

초내열합금의 열처리

Heat Treatment of Superalloy

김인배

부산대학교 금속공학과

1. 서론

일반 금속재료와 같이 초내열 합금도 용체화 처리에 따른 시효 열처리와 어닐링 및 응력제거 열처리 등을 수행함으로써 성질을 개선할 수 있다.

초내열 합금의 응력제거 열처리는 보통 재결정온도 이하에서 수행하지만 그 처리온도와 시간은 처리에 따른 고온 기계적 성질과 내식성의 감소정도를 고려하여야 할 뿐 아니라 잔류응력의 크기와 형태, 합금의 금속학적 특성 등을 고려하여 결정하는데 Table. 1은 단련형 초내열합금의 응력제거 열처리조건을 나타낸 것이다. 주조형 초내열 합금의 경우는 처리 사이클이 정리되지는 않았으나 경우에 따라서 특히 주조물의 형상이 복잡하거나 용접부분이 있을 경우에는 응력제거 열처리를 해주는 것이 좋다.

어닐링 열처리는 연성을 증가시켜 가공을 용이하게 하고, 용접작업의 전처리로서, 특별한 미세조직을 얻기 위하여, 시효경화된 합금에 있어서 제2상의 재용해에 의한 연화를 위한 목적 등으로 수행한다. 이러한 어닐링 열처리는 냉간가공 중의 중간 열처리로서, 급냉후의 열처리로서, 열간가공에 있어서의 재가열처리 등으로서 수행하는데 단련형 초내열합금의 어닐링 처리조건을 Table. 1에 나타내었다.

초내열 합금의 시효처리는 용체화처리에 의한 과포화 고용체로부터 석출물이나 제2상을 형성시켜 합금을 강화시키는 열처리작업으로서 시효처리의 조건을 가능한 석출물의 수와 형태, 합금의 최종사용온도, 석출물의 크기, 합금의 최종요구강도 등을 고려하여 결정한다.

초내열합금에 있어서의 주요석출상은 합금의 종류에 따라 γ' (Ni₃Al 혹은 Ni₃(Al, Ti)), η (Ni₃Ti), γ'' (bct Ni₃Nb) 등이 있으며 제2 상에는 M₂₃C₆, M₇C₃, M₆C, MC 등의 탄화물과 MN형태의 질화물, MCN형태의 탄질화물 M₃B₂형태의 붕화물, M₂Ti과 같은 Laves상, δ (orthorhombic Ni₃Nb)상 등이 있는데 시효처리 조건에 따라 합금에 존재하는 상의 종류와 양, 형태, 크기 등이 달라지며 Table. 2와 Table. 3에 단련형 초내열 합금과 주조형 초내열합금의 용체화 처리조건과 시효처리조건을 나타내었다.

2. Fe기 초내열 합금의 열처리

2.1 응력제거 및 어닐링

Fe기 초내열 합금에 있어서, 고용체강화를 증대시키기 위해서 응력제거 열처리를 해주어야 할 경우도 있지만, 내식성이 요구되는 목적에 사용되는 합금의 경우에는 응력제거 열처리 온도가 부식민감 온도범위이기 때문에 응력제거 열처리 보다는 어닐링 처리를 해주는 것이 좋다.

γ' 석출강화 Fe기 초내열합금인 A-286과 Incoloy 901의 경우에는 어닐링 온도까지 급속히 가열한 후 냉각시키므로써 일부 γ' 을 용해시킨 다음 냉각에 따라 재석출시키므로써 잔류응력을 제거하는 효과와 함께 합금이 적당한 연성을 갖도록 해줄 수가 있다.

2.2 용체화 처리 및 시효

Fe기 초내열 합금중의 대표적인 합금중의 하나인 A-286 합금의 기계적 성질은 Table. 4에서 보는바와 같이 용체화처리 온도에서 부터의 냉각속도에 따라서는

Table 1. Typical stress relieving and annealing cycles for wrought superalloys

Alloy	Stress relieving			Annealing(a)		Holding time per inch of section, h
	Temperature °C	Temperature °F	Holding time per inch of section, h	Temperature °C	Temperature °F	
Iron-base and iron-nickel-chromium alloys						
RA-330	900	1650	1(b)	1110(c)	2025(c)	1/4(d)
A-286	(f)	(f)	...	980	1800	1
Discaloy	(f)	(f)	...	1035	1900	1
Nickel-base alloys						
Astroloy	(f)	(f)	...	1135	2075	4
Hastelloy B	(f)	(f)	...	1175	2150	1
Hastelloy C	(f)	(f)	...	1215	2225	1
Hastelloy W	(f)	(f)	...	1175	2150	1
Hastelloy X	(f)	(f)	...	1175	2150	1
Incoloy 800	870	1600	1 1/2	980	1800	1/4
Incoloy 800H	...	...	...	1175	2150	...
Incoloy 825	...	...	...	980	1800	...
Incoloy 901	(f)	(f)	...	1095	2000	2
Inconel 600	900	1650	1	1010	1850	1/4(d)
Inconel 601	...	...	...	980	1800	...
Inconel 625	870	1600	1	980	1800	1
Inconel 690	...	...	...	1040	1900	1/2
Inconel 718	(f)	(f)	...	955	1750	1
Inconel X-750	880(g)	1625(g)	...	1035	1900	1/2
Nimonic 80A	(f)	(f)	...	1080	1975	2
Nimonic 90	(f)	(f)	...	1080	1975	2
René 41	(f)	(f)	...	1080	1975	2
Udimet 500	(f)	(f)	...	1080	1975	4
Udimet 700	(f)	(f)	...	1135	2075	4
Waspaloy	(f)	(f)	...	1010	1850	4
Cobalt-chromium-nickel-base alloys						
L-605 (HS-25)	(h)	(h)	...	1230	2250	1
N-155 (HS-95)	(h)	(h)	...	1175	2150	...
S-816	(h)	(h)	...	1205	2200	1
Refractory metals(j)						
Ta-10W	1205(k)	2200(k)	1	1425(k)	2600(k)	1
FS-80	1095(k)	2000(k)	1	1315(k)	2400(k)	1
FS-82	1095(k)	2000(k)	1	1315(k)	2400(k)	1
Mo-0.5 Ti	1095(m)	2000(m)	1/2	1315(m)(n)	2400(m)(n)	1
TZM	1205(m)	2200(m)	1	1425(m)(n)(p)	2600(m)(n)(p)	1

(a) Minimum hardness is achieved by cooling rapidly from the annealing temperature, to prevent precipitation strengthening of phases. Water quenching is preferred and is usually necessary for heavy sections; air cooling is preferred for heavy sections of Waspaloy, Udimet 500, Udimet 700, and Inconel X-750, because water quenching causes cracking. However, for complex shapes subject to excessive distortion, oil quenching is often adequate and more practical. Rapid air cooling usually is adequate for parts formed from strip or sheet. Rapid cooling from the annealing or solution treating temperature does not suppress the aging reaction of some alloys, such as Astroloy; these alloys become harder and stronger. (b) Time given is minimum; some plants use as long as 3 h per inch. (c) Nominal temperature; 1035 to 1175 °C (1900 to 2150 °F) is commonly used. (d) Short time is required for prevention of grain coarsening. (e) Nominal temperature; 650 to 705 °C (1200 to 1300 °F) is permissible. (f) Full annealing is recommended, because intermediate temperatures cause aging. (g) Used only for stress equalizing of warm worked grades. (h) Full annealing is recommended if further fabrication is performed; otherwise, material can be stress relieved at approximately 55 °C (100 °F) below annealing temperature. (j) Annealing temperatures depend on prior plastic deformation, degree of cold work, alloy content, and interstitial purity. Annealing temperatures given are those most frequently used for cold worked sheet or plate; in many instances, more precise determination of the recrystallization temperature is necessary for a specific application.

Table 2. Typical solution treating and aging cycles for wrought superalloys

Alloy	Solution treating			Cooling procedure	Aging		Cooling procedure	
	Temperature °C	Temperature °F	Time, h		Temperature °C	Temperature °F		Time, h
Iron-base alloys								
A-286.....	980	1800	1	Oil quench	720	1325	16	Air cool
Discaloy.....	1010	1850	2	Oil quench	730	1350	20	Air cool
N-155.....	1175	2150	1	Water quench	650	1200	20	Air cool
					815	1500	4	Air cool
Nickel-base alloys								
Astroloy.....	1175	2150	4	Air cool	845	1550	24	Air cool
	1080	1975	4	Air cool	760	1400	16	Air cool
Hastelloy B.....	1175	2150	1/2	(a)	(b)	(b)	...	...
Hastelloy B-2.....	1065	1950	1/2	Rapid quench	...	...	...	...
Hastelloy C-4.....	1065	1950	1/2	Rapid quench	...	...	...	...
Hastelloy C-276.....	1120	2050	1/2	Rapid quench	...	...	...	...
Hastelloy N.....	1175	2150	1/2	Rapid quench	...	...	...	...
Hastelloy S.....	1065	1950	1/2	Rapid quench	...	...	...	...
Hastelloy C.....	1220	2225	1	(a)	(b)	(b)	...	...
Hastelloy W.....	1175	2150	1	(a)	(b)	(b)	...	...
Hastelloy X.....	1175	2150	1	(a)	...	...	...	...
Inconel 901.....	1095	2000	2	Water quench	790	1450	2	Air cool
					720	1325	24	Air cool
Inconel 600.....	1120	2050	2	Air cool	...	...	...	...
Inconel 601.....	1150	2100	1	Air cool	...	...	...	...
Inconel 617.....	1175	2150	2	(a)	...	...	...	...
Inconel 625.....	1150	2100	2	(a)	...	...	...	...
Inconel 706.....	925-1010	1700-1850	...	...	845	1550	3	Air cool
					720	1325	8	Furnace cool
					620	1150	8	Air cool
	925-1010	1700-1850	...	...	730	1350	8	Furnace cool
					620	1150	8	Air cool
Inconel 718.....	980	1800	1	Air cool	720	1325	8	Furnace cool
					620	1150	8	Air cool
Inconel X-750 (AMS 5667).....	855	1625	24	Air cool	705	1300	20	Air cool
Inconel X-750 (AMS-5668).....	1150	2100	2	Air cool	845	1550	24	Air cool
					705	1300	20	Air cool
Nimonic 80A.....	1080	1975	8	Air cool	705	1300	16	Air cool
Nimonic 90.....	1080	1975	8	Air cool	705	1300	16	Air cool
René 41.....	1065	1950	1/2	Air cool	760	1400	16	Air cool
Udimet 500.....	1080	1975	4	Air cool	845	1550	24	Air cool
					760	1400	16	Air cool
Udimet 700.....	1175	2150	4	Air cool	845	1550	24	Air cool
	1080	1975	4	Air cool	760	1400	16	Air cool
Waspaloy.....	1080	1975	4	Air cool	845	1550	24	Air cool
					760	1400	16	Air cool
Cobalt-base alloys								
Haynes 25; L-605.....	1230	2250	1	Rapid air cool	(b)	(b)	...	...
Haynes 188.....	1175	2150	1/2	Rapid air cool	...	...	...	...
Haynes 556.....	1175	2150	1/2	Rapid air cool	...	...	...	...
S-816.....	1175	2150	1	(a)	760	1400	12	Air cool
Stellite 6B.....	1230	2250	1	Air cool	...	...	...	...

Note: Alternate treatments may be used to improve specific properties. (a) To provide an adequate quench after solution treating, it is necessary to cool below about 540 °C (1000 °F) rapidly enough to prevent precipitation in the intermediate temperature range. For sheet metal parts of most alloys, rapid air cooling will suffice. Oil or water quenching is frequently required for heavier sections that are not subject to cracking. (b) Aging occurs in service at elevated temperatures.

Table 3. Typical solution treating and aging cycles for cast superalloys

Alloy	Solution treating				Aging			
	Temperature(a) °C	°F	Time, h	Cooling procedure	Temperature(b) °C	°F	Time, h	Cooling procedure
A-286	1095	2000	2	Rapid cool	720	1325	16	Air cool
B-1900	As cast		...	...	...	...	...	...
FSX-414	1150	2100	4	Rapid cool	980	1800	4	Air cool
Hastelloy B	1175	2150	2	Rapid cool	(c)	(c)	...	...
Hastelloy C	1220	2225	1	Rapid cool	(c)	(c)	...	...
HS-31 (X-40)	As cast		...	...	...	...	...	...
IN-100	As cast		...	...	...	...	...	...
IN-713C	As cast		...	...	...	...	...	...
IN-738	1120	2050	2	Air cool	845	1550	24	Air cool
IN-792	1120	2050	2	Air cool	845	1550	24	Air cool
IN-939	1160	2120	4	Air cool	850	1560	16	Air cool
Inconel 718	1095	2000	1	Air cool	620	1150	10	Air cool
MAR-M 200	...	...	...	...	870	1600	50	Air cool
MAR-M 200 DS	1230	2250	4	Air cool	870	1600	32	Air cool
MAR-M 246	...	...	...	...	845	1550	50	Air cool
MAR-M 247	...	...	...	...	870	1600	16	Air cool
MAR-M 302	As cast		...	...	...	...	...	...
MAR-M 509	As cast		...	...	...	...	...	...
René 41	1095	2000	1/2	Rapid cool	900	1650	4	Air cool
René 80	1220	2225	2	Air cool	1095	2000	4	Air cool
					1055	1925	4	Air cool
					845	1550	16	Air cool
Udimet 700	1150	2100	2	Air cool	760	1400	16	Air cool

(a) Furnace temperature tolerance of $\pm 15^\circ\text{C}$ ($\pm 25^\circ\text{F}$) is satisfactory. (b) Furnace temperature tolerance of $\pm 10^\circ\text{C}$ ($\pm 15^\circ\text{F}$) is recommended. (c) Aging occurs in service at elevated temperature. Use a vacuum or protective atmosphere for heat treating at temperatures above 1040°C (1900°F) and subsequent cooling.

Table 4. Effect of cooling rate from 980°C to 535°C (1800 to 1000°F) on short-time properties of A-286(a)

Cooling rate °C/min	°F/min	Yield strength(b)		Tensile strength		Elongation, %	Reduction in area, %
		MPa	ksi	MPa	ksi		
Tested at 20°C (70°F)							
Oil quench		680	99	1030	149	24	39
15	27	690	100	1030	150	22	42
7	15	680	99	1020	148	24	39
5	9	700	102	990	143	22	36
1	2	660	96	1030	149	23	33
Tested at 650°C (1200°F)							
Oil quench		650	94	780	113	8	10
5	27	650	94	770	112	6	7
7	15	630	92	770	112	9	16
5	9	590	86	740	108	7	17
1	2	220	90	740	108	11	18

(a) After cooling from the solution temperature, all samples were aged at 720°C (1325°F) for 16 h and air cooled. (b) At 0.2% offset

민감하지 않으며 Fig.1에서 보는바와 같이 시효에 따라 경도치가 증가하여 피크경도값이 얻어지며 냉간가공량이 증가 할 수록 초기경도치는 물론 전반적인 경도치가 증가하고 피크경도치를 나타내는 시효온도가 감소함을 알 수 있다.

예컨대 냉간가공이 불균일한 경우와 같이 특별한 경우에는 통상의 시효온도보다 높은 온도에서 시효처리를 하기도 하고 통상의 시효온도 보다 낮은 온도에서 제 2 차 시효처리를 해주기도 하는데 원하는 기계적 성질을 나타내는 초내열 합금을 얻기 위해서는 다음과 같은 열처리 변수들을 고려해야 한다.

- 용체화 처리의 온도와 시간
- 시효 온도
- 적절한 중간 시효처리
- 낮은온도에서의 제 2 차 시효처리
- 제 3 차 시효처리

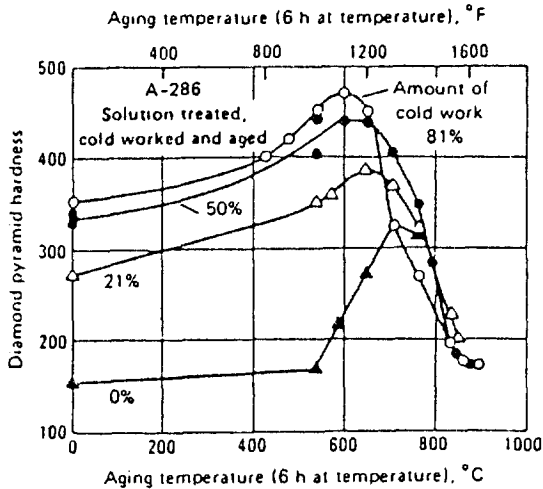


Fig.1. Effect of cold work and aging on diamond pyramid hardness of A-286

3. Ni기 초내열 합금의 열처리

3.1 응력제거 및 어닐링

응력제거 및 어닐링 열처리는 주조형 Ni기 초내열 합금에 대해서는 수행하지 않고 단련형 고용체 강과합금 혹은 석출강화 합금에 대하여 수행한다.

Rene 41 과 같은 단련형 석출강화 합금은 Fe기 합금 보다 균열 민감도가 크기 때문에 가공 및 용접잔류응력

의 제거를 위한 어닐링을 해 주어야 한다. 어닐링 온도 및 어닐링전의 가공량에 따라 합금의 결정립 크기가 달라지는데 Fig. 2는 Nimonic 90 에 대한 예이며 Table. 5는 결정립의 크기에 따른 강도 특성의 변화를 Rene 41 을 예로하여 보여준 것이다.

어닐링 온도에서의 유지시간은 대개 1~2 시간 정도이나 Astroloy, Udimet 500, Udimet 700 등의 합금은 유지시간이 길어야 하는 반면에 Inconl 600 합금 등은 아주 짧다.

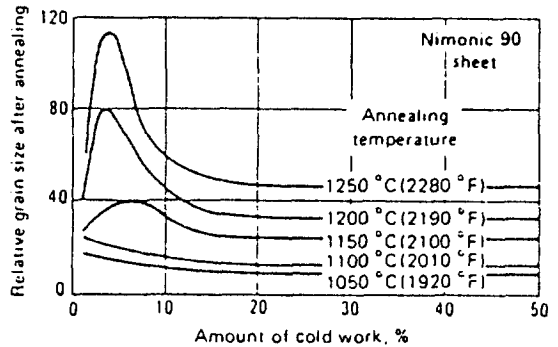


Fig.2. Effect of cold work and annealing on grain size

Table 5. Relationship of grain size and yield strength of forged Rene bar

ASTM grain size	Average 0.2% yield strength	
	MPa	ksi
3	840	122
5	900	130
7	1010	147
8	1060	154

3.2 용체화 처리 및 시효

Ni기 석출경화 합금의 용체화 처리 온도는 크리이프 파단강도 성질이 강조되는 경우가 고온 인장 강도 특성이 강조되는 경우보다 높은 것이 보통이다. 예를들면 Rene 41 과 Udimet 500 의 경우 크리이프 파단 특성이 강조되는 경우에는 1175°C에서 용체화 처리하는 반면에 인장성질이 강조되는 경우에는 1080°C에서 수행한다.

주조형 합금의 용체화 처리는 용점부근의 고온에서 수행하기 때문에 이 경우에는 불활성분위기나 진공하에서 열처리 하여야 한다.

Ni기 초내열 합금의 시효처리에 있어서 고려하여야 할 중요한 사항은 시효 후 시편의 수축현상이다. 예를 들면 Rene 41의 경우 760°C에서 16시간 시효할 경우 길이방향 및 폭방향의 수축은 0.033 mm/mm나 된다.

4. Co기 초내열합금의 열처리

Co기 초내열합금에 있어서는 완전 어닐링이나 응력제거 어닐링은 수행할 수 있으나 γ' 석출물에 의한 강화가 아니기 때문에 용체화처리 및 γ' 석출을 위한 시효처리는 수행하지 않고 다만 탄화물의 석출 및 분포와 형상의 조정을 위한 시효처리만을 수행한다.

단련형 Co기 합금이 가공중 높은 잔류응력을 갖는 경우 완전 어닐링을 수행하는 반면에 주조형합금의 경우

는 일반적으로 어닐링에 의한 조대한 탄화물의 형성이 가능 때문에 어닐링을 수행하지 않는다. 그러나 주조형이라도 가스터빈 buckets나 guide vane 과 같이 우수한 stress cracking 저항성이 요구되는 경우에는 870~900°C에서 2~4시간 응력제거 열처리를 해 주어야 한다.

Co기 초내열합금의 시효처리는 주로 탄화물의 분포와 형상의 조정과 급속간 화합물의 석출을 위한 목적으로서, Co기 합금중의 하나인 HS-31은 $Cr_{23}C_6$, Cr_3C_2 , M_6C , M_6C 등의 탄화물과 $\mu(M_7W_6)$ 상등을 포함하는데 $Cr_{23}C_6$ 의 경우 시효온도에 따라 discrete, acicular, lamellar 등의 형태가 존재한다.

5. 참고문헌

본 내용은 E.F. Badly의 Superalloy: A technical guide(1988) ASM에서 발췌한 것임.