

(討9) 大型鍛鋼軸材の熱処理

(特に高強度、高靱性の発電用タービン軸材の製造について)

(株)日本製鋼所 室蘭製作所 川 上 辰 男

1. 緒 言

鍛造打上り重量で100Tから280Tにも及ぶ自由鍛造による超大型鍛鋼品の熱処理技術は、実験室的な研究よりもむしろ現場作業の経験の積み重ねと、その解析から生み出されている。もちろん、その背景には熱処理々論があるが、大型鋼塊内部に存在する強偏析帯、質量効果、焼戻脆性及び残留応力等が重要な問題となって来る。この自由鍛造による鍛鋼品は各種重産業の主要部材をつくり出しているが、こゝでは最も製造のむづかしさを持っているものの一つである発電用のローター軸材について述べる。ローター軸材には発電機用、高圧、中圧、低圧タービン用とあるが、これら軸材は回転体であること、製造上の問題から、軸材中心部の機械的性質が重要視される。これは圧延機のロール材のように表面強度(主として硬さ)が重要視されるのに対し特異的である。

本文にとり上げた軸材例は、特に高降伏強度と高靱性を必要とされた低圧タービン用の軸材で、これは0.2%降伏強度で80Kg/mm²、かつ軸材調質時の直径が1982mmにも及ぶ肉厚中心部で破面遷移温度(FATT)が+16℃以下、常温の衝撃値で4Kg-M以上を必要とされたものである。

2. 熱処理に供した軸材の製鋼、鍛造条件

高降伏強度と高靱性を確保するのは熱処理である。しかし熱処理以前の製造過程の製鋼、鍛造において、まづ、軸材に強靱な素地を与えておいて熱処理することが必要である。

本軸材の成分には、3.5~4.0% Ni-Cr-Mo-V鋼を選定した。表に産出した成分々析結果を示す。

表 - 1. 本軸材の成分分析結果

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Al	As	Sn	Sb
Aim	.30/.27	*	.24/.21	*	<.010	3.85/3.80	1.85/1.75	*	.40/.35	.12/.08	<.010	*	*	*
Ladle	.28	.02	.22	.006	.009	3.79	1.80	.04	.37	.09	.007	.009	.007	.0015
Check	S-1	.28	.01	.21	.005	.009	3.80	1.81	.04	.37	.09	.009	.012	.009
	S-2	.27	.01	.21	.005	.008	3.80	1.80	.04	.37	.08	.007	.010	.008
	S-3	.27	.01	.21	.005	.008	3.80	1.79	.04	.37	.08	.006	.010	.008
	S-4	.27	.01	.21	.005	.008	3.80	1.79	.04	.37	.08	.005	.010	.008
	S-5	.27	.01	.21	.005	.008	3.80	1.79	.04	.37	.08	.006	.010	.008
	T	.28	.01	.21	.005	.009	3.80	1.79	.04	.37	.08	.009	.010	.008
	B	.28	.01	.21	.005	.008	3.80	1.79	.04	.36	.08	.008	.010	.007
	T.T	.28	.01	.21	.005	.008	3.80	1.82	.04	.38	.08	.005	.008	.007
	C-1	.32	.01	.22	.006	.010	3.80	1.87	.04	.41	.10	.008	.011	.009
	C-2	.29	.01	.21	.005	.008	3.74	1.79	.04	.36	.08	.007	.010	.007
	C-3	.28	.01	.22	.006	.010	3.80	1.81	.04	.38	.09	.007	.011	.008
	C-4	.25	.01	.20	.005	.007	3.74	1.73	.04	.33	.07	.007	.010	.007
	B.B	.29	.01	.21	.005	.009	3.86	1.81	.04	.37	.08	.006	.010	.007

* As low as possible.

この成分を選定した理由は、現在低圧タービン軸(および一部の発電機軸)に、この材質が世界的にほとんど共通して用いられており、したがって製造実績の多いことである。この材質の特徴は、高強度高靱性が得やすいことと、焼入性のよいことである。反面、焼戻脆化の感受性の高いことと、粗粒化しやすいと云う欠点がある。焼戻脆化の感受性の高いことは、単に成分のみによって決定されるものでなく、むしろ熱処理技術で解決すべきであるが、化学成分の影響も無視出来ないのは事実である。

焼戻脆化に影響を及ぼす化学成分のうち残留元素、とくにP、Sn、Siの影響は最も重要な意味をもっている。図-1は残留元素P、Sn、As、Sbが脆化に及ぼす程度を示す。図-2はP+Snの量が脆化に及ぼす程度を示すもので、供試材は軸材中心部より採取せるものである。図-3はSiが脆化に及ぼす程度を示すもので、図-2同様供試材は軸材中心部より採取したものである。なお、図中の $\Delta FATT$ とは供試材を595℃からステップクールした後のFATT値と、595℃から水冷した後のFATT値の差を示す。図-4はSi+P+Snの量が結晶粒度に及ぼす程度を示す。

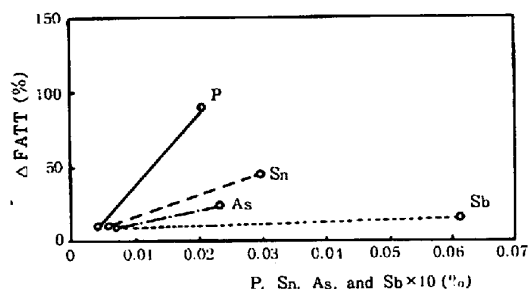


図-1. 残留元素の脆化に及ぼす影響

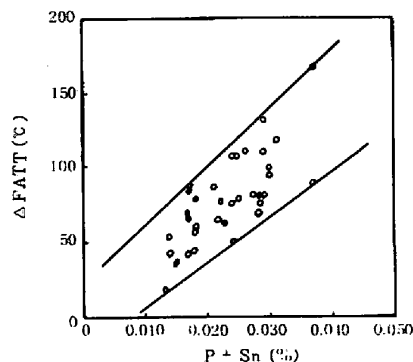


図-2. 残留元素(P+Sn)の脆化に及ぼす影響

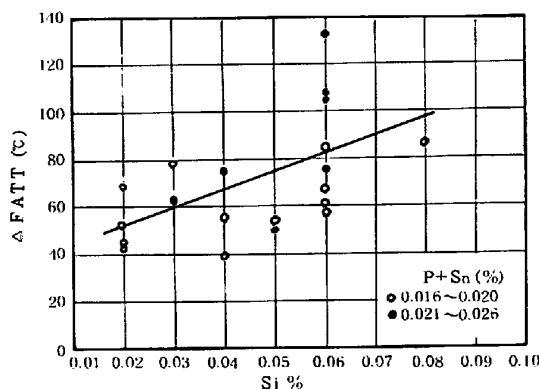


図-3. Siの脆化に及ぼす影響

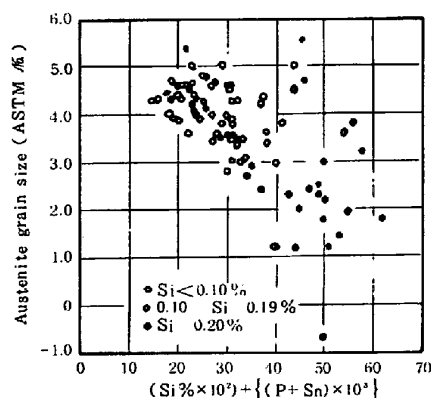


図-4. 残留元素の結晶粒度に及ぼす影響

脆化に影響を及ぼす各元素の量を調整し、その影響を防ぐのが最善の方法であるが、これらの因子は一次相関では表現出来ないもので、その説明は今後の問題である。

又、熱処理後の結晶粒度は、鍛造過程で形成された再結晶の特徴を何らかの形で受けついでいる訳であるから、鍛造時の再結晶及び粒成長を抑止することが必要である。結晶粒度が機械的性質に重要な影響を与えるので、このことも重要な意味を持っている。

3. 熱 処 理

熱処理は鍛造肌の状態で行われる焼鈍と、機削肌で行われる調質(焼入戻)から成り立っている。図-5は、本軸材の調質形状を示し、図-6は本材質の一般的な熱処理線図を示す。

焼鈍は調質を効果あらしめるための予備処理で、線図に示すごとく結晶粒の微細化を図るため、二重焼ならしと焼戻の方法で行う。

焼入は本鋼種の場合、840℃から強烈なスプレークエンチを行い、中心部の冷却を速くするよう表面温度を100℃以下に保つことが必要である。

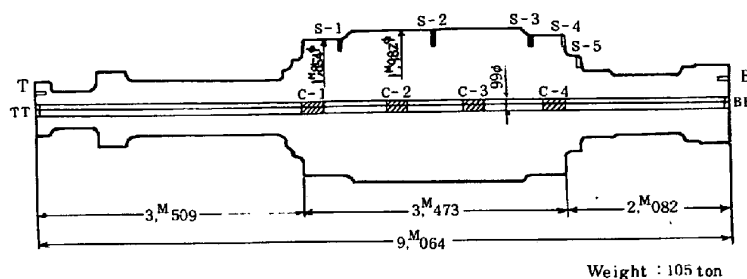


図 - 5. 本軸材の調質形状と試験片採取位置

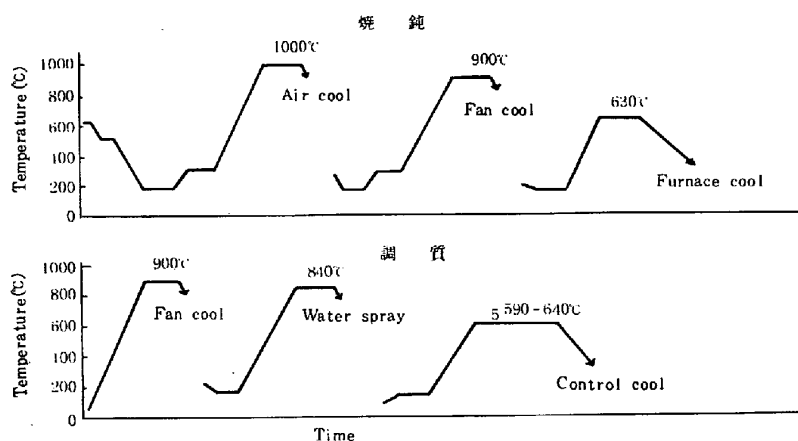


図 - 6. 本軸材の熱処理線図

図 - 7 は、1800 mm 直径を有する実体試験材の各深さ位置における冷却速度を示した連続冷却変態曲線（CCT曲線）である。図中のA線は表面から15 mmの位置の冷却曲線で、B線は100 mm，C線は200 mm，D線は450 mm，E線は肉厚中心すなわち900 mmの深さ位置における冷却曲線である。強烈なスプレークエンチによると肉厚中心部においても、充分なベイナイト変態が行われていることがわかる。

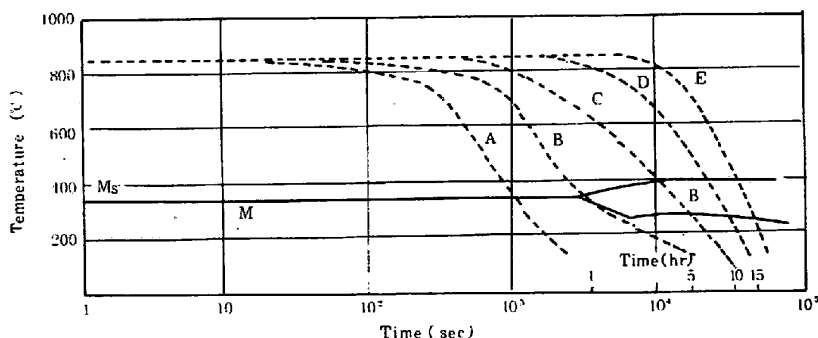


図-7. 1800 mm直径試験材の冷却曲線とその連続冷却変態曲線

焼戻後の冷却は中心部の脆化を防ぎ、過大な残留応力を発生させぬようコントロールクールする。コントロールクールは、脆化を防ぐためには充分速い冷却速度，残留応力低減のためには充分遅い冷却速度，との組合せで行われる。

残留応力は、普通降伏強度の10%が経験的にとられているが、本軸材の場合、胴部表面中央部で軸

'75-A36

方向 (σ_θ) = 2.2 kg/mm², 周方向 (σ_θ) = 5.0 kg/mm² であった。この値は、応力除去焼鈍前のものである（実際の回転軸材の中心孔表面部の残留応力を直接知ることが望ましいが、現状では外表面の値から類推している）。

4. 機械的性質

発電用軸材の場合、胴部外表面の機械的性質も勿論大切であるが、回転体であることと、品質評価の面から、軸材中心部の機械的性質が重要視される。ヨーロッパでは中心孔を明けずに、胴部に直径方向ないしは接線方向から試験片を採取する方法もとられているが、日本およびアメリカでは軸材に中心孔を明け、採取した中心孔試材について軸方向及び横方向の機械的性質を求めるやり方が普通である。

さきの図-5（調質形状）に、試験片採取位置を示してある。軸材胴部における中心部の試験片は、トップ側（これは鋳塊のトップと同じ意味）よりボトム側にかけて4ヶ所より採取している（C-1～4）。これは胴部全長3473mmの範囲にわたり、ほぼ均一な機械的性質が得られているか何うかを知るためである。

表-2は、本軸材の機械的性質の実績を示す。期待した高降伏強度と高靱性が確保されている。特に、胴部の中心部における機械的性質は、トップ側よりボトム側にかけて、ほぼ均一でしかも軸方向と横方向で差のないことがわかる。中心孔横方向の強度及び靱性が軸方向と差のないことは、この種回転体の軸材にとって重要な事である。

表-2. 本軸材の機械的性質

			Tensile Test				Charpy Impact Test (Notch: 2mmV)			
			σ_s (kg/mm^2)	σ_B (kg/mm^2)	E1. (%)	R.A. (%)	As Received		De-embrittlement	
							Izv ($kg-m$)	FATT (°C)	Izv ($kg-m$)	FATT (°C)
Aim	Surface	Rad	80		15	45	4.1	+ 16		
	Center Core	Long	80		15	45	4.1	+ 16		
		Trans	80		15	45	4.1	+ 16		
Surface		S - 1	84.0	95.3	19.1	69.6	Out In 11.0 12.1	Out In <- 75 -65		
		S - 2	83.8	96.0	19.1	65.6	Out In 12.7 12.1	Out In -63 -29		
		S - 3	83.7	94.8	20.5	68.3	Out In 12.7 12.5	Out In -75 -37		
		S - 4	92.1	102.8	18.0	62.8	Out In 9.8 11.0	Out In <- 75 <- 75		
		S - 5	90.9	101.6	19.1	68.8	Out In 10.8 11.6	Out In <- 75 <- 75		
		T	90.9	101.9	20.5	67.4				
		B	92.8	103.6	20.5	67.9				
Center Core	C-1	L	84.3	98.4	19.8	57.9	4.6	+ 15	10.5	+ 1
		T	83.8	98.7	17.7	51.9	5.9	+ 12	6.9	+ 13
	C-2	L	85.0	98.5	18.3	60.5	6.7	0	12.5	- 18
		T	85.0	99.0	16.9	53.9	7.3	0	13.0	- 20
	C-3	L	84.0	97.1	19.9	59.5	8.7	- 8		
		T	83.8	96.4	18.2	57.8	8.7	- 10		
	C-4	L	83.4	96.0	20.8	62.9	8.1	+ 11	14.0	- 4.5
		T	83.1	95.7	18.7	59.9	10.6	+ 10	9.0	+ 8

5. 結 言

大型化するローター軸材の高降伏強度、高靱性を確保するための製造と、その実績について概説した。製造上の決め手は熱処理にあることは勿論であるが、製鋼、鍛造過程での配慮も重要で、この意味からこれら三製造条件は三者一体と云えよう。大型化すればする程熱処理も、その扱い方がむづかしくなってくる。超大型鋳塊内部の強偏析帯の扱い方、残留応力の低減など、今後に残された問題も多く、経験の積み重ねとその解析は今後共益々増大して行くであろう。