Gamma Titanium Aluminide의 용접균열 감수성에 관한 연구

A Study of Weld Cracking Susceptibility of Gamma Titanium Aluminides

이 종 섭*, W.A. Baeslack III**, T.J. Kelly***
* 산업과학기술연구소 철강제품부문 접합가공팀
** The Ohio State University
*** General Electric Aircraft Engines

Abstract Five cast gamma titanium aluminides, Ti-45~48%Al-2%Nb-2%Cr (nominal composition in at. %), were laser welded and their weld cracking susceptibilities were evaluated. Laser power, traversing rate and preheat temperature were systematically varied to generate a series of welds exhibiting a wide range of cooling rate (100°C/s-10,000°C/s). As Al content increased and the weld cooling rate decreased, solidification cracking susceptibility increased while solid-state cracking susceptibility decreased. Through laser beam energy input control and preheat, it was determined possible to produce high quality laser welds.

1. 서 론

Gamma titanium aluminide는 Ti 약 50%, Al 약 50%로 구성된 intermetallic compound로서 낮은 density와 우수한 고온성질로 인하여 항공기 엔진 trubine blade용 소재로 사용되던 기존의 Ni-based superalloy를 대체할 새로운 소재로 각광받고 있다. 반면 gamma alloy의 단점은 1-3%에 불과한 낮은 상온연성과 DBTT (ductile-brittle transition temperature)가 약 650°C에 달하는 낮은 파괴인성인데 [1] 최근의 집중적인 연구로 이의 개선이 가능해짐에 따라 새로운 대두된 issue들중의 하나가 용접성이다. 심한 고상균열 (solid-state cracking)이 gamma alloy 용접시 가장 큰 문제점으로 알려져있으나 [2] gamma alloy의 용접에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다. 이같은 gamma alloy의 제한된 용접성과 미미한 연구실적때문에 본 연구를 수행하게 되었으며 본 연구에서는 gamma alloy의 용접균열 감수성에 미치는 Al 함량과 용접 열cycle의 영향을 조사하고자 하였다.

2. 실험방법

소재는 as-cast 상태의 판재 (두께 5mm)로 공급되었으며 이 소재를 HIP 및 열처리 한 후 laser beam welding을 실시하였다. 화학조성은 Table 1에 나타낸 바와 같이 Ti-48Al-2Nb-2Cr의 기본조성에 specification내에서의 Al 함량의 영향을 조사하기 위하여 Al을 45.5%에서 47.9%까지 변화시켰으며 불순물 원소로서는 Si, Fe, O등이 함유되어 있었다. Laser 용접시 power는 1.2 kW-2.0 kW, 용접속도는 20 cm/min.-120 cm/min.까지 변화시켰으며 고상균열이 생기는 조건에서는 예열을 실시하였는데 최고 예열온도는 600°C이었다. 이같은 용접조건의 변화로 100°C/s에서 10,000°C/s까지의 광범위한 냉각속도가 얻어졌다. 예열과 용접은 시편의 고온산화를 막기 위해서 Ar 또는 He 분위기에서 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응고균열감수성

Gamma alloy는 기존의 Ti-based alloy처럼 solidification temperature range가 매우 좁고 합금원소의 partitioning ratio가 크기 때문에 응고균열에 민감하지 않은 것으로 알려져 있으며 지금까지 전혀 보고된 적이 없었으나 본 연구에서는 응고균열이 gamma alloy의 laser 용접부에서 관찰되었다. 응고균열은 Al 함량이 높고 용접속도가 느린 경우에 주로 발생하였는데 용접부 단면을 조사해 본 결과 양쪽의 fusion boundary로 부터 heat flow 방향으로 성장한 columnar dendrite들이 서로 마주치는 용융역 centerline을 따라서 Al의 편석이 일어나며 이같은 centerline segregate를 따라서 고온균열이 발생, 전파하고 있었다. Fig. 1은 gamma alloy의 용접균열 감수성을 조사한 결과로서 Al 함량이 증가함에 따라 고온균열 감수성은 증가하고 있으며 용접입열량이 증가함에 따라 (용접속도가 감소함에 따라) 균열 발생빈도가 증가함을 알 수 있다.

3.2 고상균열 감수성

응고균열이 용접선에 평행한 방향으로 발생하는 데 비해 고상균열은 대부분의 경우, 용접선에 수직한 방향으로 발생, 전파하였다. Fig. 2, 3은 각각 고상균열 감수성에 미치는 용접속도 및 예열온도, 용접부 냉각속도의 영향을 조사한 결과로서 고상균열 감수성은 용접속도가 증가함에 따라 증가하고 있으며 예열온도가 증가함에 따라 감소하고 있고 그 결과 용접부 냉각속도가 증가함에 따라서 균열 감수성은 증가하고 있다. Fig. 4는 고상균열 감수성에 미치는 Al 함량의 영향을 나타낸 것으로 어떤 용접속도에서도 고상균열 감수성은 Al 함량이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

3.3 Al 함량 및 용접부 thermal cycle의 영향

Fig. 5는 응고 및 고상균열 시험결과를 종합해 놓은 결과인데 (alloy B) 두 line 사이의 영역이 crack-free laser 용접부를 만들 수 있는 process parameter window를 보여주고 있는데 이같은 적정 용접조건은 본 연구에서 이용한 모든 소재에 대해 설정되었다. Fig. 6, 7은 각각 용접균열 감수성에 미치는 Al 함량과 미시조직의 영향을 나타내고 있는 그림으로서 Al 함량이 증가함에 따라 응고균열 감수성은 증가하는 반면에 고상균열 감수성은 감소하였으며 용융역에서의 alpha-two phase의 분율이 증가함에 따라 고상균열 감수성은 증가하였다. Alpha-two phase의 분율은 냉각속도가 증가함에 따라 증가하였다. 결론적으로 gamma alloy는 용접응고균열, 고상균열 모두에 민감하였으나 용접조건을 조절함으로서 crack-free laser 용접부를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

1) Gamma titanium aluminide laser 용접부는 응고 및 고상균열 모두에 민감하였다.
2) 응고균열은 용접선에 평행한 방향으로 발생하는 반면에 고상균열은 용접선에 수직한 방향으로 발생하여 전파하였다.
3) Al 함량이 증가하고 냉각속도가 감소함에 따라 응고균열 감수성은 증가하는 반면에 고상균열 감수성은 감소하였다.
4) 용접조건을 조절함으로서 gamma titanium aluminides의 crack-free laser 용접부를 만들 수 있었다.

5. 참고문헌

1. Y-W. Kim: Journal of Metals, Vol. 46, No. 7, 1994, pp. 30-39
2. R.A. Patterson, P.L. Martin, B.K. Damkroger and L. Christodoulou: Weld. Journal Research Supplement, Vol. 69, No. 1, 1990, pp. 39s-44s

Table 1 Chemical compositions of gamma titanium aluminides

Heat	Ti	Al	Nb	Cr	Fe	Si	O
A	50.6	45.5	1.9	1.8	0.028	0.028	0.2206
B	49.8	46.2	2.0	1.7	0.01	0.04	0.1297
C	49.4	46.9	1.9	1.5	0.007	0.03	0.141
D	48.6	47.3	1.9	1.9	0.007	0.03	0.180
E	48.4	47.9	1.9	1.5	0.01	0.03	0.153

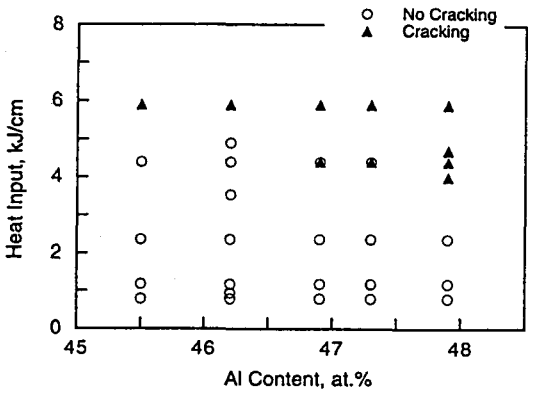

Fig. 1 Soldification cracking susceptibility of gamma titanium aluminides

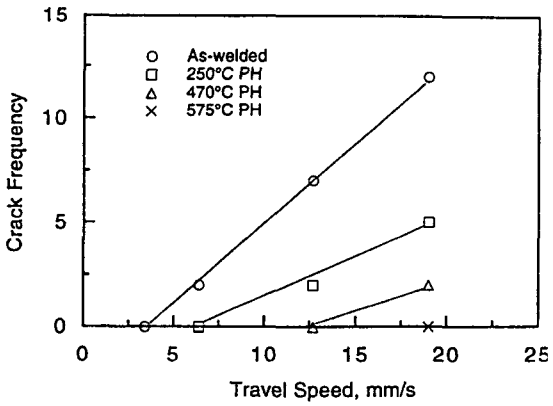

Fig. 2 Effect of travel speed on solid-state cracking susceptibility (B)

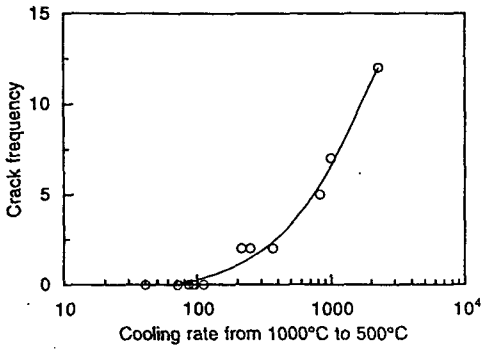

Fig. 3 Effect of cooling rate on solid-state cracking susceptibility

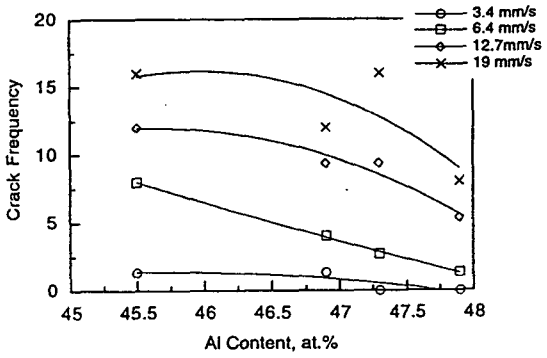

Fig. 4 Effect of Al content on solid-state cracking susceptibility

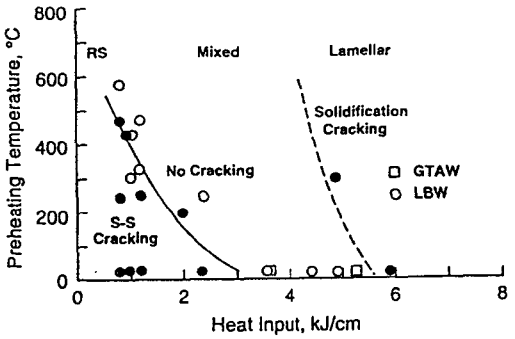

Fig. 5 Process parameter window for sound LB welds showing region susceptible to solid-state cracking, region susceptible to solidification cracking and crack-free region

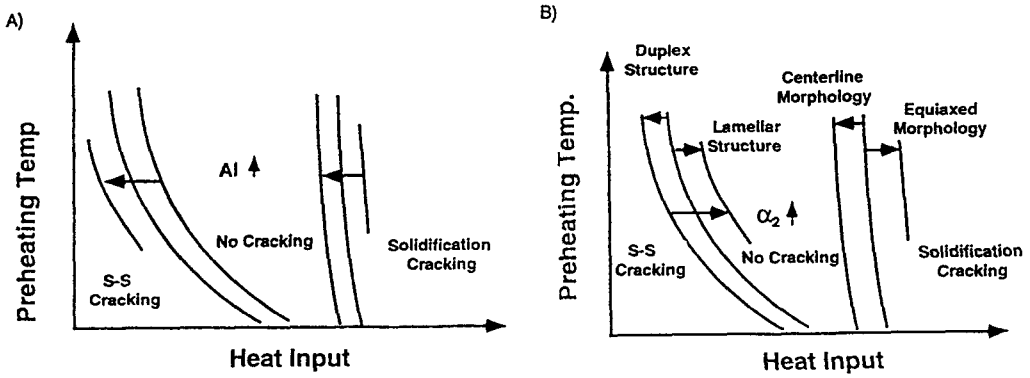

Fig. 6 Factors determining the size of process parameter envelope and their effect on weld cracking susceptibility