を行い破断にいたるまでの捻回数求めた。なお回転数はほかの研究者の結果と比較するため 200 rpm に一定し試験を行つた。

III. 実験結果および考察

(1) 標準鋼種の高温変形能

309, 310, 330 各型の高温変形能を知るために Cr, Ni 以外の元素量がほぼひとしいものについて捻回試験を行い比較した。Fig. 1 は C 約 0.20% の大気溶解材および C 約 0.01% の真空溶解材の試験結果を示す。0.20% C においては各鋼種共試験温度に対し山型の捻回値を示し、1,150°C 以下においてはほぼ同様の変形能を有するが、1,300°C に近づくとき高 Ni の 310 および 330 型は捻回値が低下することが知られる。

CLARK, Russ⁷⁾ は山型の捻回値を示す鋼種について組織を検討し、最高捻回値を過ぎると破壊は貫粒破壊から粒界破壊に移行し、この時の温度は適正な加工温度の上限にほぼ相当すると結論しているが本実験においても捻回試料の顕微鏡試験により同様の現象が認められた。一例として 0.20% C を含む 330 型の捻回試験片の破断

Table 1. Chemical composition of test specimens (%).

AISI type steels	Specimen marks	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	N	Others	
309	HX18	0.21	23.31	13.58	0.61	1.37	0.010	0.012	0.021	Vacuum-melt	
	HXV2	0.012	23.05	12.86	0.55	1.56	0.014	0.016	0.009		
	HX31	0.16	23.83	13.78	0.55	1.48	0.016	0.015	0.028		
	HX10	0.12	23.50	13.50	1.40	1.46	0.014	0.015	0.024		
	HX11	0.14	23.58	13.50	2.22	1.46	0.016	0.014	0.034		
	HX12	0.11	23.53	12.06	0.64	1.47	0.017	0.015	0.039		
	HX43	0.15	23.07	15.02	0.51	1.55	0.015	0.011	0.038		
	HX16	0.23	23.73	13.58	0.61	1.37	0.010	0.012	0.021		B 0.001
	HX17	0.26	23.31	13.58	0.61	1.37	0.010	0.012	0.025		B 0.01
310	KX31	0.20	25.53	20.66	0.66	1.61	0.014	0.018	0.031	Vacuum-melt Vacuum-melt	
	KXV1	0.21	25.83	20.39	0.51	1.59	0.015	0.017	0.065		
	KXV2	0.014	25.17	20.69	0.56	1.58	0.012	0.022	0.009		
	KX22	0.10	25.24	20.73	0.82	1.65	0.014	0.015	0.019		
	KX11	0.10	26.08	20.72	1.47	1.73	0.017	0.017	0.016		
	KX12	0.13	26.08	20.72	2.69	1.73	0.017	0.017	0.016		
	KX33	0.12	25.53	20.66	0.66	1.61	0.014	0.018	0.028		
	KX23	0.07	25.72	20.47	0.69	1.71	0.013	0.012	0.017		
	KX 8	0.06	25.97	20.52	0.50	1.50	0.013	0.015	0.034		Nb 1.47
	KX18	0.18	25.60	20.80	0.85	1.66	0.016	0.020	0.020		
	KX10	0.22	24.84	19.98	0.89	1.50	0.014	0.014	0.019		Nb 1.59
	KX46	0.16	25.50	20.36	0.71	1.71	0.011	0.011	0.025		
	KX44	0.16	25.55	20.74	0.66	1.71	0.006	0.009	0.029		Al 0.38
	KX45	0.16	25.02	20.10	0.87	1.75	0.009	0.010	0.026		Al 1.23
330	TX1	0.19	14.63	35.15	0.65	1.51	0.012	0.021	0.043	Vacuum-melt	
	TXV1	0.013	15.13	34.94	0.47	1.58	0.010	0.024	0.010		
	TX31	0.17	14.94	35.53	0.59	1.58	0.010	0.009	0.019		
	TX 4	0.16	14.87	34.82	1.74	1.48	0.011	0.010	0.020		
	TX 5	0.18	14.77	34.66	2.73	1.42	0.012	0.011	0.025		
	TX 3	0.12	24.87	34.58	0.59	1.46	0.015	0.017	0.042		

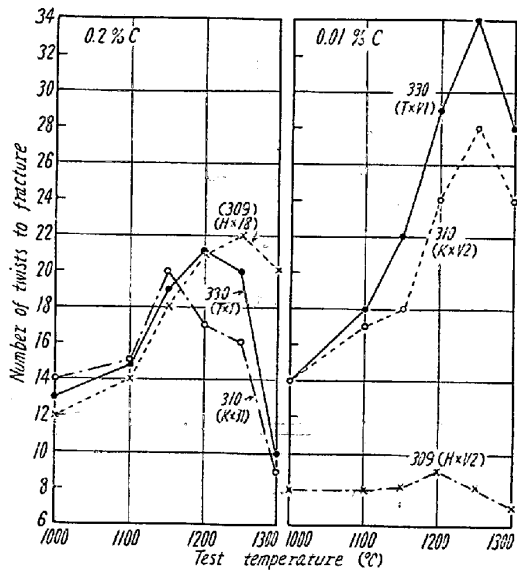


Fig. 1. Hot-twist ductility of AISI type 309, 310 and 330 steels.

部組織を示すと Photo. 1 のごとくで、試験温度 1,100 °C 以下では貫粒破壊であるが、1,200°C 以上で粒界破壊を示している。このように試験温度の上昇とともに貫粒破壊から粒界破壊に移るのは粒界の C あるいは不純物などの濃化による粒界脆弱化のためと考えられる。

このような粒界破断型を示すとき高い加熱温度においては雰囲気による粒界酸化あるいは硫化を受け、一層変形能を低下させられると思われるので異常な高温加熱はさげなければならないことが知られる。

0.01% C の結果を 0.20% C と比較すると、C の影響が極めて顕著である。低 C の 309 型においてはいちじるしく捻回値が低く、これに対し 330, 310 型においては逆に捻回値がかなり向上していることが知られる。また 309 型は温度による捻回値の変化が認められないのに

対し 330, 310 型は試験温度に対し山型の捻回値を示す。この捻回値のいちじるしい差異は 309 型は全温度範囲にわたって相当量のフェライトを含有するのに対し 310, 330 型ではいずれの温度においても完全オーステナイト組織であるためによるものと考えられる。

Ti, Nb, Mo などのフェライト生成元素を含む 18-8 鋼は高温においてフェライトを生じ、これが変形能をいちじるしく害することは BLOOM らりをはじめ多くの研究者により報告されている

また 330, 310 型は 1,300°C においても捻回値の低下が少ないことは後述するごとく低 C のため粒界の融点の低下が少ないためと考えられる。かつ最高捻回値を示す温度が 1,250°C にあり、高 C の鋼種より高い温度を示すことが注目される。

(1) 合金元素の影響

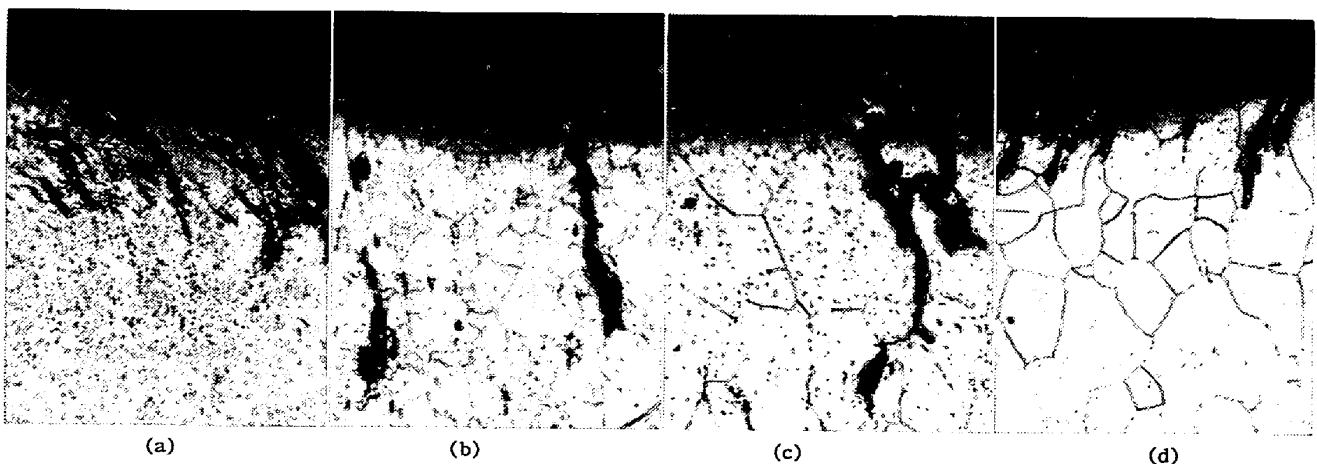
309, 310 および 330 各系鋼種につき合金元素の影響を調査した。

a) C

309, 310 型の大気溶解せる代表的鋼種について実験した結果 C の影響は両鋼種間ではかなりの差異のあることが知られたのでこの点をなお明らかにするためにさらに C% のことなる多数の鋼種について実験を行なった。その結果を Fig. 2 (309) および Fig. 3 (310) に示す。

この結果から (1) オーステナイトの不安定な 309 型においては各温度とも C 約 0.2% までは C 量とともに捻回値が向上しその後は低下すること、(2) オーステナイトの安定な 310 型においては、C 量とともに低下の傾向を示すこと、(3) これらの C 量による低下は高温になるほどいちじるしいことが知られる。

309 系においては C 0.1% 以下では高温でフェライトを含む二相組織であるが、C の増加とともにフェライト



Tested at (a) 1,000°C, (b) 1,100°C, (c) 1,200°C and (d) 1,300°C.

Etched with electrolytically 10% oxalic acid solution. x100 (1/3)

Photo. 1. Microstructures of fractured hot-twist specimen of type 330 steel (KX 31).

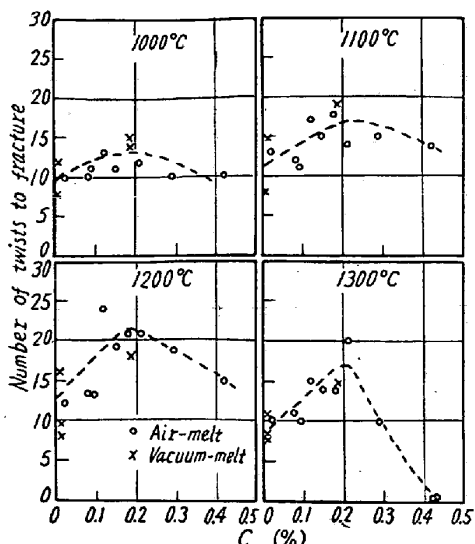


Fig. 2. Effect of C content on hot-twist ductility of AISI type 309 steels.

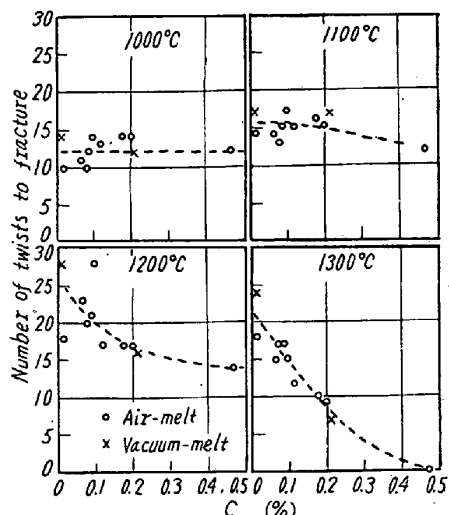


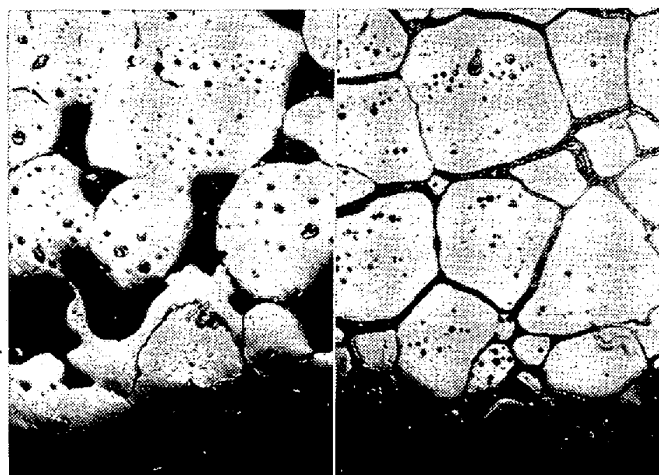
Fig. 3. Effect of C content on hot-ductility of AISI type 310 steels.

量を減ずるため、高温変形能が改善される。

完全オーステナイト鋼の 310 系または C 0.2% 以上の高 C 309 系においては C 量とともに高温捻回値が低下し、この傾向は高温になるほどいちじるしいが、これは C の増加とともに融点が低下するため高 C ほど粒界の液化に近づくためと考えられる。Photo. 2(a) は C 0.47% を含む 310 型の 1,300°C の捻回試験片の組織であるが、粒界が融解し始めていることを示している。

b) Si

Fig. 4 に 309, 310 および 330 型に対する Si 量の影響を示した。1,100°C 以下では Si はほとんど影響しないが、高温ではいちじるしく捻回値を低下させる。これは Si による融点の低下のためと考えられ、Ni の多いほど顕著に現われる。Photo. 2(b) は Si 2.7% を含



(a) Type 310 containing 0.47% C
(b) Type 330 containing 2.7% Si (TX5)

Etched electrolytically with 10% oxalic acid solution $\times 100(2/3)$

Photo. 2. Microstructures of fractured hot-twist specimen tested at 1,300°C.

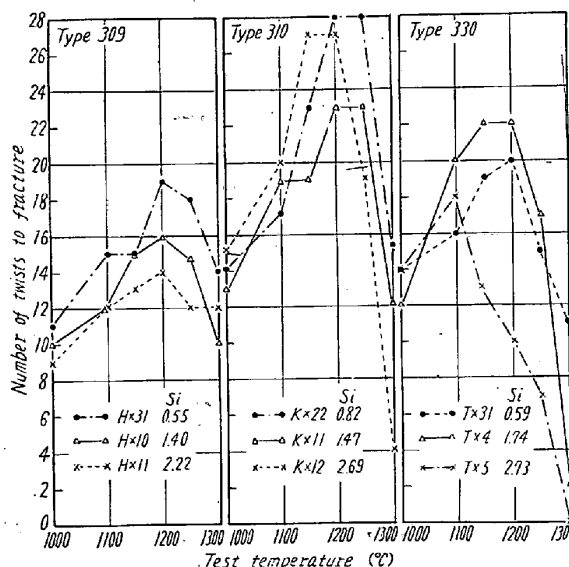


Fig. 4. Effect of Si content on hot-ductility of AISI type 309, 310 and 330 steels.

む 330 型の 1,300°C 捻回試験片の組織で粒界液化が明らかに認められる。

c) N

309 および 310 型に対する N 添加の影響を調査した結果 N の捻回値におよぼす影響は比較的少ないが、0.2% 程度添加するとやや捻回値を低下させる。

d) Ni

Fig. 5 は Cr 25% における Ni の影響を示すもので低 Ni 鋼は二相組織のため、捻回値が低くまた試験温度によりほとんど変化しない。Ni を 15% に上げて完全オーステナイト組織にするといちじるしく変形能が改善されるが、さらに Ni 量が増加するとかえつて 1,200°C 前後の捻回値は劣化すると傾向がみられる。

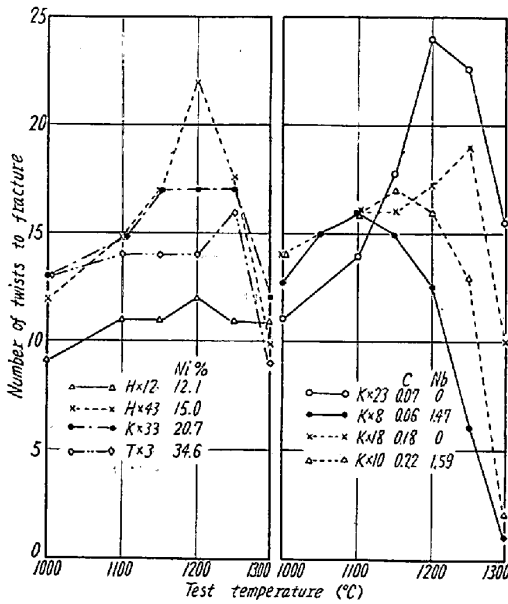


Fig. 5 Fig. 6.

Fig. 5. Effect of Ni content on hot-twist ductility of austenitic steels containing 25% Cr.

Fig. 6. Effect of Nb addition on hot-twist ductility of AISI Type 310 steel.

e) Cr

35% Ni 鋼における 15~25% の範囲の Cr の影響を調べた結果、Cr が高くなるほど 1,200°C 前後において若干捻回値が低くなる傾向が認められる。

f) Nb

低Cおよび高C 310 型における 1.5% Nb 添加の影響を Fig. 6 に示した。いずれも低温側では Nb は捻回値に影響しないが、高温になると急激に捻回値を低下せしめ、1,300°C ではほとんど変形能がない。

Nb の影響は低C鋼においていちじるしく現われまた

Nb の添加により最高の捻回値を示す温度が低温側にずれてくることが認められる。これは Nb 添加鋼は高温で粒界初期溶解を生ずることによるものであることが顕微鏡的に認められる。

(3) 溶解条件の影響

溶解条件の高温変形能におよぼす影響を知るために真空溶解と大気溶解の比較ならびに脱酸剤添加の影響を調べた。Table 2 に 309, 310 および 330 型の真空溶解材と大気溶解材の比較結果を示す。真空溶解による高温変形能の改善は低 C 310 鋼の 1,200°C 以上の試験において見られるのみであるが、これは前出 Fig. 3 から C% の差によるものと考えられる。まったく同一の化学成分の試料を二種の溶解法によつて得ることができなかつたため純粋に溶解法の比較を行うことは困難であるが、これらの結果から溶解法の影響に有意差を見出すことはできない。

18 Cr-10 Ni 鋼の高温変形能は O₂ 量の高くなるにしたがい、悪くなるといわれているが²⁾、本実験に用いた試料の程度の O₂ 量の差異は高温変形能には明瞭な影響を与えるものではないと考えられる。

つぎに脱酸剤として Al および B 添加の影響を調べた。Fig. 7 にその結果例を示す。これらは同一溶鋼に Al または Fe-B (20%B) を順次添加し、分割注型を行なつた試料について比較を行なつたものである。

この結果から Al は少量では脱酸効果のため捻回値を向上させるが多量に添加すればかえつて有害であること、B はほとんど捻回値に好影響をあたえずかえつて 0.01% 添加せるものでは 1,300°C 付近の捻回値を急減させることがうかがわれる。

本実験結果は Al については 18-8 鋼に対する森島³⁾

Table 2. Influence of melting process on hot ductility of high Cr-high Ni steels.

AISI type No.	C grade	Melting process	O ₂ %	C%	N%	Number of twists to fracture tested at					
						1,000°C	1,100°C	1,150°C	1,200°C	1,250°C	1,300°C
309	High-C	Air-Melt Vacuum	0.013	0.21	0.021	12	14	18	21	22	20
			0.007	0.19	0.065	14	19	21	18		15
309	Low-C	Air-Melt Vacuum	0.010	0.034	0.027	10	13	12	12		10
			0.012	0.012	0.009	8	8	8	9	8	8
310	High-C	Air-Melt Vacuum	0.012	0.20	0.031	14	15	20	17	16	9
			0.005	0.21	0.065	12	17	18	17	16	7
310	Low-C	Air-Melt Vacuum	0.012	0.025	0.044	10	14	16	18	20	18
			0.013	0.014	0.009	14	17	18	24	28	24
330	High-C	Air-Melt Vacuum	0.012	0.19	0.043	13	15	19	21	20	10
			0.008	0.23	0.027	11	16	20	21	19	8

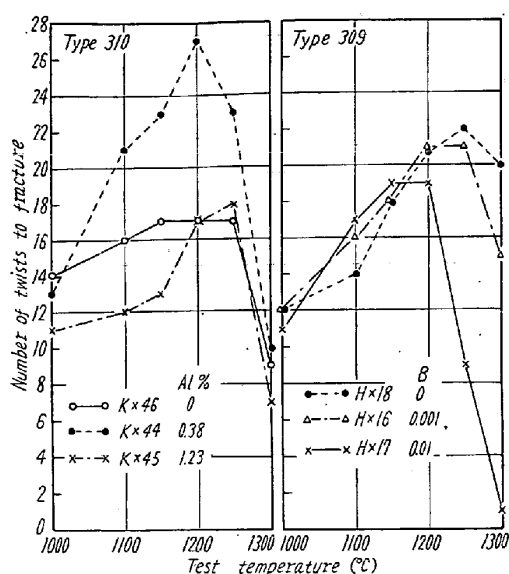


Fig. 7. Effect of Al and B addition on hot-twist ductility of AISI type 310 or 309 steels.

の結果とよく一致を示すが、Bについては 18-8 鋼および 310 鋼に対する LOVELESS ら⁵⁾の捻回値改善効果とは一致しない。この原因は明らかでないが、Bの添加原料、添加時期および方法などに基因するものと推定せられる。多量のBが 1,300°C 附近の高温の変形能を阻害することは LOVELESS ら⁵⁾も 0.01% を超えると共晶を生ずることを認めているが、本実験においても B 0.01% 添加せる 310 鋼の 1,300°C 捻回試験の組織では粒界が太くなり、粒界液化に近いことが知られる。

以上のごとき溶解条件の影響については溶解作業上の種々の要因が影響すると思われるので今回得られた傾向を決定づけるためにはさらに多数の試料により統計的に実験を行うべきであると考え、これについては別の機会に譲りたい。

(4) 前処理条件の影響

オーステナイト結晶粒度が高温変形能におよぼす影響を知るために完全オーステナイト 310 系の高Cおよび低C鋼を用い、熱処理温度を 1,300°C までいろいろに変え 1 h 加熱水冷後 1,000~1,300°C の高温捻回試験を行なった。その結果を熱処理温度による結晶粒度の変化とともに Fig. 8 に示した。この結果から低Cの 310 においては各試験温度共捻回値は熱処理温度によりほとんど変わらず、実験誤差範囲内でほとんど一定であるのに対し高C鋼は熱処理温度の上昇とともに捻回値が低下する傾向を示している。捻回試験を行なった試料の破断形式を顕微鏡的に調査した結果、高C 310 の 1,100°C 水冷材は 1,100°C 捻回では貫粒破壊、1,300°C では粒界破壊を示

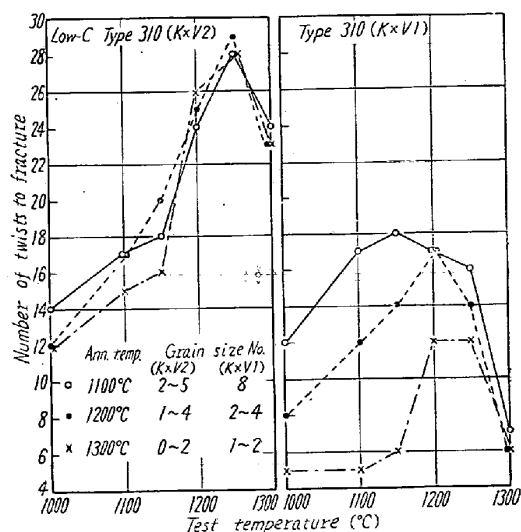


Fig. 8. Effect of annealing temperature on hot-twist ductility of AISI type 310 steels.

しているのに対し、1,300°C 水冷材では試験温度 1,100, 1,300°C いずれも粒界破壊を示している。すなわち 1,300°C 水冷により貫粒破壊から粒界破壊に移行することが認められる。これに対し低C鋼においては 1,100°C 捻回試験ではいずれも貫粒破壊、1,300°C 試験ではいずれも粒界破壊を示している。

以上のことからCの極めて低いものにおいては熱処理温度の上昇に伴う結晶粒粗大化は変形能に対しては影響をおよぼさないことが知られる。これに対し高C鋼においては結晶粒度が変形能に影響すると考えるよりは熱処理温度の上昇に伴ない球状炭化物がオーステナイト中に固溶し、さらに温度上昇とともに粒界の固溶C量が増加するため漸次粒界破壊に移行する結果、変形能が低下すると考えられる。なお 330 系についてもこれと同様の結果が得られた。

IV. 結 言

耐熱オーステナイトステンレス鋼の高温変形能におよぼす合金元素、溶解条件、結晶粒度などの影響につき実験を行なった結果を総括するとつぎのごとくなる。

① 完全オーステナイト組織を呈するものは試験温度に対し山型の捻回値を示し一般に最高捻回値を示す温度より低温においては貫粒破壊、高温においては粒界破壊を示す。

二相組織を示すものは捻回値が低く、試験温度によりほとんど捻回値が変わらない。

② C 約 0.20% を含む 309, 310, 330 型標準鋼は 1,150°C までにはほとんど変形能に差異がないが、これよ

り高温では 309 が最もすぐれている。しかし C 0.01% 程度では逆に Ni の低いほど高温の検回値が劣っている。

③ 309 型においては C 約 0.2% までは C 量とともに検回値が増加しその後低下するが、310 型においては C 量とともに検回値が低下する。これらの傾向は高温になるほどいちじるしい。また C が低いものは最高検回値を示す温度が高い。

④ Si の添加は低温では影響が認められないが、高温では各鋼種とも検回値を低下する。

N を 0.2% 程度添加するとやや検回値が低下する。

Ni の増加は二相組織の場合は検回値を改善させるが、完全オーステナイトでは 1,200°C 前後の変形能を低下させる傾向が認められる。

Cr は 1,200°C 前後の検回値を低下させる。

Nb は高温の検回値を急減させる。また Nb の添加により最高検回値を示す温度が低温にずれる。

⑤ 真空溶解材と大気溶解材の比較では、成分の影響が強く現われ、決定的な差異は認められない。

Al の添加は少量では検回値を向上させるが、多量で

はかえつて低下させ、また B は検回値を向上させず、かえつて 0.01% 添加でも高温側の検回値が急減する。

⑥ 熱処理温度を高め、結晶粒度を大きくさせても低 C 鋼では検回値曲線に変化が認められないが、高 C 鋼では粒界の C 固溶量の増加の結果、低温側でも粒界破壊となるため、変形能が低下することが知られる。この結果結晶粒度そのものは検回値に影響しないことが結論される。
(昭和 36 年 4 月寄稿)

文 献

- 1) F. BLOOM, W. CLARK JR, P. JENNINGS: Metal Progress, 9 (1951), Feb. 250
- 2) 森島: 鉄と鋼, 44 (1958), 660
- 3) R. PERKINS, W. BINDER: J. Metals, 9 (1957) 239
- 4) C. POST, D. SCHOFFSTALL, H. BEAVER: J. Metals, 3 (1951), 973
- 5) D. LAVELESS, F. BLOOM: Iron Age, 179 (1957) June, 20. 95
- 6) 加藤, 金井, 阿部: 鉄と鋼, 46 (1959) 10, 1268
- 7) C. CLARK, J. RUSSELL: Metals Technology, 12 (1945), Dec, 1839
- 8) 森島: 鉄と鋼, 42 (1956) 9, 928

30Ni-20Cr 系ステンレス鋼の機械的性質と耐食性におよぼす Mo, Si, Cu 単独添加の影響*

(30Ni-20Cr 系ステンレス鋼に関する研究—I)

井 上 繁 弘**

Effect of Mo, Si and Cu Additions, Respectively, on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of 30Ni-20Cr Stainless Steel.

(Studies on 30Ni-20Cr stainless steels—I)

Shigehiro INOUE

Synopsis:

Changes of mechanical properties and corrosion loss were observed with specimens of 30Ni-20Cr stainless steels by varying Mo, Si and Cu contents, respectively.

The following results were obtained:

(1) The higher the Mo content, the higher the tensile strength, the yield strength and the elastic limit of forged specimens. But the maximum tensile strength of cast specimens was obtained by addition of 8.8% Mo.

(2) The minimum corrosion loss in a boiling solution of 5 wt. % H₂SO₄ and HCl was obtained by addition of 3~4% Mo, also the minimum grain-boundary corrosion loss was obtained by addition of 3~7% Mo.

(3) Effect of Si and Cu contents on mechanical properties and corrosion loss was less than that of Mo.

** 昭和 36 年 4 月本会講演大会にて発表 ** 太平金属工業株式会社