

高 Cr フェライト鋼の高温変形能*

塚本富士夫**・鈴木 隆志**

Hot-Twist Ductility of High-C Ferritic Steels.

Fuji TSUKAMOTO and Takashi SUZUKI

Synopsis:

The hot-twist ductility of AISI Type 446 and some other high-Cr ferritic steels, especially effects of metallurgical factors such as alloying elements, microstructure and grain size were investigated by hot-twist test rotated at 200 r.p.m at a temperature ranging from 800 to 1250°C.

The hot-twist ductility of high-Cr steels was much influenced by its microstructure.

Some steels which had a single ferritic structure at these testing temperatures showed higher twist value and a convex type twist curve against the testing temperatures, while other steels which transformed at a testing temperature showed a lower twist value and had a concave-type twist curve. The temperature at which the specimen showed the minimum twist value nearly corresponded to the transformation temperature.

As to the influence of the alloying elements in 25% Cr steels, C and N were the most detrimental ones which lowered these twist values. Addition of C+N up to about 0.2% greatly reduced a hot-twist ductility and about 0.2% of C+N was the inflection point of curve figure. Addition of Si, Ni, and Cr reduced a hot-twist value although Ni improved hot-twist value above 1200°C.

The difference of hot-twist value could not be recognized between air- and vacuum-melted specimens which had similar chemical compositions.

Grain-coarsening owing to the elevation of annealing temperature lowered hot-twist ductility, especially when single-phase specimens were annealed at a temperature higher than the temperature of maximum ductility. In the latter case intercrystalline fracture occurred at every test temperature and consequently twist values were much reduced.

I. 緒 言

フェライト系高 Cr 鋼は一般にオーステナイト系ステンレス鋼に比し変形抵抗が低く、熱間加工が容易なため、この熱間加工性に関する研究はきわめて少ない。しかし実際の熱間加工作業においては、変形抵抗が低いにもかかわらずいちじるしい割れ疵の発生する例を経験しており、特に激しい加工を受ける Stiefel Mannesmann 穿孔機による穿孔作業にこの現象がいちじるしい。これは加工温度における変形能に基因するものと考えられる。

一般に金属の組織が加工温度において二相組織を呈する場合、変形能が低下することは古くから知られているが、AISI 446 型のフェライト系高 Cr 鋼においては化学成分配合によつて高温において二相組織となるものが大半であるのでこれが変形能を低下させるものと推定される。

本研究は以上の見地からフェライト系ステンレス鋼の高温変形能について冶金学的に重要な化学成分、組織および結晶粒度などの影響を調査したものである。

II. 試料および実験方法

実験に供した試料は C 0.07, Cr 25.5, Si 0.5, Mn 0.7, N 0.20% を標準成分とする AISI 446 型高 Cr-N 鋼でこの基準組成に対し C, N, Si, Cr などの主要成分を変化させ、また特に Ni, Al などの添加を行なつたものももちいた。大気溶解は 200kg 型塩基性高周波誘導炉をもちい、目的元素の含有量を変化させる方法としては溶解条件、目的元素以外の他成分、O₂ 量などの変動を成可く少なくするために 1 チャージの溶解で目的元素のみを順次高めつつ 75~100kg 鋼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。また真空溶解は 100kg 高周波誘導真空溶解炉をもちいて 1 チャージ 1 本の溶解を行なつた。鋼塊はすべて熱間鍛造および圧延により径 16mm 丸棒とし、750°C 1h 水冷の焼鈍を施し実験に供したが、Ni 2.65 および

* 昭和 36 年 4 月本会講演大会にて発表

** 日本金属工業株式会社

Table 1. Chemical composition of specimens subjected to hot-twist test.

Specimen marks	Chemical composition (%)						Transformation temperature of α to $\alpha+\gamma$ ($^{\circ}\text{C}$)*	Melting process
	C	Cr	Ni	Si	N	Al		
R X 31	0.08	25.62	0.23	0.45	0.18		1150	Air-melt
17	0.08	25.60	0.15	0.47	0.20		1150	
2	0.025	27.61	0.16	0.70	0.21		1200	
33	0.16	25.02	0.44	0.45	0.22		1100	
34	0.22	24.62	0.50	0.45	0.22		1100	
5	0.07	25.51	0.16	0.37	0.054		1200	
6	0.06	25.50	0.16	0.51	0.38		1150	
8	0.07	25.72	0.15	1.53	0.21		1200	
10	0.07	25.72	0.15	2.50	0.21		1250	
7	0.07	25.51	0.16	1.34	0.054		(a)	
9	0.07	25.51	0.16	1.34	0.042	1.29	(a)	
41	0.06	26.15	1.14	0.64	0.19		1150	
42	0.06	25.40	2.65	0.62	0.20		(b)	
13	0.06	25.99	4.10	0.63	0.19		(b)	
V 1	0.06	25.80	0.19	0.44	0.26		1150	
V 2	0.022	25.44	0.19	0.44	0.24		1100	
V 3	0.012	25.11	0.20	0.39	0.008		(a)	
V 5	0.06	25.60	0.20	0.40	0.046		1200	
V 7	0.011	25.69	tr.	0.52	0.022		(a)	
V 16	0.014	29.69	0.17	0.49	0.009		(a)	
V 17	0.015	34.41	0.19	0.45	0.010		(a)	

* a) Ferritic structure at all temperatures, b) Duplex structure at all temperatures.

4.10% を含む高 Ni 鋼は 1100 $^{\circ}\text{C}$ 1h 水冷の焼鈍を行なった。

試料の分析成分を Table 1 に示す。

高温変形能の測定には従来もつともすぐれていると認められている高温捻回試験²⁾³⁾によつた。捻回試験の大意は所定の温度に加熱した丸棒試料の一端に捻り回転をあたえて切断するまでの捻回数を求め、これの大小をもつてその材料の高温における変形能を評価するものである。

本研究に使用した高温捻回試験機は 10kg-m の容量のもので平行部径 8mm, 長さ 40mm の試験片を 800~1250 $^{\circ}\text{C}$ の範囲の所定温度に 20mn 均熱後、廻転速度 200 r.p.m で試験を行なった。廻転速度を 200 r.p.m としたのは他の研究者⁴⁾⁵⁾の結果と比較するため同一条件で行なったものである。

捻回試験においては、捻りモーメントおよび破断迄の捻りエネルギーは実際の鍛造性を示唆しない⁶⁾とされているので、破断迄の捻回値の測定のみを行ない、変形抵抗は測定しなかつた。試験機の再現性および精度を知るため RX-33 および RX-5 の 2 試料について 1150 $^{\circ}\text{C}$ のねじり試験をおのおの 10

回繰返し試験を行ない、捻回数の標準偏差を求めた。その結果 RX-33 においては $\bar{x}=16.7$, $s=1.33$ (8.0%), また RX-5 においては $\bar{x}=404.1$, $s=36.4$ (9.0%) という結果が得られた。すなわち標準偏差は捻回数的大小にかかわらず平均値の 10% 以内であり、この程度の精度であれば変形能の比較検討に十分たえるものと思われる。捻回試験後の外観写真を標準 446 (RX-31) および変形能の大きい低 C, 低 N 鋼 (RX-V7) について例示すると Photo. 1 のごとくである。捻回値が 100 回をこえるようなものは表面に多数の不規則な突起を生じ、ね

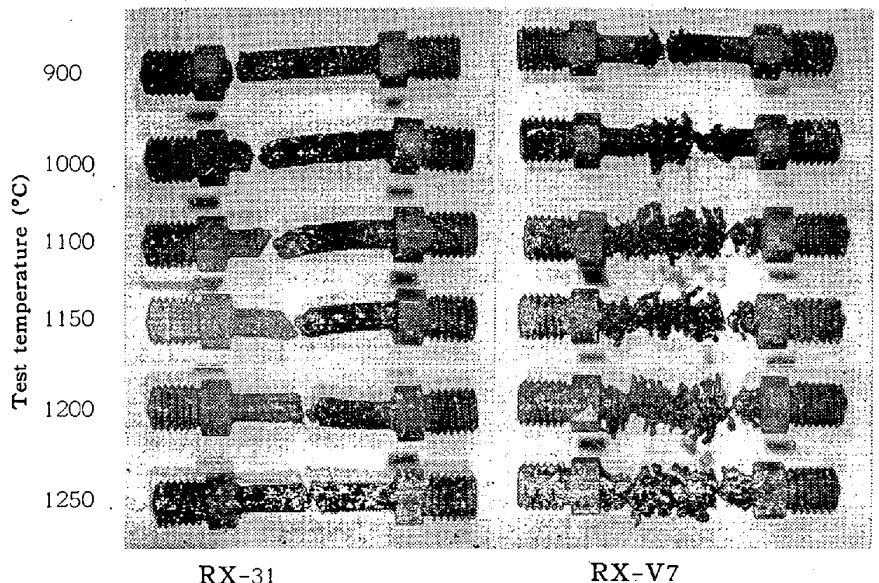


Photo. 1. Appearance of specimens after hot-twist test.

じり部は次第に細くなり容易に破断しない。

III. 実験結果および考察

1) 合金元素の影響

a) C, N Fig. 1 に大気溶解材のN約0.2%におけるC量の影響およびC約0.07%におけるN量の影響を示す。これから試験温度に対し山型の検回値を示すものと、谷型の検回値を示すものの2種類に分類される。前者は一般に検回値が高く Table 1 から知られるようにおおむね全温度に亘りフェライト組織を示すものであり、後者は一般に検回値が低く、 $\alpha/\alpha+\gamma$ 変態を有するものである。前者において最高検回値を示す温度より低い温度においては貫粒破壊であり、高い温度では粒界破壊を示すことは Photo. 2 よりあきらかで CLARK および Russ⁴⁾ の炭素鋼に対する実験結果と良い一致を示している。またこの最高検回値を示す温度はC, Nの低い

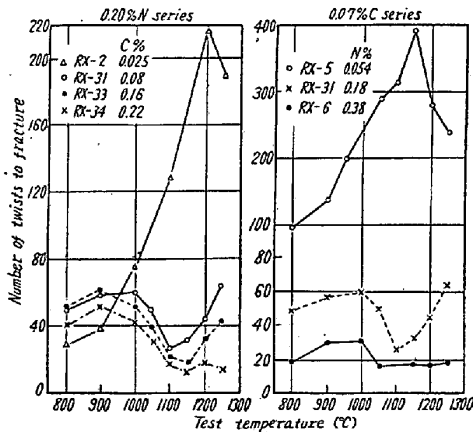
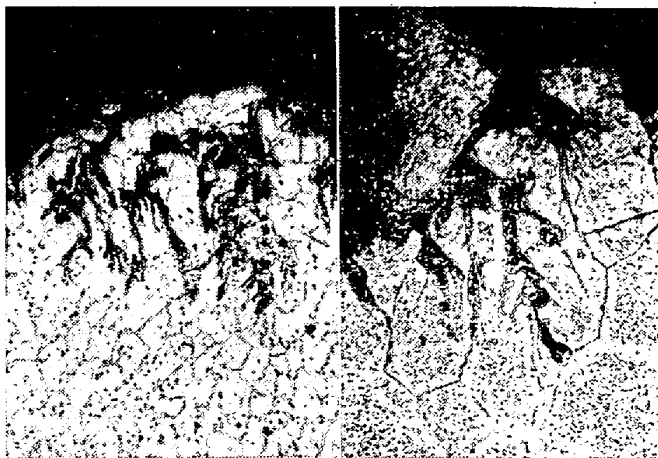


Fig. 1. Effect of C and N content on hot-twist ductility of AISI Type 446 steels.



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

Photo. 2. Fractured RXV5 hot-twist specimens tested at (a) 1000°C and (b) 1200°C.

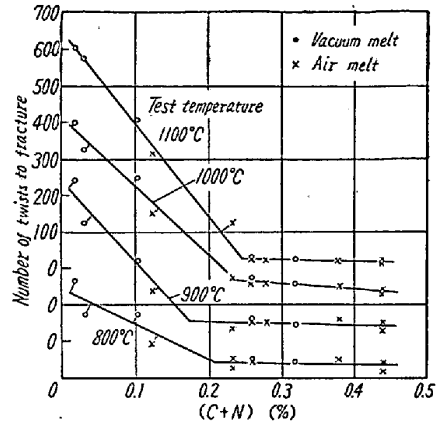


Fig. 2. Effect of (C+N) content on hot-twist ductility of 25% Cr steel.

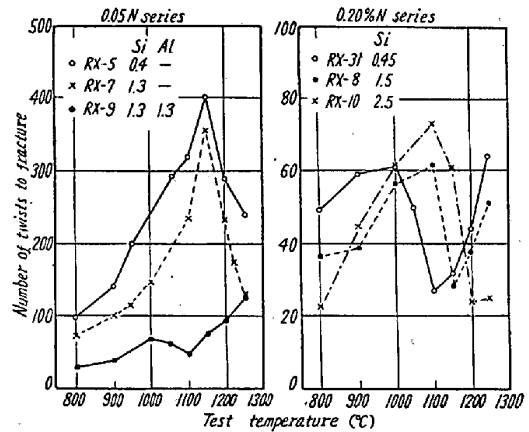


Fig. 3. Effect of Si and Al content on hot-twist ductility of 25% Cr steel containing low and high N.

ものほど高くなる傾向が認められる。谷型の検回値曲線を示すものは Table 1 より知られる如く最低検回値を示す温度はほぼ変態温度に相当する。また Fig. 1 より一般にC量の増加とともに検回値が低下し、この傾向は試験温度が高いほどいちじるしい。

Nも同様いずれの温度においても検回値を低下させる。これは CONTRACTOR および MORGAN⁵⁾の結果と同様である。これらの結果を C+N の影響として各試験温度別に整理すると Fig. 2 のごとくで、いずれの温度においても C+N の増加により急激に変形能が低下することがあきらかである。C+Nの影響は少量の場合にいちじるしいが、これが約0.2%以上になると低下が少なくなることが認められる。なおこの結果からは大気溶解材と真空溶解材との差は認められない。

b) Si, Al (Fig. 3) 低Nの完全フェライト組織を示す場合には Siは 検回値を低下せしめるがN約0.2%を含む 446 型钢においては Si 量の増加とともに最大値および最小値を示す温度は高温に移動する。このため

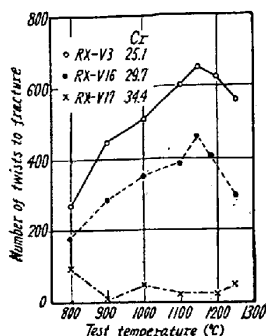


Fig. 4. Effect of Cr content on hot-twist ductility of low-C, low-N ferritic steel.

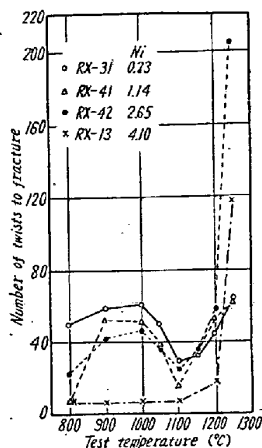


Fig. 5. Effect of Ni content on hot-twist ductility of AISI Type 446 steel.

試験温度によつて Si の影響がことなり、たとえば 1100°C では Si は捻回値を増し、逆に 1200°C 以上では低下させる。これは Si 量とともに $\alpha/\alpha+\gamma$ の変態温度が高くなるためである。(Table 1 参照) なお低 N, Si 添加鋼にさらに Al を 1.3% 添加した Sicromal 鋼 (RX-9) は完全フェライト組織であるにもかかわらずかなり捻回値が低い。

c) Cr 低 C, N の 25~35% Cr の捻回値の比較は Fig. 4 に示した通りで、Cr は変形能を害しとくに Cr 35% では 1250°C 以下ではきわめて靱性に乏しい。

d) Ni Ni の影響は Fig. 5 に示すごとくで 446 型鋼に対し Ni は少量ではわずかに捻回値をさげるが Ni 4.1% ではいちじるしく捻回値を害する。ただし 1200°C 以上では Ni 2.65% の添加により捻回値が急増する。

2) 前処理温度の影響

以上の実験結果は高 Ni 鋼をのぞき 750°C × 1h 水冷の焼鈍試料について捻回試験を行なつた結果であるが高温変形能は加工履歴、前処理温度、結晶粒度などによつても影響をうけることは当然予想せられる。高 Cr フェライト鋼は高温加熱により結晶粒の粗大化がいちじるしくこれが冷間加工性を害することはよく知られている。このような結晶粒の大きさが高温変形能に如何なる影響をおよぼすかを知るため標準 446 型の RX-V1 および低 N の RX-V5 の両試料について焼鈍温度を 750~1300°C の範囲に種々変化せしめ、1h 保持水冷のあと高温捻回試験を行なつた。RX-V1 は高温で二相組織となるもので $\alpha/\alpha+\gamma$ 変態点は 1100~1150°C にある。これに対し RX-V5 はほとんど γ 相の析出をみない完全

フェライト組織に近い成分である。

実験結果は Fig. 6 に示すごとくで RX-V1 は試験温度に対し谷型、RX-V5 は高温焼鈍材をのぞき山型の捻回値曲線を示している。両試料とも焼鈍温度の上昇、したがつて結晶粒度の粗大化とともに高温捻回値が低下するが、その傾向は準完全フェライト鋼の RX-V5 の方がいちじるしい。しかし RX-V1 においては焼鈍温度 750~1000°C 間、また RX-V5 においては 750~1100°C 間ではほとんど捻回値曲線がかわらない。高温捻回値が低下しはじめる焼鈍温度、すなわち RX-V1 の 1000°C、RX-V5 の 1100°C はおおよそ 750°C 焼鈍試料において最大捻回値を示す温度で、これより低温の貫粒破壊域で焼鈍した場合には焼鈍温度あるいは結晶粒度の影響はほとんどないと考えられる。

しかし最大値を示す温度以上の粒界破壊域で焼鈍した

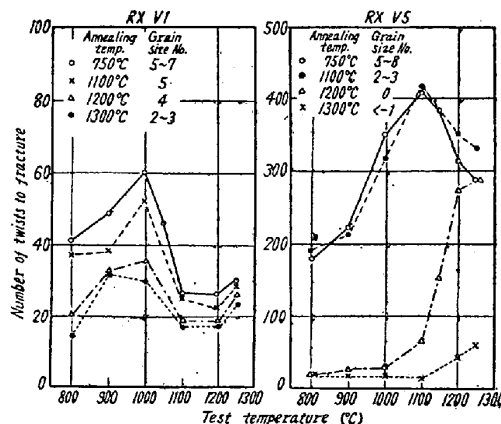


Fig. 6. Effect of annealing temperature on hot-twist ductility of AISI Type 446 (RXV1) and 25% Cr steel (RXV5).

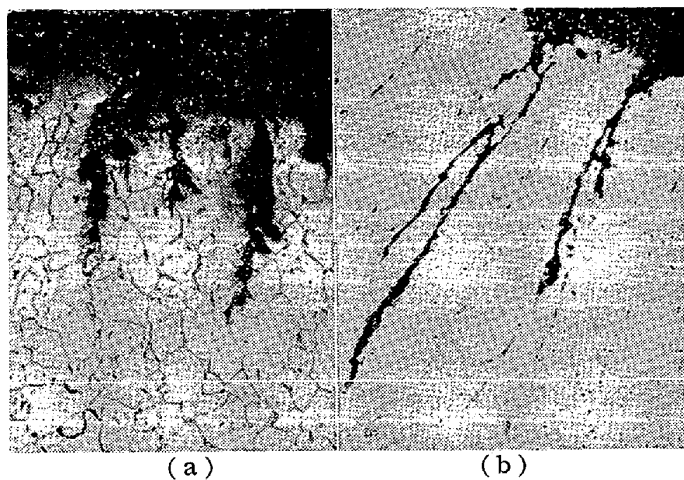


Photo. 3. Fractured RXV5 hot-twist specimens tested at 1000°C. Pretreatment; (a) 1000°C, (b) 1300°C Etched electrolytically with 10% oxalic acid solution. ×100 (2/3)

場合に見られる高温変形能の低下は焼鈍温度以上の試験温度においては見られなくなる。

Photo. 3 は 1100 および 1300°C で 1h 加熱水冷後 1100°C で捻回試験を行なった RX-V5 試料の組織を示したもので、焼鈍温度の上昇にしたがい貫粒破壊から粒界破壊に移ることをあきらかにしている。

IV. 結 言

フェライト系高 Cr 鋼の高温変形能に関し 800~1250°C の高温捻回試験 (回転速度 200 r.p.m) により化学成分、組織、結晶粒度の影響を調査した結果つぎの結論が得られた。

1. 試験温度においてフェライト一相の組織を呈するものは一般に捻回値がかなり高く、試験温度に対し山型の捻回値曲線を示す。最高捻回値を示す温度よりも低い温度においては貫粒破壊であり、高い温度においては粒界破壊を示す。

これに対し試験温度中 $\alpha/\alpha+\gamma$ 変態を示すものは一般に捻回値が低く、試験温度に対し谷型の捻回値曲線を示す。この最低捻回値を示す温度はほぼ変態温度に相当する。

2. したがってフェライト一相の鋼種においては最高捻回値以下の温度で熱間加工を行ない、二相組織を呈するものは変態点附近の温度での加工を避け、変形抵抗からみてさしつかえなければ 900~1000°C の低温をえらび、変形抵抗が重視される場合は 1200~1250°C が適当である。

3. 25% Cr 鋼の化学成分において最も捻回値を低下させるものは C と N で、とくに C+N 約 0.2% までの添加は捻回値を急減させるが、これ以上では影響が少

なくなる。C+N 約 0.2% 以下では山型の捻回値曲線を示すがこれ以上では谷型を示す。

低 N の 25% Cr 鋼に対しては Si は捻回値を低下させるが N 約 0.2% を含む 446 型鋼に対しては Si 量の増加とともに捻回値曲線が高温側に移動する。これは Si 量とともに $\alpha/\alpha+\gamma$ 変態温度が高温に移行することと対応する。

低 N 25% Cr 鋼に Si, Al を添加した Sicromal 鋼は完全フェライト組織であるが捻回値が低い。

4. 低 C, N の 25% Cr 鋼において Cr を 35% まで高めると捻回値が低下する。また 446 型鋼に対する Ni の添加は 1200°C 以下で捻回値を低下させるがこれ以上で急増させる。

・近似的化学成分を有する大気溶解材と真空溶解材では捻回値にほとんど差が認められない。

5. 焼鈍温度の上昇にともなう結晶粒度の粗大化によつて高温捻回値が低下する。二相鋼においてはその影響が少ないが山型の捻回値曲線を示すフェライト一相鋼においては最高捻回値を示す温度以上で焼鈍を行なうと、これより低い温度でも粒界破壊をおこすためいぢるしく捻回値が低下する。 (昭和 36 年 4 月寄稿)

文 献

- 1) 井上: 鉄と鋼, 41 (1955), 506, 583, 839
- 2) 森島: 鉄と鋼, 41 (1955), 1069
- 3) G. WALLQUIST, J. CARLÉN: Rev. Mét. LVI No. 6 (1959), 268
- 4) C. CLARK, J. Russ: Metals Technology 12 (1945), Dec. 1839
- 5) G. CONTRACTOR, W. MORGAN: Iron Age, Nov. 13 (1958), 142