

일방향응고 Ni기 초내열합금 GTD111의 Wide Gap 천이액상확산접합 현상에 관한 연구

A study on the appearance of wide gap TLP bonding process
in directional solidified Ni base superalloy GTD111

김영일, 황형철, 강정운
부산대학교 금속공학과

1. 서론

산업용 가스터빈의 Bucket 및 항공기의 vane 재료는 거의 Ni기 초내열합금으로 제조되고 있고, 가스터빈의 고효율화의 추세에 따라서 일반 주조합금인 다결정 합금에서 결정제어합금인 일방향응고 및 단결정 합금으로 사용재료가 변화하는 추세에 있다. Ni기 초내열합금은 용접성이 나빠 용융용접에 의한 보수는 곤란하므로 보수기술로서 천이액상확산접합법이 채용되고있다. 가스터빈 부품의 손상은 주로 열피로균열과 부식 및 에로존 등이 있으며, 대체로 폭이 1~2mm 정도인 미세결함이므로 열 피로균열의 수리를 위해서는 접합부 간격이 1~2mm의 wide gap을 상정한 접합기술의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내에 가장 많이 도입된 일방향응고합금인 GTD111을 대상으로 하여 접합간격이 넓은 경우의 천이액상확산접합 현상을 파악하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 모재는 GTD111이고, 삽입금속으로는 두께 40 μ m Ni기 비정질금속 MBF 50을 사용하였다. 모재에 폭 340 μ m, 길이 3, 4, 7mm의 gap을 기계가공하고 삽입금속 8장을 끼워넣어 진공고주파유도로에 장착한 후 5 $\times 10^{-5}$ torr의 진공분위기에서 접합온도 1423, 1453, 1473K, 유지시간 0~14.4ks로 접합실험을 행하였다. 접합부 미세조직 현출을 위해 시험편을 접합부에 수직하게 미세절단하여 연마를 하였다. 연마된 시험편은 Marble 용액(10g CuSO₄ + 50ml HCl + 50ml H₂O)을 사용하여 수초간 화학에칭 하여 광학현미경과 주사식전자현미경으로 관찰하였다. 접합부 보이드율은 각 접합조건의 접합부 전체를 광학현미경상에서의 50배 조직으로부터 2차원적으로 3시야 확보하여 이미지분석기에서 접합실험 전의 gap의 전체면적에 대한 보이드 점유면적의 비로 평가하였다. 각 접합온도와 유지시간에 따른 접합부 공정폭의 측정을 위해 이미지분석기를 이용하여 접합부 전체를 길이방향으로 50등분하여 측정하고 평균값을 구하였다. 접합부에 형성되는 상의 종류와 생성원인을 파악하기 위해 EDX, EPMA를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 접합결함에 미치는 전처리조건과 접합조건의 영향

Fig. 1은 gap 길이 7mm일 때 1423K \times 3.6ks의 조건으로 접합한 접합부의 마크로조직사진이며, Fig. 2는 Fig. 1에서 A와 B로 표시한 부분을 확대한 조직사진이다. 사진 A에서 관찰되는 크기가 작고 접합부 전체에 걸쳐 존재하는 보이드를 Type 1, 사진 B에서 관찰되는 크기가 크고 접합부의 중부와 하부에서 관찰되는 보이드를 Type 2로 구분하였다. 이러한 보이드의 발생에 미치는 표면상태의 영향을 알아보기 위해 Ni기 초내열합금의 브레이징 시 사용되는 세정방법을 조사하여 비교하여 보았다. 세정방법은 Table 1과 같다. Fig. 3은 상기 세정방법 3가지를 각각 적용한 시험편을 1423K \times 1.8ks로 접합한 경우의 접합부 보이드율을 나타낸 것이다. 보이드 Type 1은 세정방법에 영향을 받지 않으나, 보이드 Type 2는 세정방법에 따라 발생율이 현저히 차이 나고, cleaning method 3를 적용 시켰을 때의 비율이 가장 낮다. 이 결과로부터 cleaning method 3가 가장 양호한 세정방법으로 판단되었으므로 이후의 실험에는 모두 cleaning method 3를 적용하였다. Fig. 4에서는 gap 길이 7, 4, 3mm일 때 접합조건 1423K \times 3.6ks로 접합한 경우의 접합부 보이드율을 나타내었으며, gap의 길이가 짧아질 수록 보이드율은 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 gap 길이 3mm일 때 접합온도 1423, 1453, 1473K, 유지시간 0, 3.6, 7.2ks의 조건으로 접합했을 때 각 조건에 따른 보이드율을 나타낸 것이다. 접합조건 1453K

×3.6ks의 경우 최종공정의 양이 많으므로 보이드율이 높아졌다고 판단되며, 유지시간이 길어질 수록 전체적으로 보이드율이 감소하는 추세이다. 이는 유지시간이 길어질수록 최종응고하는 공정의 양이 적기 때문인 것으로 판단되며, 보이드 Type 1은 공정조각이 최종응고 할 때 응고수축에 의해 생성된다고 추측된다. 따라서 접합부 등온응고가 완료되어 액상이 존재하지 않는다면 보이드 Type 1은 생성되지 않을 것으로 판단된다.

3.2 접합부 미세조직 변화

Fig. 6은 접합온도 1423, 1453, 1473K, 유지시간 0, 1.8, 3.6, 7.2ks의 조건으로 접합했을 때 접합부의 마크로조직사진이고, Fig. 7은 접합 전의 gap과 Fig. 6에서 표시한 A, B부분을 확대한 조직사진이다. Fig. 7의 (b)에서 공정폭이 접합전의 gap의 폭보다 크다. 이는 모재가 용융했기 때문이며 Fig. 6에서 접합온도 1423, 1453, 1473K×0ks를 비교해 보면 접합온도가 높을 수록 모재용융이 많이 일어나는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 (c)는 (b)와 비교해서 공정폭이 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 접합온도에서 유지함에 따라 등온응고 하기 때문으로 판단된다. 특히 접합온도 1473K에서는 공정폭의 감소 속도가 매우 빠르다. Fig. 8은 접합온도 1423K의 경우 시간의 1/2승에 대한 공정폭의 변화를 나타낸 것이다. 접합온도 1423K의 경우 공정폭이 시간의 1/2승에 대하여 직선적으로 감소하여 Boron의 확산에 의한 등온응고가 됨을 알 수 있고, 등온응고 완료되기까지 유지시간은 약 40ks이상 소요될 것으로 예상된다. Fig. 9는 접합조건 1423K×7.2ks일 때 접합부 공정조직에 존재하는 대표적인 상들에 대한 SEM 조직사진과 EDX 분석결과이다. 접합부에 생성된 상은 Ni과 Si를 주로 함유한 상과 Cr, W, Mo 등을 함유한 상, Ti, Ta를 함유한 MC carbide 등이 있다. 이 중 Ni과 Si를 주로 함유한 상은 최종적으로 응고한 공정조직, MC carbide는 모재 용융반응에 의해 접합부액상으로 유출된 것이라고 추측된다. Fig. 10은 Cr, W, Mo등을 함유한 상에 대한 EPMA결과이며, Cr, W외에 B이 검출되었으므로 이는 접합부로 유출된 W, Mo등과 삼입금속의 Cr, B등이 반응하여 생성된 boride라고 판단된다.

4. 결론

1. 보이드는 접합부의 중부와 하부에서 관찰되는 큰 보이드와 접합부 최공공정조직 내에 있는 작은 보이드가 있다. cleaning method 3을 적용했을 때 큰 보이드의 생성은 감소하였고, gap의 길이가 짧을 수록, 유지시간이 길어질 수록 보이드율은 감소하였다.
2. 접합온도가 높을 수록 모재용융 양이 많고, 1473K일 때 액상소멸 속도가 매우 빨랐다. 접합온도 1423K의 경우 최종공정폭이 시간의 1/2승에 대하여 직선적으로 감소하여 확산에 의한 등온응고가 됨을 알 수 있었고, 등온응고 완료되기까지 유지시간은 약 40ks이상 소요될 것으로 예상되었다.
3. 접합부에는 Ni과 Si를 주로 함유한 공정상이라 추측되는 상과 모재로부터 유출된 MC carbide, 그리고 모재의 W, Mo와 삼입금속의 Cr, B등이 반응하여 생성된 boride가 관찰되었다.

Table 1 Typical Cleaning methods

Type	Methode
1	soapy water degrease → alcohol ultrasonic cleaning
2	trichloroethylene solvent degrease → alcohol ultrasonic cleaning
3	trichloroethylene solvent degrease → remove metallic contaminants ¹⁾ → remove tarnish ²⁾ (thin oxide film) → alcohol ultrasonic cleaning 1) digestion for 15~30min in 50% HNO ₃ aqueous water(35℃) 2) digestion for 1~5min in 23%HNO ₃ + 4%HF aqueous water(50℃)

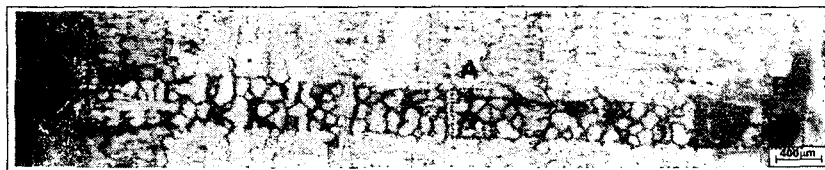


Fig. 1 Macrostructure of bonded interlayer at 1423K for 3.6ks

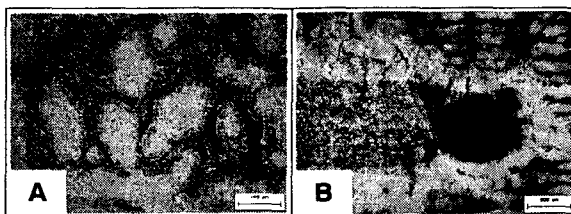


Fig. 2 Void types of bonded interlayer (A) Type 1, (B) Type 2

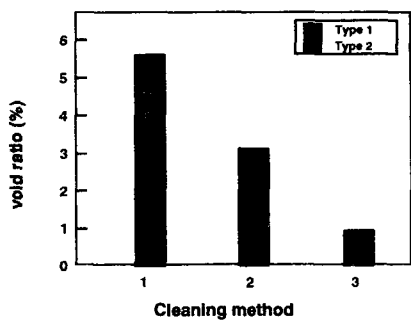


Fig. 3 Effect of cleaning method on void ratio at 1423K for 1.8ks

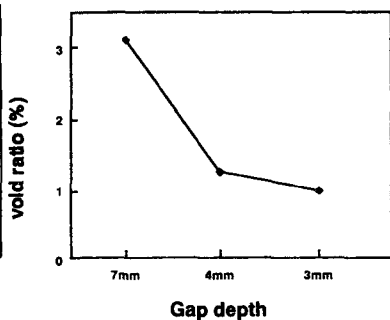


Fig. 4 Effect of gap depth on void ratio at 1423K for 3.6ks

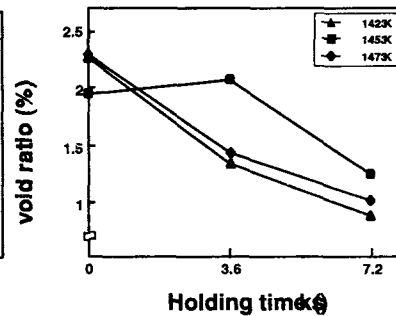


Fig. 5 Effect of holding time on void ratio with bonding temperature

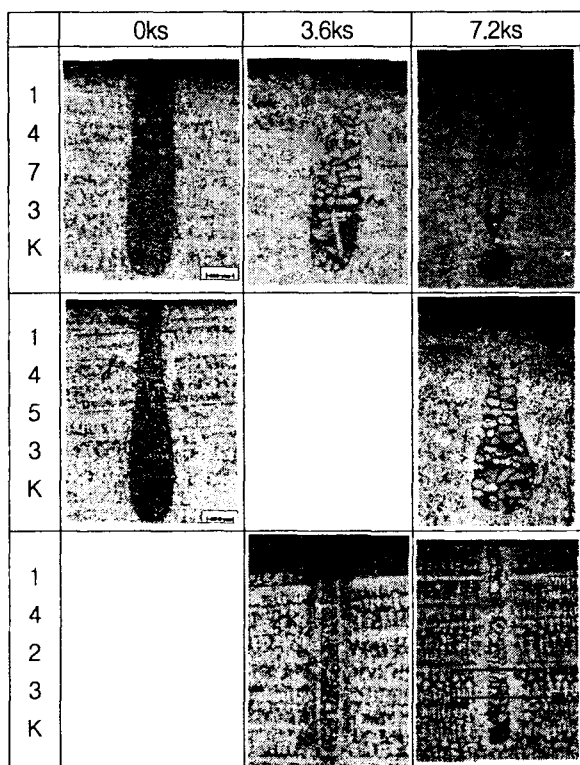


Fig. 6 Macrostructures of bonded interlayer with holding time at 1423, 1453, 1473K

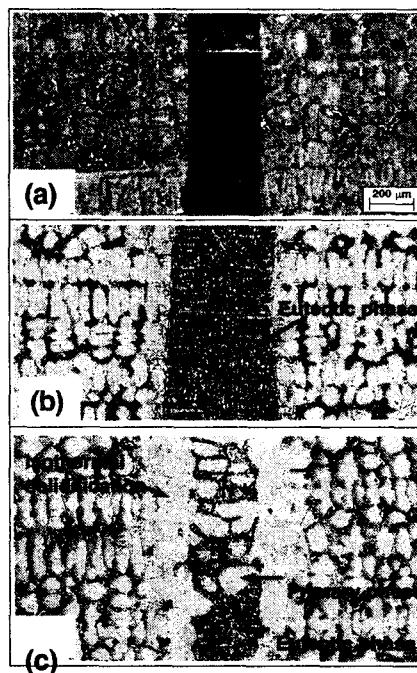


Fig. 7 Microstructures of (a) gap and (b) marked A, (c) marked B in Fig. 6

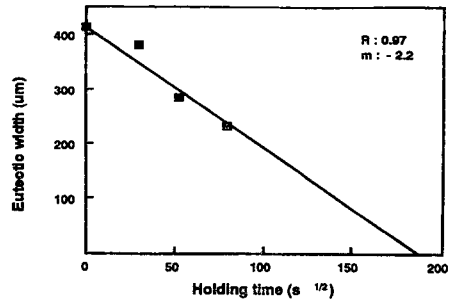


Fig. 8 Effect of holding time on eutectic width at 1423K

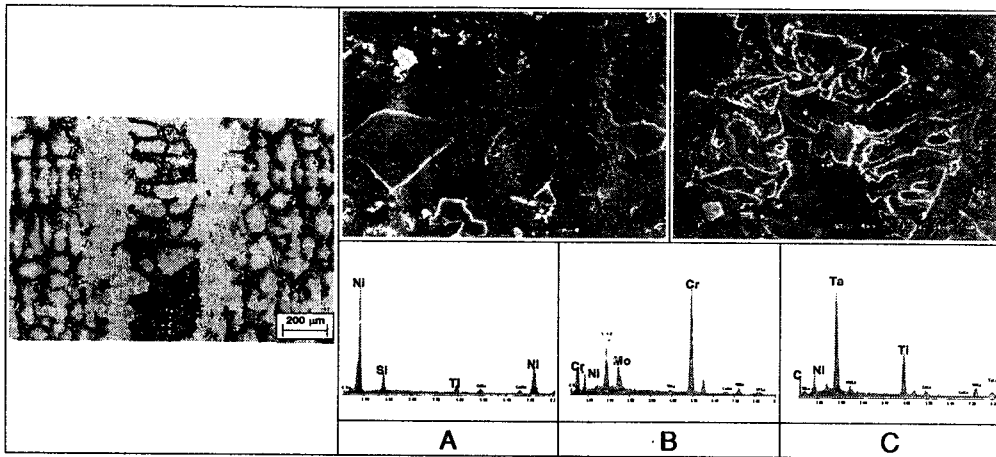


Fig. 9 SEM microstructures and EDX analysis of typical phases in bonded interlayer at 1423K for 7.2ks

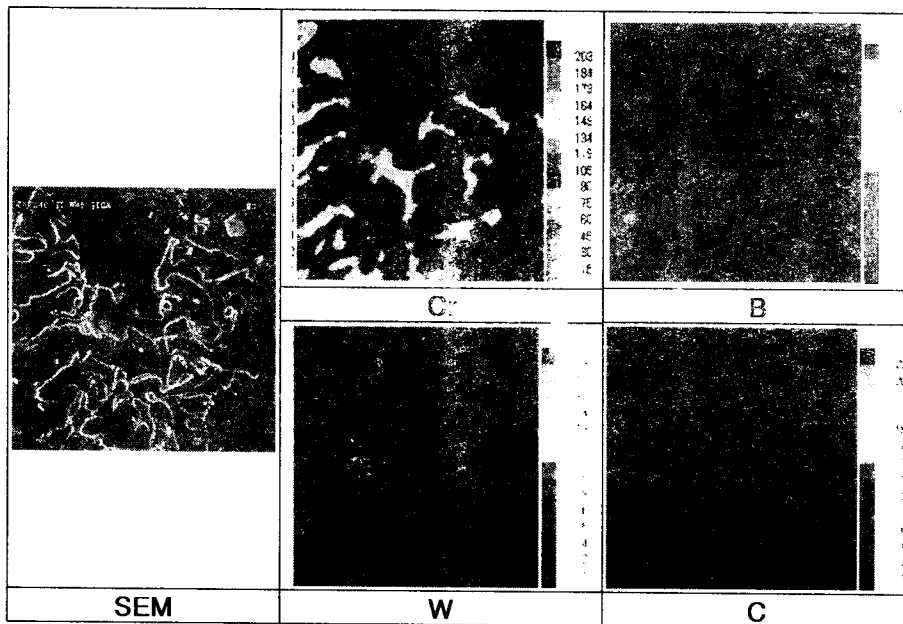


Fig. 10 Result of EPMA on the phase containing Cr, W, Mo