

단결정 초내열합금의 재결정 방지를 위한 접합 전처리 조건에 관한 연구

김 대 업*

* 현대모비스(주) 기술연구소

A Study on the Optimum Bonding Preparation Condition of Single Crystal Superalloy

Dae-Up Kim*

* Research Institute, Hyundai MOBIS Co., Yongin 449-910, Korea

Abstract

The oxidation and recrystallization behaviors of Ni-base single crystal superalloy, CMSX-2 were investigated to determine the condition of the preparation for transient liquid phase (TLP) bonding operations. The faying surfaces of CMSX-2 were worked by the shot peening, fine cutting and mechanical polishing treatments and the degree of working of treated surfaces was evaluated by the hardness test and X-ray diffraction method. CMSX-2 was heat-treated at 1,173~1,589K for 3.6ks in vacuum of 4mPa. The mechanically polished surface was slightly oxidized after heat treatment even in the vacuum atmosphere of 4mPa. The thickness of an oxide film increased with increasing the heating temperature and the surface roughness of the faying surface. Recrystallization occurred at the surface after heat treatment at above 1,423K when the hardness was increased more than Hv600 by the shot peening treatment, while the mechanically polished or fine cut surfaces didn't recrystallized. Based on these results, it was clarified that the mechanically polishing with fine abrasive grit could be used for the preparation of faying surface of CMSX-2 before bonding operation.

(Received September 27, 2000)

Key Words : Ni-base superalloy, CMSX-2, TLP bonding, Recrystallization, Oxidation, Shot peening

1. 서 론

Ni기 단결정 초내열합금은 고온에서의 기계적 특성을 대폭 개선시킨 합금으로 현재 실용적으로 가장 내열온도가 높은 차세대 내열재료로서 유망되고 있다^{1,2)}. 단결정재의 이용분야를 보다 확대시키기 위해서는 복잡한 형상을 가진 부품의 적용이 불가결하기 때문에 단결정재의 특성을 충분히 발휘시킬 수 있는 고성능·고효율·고신뢰성을 가지는 접합기술의 확립이 절실하게 요구된다.

단결정 초내열합금을 접합할 경우, 접합전처리 단계에서 가공시 잔류응력에 의해 접합시 접합면에 결정입계가 형성되면 단결정 초내열합금에는 입계강화원소

가 함유되어 있지 않기 때문에 접합이음부의 기계적 성질이 현저하게 저하하는 문제점이 있다³⁾. 이 때문에 표면가공조건에 기인하는 단결정의 재결정 거동을 조사하여 단결정 접합면의 재결정 방지책을 확립해야만 한다. 또한, 접합시의 가열중에 재료표면에 산화피막이 형성될 경우, 산화피막은 응고 완료후에도 접합부에 잔류하여 접합이음부의 특성을 저하시키는 것이 보고되고 있다⁴⁾.

본 연구에서는 단결정 초내열합금의 접합의 예비단계로서 단결정재의 접합이음부 특성에 큰 영향을 미치는 단결정 접합면에 대한 산화 및 재결정 거동에 대해서 조사함과 동시에 재결정 메커니즘에 대해서 고찰하였다. 또한, 이들 검토결과에 기초하여 양호한 접합이 가능한 최적의 접합 전처리조건을 선정하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 모재는 Ni기 단결정 초내열합금인 CMSX-2이며, 접합시 인서트금속은 MBF-80을 사용하였다. 이들의 조성을 Table 1에 나타내었다.

단결정모재는 長手방향(주조방향)이 <001>에서 8° 이내의 것을 사용하였다.

2.2 실험방법

접합면의 재결정거동의 조사는 Table 2에 나타낸 바와 같이, 접합전의 표면처리방법을 방전가공, 정밀기계절단, 기계적연마 및 슛피닝(shot peening)처리로 변화시킨 후 재결정화 열처리를 실시하여 재결정의 발생유무와 그 생성량을 조사하였다. 슛피닝처리는 방전가공으로 절단한 {100}접합면에 주로 200μm의 강구를 사용해서 노즐거리 및 각도를 일정하게 하고 분사압력 및 처리시간을 변화시켰다.

또, 접합면의 산화거동의 조사에 있어서는, 방전가공면을 조도가 다른 연마지(#400~#1,500)로 표면연마하여 표면조도를 변화시켰다. 단결정재의 재결정화 열처리 및 산화거동 조사를 위한 열처리는 처리분위기 4mPa의 진공로에서 가열온도 1,173~1,589K, 유지시간 3.6ks의 조건에서 실시한 후 노냉하였다. 시험편의 조직관찰 및 원소분석에는 SEM 및 EPMA를 사용

하였고, 시료표면의 생성물의 조사 및 가공 잔류응력의 평가는 X선회절법(특성X선 : CoKα)에 의해 행하였다. 또한, 결정방위의 조사에 있어서는 EBSP(Electron Back Scattering Pattern)법⁵⁾에 의해 삼차원적으로 해석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합면의 재결정 거동

일반적으로 단결정재는 재결정 감수성이 매우 높기 때문에 접합준비단계에서 가공 잔류응력에 의해 접합면에서 재결정이 일어날 가능성이 높고, 접합부의 기계적성질에도 치명적인 영향을 미친다. 또, 접합후의 취급과정에서 과도한 응력집중을 받는 경우에도 재결정이 발생할 가능성이 있다. 따라서, 단결정재의 접합에서 접합부의 단결정화 달성을 위해서는 재결정이 일어나지 않는 전처리 조건을 선정해야 한다. 여기서, 접합면의 가공상황이 접합시의 열이력에 따른 재결정거동에 미치는 영향에 대해서 검토하였다.

3.1.1 가공조건에 따른 표면 잔류응력

접합면의 가공상태를 변화시키기 위하여, 본 실험에서는 접합면을 방전가공, 정밀기계절단, 연마지에 의한 기계연마(#1,500) 및 슛피닝처리를 행하였다.

Fig. 1은 표면처리조건을 변화시켰을 때 표면근방에서의 경도분포를 나타낸 것이다. 슛피닝처리한 재료에

Table 1 Chemical compositions of materials used (mass%)

Materials		Ni	B	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Ta
Base metal	CMSX-2	Bal.	-	8.0	4.6	0.6	8.0	1.0	5.6	6.0
Insert metal	MBF-80	Bal.	3.7	15.5	-	-	-	-	-	-

Table 2 Conditions of surface working treatment

	Surface damage	Type of ball	Jet pressure	Distance	Angle	Time
Condition A	Shot peening	200μm of steel beads	4kgf/cm ²	100mm	90°	300s
Condition B		200μm of steel beads	4kgf/cm ²	"	"	30s
Condition C		200μm of steel beads	4kgf/cm ²	"	"	3s
Condition D		200μm of steel beads	1kgf/cm ²	"	"	3s
Condition E		80μm of glass beads	1kgf/cm ²	"	"	3s
Condition F	Cutting					
Condition G	Polishing (#1,500)					
Condition H	Discharge working					

있어서, 조건 A~D의 표면근방에서의 가공층의 최고 경도는 Hv600이상이고, 모재(Hv480)에 비해서 높은 가공 잔류응력이 존재하는 것을 알 수 있다. 조건 A 및 B에서는 시료표면 근방의 경도 상승이 억제되어, 시료내부에 최고경도를 나타내는 부분이 존재한다. 그 값은 조건 B가 가장 크고, 약 Hv720을 나타낸다. 또, 조건 C~E에서는 시료표면에서 최고경도를 나타내고, 내부로 갈수록 경도는 점점 감소함과 동시에 경도값은 조건 C→D→E의 순으로 저하한다. 경화 영역의 깊이에 대해 보면, 조건 A→B→C→D→E의 순으로 감소한다. 한편, 방전가공, 정밀기계절단 및 기계연마의 상태에서는 표면에서 모재부에 이르기까지 거의 일정한 경도분포를 나타내고, 표면에는 가공 잔류응력이 거의 존재하지 않은 것을 알 수 있다.

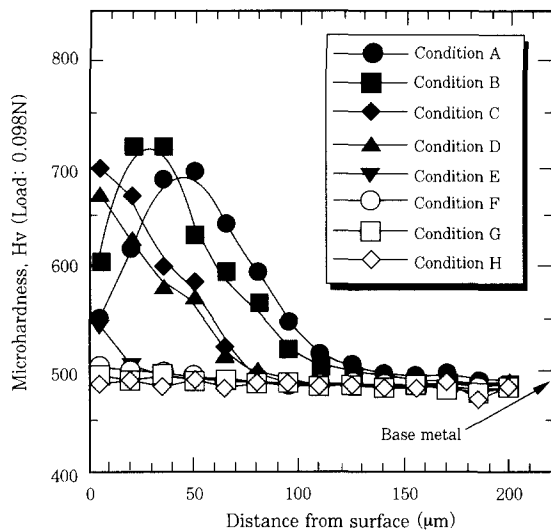


Fig. 1 Microhardness distribution near the worked surface by the various conditions

일반적으로 기계가공후 표면의 잔류응력 측정은 X선 회절에 의한 반가폭법(半價幅法)이 이용되고 있다⁶⁾. 슛피닝처리한 시료표면에 대해, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 X선회절에 의한 Ni의 (100)피크의 반가폭을 측정했다. Ni(100)피크의 반가폭은 조건 A가 가장 넓고 조건 C, E의 순으로 좁게 된다. 즉, 표면에서의 가공정도가 클수록 반가폭은 넓어지고, 가공 잔류응력을 반가폭으로 평가할 수 있다는 것을 알 수 있다.

표면가공조건에 따른 최고경도, 경도층의 깊이 및 반가폭의 측정결과를 각각 Fig. 3~Fig. 5에 나타내었다. 최고경도는 조건 A~D에서는 Hv670~720정도이고, 조건 E에서는 약간 경화한다. 경화깊이는 조건 A에서 180μm이나, 조건 F~H에서는 가공층은 전혀 존재하지 않는다. 반가폭에 대해서 보면, 변화의 정도는 그다지

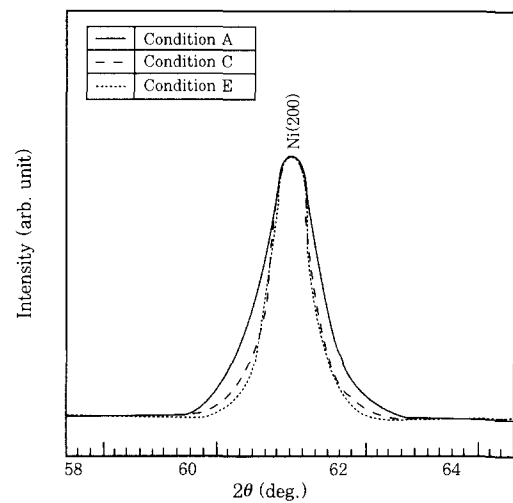


Fig. 2 X-ray diffraction patterns of Ni(200) from worked surface by various conditions

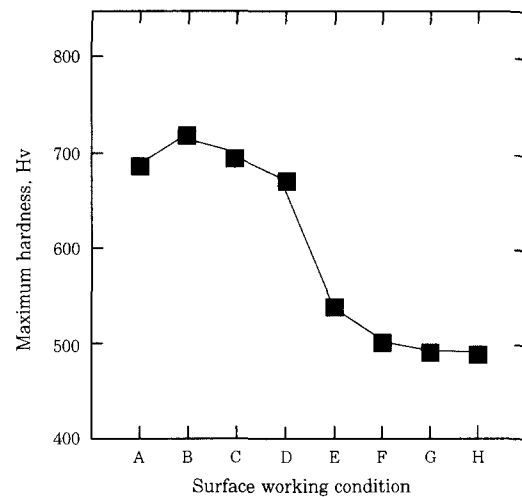


Fig. 3 Change in the maximum hardness with surface working condition

크지 않으면서 유사한 경향을 나타내고 있다. 가공면의 경도분포 및 반가폭의 결과로부터, 처리조건 A→H의 순으로 표면가공정도가 약해질수록 가공 잔류응력이 감소하는 것을 알 수 있다.

3.1.2 표면 재결정화 거동

가공처리표면에 명확하게 가공 잔류응력층의 존재가 인정되는 슛피닝처리한 시료에 대해, 재결정화 열처리 후의 시료표면 근방의 단면조직을 관찰하였다. Fig. 6는 조건 C로 처리한 시료의 열처리온도에 따른 조직변화를 나타낸 것이다. 1,273K에서는 결정입계의 발생은 보이지 않고, γ 상은 규칙적으로 배열하고 있다. γ 상의 형태 및 석출방향은 모재의 결정방위를 반영하고 있기 때문에 1,273K에서는 재결정이 일어나지 않았음을 알 수 있다.

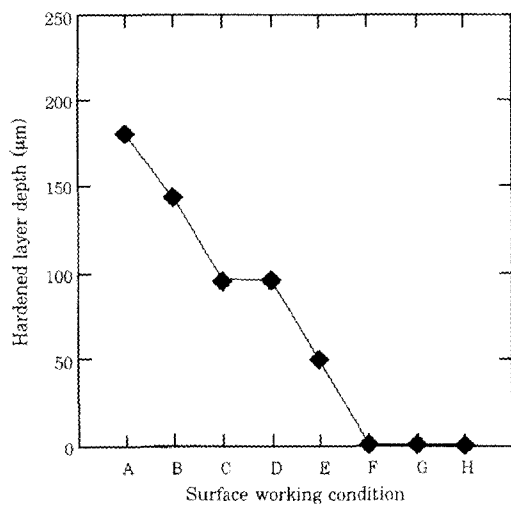


Fig. 4 Change in the hardened layer depth with surface working condition

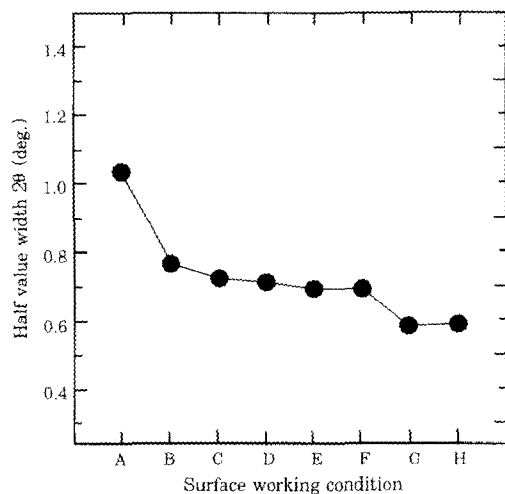


Fig. 5 Change in the half value width of Ni(200) with surface working condition

한편, 1,423K 이상에서는 가공을 받은 부분에 γ' 상의 형태·방위가 일정하지 않고 모재와는 명확하게 상이한 결정립이 관찰되었다. 또, 모재에서 γ' 상의 크기가 약 $0.4\mu\text{m}$ 으로 일정하나, 가공부에서는 약 $0.45\sim 2\mu\text{m}$ 의 범위내에서 일정하지 않다. 또한, 용체화처리 온도인 1,589K에서는 결정립이 조대화되고 γ' 상은 여러 방위로 배향되어 있으나, 각 결정립내의 γ' 상의 형태 및 크기는 모재 정도로 회복되어 있다. 이들 시료표면의 X선회절 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 그림(a)에 나타낸 바와 같이 1,273K 이하에서 열처리한 시료에서는 단결정 특유의 Ni(200) 피크만이 관찰된다. 그러나, 그림(b)에 나타낸 바와 같이 1,423K 이상에서 열처리한 시료에서는 많은 회절 피크가 관찰되며, 다결정화되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 표면처리조건 및 열처리온도에 따른 재결

정 거동을 나타낸 것이다. X선회절 시험결과, 조건 A 및 B의 숏피닝처리에서는 이하에 서술하는 바와 같이 숏피닝단계에서 이미 동적 재결정이 생겨 시료표면 근방에서의 경도상승이 억제된 것이라고 생각된다. 숏피닝처리는 금속표면에 시료와 동등이상의 경도를 가지는 $40\sim 200\mu\text{m}$ 의 강구를 분사속도 100m/s 이상으로 분사시키는 처리이기 때문에 시료표면 근방의 온도가 재료의 재결정 온도 이상으로 상승하는 것으로 알려져 있다⁷⁾.

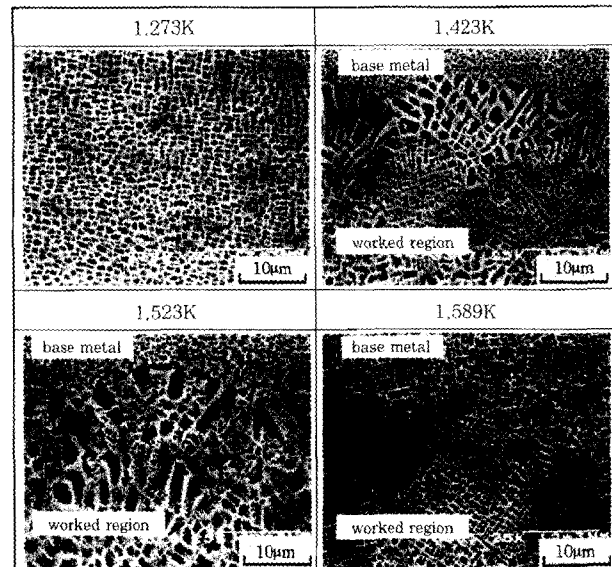
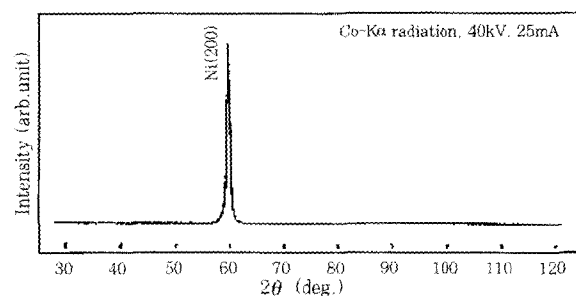
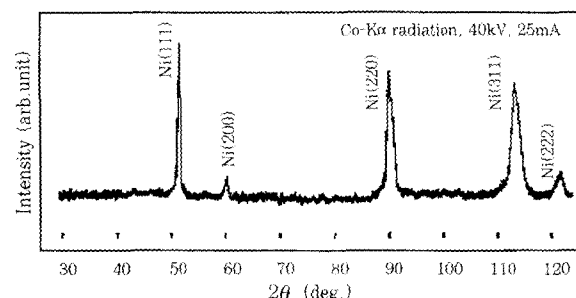


Fig. 6 Microstructures of the cross section of shot peened CMSX-2 after heat treatment



(a) Heat treated below 1,273K



(b) Heat treated above 1,423K

Fig. 7 X-ray diffraction patterns for shot peening treated CMSX-2 surface (a) Heat treated below 1,273K (b) Heat treated above 1,423K

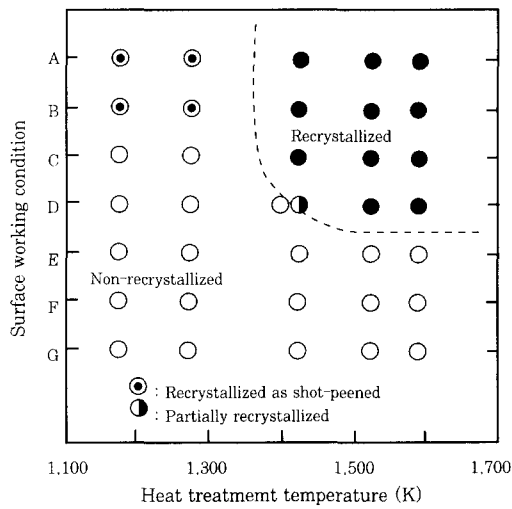


Fig. 8 Recrystallization behavior of CMSX-2

본 실험에서의 조건 A 및 B에서도 샷피닝시에 시료표면의 온도상승에 의해 샷피닝에 의한 가공을 받으면서 동시에 재결정이 발생한 것으로 생각된다. 즉, CMSX-2에 대해서 높은 가공 에너지를 부여한 샷피닝 조건에서는 동적 재결정이 일어났다고 사료된다.

조건 A~D에서는 모든 표면처리조건에서 1,273K이하의 열처리 온도에서는 동적 재결정립 이외에는 새로운 재결정립은 관찰되지 않았으나, 1,423K이상의 온도에서는 재결정이 발생하였다. 조건 E~H의 처리조건에서는 모든 열처리 온도에서 재결정은 발생하지 않았다.

열처리 온도에 따른 다결정화 영역의 평균 및 최대깊이의 측정결과를 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다. 열처리 온도 및 가공도가 높을수록 다결정화 영역이 깊고, γ 상이 고용되는 용체화처리온도 1,589K에서는 다결정화 영역의 깊이가 급격히 증가하였다. 또한, 1,523K에서의 다결정화층의 최대깊이는 경화영역의 깊이에 거의 대응하고 있는 것을 알 수 있다. 조건 C 및 조건 D의 가공조건에서는 1,273K이하의 온도에서 재결정은 생기지 않으나, 1,423K이상에서는 온도의 상승에 따라 다결정화 영역이 증가하였다. 조건 E의 가공조건에서는 어느 온도에서도 재결정은 발생하지 않았다.

Fig. 11은 열처리 온도에 따른 다결정 영역에서의 결정입경의 변화를 나타낸다. 1,523K까지는 결정입경이 큰차이 없이 열처리 온도가 증가할수록 약간 커지는 경향을 나타내나, 1,589K에서는 결정입경이 현저하게 증가하였다. 이들 결과로부터 판단해보면, 1,589K에서는 γ 상이 고용되기 때문에 재결정이 발생 한 후에 결정립의 성장·조대화가 촉진되었다고 생각된다.

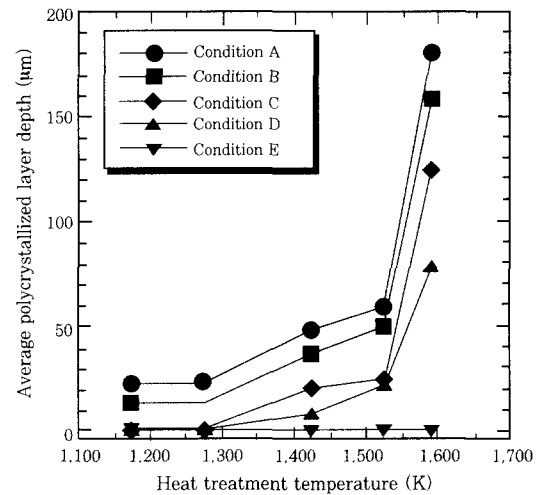


Fig. 9 Average depth of polycrystallized layer as functions of heat treatment temperature and surface working condition

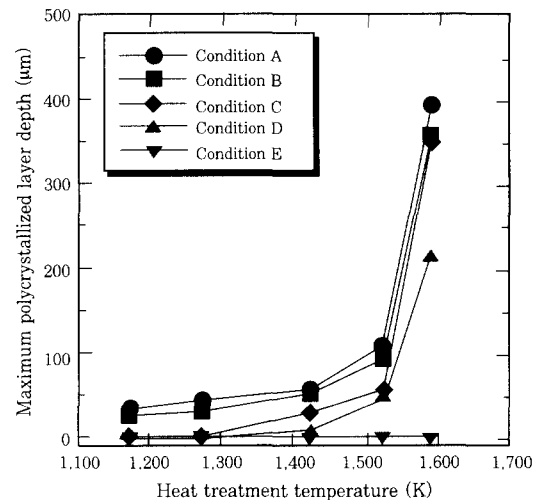


Fig. 10 Maximum depth of polycrystallized layer as functions of heat treatment temperature and surface working condition

3.1.3 재결정기구에 관한 고찰

재결정의 구동력은 내재해 있는 가공 잔류응력 에너지이기 때문에 가공정도와 재결정 거동의 관계에 대해서 검토하였다. Fig. 3~Fig. 5 및 Fig. 8의 결과로부터, 본 실험의 범위내에서는 재결정이 생기는 한계가공량은 Ni(200)피크의 반가폭의 변화량으로 겨우 0.2° 정도이고, X선의 반가폭으로 정확한 평가를 하는 것은 곤란하다. 또, 가공에 의한 경도상승에 대해 보면, Hv150정도의 경도상승으로 재결정이 생기기 시작하나, 반드시 최고경도만으로 평가할 수 없는 것을 알 수 있다. 여기서, 경도분포에 기초하여 가공도에 대응하는 파라미터로서 다음식에 나타내는 P를 이용하여 재결정 현상을 정량적으로 검토하였다.

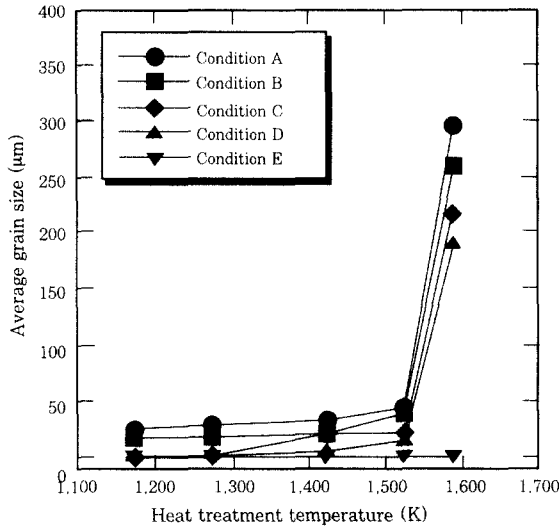


Fig. 11 Average grain size as functions of heat treatment temperature and surface working condition

$$P = \int H_v(x) dx \quad (1)$$

여기서, x : 거리(위치), $H_v(x)$: 위치 x 에서의 경도 상승을 나타낸다. 즉, 가공도(P)는 가공 잔류응력 에너지가 내재하는 경화영역에서 경도상승곡선과 거리 x 를 둘러싼 면적을 나타내고 있다. Fig. 12는 가공도(P)와 열처리 온도에 따른 재결정 영역의 최대깊이의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, 재결정후에 명확하게 결정립 성장이 생긴 열처리 온도 1,589K의 결과는 제외하였다. 모든 열처리 온도에서 가공도(P)가 약 1,500을 초과하면 재결정(1차 재결정)이 생기고 재결정 영역의 최대깊이는 가공도에 거의 비례해서 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 열처리 온도가 높을수록 재결정 감수성이 높아지는 경향이 있었다.

재결정 발생온도에 대해서 보면, 재결정 온도 1,423K는 CMSX-2 용점의 약 80%에 상당하고, 순금속의 용점에 비하면 상당히 높다. 이것은 Ni기 단결정 초내열합금에서는 석출강화상인 γ' 상이 재결정의 억제에 기여하기 때문³⁾이라고 생각된다. 또, 용체화처리 온도 1,589K에서는 다결정화 영역의 깊이가 급격히 증가해서 최대 약 400 μ m으로 되고, 경도상승이 인정되지 않는 모재영역까지 결정립이 성장하였다. CMSX-2의 2차재결정의 개시온도가 1,573K라는 보고³⁾를 고려하면, 본 실험에서도 용체화처리 온도에서 열처리를 행하면 2차재결정이 생겨 결정립의 조대화가 일어난 것이라고 판단할 수 있다. 한편, 기계연마에 의한 표면처리에서는 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 가공도(P)가 거의 0에 가까운 값을 나타내고, 가공후의 열처리를

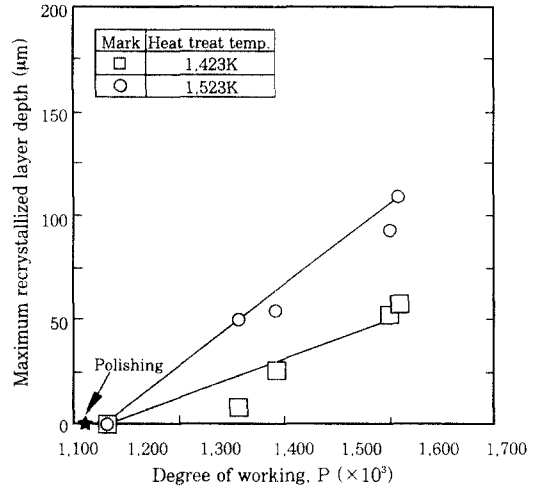


Fig. 12 Relation between the degree of working and the maximum depth of recrystallized layer

실시한 경우에도 재결정은 발생하지 않았다. 이로 부터, 본 실험범위에서는 CMSX-2의 재결정 거동은 가공도(P)로부터 반정량적으로 평가할 수 있었다.

3.2 접합면의 산화거동

Ni기 초내열합금과 같이 Ti, Al, Hf등의 산소와의 친화력이 강한 원소를 함유한 합금에서는, 접합시의 분위기에 따라서는 접합면이 산화될 가능성이 충분히 예기된다. Ni기 초내열합금의 액상화산접합에서 접합 전처리조건에 따라 접합면의 산화가 접합부 특성을 현저하게 열화시키는 것이 보고되고 있다⁴⁾. 여기서, 접합시에 접합면의 산화상황을 평가하였다.

Fig. 13은 연마지 #400으로 표면연마(Rmax : 5.5 μ m)한 후, 4mPa의 진공분위기하에서 1,373K \times 3.6ks의 조건에서 열처리한 시료의 표면근방의 단면조직을 나타낸 것이다. 단면조직은 조직의 양상에 따라 표면으로부터 4종류의 영역으로 분류되었다. 즉, 표면부의 γ' 상이 전혀 인정되지 않는 영역(A), 부정형의 γ' 상이 석출하는 영역(B), γ' 상이 부분적으로 약간 변형된 영역(C) 및 γ' 상이 입방체상의 형태이고 모재와 일정한 방위를 가지는 모재조직으로 된 영역(D)이다.

표면근방의 주요원소의 분포상황을 Fig. 14에 나타낸다. 표면근방에는 산소 이외에 Al, Ti 및 Ta가 증가하고 모재와는 상이하기 때문에 표면에는 산화피막이 존재하는 것을 알 수 있다. 또, 영역 B 및 C부분에서는 Al, Ti 및 Ta가 모재부분보다 약간 감소하였다.

1,523K \times 57.6ks의 조건에서 장시간 열처리한 후의 모재표면에는 Fig. 15에 나타낸 것과 같이, Al₂O₃가 동정된 사실로부터 1,373K \times 3.6ks의 열처리 조건에

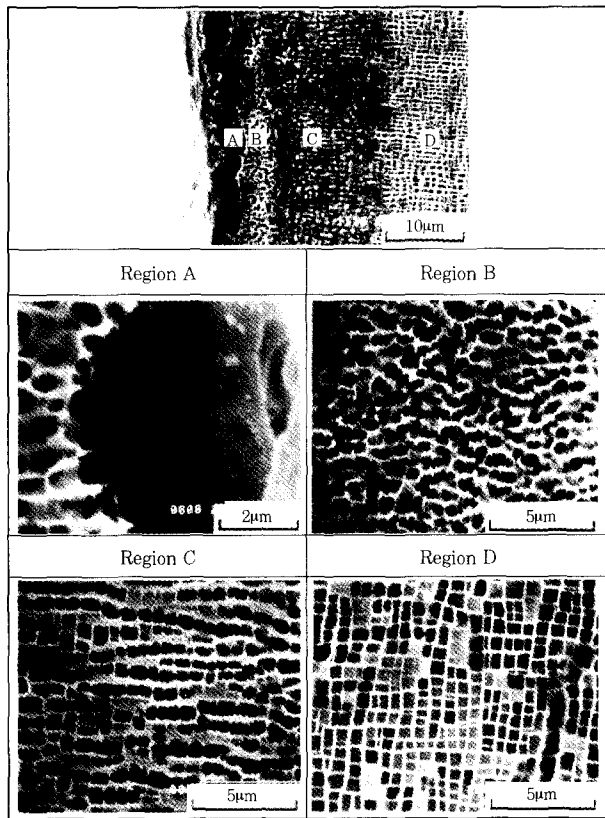


Fig. 13 Microstructures near the surface of the polished specimen after heat treatment

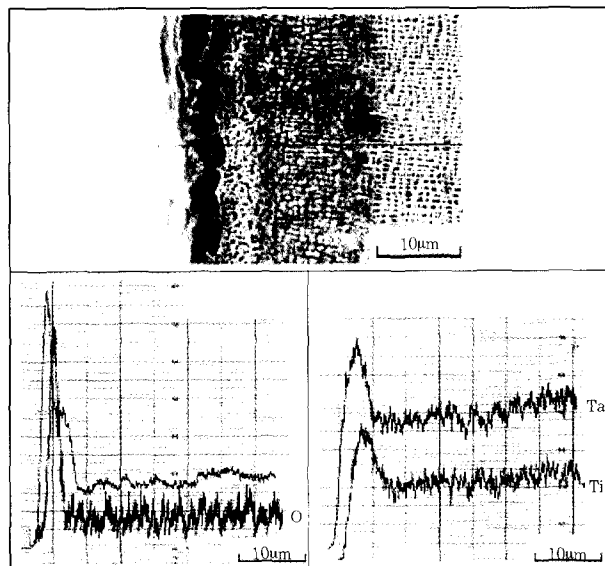


Fig. 14 Line profiles of elements analyzed by EPMA perpendicular to the surface

있어서도 모재표면에는 Al_2O_3 를 주체로 한 산화피막이 형성된 것이라고 판단된다.

Fig. 16은 표면근방의 각 영역에서의 단결정화 상황을 조사하기 위하여, 각 영역의 결정방위를 EBSD법을 사용해서 삼차원적으로 해석한 결과를 나타낸 것이다.

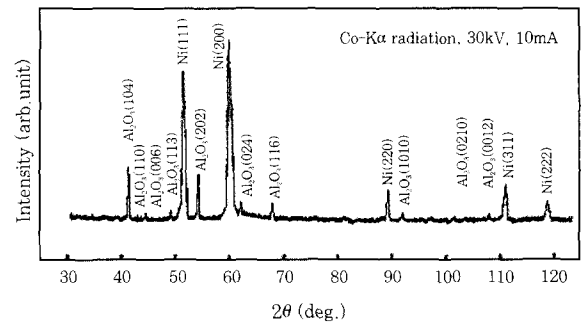


Fig. 15 X-ray diffraction pattern of the oxidized surface after heat treatment

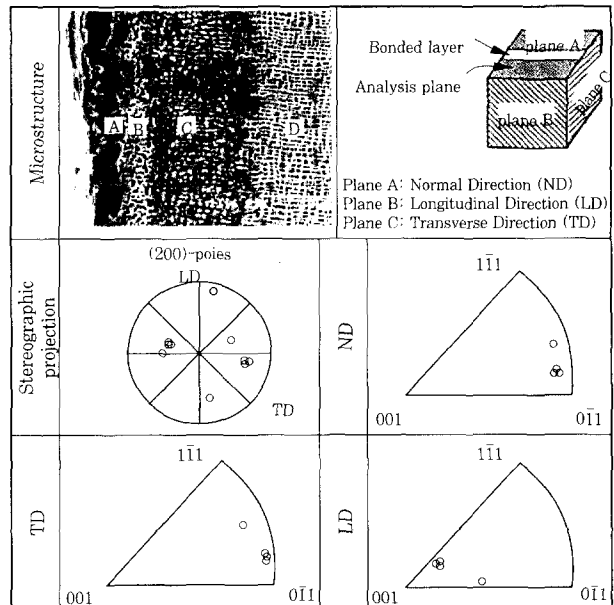


Fig. 16 Crystallographic orientation analyzed using the EBSD method for CMSX-2 after surface polishing and heat treatment

영역 A~D의 각 분석위치에서 수직인 면(TD), 평행한 면(LD) 및 시료표면(ND)에 대해서 스테레오 투영도 및 (200)극도형을 얻었다. 각 영역에서의 분석결과를 보면, 영역 B~D의 투영위치는 거의 한점에 plot되어 있으나, 영역 A는 떨어져 plot되어 있다. 즉, 산화피막이 형성된 영역 A를 제외하고 영역 B~C는 모재(영역 D)와 동일한 결정방위를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

이상의 사실로부터, 표면에 산화피막이 형성된 것에 의해 표면부 근방의 영역 A에서는 산소와의 친화력이 강한 Al, Ti 및 Ta의 결합층이 생겨 γ' 상이 인정되지 않는 영역이 형성된 것이라고 추측된다. 또한, 영역 B 및 C에서 γ' 상의 형태가 변화한 것은 표면산화에 따른 γ' 상의 형성원소인 Al, Ti 및 Ta가 표면으로 확산·감소한 것에 의한 것이라 생각된다.

3.3 접합 전처리조건에 관한 검토

3.3.1 접합 전처리조건 선정

단결정재를 접합할 경우 접합면의 표면처리방법으로서 방전가공 혹은 전해연마가 필요하다고 보고되고 있다⁶⁾. 그러나, 본 실험에 이용한 CMSX-2에서는 재결정 감수성은 그다지 높지 않고, Hv600이상의 큰 경도 상승이 생기는 전처리조건을 선정하지 않는 한, 표면 재결정은 생기지 않는 것을 알았다. 따라서 접합면의 전처리조건으로서 방전가공이나 전해연마를 행하지 않고 기계연마를 행하는 것도 가능하다고 사료된다. 본 실험에 있어서는 방전가공에 의해 절단한 접합면에 대해서 접합면의 잔류응력을 뺄 수 있는 한 제거할 수 있도록 연마지 #1,500에 의한 기계연마를 접합 전처리조건으로 선정했다.

한편, 접합면의 산화거동에 대해서 예비적으로 조사한 결과, 접합시의 분위기가 4mPa정도의 진공에서도 접합면을 1,373~1,523K에서 장시간 분위기에 노출하면 표면에는 Al₂O₃를 주체로 한 산화피막이 생성되는 것을 알았다. 표면조도를 변화시켰을 때 산화거동의 차이는 분명하지 않으나, 접합면의 표면조도를 작게 하면 산화층 두께를 감소시킬 수는 있으나, 산화를 완전히 방지할 수는 없다고 생각된다. 한편, 일반적으로 액상확산접합에서는 접합과정에서 용융 인서트금속속이 접합면을 극히 단시간에 메우기 때문에, 사실상 접합면의 산화문제는 거의 무시할 수 있다고 생각된다. 또, 어느 정도의 표면산화피막이 존재하는 경우에 있어서도 접합시의 모재용융속도가 약간 저하할 뿐, 반응시간의 증가에 따라서 용융 인서트금속속에 의해 산화피막이 분해되는 것도 경험적으로 알려져 있다⁴⁾. 본 실험에서 13.3mPa의 진공중에서 접합온도 1,373~1,548K, 유지시간 0~19.6ks의 열이력을 시료에 가한 경우, 시료표면은 금속광택을 유지하는 것이 관찰되었다. 이들 사실로부터 판단해 보면, 접합면의 기계연마시 표면조도를 연마지 #1,500 정도로 연마하는 것에 의해 접합과정에서의 접합면의 산화의 영향은 거의 없다고 사료된다.

3.3.2 접합 전처리조건 타당성 검증

선정한 접합 전처리조건으로 부터 건전한 접합이 가능한지를 확인하기 위해, 실제로 액상확산접합을 행하여 접합부의 양상을 조사하였다.

전술한 바와 같이, CMSX-2의 재결정 감수성은 그다지 높지 않고, 방전가공이나 정밀절단에 의해 절단한 접합면을 연마지에 의한 기계연마를 행해도 재결정은 일어나지 않았다. 만일 접합면에 표면가공층이 존

재한다고 하여도 모재의 용융과정에서 접합층에 충분한 액상이 형성된 경우에는 가공층이 용융제거 된다고 사료된다. 본 연구에서 MBF-80 인서트금속을 사용한 경우, 접합온도 1,523K에서 91μm의 모재용융이 생기고, 접합면의 가공층(재결정립)이 용융 인서트금속속에 용융되어 소실하는 것은 충분히 기대할 수 있다. 따라서, 본 접합조건 범위내에서는 액상확산접합과정에서 재결정에 따른 접합부의 다결정화는 거의 문제되지 않는다고 판단된다. 실제로 본 연구에서 MBF-80 인서트금속을 사용해서 접합온도 1,373~1,523K, 유지시간 0~19.6ks, 가압력 2.3MPa의 조건에서 접합한 모든 접합부에서 모재 및 접합층 내에서는 새로운 결정립은 관찰되지 않고, 재결정에 기인한 다결정화가 생기지 않는 양호한 접합이 가능하였다. 이상으로 부터, 선정한 전처리조건으로 접합을 행하면, 접합면에서 재결정에 따른 접합층내에서의 다결정립의 발생⁹⁾은 완전히 방지할 수 있다고 말할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Ni기 단결정 초내열합금인 CMSX-2 모재의 산화 및 재결정거동을 조사하여 액상확산접합을 행한 경우의 접합면의 전처리조건에 대해서 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 접합 전처리조건을 변화시켰을 때 표면근방의 가공층의 경도가 Hv600이상으로 되면 1,423K 이상의 열처리온도에서 1차재결정이 발생하였다. 특히, 용체화처리온도 1,589K에서 열처리한 경우에는 2차재결정이 일어나 결정립이 조대화하였다.
- (2) 표면연마후 재결정화 열처리한 시료의 단면조직은 γ 상의 형태 및 방위에 따라 4종류의 영역으로 분류할 수 있었으며, 표면부에는 Al₂O₃를 주체로 하는 산화피막이 생성되었다.
- (3) 재결정이 생기지 않고 접합면의 산화를 최소화할 수 있는 접합면의 전처리조건으로서 연마지 #1,500에 의한 기계연마를 행하면 모재 및 접합층내에서는 새로운 결정립의 발생없이 양호한 접합이 가능하였다.

참 고 문 헌

1. D.J.Frasier, J.R.Whetstone, K.Harris, G.L.Ericson and R.E.Schwer : Proc. of Inter. Conf. on High Temperature Alloys for Power Engineering 1990, Belgium, Sep. 24-27(1990), p1281
2. 原田, 横川, 大野, 山懸, 山岐 : 合金設計プログラムによる單結晶超合金の組織と特性の解析, 耐熱金属材料第123委員會研究報

- 告,34-3 (1993), p303
3. 太田, 中川 : ニッケル基超合金単結晶の再結晶學動, 日本金屬學會誌, 54-1 (1990), p84
 4. 中尾, 西本, 篠岐, 美, 堀 : 液相インサート金屬による母材の熔融現象, 日本溶接學會誌, 6-4(1988), p519
 5. B.L.Adams, S.I.Wright and K.Kunze: Orientation Imaging : The Emergence of a New Microscopy, Metall. Trans., 24A (1993), p819
 6. 栗田 : X線回折による應力測定値の再現性に関する統計學的解析, 非破壊検査, 40-5 (1991), p298
 7. 久保田 : 精密ショットピーニングWPC處理について, 溶接學會表面改質技術研究委員會資料, SM-139-95, (1995)
 8. S.Kamohara, T.Funamoto, K.Yasuda, A.Yoshinari and T.Shibayanagi : Liquid-Phase Diffusion Welding of Single Crystal Nickel Base Superalloy, Proc. of the 3rd Inter. Conf. on Trends in Welding Research, USA, (1992), p1089
 9. 蒲原, 舟本, 和知, 安田, 柴柳 : 單結晶Ni基超合金の液相擴散接合, 日本溶接學會全國大會講演概要, (1993), p310