

(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>  
B23P 15/04

(11) 공개번호 특2001-0031460  
(43) 공개일자 2001년04월16일

(21) 출원번호 10-2000-7004494  
(22) 출원일자 2000년04월26일  
    번역문제출일자 2000년04월26일  
(86) 국제출원번호 PCT/US 98/22732 (87) 국제공개번호 W0 99/21680  
(86) 국제출원출원일자 1998년10월27일 (87) 국제공개일자 1999년05월06일  
(81) 지정국 AP ARIPO특허 : 가나 감비아 케냐 레소토 말라위 수단 스와질랜드  
                  우간다 짐바브웨  
EA 유라시아특허 : 아르메니아 아제르바이잔 벨라루스 키르기즈 카자흐스탄  
                  몰도바 러시아 타지키스탄 투르크메니스탄  
EP 유럽특허 : 오스트리아 벨기에 스위스 사이프러스 독일 덴마크 스페인  
                  핀란드 프랑스 영국 그리스 아일랜드 이탈리아 룩셈부르크 모나코  
                  네덜란드 포르투갈 스웨덴  
OA OAPI특허 : 부르키나파소 베냉 중앙아프리카 콩고 코트디부와르 카메룬  
                  가봉 기네 기네비소 말리 모리타니 니제르 세네갈 차드 토고  
국내특허 : 알바니아 아르메니아 오스트리아 오스트레일리아 아제르바이잔  
                  보스니아-헤르체고비나 바베이도스 불가리아 브라질 벨라루스 캐나다  
                  스위스 중국 쿠바 체코 독일 덴마크 에스토니아 스페인 핀란드 영국  
                  그레나다 그루지야 가나 감비아 크로아티아 헝가리 인도네시아 이스라엘  
                  아이슬란드 일본 케냐 키르기즈 북한 대한민국 카자흐스탄 세인트루시아  
                  스리랑카 라이베리아 레소토 리투아니아 룩셈부르크 라트비아 몰도바  
                  마다가스카르 마케도니아 몽고 말라위 멕시코 노르웨이 뉴질랜드  
                  폴란드 포르투갈 루마니아 러시아 수단 스웨덴 싱가포르 슬로베니아  
                  슬로바키아 시에라리온 타지키스탄 투르크메니스탄 터어키 트리니다드  
                  토바고 우크라이나 우간다 미국 우즈베키스탄 베트남 유고슬라비아  
                  짐바브웨

(30) 우선권주장 60/063,640 1997년10월27일 미국(US)  
(71) 출원인 지멘스 웨스팅하우스 파워 코퍼레이션 랭크 크리스토퍼 제이  
미국 플로리다주 32826-2399 올랜도 엠씨 301 알라파야 트레일 4400  
(72) 발명자 벌크마이클에이.  
미국펜실베이니아15213피츠버그월링포드스트리트4723  
프레이어폴라디.  
미국펜실베이니아16066크랜베리타운쉽콜링우드코트219  
해바모한에이.  
미국플로리다32765오비에도레인포레스트코트5722  
세쓰브리즈비.  
미국플로리다32751마잇랜드인디안댄스코트1641  
스와트즈백그레이더블유.  
미국펜실베이니아15642노스헌팅돈드롭로드11509  
자거토마스월터  
미국플로리다32708-6138원터스프링스와링톤스트리트1594  
(74) 대리인 장용식

심사청구 : 없음

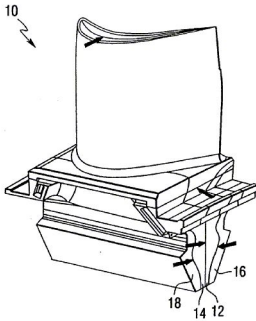
(54) 복수의 단결정 주물 초합금 세그먼트들로 만들어진터빈블레이드

요약

별개의 초합금 주물 부분들로 만들어진 큰 가스터빈블레이드가 개시된다. 이 터빈블레이드는 인접한 부분들 사이의 접합라인이 블레이드의 저 응력구역에 위치되도록 설계되어 있다. 블레이드의 주물 초합금

부분들은 일정한 공차를 가지고서 함께 중심점이 맞추어져 있고 끼워맞춤되어 있다. 그 다음에 상기 터빈블레이드 부분들은 전이액상접합에 의해 연결되고, 상기 접합구역에 원하는 미세구조를 만드는 제어된 열처리가 뒤따른다. 이 방법은 매우 낮은 산출률 및 높은 각각의 구성요소 비용을 발생시키는 일체로서 큰 터빈블레이드를 주조하고자 하는 종래의 시도와 비교하여, 작고 고 품질의 주물 초합금 부분들의 연결에 의해 크고 고 품질의 터빈블레이드의 생산을 허용한다.

**대표도**



**색인어**

단결정, 다결정, 전이액상접합, 포일, 고용화열처리, 석출열처리, 니켈계 초합금, 유한 원소 분석법, 터빈블레이드

**명세서**

**기술분야**

본 출원은 1997년 10월 27일자에 출원된 미국 가출원 일련번호 60/063,640의 유리한 점을 청구한다. 본 발명은 동력발생 연소가스터빈에 관한 것으로서, 더욱 자세하게는 주물 초합금의 복수의 세그먼트들로 만들어진 터빈에 대한 블레이드에 관한 것이다.

**배경기술**

현대의 고효율 동력발생 연소터빈엔진에 채용되는 최신식 블레이드 및 베인은 단결정 합금과 같은 고품질의 재료 및 그 부분의 내외부 크기의 정확한 제어에 의존한다. 이러한 부분의 큰 크기 때문에, 몇 개의 루트에 의해서 비용효율이 높은 제조가 수행되고 있다.

개발중인 개량형 터빈시스템(ATS)과 같은 지상기지 가스터빈은 개량된 재료로부터 제조된 비용효율이 높은 고성능 구성요소를 요구한다. 제 1 및 제 2 로우(row) 터빈블레이드 및 베인은 복잡한 내외부 결합구조를 포함하고, 그리고 무결점 재료로 제조되어야 한다. 비록 상기와 같은 특징을 가진 구성요소는 항공기엔진용으로 개발되고 있지만, 동력발생 터빈구성요소의 보다 큰 크기는 중대한 도전을 제공한다. 지금까지 주물에 의한 시도는 어떠한 두드러진 산출률로 무결점의 큰 구성요소를 생산할 수 없었다.

대체적인 제조방법은 무결점의 보다 작은 하위구성요소들을 주조하고 계속해서 고 품질 접합 프로세스를 이용하여 하위구성요소들을 연결하는 것이었다. 그러나, ATS-류 엔진에 사용될 것을 목적으로 한 CMSX-4와 같은 단결정 재료를 포함하는, 개량된 합금에 대한 요구된 접합기술은 일반적으로 이용할 수 없었다.

**발명의 상세한 설명**

고온부의 가스터빈블레이드는 고 품질의 주물섹션 또는 부분을 접합함으로써 단결정 초합금 주물로 제조된다. 본 방법은 높은 각각의 구성요소 비용을 수반하면서 매우 낮은 산출률을 발생시키는 일체로서 터빈블레이드를 주조하고자 하는 종래의 시도와 비교하여, 작고 고 품질의 주물섹션들의 연결에 의해 크고 고 품질의 터빈블레이드의 생산을 허용한다.

본 발명은 가스터빈용 큰 크기의 단결정 구성요소의 고 산출률 생산을 제공한다. 이 방법은 터빈블레이드의 비용을 상업적인 실행에 알맞은 상태로 만든다. 그것은 또한, 단결정 재료의 통상적인 주물로서는 성취될 수 없는, 정확한 부분외형 및 최적의 재료품질 및 성능을 동시에 얻을 수 있도록 허용한다. 주물코어를 제거함으로써 본 프로세스는 내부 구성요소의 결합구조 및 특징의 제어를 제공한다. 게다가, 생산 도중에 내부 냉각통로에 접근로를 허용함으로써, 내부 냉각특성 및 벽의 크기의 정확한 품질제어에 대한 가능성이 제공된다. 내부 결정상태 구조 및 결정의 실체가 또한 결정될 수 있다. 본 발명은 크게 감축된 비용으로 보다 정확하게 제어된 단결정 터빈블레이드를 제공한다.

상기 블레이드는 블레이드의 저 응력구역에 있는 접합라인의 배치를 허용하도록 설계되어 있다. 블레이드의 부분들은 접합을 위한 개량된 설치를 제공하는 특별히 편입된 과잉 스톱에 의해 주조될 수 있다. 변형방법은 외형 및 설치를 위해 부분들을 형상화하도록 사용될 수 있다. 터빈블레이드 부분은 co-EDM 등과 같은 기계가공 프로세스에 의해 0.0025 cm(0.001 인치) 정도의 매우 정확한 설치에 대해 준비될 수 있다. 그 다음에 블레이드의 부분들 사이의 결합 틈새는 포일 또는 페이스트에 의해 채워진다. 접합포

일 및 열처리는 고 품질 및 견고한 접합조인트를 제공하도록 선택된다. 한 실시예에 있어서, 단결정 섹션은 다른 단결정 섹션에 연결될 수 있다. 다른 실시예에 있어서, 비용효율이 높은 하이브리드 블레이드의 제조를 제공하도록, 단결정 섹션은 방향에 따라 강화된 부분을 포함하는 다결정 섹션에 연결될 수 있다.

터빈블레이드 설계는 저 응력구역을 따라서 2 개 이상의 편으로 분할된다. 한 실시예에 있어서, 블레이드 캠버-라인을 대체로 따라서 위치하는 단일 표면을 따르는 분할은 결정없이 고 산출율로 통상적으로 생산될 수 없는 단결정 주물 초합금의 본질적으로 무결점인 블레이드를 생산하도록 고 품질 주물의 유효한 연결을 허용한다. 다른 실시예에 있어서, 블레이드 설계는 블레이드 에어포일 캠버-라인을 대체로 따라서 있는 단일면의 고유(original)부분에 더하여 루트부분내의 2 개의 다른 면을 따라서 분할함으로써 4 개의 부분으로 분할되어 있다. 따라서, 상기 4 개의 편은 2 개의 고유섹션을 또 2 개의 섹션으로 더 분할함으로써 한정된다. 이러한 여분의 2 개의 섹션은 바람직하게 블레이드의 루트에 위치되어 있다. 그것들은 저 응력면 위에 제공되어 있으며, 그리고 블레이드 루트의 외면의 면외형과 내부 접합면 외형 사이에 있도록 외형 구성되어 있다. 계속해서 전이액상접합을 사용하여 복수개의 편을 단일구조로 주도하고 연결하는 것은 매우 높은 온도에서 실행될 수 있는 본질적으로 무결점인 블레이드를 생산하도록 고 품질 주물의 효율적인 연결을 허용한다.

또 다른 실시예에 있어서, 터빈블레이드의 에어포일섹션은 단결정 합금으로서 주도되고, 그리고 루트의 외측 부분은 다결정 합금으로서 주도되어 있다. 고 품질의 각 편들은 높은 산출율로 주도되고 계속해서 비용 효율높은 산출율을 가지고서 본질적으로 무결점의 고 품질 터빈블레이드를 생산하도록 전이액상접합과 같은 접합처리에 의해 연결되어 있다.

주물의 섹션크기를 감소시킴으로써, 개량된 품질이 다듬질된 부분에서 유도될 수 있다, 즉 주물의 섹션크기가 감소됨에 따라 결정입계, 은 및 반점의 발생이 감소될 수 있다. 게다가, 상기 주물섹션은 고체 섹션으로 선택될 수 있기 때문에, 내부 코어의 비교적 두드러진 특징부 주위의 주물과 연관된 주물문제는 회피될 수 있다. 결점이 있는 주물을 생산하는 경향을 감소시키기 위해 이러한 방법을 사용함으로써, 80 내지 90 % 정도의 주물산출률이 가능할 수 있다.

블레이드 구조의 하위구성요소 세그먼트의 조립에 바탕을 둔 본 방법은 전체적인 열, 공기역학 및 기계적인 요구를 만족하도록 설계되어 있는 하위구성요소로 저 취약성 접합평면을 합체시킨다. 이러한 세그먼트화는 상기 구성요소를 쉽게 주도될 수 있고, 손쉬운 조립에 적합하며, 그리고 최소화된 응력위치로 접합면을 위치시키는 보다 작은 세그먼트로 분할한다. 상기 설계 세그먼트화 프로세스는 접합평면을 가로지르는 현저한 하중에 노출되지 않게 될 완만하게 연속적인 곡면을 바람직하게 확인한다. 날카로운 곡선 및 하위구성요소의 면으로부터 돌입하고 돌출하는 특징부를 제거하는 것은 주물 산출율을 향상시킬 뿐만 아니라 접합 동안 접합매체의 적용 및 하위구성요소의 고정을 도와준다.

바람직한 전이액상접합 프로세스는 향상된 단결정 합금의 큰 블레이드의 접합을 제공한다. 심지어 단결정 구조에 있어서, 후접합열처리가 기본 금속에서 뿐만 아니라 접합구역에서 원하는  $\gamma/\gamma'$  구조를 제공한다면, 접합포일의 화학적 성질은 접합구역을 가로지르는 연속적인 구조를 제공하도록 변경될 수 있다. 접합구역내의 미세구조를 기본재료의 미세구조와 맞추는 것에 부가하여, 접합포일은 기본재료에 대해 사용된 열처리 프로세스와 양립가능하도록 선택되어 있다.

유한 요소 모델링과 결합된 컴퓨터를 이용한 설계는 분할된 하위구성요소의 개발 및 기계적인 분석을 도와주도록 사용될 수 있다. 이러한 기술은 고체 모델은 별개의 구역으로 분할하는 세그먼트화된 면을 가진 블레이드 결합구조의 한정을 허용한다. 고유 블레이드로부터 시작하여, 잠정적인 세그먼트화 면을 선택하고 상기 면을 가로지르는 예상된 부하의 관점으로부터 정량적으로 그것들을 평가함으로써 세그먼트화를 진행한다. 그 다음에 상기 면들은 주도 및 접합을 도와주는 매끈한 연속면을 제공하는 것의 관점으로부터 정성적으로 고려된다. 선택된 면들은 그 다음에 주물 품질을 손상하고 접합을 방해할 날카로운 모퉁이 같은 특징부를 제거하도록 수정될 수 있다. 상기 수정된 면은 그 다음에 상기 접합라인을 가로지르는 잠정적인 부하를 재평가하기 위해 유한 요소 모델링을 사용하여 분석될 수 있다. 널리 사용되는 블레이드 설계요건은 고 사이클 피로, 저 사이클 피로, 크리프, 가소성 및 열-기계적인 피로를 포함한다. 잠정적인 접합면의 유한 요소 모델링 분석은 접합된 금속의 기계적인 특성이 이러한 요건을 만족하는지 여부를 나타낸다. 효율적으로, 상기 접합구역 특성은 상기 재료의 요건에 의해 한정된 특성들을 극복해야만 한다. 비록 본 접합 프로세스가 바람직하게 기본 금속 성능의 90%를 목표로 하지만, 합성 재료 특성은 접합위치에서 약간 감소될 수 있기 때문에, 접합면은 작용하는 응력이 최소화되는 위치에 위치되어 있다.

본 발명의 한 형태는 지상기지 가스터빈을 위한 단결정을 함유하는 터빈블레이드를 만드는 방법을 제공하는 것이다. 그 방법은 터빈블레이드를 형성하기 위한 단결정 초합금을 선택하는 단계, 복수의 초합금의 각각의 주물에 의해 형성될 복수의 터빈블레이드의 세그먼트를 선택하는 단계로서 상기 세그먼트들의 위치는 감소된 응력위치에서 인접한 세그먼트들 사이에 조인트를 위치시키도록 선택되는 단계, 복수의 몰드로 초합금을 주도함으로써 상기 세그먼트들을 형성하는 단계, 그리고 상기 세그먼트들을 연결하는 단계를 포함한다.

본 발명의 다른 형태는 주물 초합금의 복수의 세그먼트를 포함하는 지상기지 가스터빈을 위한 터빈블레이드를 제공하는 것이다. 상기 세그먼트들은 상기 세그먼트들 사이의 조인트가 감소된 응력의 영역에 위치되도록 설계되어 있다.

본 발명의 이러한 형태 및 다른 형태는 이하의 상세한 설명으로부터 더욱 명확하게 될 것이다.

**도면의 간단한 설명**

도 1은 본 발명의 실시예에 따른 분할된 터빈블레이드 절반들 및 접합된 터빈블레이드의 사시도,

- 도 2는 터빈블레이드 에어포일의 단면으로부터 응력 윤곽도,
- 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 4 개로 분할된 터빈블레이드 부분의 측면도,
- 도 4는 도 3에 도시된 바와 같이 별개의 세그먼트들로 만들어진 조립된 터빈블레이드의 측면도,
- 도 4a는 도 4의 복수의 세그먼트 터빈블레이드의 섹션에 대한 단면도,
- 도 5는 도 4의 조립된 터빈블레이드의 사시도,
- 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 복수의 세그먼트 터빈블레이드의 조립을 도시하는 사시도,
- 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 다결정 초합금 접합에 대한 단결정 초합금의 미세구조를 보여주는 현미경사진,
- 도 8은 단결정 초합금과 다결정 초합금 조인트의 접합구역을 가로지르는 다양한 원소의 농도를 도시하는 그래프,
- 도 9는 단결정 니켈계 초합금에 대한 바람직한 미세구조를 보여주는 현미경사진,
- 도 10은 본 발명의 실시예에 따른 접합될 수 있는 단결정 니켈계 초합금의 미세구조를 보여주는 현미경 사진,
- 도 11은 도 10의 초합금의 전이액상 접합구역의 미세구조를 보여주는 현미경사진,
- 도 12는 붕소를 함유하는 포일과 접합된 단결정 니켈계 초합금의 주조상태구조를 보여주는 현미경 사진,
- 도 13은 열처리 후 도 12의 초합금의 미세구조를 보여주는 현미경사진,
- 도 14는 붕소를 함유하는 포일과 접합된 단결정 니켈계 초합금의 전이액상 접합지대를 가로지르는 몇몇 원소의 농도를 도시하는 그래프,
- 도 15는 본 발명의 실시예에 따른 전이액상 접합 및 열처리를 받는 단결정 니켈계 초합금의 미세구조를 보여주는 현미경 사진,
- 도 16은 본 발명의 실시예에 따른 접합 및 열처리를 받는 단결정 니켈계 초합금의 바람직한 미세구조를 보여주는 현미경 사진,
- 도 17은 고 붕소함유 포일과 접합된 단결정 니켈계 초합금의 접합라인에 형성된 유해한 붕산화물 입자를 보여주는 현미경사진,
- 도 18은 도 17의 접합라인을 확대하여 보여주는 현미경사진,
- 도 19는 고 붕소함유 포일과 접합된 단결정 니켈계 초합금에 있어서 고용화된 접합지대를 보여주는 현미경사진,
- 도 20은 본 발명의 실시예에 따른 고용화 및 석출처리를 받는 단결정 니켈계 초합금의 접합지대에 있어서 개선된 미세구조를 보여주는 현미경사진,
- 도 21은 단결정 니켈계 초합금의 대향면들 사이에 접합라인을 보여주는 현미경사진,
- 도 22는 본 발명의 실시예에 따른 단결정 니켈계 초합금 세그먼트의 두 대향면의 전이액상접합에 앞서 단결정 니켈계 초합금 부분의 두 대향면 사이에 미세한 틈새를 보여주는 현미경사진,
- 도 23은 단결정 니켈계 초합금 세그먼트들 사이의 접합라인을 도시하는 현미경사진, 그리고
- 도 24는 본 발명의 실시예에 따른 기계가공될 수 있는 터빈블레이드 에어포일 세그먼트들의 단면도이다.

**실시예**

본 발명에 따르면, 단결정 초합금 터빈블레이드의 고 산출률의 생산은 터빈에 대한 단결정 블레이드의 비용을 감소시킨다. 현재 단일 주물로서 블레이드의 20% 보다 낮은 산출률이 주물의 두께에 주요한 난점을 가지고 있는 큰 지상기지 터빈블레이드에 대하여 예상된다. 주물의 두께를 약 2 또는 2.5cm(약 0.75 또는 1인치) 이하로 감소시키는 것은 결점을 감소시키고 산출률을 증가시킨다. 블레이드의 절반섹션에 대한 주물 산출률은 그것들의 감소된 두께 때문에 90% 정도로 되어야만 한다. 접합 산출률은 또한 약 90%가 되어야만 한다. 그러므로, 본 발명의 접합된 블레이드의 생산률은 단일체 주물에 대해 예측된 20% 산출률에 비해 약 80% 또는 그 이상이 될 수 있다.

여기서 사용된 바와 같이, "터빈블레이드"는 터빈의 회전 블레이드 및 고정베인을 포함하는 지상기지 가스터빈의 구성요소를 의미한다. 회전 블레이드는 전형적으로 에어포일 부분 및 플랫폼을 포함하는 루트 부분을 포함한다. 고정 베인은 전형적으로 중심 에어포일 부분 및 회전 블레이드의 루트 부분에 상당하는 것으로 간주될 수 있는 2 개의 측면부분을 포함한다. 터빈블레이드는, 바람직하게 적어도 약 12 인치의 전체 길이, 적어도 약 4인치의 에어포일 코드 및 적어도 약 5/16인치의 에어포일 두께를 가지는 것으로서, 비교적 크다. 회전 블레이드에 대해서는, 블레이드의 에어포일 부분의 최소 길이가 바람직하게 적어도 약 7인치이고, 반면에 블레이드의 루트 부분의 최소 길이는 적어도 약 5인치이다. 상기 회전 블레이드의 루트 부분은 바람직하게 적어도 약 3인치의 폭을 가지고 있다. 본 터빈블레이드는, 약 11인치의 길이를 가지는 에어포일 부분 및 약 7인치의 길이를 가지는 루트 부분을 가지고서, 전형적으로 약 18인치의 전체 길이를 가지고 있다. 에어포일 부분의 코드는 전형적으로 약 6인치이고, 반면에 에어포일 부분의 두께는 전형적으로 약 1인치이다. 루트 부분은 약 4 또는 5인치의 전형적인 폭을 가지고 있다. 회전 블레이드에 대해서는, 에어포일 부분은 블레이드의 전체 무게의 약 20%에 해당하고, 반면에

루트 부분은 전체 무게의 약 80%에 해당한다. 본 터빈블레이드는 바람직하게 10파운드 이상의 무게를 가지고 있고, 전형적으로는 약 20 내지 약 30파운드이다. 이것은 전형적으로 약 2파운드의 무게를 가지고 있고 실질적으로 보다 작은 크기를 가지고 있는 항공기 터빈블레이드와 비교된다.

본 발명에 따르면, 조인트 구역이 없이 일체로서 대개 주조되는 가스 터빈블레이드는 2개 또는 그 이상의 편으로서 주조될 수 있고 조인트 면이 예상된 저 응력의 구역을 따라서 위치되고 있고, 그리고 조인트 면이 어떠한 날카로운 각을 이룬 돌출부 또는 돌입부로 구성되지 않으면 계속하여 연결될 수 있다. 예상된 저 응력의 한 구역은 대략적인 중간 평면 또는 블레이드 에어포일의 캠버-라인을 따라서 놓여 있다. 그 다음에 이 캠버-라인 면은 블레이드의 완전한 분할을 제공하도록 블레이드의 루트 속으로 뻗어 있다. 계속하여, 전이역상접합과 같은 고 품질의 접합 프로세스를 사용하여 이 면을 가로지르는 접합은 사용되고 있는 단지 최소 응력을 경험하도록 예상된 구역 내에 고 품질의 접합을 제공한다.

캠버-라인 방법에 기초한 선택된 면은 일반적으로 작용 도중에 매우 낮은 횡응력의 면이다. 실제 접합 면은 블레이드 내의 응력이 이 구역 내에서 비교적 서서히 변화하기 때문에 이 캠버-라인 면에 매우 큰 접하도록 선택될 수 있다. 접합면을 가로지르는 날카로운 돌입부 및 돌출부들이 사용되고 있는 접합 평면을 가로지르는 응력 집중을 유발하기 때문에 접합면은 접합면을 가로지르는 날카로운 돌입부 및 돌출부를 회피해야만 한다. 이질적인 돌입부 및 돌출부를 회피하면서 캠버-라인 면에 접근하는 것의 2 가지 기준을 결합하는 바람직한 방법은 캠버-라인에 바탕을 둔 결합구조 섹션으로부터 시작하는 것과 상기 섹션에 나타나는 어떠한 돌입부 및 돌출부의 곡률 반경을 증가시키는 것이다. 그 다음에 이 수정된 분할 평면은 모든 지점의 응력이 재료의 성능한계 이하에서 적당한 것을 결정하도록 유한 요소 분석법을 사용하여 분석될 수 있다. 접합면의 돌입 및 돌출구역의 완전한 제거는 이를 수 없고, 그리고 돌입 및 돌출 구역의 존재는, 특히 터빈의 회전에 의해 발생될 원심적인 응력의 작용 하에서, 접합된 블레이드의 기계적인 특징을 향상시킬 기계적인 맞물림의 정도를 제공할 수 있다는 것을 주의하라.

중심 라인 위치는 블레이드 세그먼트들에 대한 초기의 주요한 맞물림면을 한정한다. 그 다음에 에어포일의 선도하는 에지와 뒤따르는 에지의 외부 벽면에 대한 돌파구는 결합구조의 고려 하에서 수정된다. 선도하는 에지벽 돌파구는, 전형적으로 단편 주물 왁스 패턴 코어 다이 스플릿 라인인, 선도하는 에지벽 반경의 정점에 의해 위치되어 있다. 뒤따르는 에지에서, 맞물림면의 위치를 한정하는 뒤따르는 에지 반경의 정점에 의해 이러한 동일한 방법이 계속된다. 제안된 세그먼트화의 이러한 수정 후에, 새로운 접합 평면을 가로지르는 예상된 설계 응력은 유한 요소 모델을 사용하여 재분석되고 접합된 금속의 예상된 특성에 비교된다.

본 발명의 다른 실시예에 따르면, 플랫폼 및 루트가 다른 조건하에서 주조될 수 있는 동안 매우 엄격한 조건하에서 매우 높은 정밀구조로서 플랫폼으로부터 에어포일을 분리시키고 루트부분은 에어포일을 주조하는 것을 허용한다. 각 주물의 길이 및 두께를 감소시킴으로써, 주물 산출률은 개선될 수 있다. 이러한 형태에 있어서, 플랫폼으로의 에어포일의 연속은 에어포일-플랫폼 필릿 반경의 바닥부의 패턴을 뒤따르고 적어도 플랫폼으로 충분히 깊게 뻗어서 국소의 방사상 응력이 접합된 재료특성의 목표수준 이하로 떨어진다. 이것은 에어포일벽 두께와 동등한 깊이에서 발생하고 에어포일벽 두께와 동등한 깊이에서 응력은 그 섹션을 가로질러서 매우 낮고 일정하다. 이 위치에서, 실행온도는 또한 에어포일 온도 이하로 수 백도 떨어진다.

남아있는 블레이드 부분의 세그먼트화는 플랫폼의 결합구조의 쌍을 이룬 틈새 및 루트샹크(shank) 영역이다. 이러한 세그먼트화는 주로 주물 산출률을 더욱 향상시키기 위해서 주물의 단편크기를 감소시킨다. 남아있는 루트섹션은 대략 동일한 두께를 가진 부분으로 분할될 수 있다. 이러한 분할은 본질상으로 한 방향으로 만곡되어 있는 연속적으로 만곡된 면을 생산할 수 있다. 이 평면을 가로지르는 응력 및 온도는 비교적 낮다.

요구된 응력이 예를 들면, 모(parent)금속의 약 80% 보다 더 작은 접합면을 선택함으로써, 모든 설계기준은 만족될 수 있다. 접합 프로세스는 모듈러스를 변화시키지 않고 최종 블레이드 결합구조는 접합된 주물 또는 단편의 주물에 대해 동일하기 때문에, 어떠한 빈도(frequency) 변화도 예상되지 않는다. 접합면은 특히 열-기계적인 피로 및 저 사이클 피로가 한계에 접근할 수 있는 그러한 위치로부터 이격되어 선택된다. 특히 접합구역에서, 열-기계적인 피로 및 저 사이클 피로 라이프가 심지어 특성에 있어서 두드러진 감소를 가지고서 초과될 것이다. 다양한 모드에 대한 일정하고 진동성의 응력기여는 접합평면을 가로지르기 보다는 평행하거나 또는 매우 낮은 수준에 있다.

도 1은 세그먼트화된 개략도가 통상적인 코어형 블레이드의 중간에서 아래로 유효하게 분할되어 있는 2개의 블레이드 반쪽을 만드는 방법을 도시하고 있다. 루트섹션의 접합면은 블레이드의 캠버-라인으로부터 루트섹션의 중심평면으로의 접합면의 변이를 수용하는 비교적 완만한 곡선을 나타낸다.

도 2는 예상된 응력이 블레이드 재료의 예상된 성능 이하에서 유효하다는 것을 보여주는 블레이드 에어포일의 섹션의 유한 요소분석의 외형화된 응력도를 나타낸다.

CMSX-4와 같은 단결정 초합금에 대한 접합평면의 선택은 본 전이역상 접합 프로세스가 접합구역내에 있어서 예상된 기본금속 성능의 대략 80 또는 90%를 만들 수 있다는 사실에 기초하고 있다. 유한 요소 분석에 의해 결정된 것과 같이, 이것을 요구된 성능/강도에 비교하면, 그것은 선택된 접합면을 가로질러서 상기 요건이 기본 금속특성의 20%보다 더 작다는 것을 보여준다.

단결정 블레이드의 제어하는 단면은, 예를 들면 약 102 mm(4 인치)의 두께가 될 수 있다. 상기 블레이드를 복수의 부분으로 설계함으로써, 이러한 단면은 그것의 최대 폭의 위치에서 약 25 mm(1 인치) 이하로 작게 감소될 수 있다. 블레이드 높이의 대부분에 대해서, 주물 두께는 약 13 mm (0.5 인치)보다 더 작게 될 수 있다. 예를 들면 약 13 mm(0.5 인치)로부터 6 mm(0.25 인치)로, 단면의 폭에 있어서의 부가적인 감소가 주물 품질 및 산출율을 더욱 개선시킬 수 있다.

다른 실시예에 있어서, 터빈블레이드의 루트섹션은 2 개의 편으로 주조될 수 있다. 이것은 결합에 있어서 높은 레벨을 가지고 있는 두꺼운 루트섹션과 연관된 낮은 주물 산출율을 회피한다. 루트섹션에 대한

산출율은 일반적으로 주물섹션의 크기가 감소함에 따라 증가한다. 단결정 블레이드의 결과적인 고산출을 생산은 터빈블레이드의 비용을 절감한다.

이 실시예에 있어서, 대체로 일체로서 구조되는 가스터빈블레이드는 원만하게 변화하는 접합면에서 연속하여 연결되는 4 개의 편으로 구조될 수 있다. 캠버-라인을 따라 있는 에어포일섹션의 초기 분할은 앞서 기술한 바와 같이 수행될 수 있다. 이러한 세그먼트들의 각각은 그 다음에 블레이드의 루트를 통하여 더욱 세분화되어 있다. 이러한 분할에 의하여 만들어진 면은, 본질상으로 일련의 평면섹션인 주물의 외면과 이전의 세그먼트화에 의해 한정된 내부 접합면 사이의 대략 중간에 놓여 있다.

이러한 면은 실행 중에 낮은 부하에 노출되어 있는 면이어야 하고, 그리고 날카로운 돌입부 및 돌출부를 포함하지 않아야 한다. 내부/고유 접합면이 최소의 표면외형을 가지도록 제한되어 있기 때문에, 새로운 접합면은 곡률의 증가된 반경을 가지고 있는 돌입부 및 돌출부를 가지도록 제한되어 있다. 그러므로, 그것들은 심지어 블레이드의 초기 분할에 있어서 보여진 것보다 훨씬 더 작은 응력집중을 나타낸다. 더우기, 루트의 두꺼운 단면 및 그 루트가 노출되는 비교적 낮은 온도 때문에, 이러한 2차적인 접합라인을 가로지르는 응력은 비교적 낮다.

수정된 분할평면은 응력이 재료의 성능한계 이하의 모든 점에 있는 것을 결정하도록 유한요소 분석법을 사용하여 분석될 수 있다. 접합면의 돌입 및 돌출구역의 완전한 제거는 요구되지 않는다. 외부 루트섹션과 내부 루트/에어포일 섹션 사이의 기계적인 맞물림의 약간의 정도는 바람직하다. 상기와 같은 맞물림은 외부 루트면과 내부/1차 결합평면 사이의 대략 중간에 2차 결합면을 위치시키는 기준에 의해 유효하게 만들어져 있다. 최종적으로, 루트/에어포일구역에 있는 섹션에 있어서의 급격한 변이를 회피하기 위해, 에어포일의 내부 주물세그먼트들은 그것들이 블레이드의 루트섹션으로 들어갈 때 약간 벌어질 수 있고, 외부 섹션들은 이러한 변이를 조절하기 위해 공동상태로 될 수 있다. 기계적인 맞물림의 정도는 원심성의 하중 하에서 기계적인 완전상태에 대해 유리하게 제공되어 있다.

도 3은 4 개의 부분(12, 14, 16 및 18)을 포함하는 터빈블레이드(10)를 예시하고 있다.

도 4는 조립된 형태로 있는 4 개의 세그먼트(12, 14, 16 및 18)를 가지고 있는 터빈블레이드(10)를 예시하고 있다.

도 4a는 조립된 터빈블레이드 부분(12, 14, 16 및 18)의 단면을 도시하는 것으로서, 도 4의 복수개의 세그먼트 터빈블레이드(10)의 플랫폼/루트를 통하여 취해진 단면도이다.

도 5는 4 개의 세그먼트(12, 14, 16 및 18)를 포함하는 조립된 4 개부분 블레이드 디자인의 사시도이다.

이 실시예에 있어서, 어떠한 횡단-접합면 응력도 합금, 예를 들면 CMSX-4의 성능의 20%를 초과하는 상태에 있다는 것이 확인되지 않았다.

이러한 방법의 더욱 개량된 형태로서 에어포일 섹션은 길이에 있어서 축소될 수 있어서 그것들은 단지 루트 섹션과 에어포일 섹션 사이의 적절한 접착을 허용하는 길이에 대하여 루트의 전체 길이를 늘이지 않는다. 택일적으로, 에어포일의 얇은 섹션 때문에, 일체로서 에어포일 섹션을 구조하는 것이 가능할 수 있고, 그로 인해 2 개의 에어포일 반쪽을 연결할 필요를 회피할 수 있다. 이러한 2 개의 특징이 각각의 편입될 수 있지만, 도 6은 그것들의 에어포일 주물의 질량을 감소하고 접합 프로세스를 감소하도록 동시에 편입될 수 있는 방법을 도시하고 있다. 도 6에 있어서, 터빈블레이드(20)는 3 개의 분리된 세그먼트(22, 24, 26)들을 연결함으로써 조립되어 있다.

몇몇 응용에 있어서, 터빈블레이드의 에어포일 섹션에서 단결정 성능이 단지 요구된다. 블레이드의 대부분의 질량을 포함하는 루트 섹션은 단결정 재료를 요구하는 고온 및 응력에 노출되어 있지 않다. 단결정 에어포일을 가지고 있는 블레이드의 품질 및 산출율을 향상시키는 것에 부가하여, 다결정 루트 섹션을 가지고 있는 블레이드의 제작은 블레이드의 다결정 부분의 보다 낮은 비용으로 인해 블레이드의 비용을 대폭 감소시킨다. 이 실시예는 완전히 단결정으로 만들어진 터빈블레이드에 대해 실질적인 비용 절감을 제공할 수 있다.

이 실시예에 있어서, 가스터빈블레이드는 4 개의 편으로서 구조될 수 있고 그 다음에 적어도 하나의 단결정 섹션 및 적어도 하나의 다결정 섹션을 포함하는 완전한 블레이드를 생산하도록 연결될 수 있다. 제작된 블레이드의 외부 루트 섹션은 다결정 초합금을 포함할 수 있고, 반면에 에어포일 섹션 또는 섹션들은 단결정 주물 초합금을 포함할 수 있다. 상기 분할은 이전에 기술한 바와 같이 수행된다. 그러나, 모든 주물 세그먼트는 단결정 합금으로부터 구조될 수 있는 대신에, 루트의 외부 섹션은 단결정 및 채용될 접합매질과 열처리 프로세스와 양립가능한 낮은 비용의 다결정 합금으로부터 구조된다.

이 실시예에 있어서, 2 개의 다결정 세그먼트는 에어포일의 베이스로부터 블레이드의 루트단부로 뻗어 있다. 다결정 재료에 대해 접합 사이클이 살아남기 위하여, 모든 접합부는 다결정 재료 열처리 사이클 및 온도 능력과 양립가능한 온도에서 만들어질 수 있어야 한다. 택일적으로, 단결정 재료는 보다 높은 온도에서 접합될 수 있고, 그리고 다결정 재료는 연속하여 보다 낮은 온도에서 접합될 수 있다.

비용절감을 고려한 목적은 루트 섹션의 단결정의 양을 감소시킬 것이므로, 에어포일 섹션은 짧게 될 수 있고 그래서 그것은 루트 섹션으로 작은 거리로 단지 뻗어 있다. 다결정으로 된 루트 섹션은 단결정 섹션으로부터 제거되어 있는 재료의 위치를 확보하기 위해 조정되어 있다. 단일 섹션으로서 에어포일을 구조하고 2 개의 단결정 세그먼트를 함께 접합할 필요를 회피하는 것, 즉 3-편 구성이 또한 가능하다.

함께 연결될 수 있는 재료를 선택하는 것에 있어서, 미세구조의 양립가능성 뿐만 아니라 재료의 열처리 사이클 양립가능성이 고려되어야만 한다. 대개 포일인, 접합재료는 국소 용융온도의 일시적인 하강을 제공하고 응고 후의 접합구역의 화학적 성질을 제어하도록 선택된다. 열적인 사이클 및 열처리 사이클은 접합을 제공하고 벌크로 된 합금 뿐만 아니라 접합구역의 적절한 미세구조를 만들도록 선택된다. 단결정 온도는 그것의 다결정 등가물보다 일반적으로 더 높은 상태에서, 단결정 및 다결정 합금이 다른 온도에서 열처리되고 접합되기 때문에, 단결정 및 다결정 세그먼트를 접합하는 열적인 프로세스는 단결

정 및 다결정 세그먼트의 최적화 된 구조를 만들기 위해서 주의 깊게 선택되어야만 한다.

전이액상접합과 같은 고 품질의 접합 프로세스를 사용하는 목적은 통상 금속부분의 벌크에 있는 접합구역내의 본질상으로 동일한 화학적 성질 및 미세구조를 만드는 것이다. 이것은 일반적으로, 용해 및 재응고 도중에 발생할 바람직한 편석을 고려하면서, 접합포일의 화학적 성질을 기본 금속의 화학적 성질에 일치시키므로써 성취된다. 그러나, 티탄 및 알루미늄과 같은 원소들은 이러한 원소들이 기본 금속으로부터 용해될 것이고 응고 후에 접합라인의 중심으로 편석하는 경향이 있을 것이 때문에 기본 금속에 비해 접합포일 내에서 감소되어야만 한다. 다결정 및 단결정 합금은 다른 화학적 조성물(표 1을 참고)을 가지고 있기 때문에 단결정-대-다결정 접합조인트의 각 측에 대해 접합포일 조성물의 동일한 일치성은 가능하지 않을 수 있다. 그러나, 몇 개의 합금세트는 매우 유사한 조성물 및 감마 프라임의 부피율을 보이기 때문에, 접합될 유사한 조성물의 다결정 및 단결정 합금을 선택하고, 그리고 각 합금 양자를 접합하기 위해 사용된 접합포일을 가지고서 그것들의 조성물을 일치시키는 것이 가능하다.

표 1은 몇 개의 단결정 및 다결정 합금의 조성물을 보여준다. 이 표로부터 단결정 합금의 몇 개의 세트는 몇몇의 다결정 합금, 예를 들면 CMSX-4 및 CM186, PWA1480 및 MarM247, SC-16 및 IN738과 조성적으로 유사하다는 것이 관찰될 수 있다. 사실상, CMSX-4 및 CM274는 전이액상접합 프로세스를 사용하여 양호한 접합의 생성을 허용하기 위해 화학적 성질 및 구조에 있어서 충분히 유사하다. 이것은 이러한 합금들에 있어서 유효한 차이가 고체 및 액체 상태에서 쉽게 용해되지 않는, 레늄 함유량 때문이다. 더우기, 접합구역을 가로지르는 레늄의 변화도는 접합조인트의 성능에 유해하지 않는 구조 및 특성에 있어서의 점진적인 변이를 제공한다.

[표 1]

단결정 및 다결정 티타늄블레이드 합금 (무게 퍼센트)

합금	니켈	크롬	코발트	알루미늄	티탄	니오브	몰리브덴	탄탈	텅스텐	레늄	하프늄	지르코늄	붕소	탄소	부피 % $\gamma'$
CMSX-4	나머지	6.6	9.6	5.5	1.0	---	0.6	6.5	6.4	3	0.9	---	---	---	62
PWA1484	나머지	5	10	5.6	1	---	---	8.7	6	3	0.1	---	---	---	64
PWA1480	나머지	10	5	5	1.5	---	---	12	4	---	---	---	---	---	63
SC-16	나머지	16	---	3.5	3.5	---	3	3.5	---	---	---	---	---	---	41
CMSX-11	나머지	12.5	7	3.4	4.2	0.1	0.5	5	5	---	0.04	---	---	---	~45
CM247	나머지	8.1	9.2	5.6	0.7	---	0.5	3.2	9.5	---	1.4	0.015	0.015	0.07	62
MarM002	나머지	9	10	4.7	1.7	1	---	---	12.5	---	---	---	---	---	57
MarM002	나머지	9	10	5	2	1	---	---	12.5	---	1.8	0.06	0.02	0.14	58
MarM246	나머지	9	10	5.5	1.5	---	2.5	1.5	10	---	---	0.06	0.015	0.15	65
CM186	나머지	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
IN792	나머지	12.4	9	4.5	4.5	---	1.8	3.9	3.9	---	1	0.02	0.015	0.08	45
IN738	나머지	16	8.5	3.4	3.4	0.9	1.75	1.75	2.6	---	---	0.1	0.01	0.11	37

표 2는 단결정 및 다결정 합금의 세트를 접합하도록 적용될 수 있는 전형적인 접합합금을 보여준다. 알루미늄-다량함유 단결정의 적절한 합금 일치성은 니켈-플렉스 타입의 합금을 사용하여 접합함으로써 얻을 수 있다. 이러한 포일들은 또한 이 타입(예를 들면, CM247, MarM247 및 MarM002)의 다결정합금을 접합하도록 사용될 수 있다. 그러므로, 이러한 접합포일들은 다결정 합금, 예를 들면 CM247류에 유사한 CMSX-4 타입 단결정 합금을 접합하도록 사용될 수 있다. 반대로, 크롬을 다량 함유하고 있는 재료, 예를 들면 단결정 SC-16 타입을 IN738 타입 다결정 합금으로 접합하기 위해, MFB80/80A 등과 같은 타입의 포일이 바람직하다.

[표 2]

접합포일의 화학적 성질 (무게 퍼센트)

포일 타입	니켈	크롬	코발트	텅스텐	탄탈	몰리브덴	철	하프늄	알루미늄	티탄	붕소	탄소	규소
니켈-플렉스 110 (1.3 붕소)	나머지	10.0	5.0	4.0	4.0	---	---	---	2.0	---	1.3	---	---
니켈-플렉스 110 (1.7 붕소)	나머지	10.0	5.0	4.0	4.0	---	---	---	2.0	---	1.7	---	---
니켈-플렉스 110 (2.5 붕소)	나머지	10.0	5.0	4.0	4.0	---	---	---	2.0	---	2.5	---	---
니켈-플렉스 115 (3.0 붕소)	나머지	9.0	8.0	4.0	4.0	---	---	1.0	2.0	---	3.0	---	---
니켈-플렉스 120 (1.7 붕소)	나머지	10.0	5.0	5.0	3.0	---	---	---	---	1.0	1.5	---	---
니켈-플렉스 120 (1.9 붕소)	나머지	10.0	5.0	5.0	3.0	---	---	---	---	1.0	1.7	---	---
니켈-플렉스 121 (2.4 붕소)	나머지	10.0	10.0	5.0	---	---	---	---	---	---	2.4	---	---
니켈-플렉스 121 (3.0 붕소)	나머지	10.0	10.0	5.0	---	---	---	---	---	---	3.0	---	---
MBF20/20A	나머지	7.0	---	---	---	---	3.0	---	---	---	3.2	0.06	4.5
MBF80/80A	나머지	15.2	---	---	---	---	---	---	---	---	4.0	0.06	---

단결정 합금을 다결정 합금에 접합하는 실례로서, 단결정 CMSX-4가 다결정 CM247 합금에 접합될 수 있다. 바람직한 접합 프로세스는 : 0.05 미크론의 다듬질로 기계적으로 연마된 면; 니켈-플렉스110 1.3 붕소 포일; 2,250°F의 접합온도; 그리고 4시간의 접합시간으로 되어 있다.

도 7은 저 배율에서 접합라인의 구조를 도시하고 있다.

도 8은 단결정 CMSX-4와 다결정 CM247 사이의 접합에 대한 상응하는 화학적 성질의 변화를 도시하고 있다.

완전한 프로세스로서 블레이드 부분을 접합시키기 위해, 구성요소의 단결정 및 다결정 부분 양자에 대한 열처리 사이클을 통합하는 것이 바람직하다. 특히, 단결정 재료에 대하여 채용된 고 고용화열처리 온도에 저항하는 것이 통상적으로 주조된 다결정 재료에 대하여는 일반적으로 가능하지 않다. 표 3a-c는 단결정 및 다결정 합금, CMSX-4와 CM247에 대해 사용될 수 있는 전형적인 열처리 사이클을 예시하고 있고, 그리고 또한 완전한 단결정/다결정 블레이드의 접합을 위한 조합된 열처리 사이클이 2 개의 사이클로부터 유도되는 방법을 보여준다.

[표 3a]

CMSX4에 대한 접합 및 열처리

주물상태조건으로 2,250°F에서 접합	액상접합 및 2,250°F로부터 2,400°F 이상까지 국소용융점을 높이는 붕소의 확산
2,410°F에서 6시간 고용화열처리	접합된 일체구조 및 화학적 성질을 균질화함
4시간동안 2,084°F에서 석출열처리	계속된 시효열처리로 0.5 $\mu$ m까지 성장할 조약한 $\gamma'$ 의 초기 형성
24시간동안 1,600°F에서 시효열처리	조약한 $\gamma'$ 를 0.5 $\mu$ m까지 성장시키고 미세한, 즉 200-500 Å 크기의 2차적인 회전타원체형의 $\gamma'$ 를 석출시킴

[표 3b]

CM247에 대한 접합 및 열처리

4시간동안 2,150°F에서 접합	액상접합 및 2,150°F 이상으로 용융점을 높이는 붕소의 확산
4시간동안 2,150°F에서 고용화열처리	다결정 화학적 성질 및 $\gamma$ 상 구조를 부분적으로 균질화함
주의: 상기한 2단계는 동시에 일어날 수 있음	
4시간동안 1,950°F에서 석출열처리	계속된 시효열처리로 성장할 조약한 $\gamma'$ 의 초기형성
24시간동안 1,600°F에서 시효열처리	조약한 $\gamma'$ 를 최적의 크기( $\sim 0.5\mu m$ )로 성장시키고 200-500Å 크기의 2차적인 회전탄원체형의 $\gamma'$ 를 석출시킴. 또한 수지상 및 결정입계 탄화물을 석출시킴

[표 3c]

조합된 CMSX-4-CM247에 대한 접합 및 열처리

4시간동안 단지 2,250°F에서 SC부분을 접합	액상접합 및 2,410°F 이상으로 SC부분의 용융점을 높이는 붕소의 확산
4시간동안 단지 2,410°F에서 접합된 SC부분을 고용화열처리	SC, 접합구역의 화학적 성질 및 구조를 균질화함
4시간동안 2,150°F에서 CC를 SC부분에 접합	액상접합 및 2,150°F 이상으로 CC의 용융점을 높이기 위해 접합구역속으로 붕소의 확산; 부분적으로 CC를 고용화함; SC내에 초기의 조약한 $\gamma'$ 의 석출
4시간동안 1,950°F에서 석출열처리*	SC부분내에 조약한 $\gamma'$ 를 성장시킴; CC구역내의 초기의 조약한 $\gamma'$ 의 석출
24시간동안 1,600°F에서시효열처리	SC 및 다결정부분에 있어서 조약한 $\gamma'$ 를 거의 최적의 크기로 성장시킴; 양 부분에 있어서 미세한 2차적인 회전탄원체형의 $\gamma'$ 를 석출시킴; 또한 CC부분의 수지상/과립상의 탄화물을 석출시킴

\* 코팅사이클을 조절하기 위해 상응하는 처리방법 실행에 의해 수정될 수 있음

조합된 사이클에 있어서, 단결정 편들은 주물상태 조건으로 접합되어 있다. 상기 접합된 단결정 편들은 그 다음에 비교적 고온에서 고용화열처리된다. 상기 고용화열처리된 단결정 세그먼트 및 주물상태 다결정 세그먼트들은 다결정 재료를 접합하기 위해 채용될 조건 하에서 접합되어 있다. 이 단계는 단결정 합금에 있어서의 1차적인  $\gamma'$ 의 약간의 성장을 유발한다. 상기 접합된 전체는 그 다음에 다결정 합금에 있어서의 1차적인  $\gamma'$ 의 성장 및 단결정 합금에 있어서의 1차적인  $\gamma'$ 의 더 많은 성장을 유발하는 다른 시효처리 단계에 노출된다. 상기 접합된 전체는 단결정/다결정 블레이드에 있어서의 최적화된 미세구조를 생산하도록 양 합금에 있어서의 1차적인  $\gamma'$ 를 수정하고 또한 2차적인  $\gamma'$ 의 성장시키는 최종의 저온 시효처리 단계에 노출된다. 앞의 표에서 표시된 온도 및 시간은 전 열처리 사이클이 전체적인 구조 및 특성을 최적화하도록 선택될 수 있는 방법을 예시하고 있다.

단결정 니켈계 초합금의 접합은 기본재료에 대하여 조성상으로 유사하지만 포일의 용융온도를 억제하기 위해 약 1로부터 약 3 무게퍼센트의 붕소와 같은 부가적인 용융점 억제제를 함유하는 접합포일을 채용하고 있다. 주된 원소의 조성은 응고 후의 접합구역을 가로질러서 대략적으로 일정한 화학약품의 분배를 제공하기 위해 기본재료의 조성과 유사하다. 페이스트 또는 포일로서 접합매체의 화학적인 성질, 그리고 접합을 유효하게 하도록 요구된 열적인 사이클은 제어될 수 있고 그래서 결과적인 조인트는 화학적인 성질 및 미세구조의 연속적인 단계적 변화를 보여주고 접합구역에서 생산된 상기 특성들은 기본 단결정 또는 다결정 재료의 특성, 혹은 보다 약한 기본재료 구성요소 특성의 적어도 약 80% 사이에서 일반적이다. 그러나, 에어포일의 구역과 같은 터빈블레이드의 중요한 부분에 있어서는, 기본재료의 완전한 특성이 실현된다.

접합 프로세스는 포일의 용융정보다는 높지만 합금의 매크로-용융정보다는 낮은, 예를 들면 약 100 내지

150°F의 온도에서 등온적으로 일어난다. 접합 열사이클은 접합된 접촉면으로부터 붕소를 분산시키기 위해 고체상태 확산을 유발하기에 충분하고, 그로 인해 단결정의 통상적인 열처리에 적합한 재료를 만들기 위해 국소 용융점을 상승시킨다. 상기 방법은 CMSX-4 등과 같은 단결정 합금을 접합하기 위해 사용될 수 있다.

지상기 가스터빈의 블레이드와 같은 큰 부분을 접합하기 위한 부분들의 준비는 두 면 사이에서 약 0.0025 cm(0.001 인치)의 정도로 매우 양호한 접합면 일치성 또는 설치를 요구한다. 이러한 정밀도는 주조 후에 저응력 연삭/상기 면들의 기계가공 또는 맞물림 부분의 공동-전기방전 기계가공에 의해 부분적으로 만들어질 수 있다. 이러한 절차는 약 0.0025 cm(0.001 인치)의 범위내에 있는 면외형을 만든다. 상기 방법은 또한 충분히 변형되지 않고 연속적인 접합 및 단결정 합금의 고온 고용화열처리, 예를 들면, 2,408°F에서 CMSX-4의 고용화열처리를 포함하는 열처리 사이클 동안 재결정화에 대해 손상되지 않는 면들을 만든다.

본 발명의 한 실시예에 따르면, 가스터빈 구성요소의 단결정 부분을 서로에 대해 접합시키는 능력은 무결정의 단결정 블레이드 및 베인의 비용효율적인 제작에 대한 가능성을 제시할 뿐만 아니라 통상적인 일체형 주물에 의해 제작될 수 없는, 정확하게 파형 가공된 냉각 통로와 같은, 개량된 기하학적인 특성을 포함하는 개량된 구성요소의 개발을 허용한다. 본 방법은 가스터빈을 위한 복잡한 무결정 단결정 부분들의 고산출을 생산을 가능하게 한다.

극심한 온도 및 응력 작용조건이 단결정 가스터빈 구성요소에 대해서 계획되었기 때문에, 접합된 단결정은 접합라인을 가로질러서 연속적이고 거의 최적의 화학적 성질, 결정구조 및 미세구조를 나타내어야 한다. 이러한 조건 하에서 접합구역의 특성은 기본재료의 기계적인 특성의 요건을 나타낸다. 특히, 고온 강도 요건은 접합구역의  $\gamma/\gamma'$  미세구조가 단결정의 다른 곳에서의  $\gamma/\gamma'$  미세구조와 실질적으로 동등해야만 한다는 것을 나타낸다. 합금 CMSX-4에 의해 예시된 바와 같이 제 2세대 초합금에 대해 이것은 입방체들 사이의  $\gamma$  채널 내의  $\gamma'$ 의 보다 미세한 회전 타원체의 2차적 및 3차적인 분포를 가진  $\gamma'$ 의 대략 0.5 $\mu$ m 입방체의 연속적인 정규의 배치이다.

도 9는 단결정 합금 CMSX-4를 위해 이러한 최적의 구조를 예시한다. 이러한 구조는 크리프저항 같은 가장 고온시간 독립특성을 제공하도록 최적화된다.

전이액상접합은 초합금에서 고질의 조인트를 생성하는 결합프로세스다. 이러한 등온과정에 있어서, 접합재료 예컨대 포일 또는 덩어리가된 페이스트의 얇은 스트립은 접합될 재료의 두 부분 사이에 위치된다. 접합재료는 기본재료와 유사하지만 합금에서 신속한 고체상태 확산을 또한 보여주는 용융점을 낮추는 원소의 추가적인 첨가를 또한 포함한다. 니켈계 합금을 위해 규소 및 붕소는 바람직한 용융점 억제제이다. 접합된 단결정에서 할 수 있는 고온적용을 위해, 구성요소인 붕소는 규소가 부식문제를 야기시킬 수 있으므로 바람직한 원소이다.

본 접합 프로세스는 기본재료의 체적용융점 아래가 아니라면 포일의 용융점 위에 놓여있는 온도에서 실질적으로 등온적으로 실행된다. 붕소가 풍부한 포일로서 접착의 어느 한측상의 기본재료에 혼합되어 기본 금속의 일정용해와 더 넓은 액체지대를 만들어 낸다. 액체지대가 넓어짐에 따라 액체에 있는 붕소의 농도가 용융풀(pool)이 평형액상농도에 있는 붕소에서 충분히 희석된다. 동시에 고체상태확산은 붕소가 접합풀에 둘러싸임으로부터 제거되게 한다. 이들 두 프로세스는 두 고체 전면이 접합의 거의 중심선에서 만날 때까지 접합풀로부터 용융점 억제제의 감소를 낳는다.

접합매체의 화학성질과 접합프로세스의 온도를 주의깊게 제어함으로써, 본 등온 접합프로세스는 접합지대내의 화학성질과 기본재료의 미세구조를 다시 생성시키도록 제어될 수 있다.

접합프로세스시, 소정의 매개변수가 바람직하게 제어된다. 용융점 억제제의 양은 기본재료보다 충분히 낮은 온도에서(즉 수 백 °F) 용융될 접합포일을 제공하기에 충분해야 한다. 접합온도는 양질의, 잘 혼합된 접합지대를 생성하도록 접합포일과 기본재료의 유사한 두께를 용융하기에 충분하여야 한다. 접합포일의 양은 기본재료의 용융을 생성하고 매우 잘 제어된 접합 조인트를 제공하기에 충분하여야 한다. 접합지대 용융과 재결정화는 해로운 화학적 성질과 상분리가 접합지대내에서 일어나지 않도록 충분히 잘 제어되어야 한다. 접합포일(즉, 니켈, 크롬, 코발트, 알루미늄, 티탄, 탄탈, 텅스텐, 몰리브덴, 니오브 등)의 주 원소 화학성질은 화학성질과 접합지대의 구조가 기본재료의 구조와 효과적으로 연속적이 되도록 접합될 재료에 충분히 잘 맞추어야 한다. 접합포일성분은 어떠한 혼합이 용융지대에서 일어나기 때문에 기본재료의 성분과 일치될 필요는 없다. 또한 알루미늄과 티타늄은 최종재료로 분리되어 고체화되고, 이들 원소는 접합포일로부터 제거되어 접합중심선에서 해로운  $\gamma'$ 공정물을 형성하지 않는다. 게다가, 접합부를 가로질러 결정을 제어하거나 맞추고, 접합될 단편의 결정학적인 설정방향에 맞추는 것이 바람직하다. 등온 접합을 위한 기초 재료성분, 이것의 용융점, 접합포일 주 원소성분, 붕소의 양과 온도는 현 과정에 의해 생성된 접합구조와 화학성질을 결정하는 이 모두를 가로지르는 변하기 쉬운 성질이 있다. 붕소를 니켈계 합금에 추가하는 것은 각각의 무게퍼센트 추가당 약 100 내지 150 °F로 용융점을 낮춘다. 2,400 °F이상의 용융점과 분리된 주조형태상의 초기용융점이 다소 낮은 상태로, 포일은 약 1 내지 3 무게 퍼센트 붕소를 함유하여 전체용융 없이 국부적인 용융을 가능하게 하는 2,000 내지 2,300 °F 상태r내로 용융점을 감소시킬 수 있다. 접합포일의 주 원소 성분이 기본재료에 이상적으로 매우 가깝다 하더라도, 상당한 차이가 실질적으로 허용될 수 있다. 단결정 초합금에 있는 많은 합금원소들 때문에, 성분에 있어서 작은 차이는 용융점에 현저하게 영향을 주지 않는다. 또한, 기본재료를 접합지대 용융풀내로 용해시키는 것은 접합포일과 기본금속성분에서의 차이를 상호보충하려는 의도가 있다. 게다가 레늄같은 어떤 값비싼 원소는 원가를 줄이기 위해 포일에 바람직하지 않을 수 있다. 최종적으로 접합구역의 재결정화시 공정체  $\gamma'$ 형태를 내리누리기 위해 접합포일의 티탄과 알루미늄 내용물은 감소되어야 한다.

본 방법은 니켈계 단결정 초합금 CMSX-4에 적용될 수 있다. 합금의 성분은 표 4에 표시한다. 또한 표 4의 리스트는 CMSX-4의 단결정과 전이액상접합을 조작하는데 사용될 수 있는 몇몇의 접합포일의 성분이다.

다.

[표 4]

기본 합금 및 접합 포일의 조성물 (무게 퍼센트)

합금	니켈	크롬	코발트	알루미늄	티탄	니오브	몰리브덴	탄탈	텅스텐	레늄	하프늄	지르코늄	붕소
CMSX-4	나머지	6.6	9.6	5.5	1.0	---	0.6	6.5	6.4	3	0.9	---	---
텅스텐-포일 1	나머지	6.5	9.6	5.5	1.0	---	0.6	6.5	6.4	3	0.9	---	1.5
텅스텐-포일 2	나머지	6.5	9.6	2.9	0.5	---	0.6	6.5	6.4	3	0.9	---	1.5
텅스텐-포일 3	나머지	6.5	9.6	5.5	---	---	0.6	6.5	6.4	3	0.9	---	1.5
텅스텐-포일 4	나머지	6.5	10	2.9	---	---	0.6	6.5	6.4	3	0.9	---	1.5
니켈-플렉스 (1.3 붕소)	나머지	10	5.0	2.0	---	---	---	4.0	4.0	---	---	---	1.3
니켈-플렉스 (1.7 붕소)	나머지	10	5.0	2.0	---	---	---	4.0	4.0	---	---	---	1.7
니켈-플렉스 (2.5 붕소)	나머지	10	5.0	2.0	---	---	---	4.0	4.0	---	---	---	2.5
니켈-플렉스 (3.0 붕소)	나머지	9.0	8.0	2.0	---	---	---	4.0	4.0	---	1.0	---	3.0
니켈-플렉스 (1.7 붕소)	나머지	10.0	5.0	1.3	1.0	---	---	5.0	3.0	---	---	---	1.5
니켈-플렉스 (1.9 붕소)	나머지	10.0	5.0	1.3	1.0	---	---	5.0	3.0	---	---	---	1.7
니켈-플렉스 (2.4 붕소)	나머지	10.0	10.0	---	---	---	---	5.0	---	---	---	---	2.4
니켈-플렉스 (3.0 붕소)	나머지	10.0	10.0	---	---	---	---	5.0	---	---	---	---	3.0

텅스텐-포일 1 내지 4는 용융점 강하를 위해 추가된 1.5 무게퍼센트 붕소를 갖춘 CMSX-4 합금성분의 파생물이다. 알루미늄과 티타늄의 양은 CMSX-4 접합의 화학성분과 구조상에 부가물을 형성하는 공정체  $\gamma'$ 의 효과를 고려하도록 조정된다. 니켈플렉스 포일은 Medford, MA의 재료개발 회사로부터 획득가능한 일련의 상업적 포일이다. 이들 포일의 성분이 CMSX-4와 현저하게 다르게 나타난다 하더라도, 우수한 접착은 아래에 설명하는 바와 같이 몇몇의 이들 포일로 만들어진다.

접합온도는 포일의 용융점과 기본재료의 용융점사이에 있도록 선택된다. 붕소가 각각의 무게퍼센트 추가당 약 100 내지 150 °F로 니켈합금의 용융점을 낮추기 때문에, 1 내지 3 무게퍼센트 붕소는 2,400 °F 이상으로부터의 단결정합금의 용융점을 2000 내지 2300 °F범위 내로 낮춘다. 붕소 내용물에 대해 접합온도의 제어는 접합지대의 폭, 용해가 발생하는 원소의 혼합 및 재응고가 발생하는 편석을 결정한다. 보다 고온의 접합은 용융된 포일, 양호한 접합물 혼합 및 붕소의 가속화된 고체상태 확산에 의해 접합면이 빠르게 젖게하여 재응고 처리율을 증가시킨다. 또한 고온 접합은 감소된 붕소를 함유한 포일을 사용하게 하여 재결정화 처리시 붕산화물 입자의 잠재적인 형성과 광범위한 고체상태를 필요로 하지 않게 한다.

초기 실험후, 4 시간 동안 2,250 °F의 접합사이클은 이 온도가 제어된 접합구역을 생성시키고 어떠한 해로운  $\gamma'$  성장을 나타나지 않았기 때문에 접합포일용으로 선택된다. 기초합금 및 포일의 큰 합금 내용물 때문에, 포일의 금속 원소성분은 기초합금의 용융점 낮춤에 현저한 효과를 내지 못한다. 그러나, 재결정화된 접합지대의 화학적 성분과 열처리시 접합지대내에 발생된 미세구조에 현저한 효과를 갖는다.

재결정화 후에 접합지대내의 원소들의 화학적 편석은 접합프로세스의 제1 상태시 기본재료의 용해의 정도와 접합지대 크기에 의해 제어된다. 또한 기본재료의 상태 즉, 분리 또는 균질화 물질의 상태에 의해 영향을 받는다. 이러한 논점은 분리된 주물의  $\gamma'$ 이 풍부한 상호수지상 구역의 우선적인 용해로 인해,  $\gamma'$  공정물 이 접합라인에 형성된 많은 붕소를 함유하는 포일과 주물상태 CMSX-4의 접합에 있어서 명백하게 된다. 이 공정 재료는 그 다음 접합라인에 재배치된다. 많은 붕소를 함유한 포일이 사용되면 이러한 문제는 균질화된, 용해처리된 CMSX-4를 사용함으로써 감소되거나 없어진다. 이러한 경우에 있어서, 균질화된 구조는 일정하게 용융되어  $\gamma'$  공정물을 형성하는 원소에서 덜 풍부한 용융물을 생성한다. 결과적으로 재결정화된 접합지대는 해로운  $\gamma'$  공정물을 보여주지는 않는다.

[표 5]

CMSX-4에 대한 램프된 고용화 열처리 사이클

시간 (분)	온도 (°C)	온도 (°F)
0	23	73
60	1027	1880
80	1027	1880
110	1235	2255
140	1235	2255
170	1260	2300
185	1260	2300
215	1277	2330
335	1277	2330
365	1288	2350
485	1288	2350
500	1296	2365
680	1296	2365
695	1304	2380
875	1304	2380
890	1313	2395
1130	1313	2395
18시간 50분		전 사이클 시간

사후-접합열처리는 최적의 화학성질 및 구조를 접합구역 뿐만아니라 기본금속의 잔여부분에 생성하여야 한다. 이러한 열처리 사이클은 주물 및 재결정화 후에 획득된, 분리된 구조를 균질화하여야 하고, 또한  $\gamma'$ 을 강화시키는 석출물의 최적의 형태의 성장과 석출을 야기시킨다. CMSX-4에 대해 권고된 통상적인 고용화 및 열처리사이클이 이것을 성취하기에 적합하다. 바람직하게 이 고용화처리는 표 5에 일치하는 형태의 급격한 열처리이다. 이러한 사이클시 온도를 천천히 증가 시킴으로써, 국부적인 용융온도를 올리는 고체상태의 상호확산을 하게 함으로써 초기 용융은 실질적으로 피해진다. 이러한 프로세스는 주물 상태 단결정을 균질화하는데 효과적이고, 또한 재결정화된 접합지대를 균질화하는데 효과적이다. 더욱이, 단결정을 통해 붕소의 분산을 증가시키는데 효과적이어서 붕소가 풍부한 접합라인의 용융을 방지한다. 예를 들면, 2,250 °F에서 4 시간 후에 전개된 접합지대가 2,408 °F의 정점 고용화 처리온도 아래에 용융점을 가질 수 있는 것은 잠재적인 문제를 피하는 것을 돕는다. 이 잠재적인 문제는 2,250 °F에서 4 시간이 분리된 단결정을 균질화하는 것을 돕기 때문에 이 사이클을 짧게 하여, 붕소의 확산이 금속 합금 원소의 확산보다 더 빠르다.

고용화열처리 후에, 석출열처리의 계속은  $\gamma'$ 을 강화시키는 석출물의 최적형태를 생성하도록 바람직하게 적용된다. 4시간 동안 2,084 °F와 24시간 동안 1,650°F의 처리는 거의 0.5 $\mu$ m 입방체의 제1  $\gamma'$ 석출물과 입방체들 사이에 매트릭스 채널에서 회전단원체의 제2 및 제 3  $\gamma'$ 석출물의 분산을 생성하는데 적용된다. 기초 단결정합금을 처리하기 위해 개발된 이들 열처리를 적용함으로써, 접합된 부분의 비접합된 부분에서 미세구조는 접합된 구역에 더하여 최적화적으로 열처리된다.

도 10 및 11은 각각 바람직한 조건 하에서 접합되어 있는 샘플에 있어서 유사한 구조가 접합구역 내에 어떻게 조성되고 접합구역으로부터 어떻게 제거되는 가를 예시하는, 단결정 니켈 초합금의 매트릭스 구역 및 접합구역의 현미경사진이다. CMSX-4 단결정을 접합하는 바람직한 형태는 4시간 동안 2,250 °F에서 접합하는 1.3 무게퍼센트 붕소 포일을 사용한 후에 2,408 °F까지 일정하게 증가된 열처리를 이용하는 고용화열처리를 사용하여 4 내지 6 시간 동안 유지하고, 공간온도를 냉각시키고 그 다음 4시간 동안 2,084 °F로, 24시간동안 1,650 °F로 석출열처리 한다. 이러한 프로세스는 바람직한 구조를 생성시킨다. 이러한 프로세스의 다른 변경은 만족할만한 미세구조를 생성하도록 채용될 수 있다.

표 6은 표 4에서 포일이 어떻게 일정한 접합구조를 인도하도록 처리될 수 있는 지를 보여준다. 또한 이 표는 처리시 전개된 주요한 미세구조 특징의 일부와 일치하는지를 보여준다.

도 12는 적은 붕소를 함유하는 접합 포일들중 하나와 CMSX-4를 접합함으로써 생성된 깨끗한 접합구역을 예시한다.

도 13은 고용화열처리 후에 상응하는 미세구조를 보여준다.

도 14는 고용화 처리된 구역을 가로지르는 어떤 화학적 분석을 선으로 기록한 것을 보여준다.

도 15 및 도 16은 이 프로세스에 의해 생성된 최적  $\gamma'$ 구조를 보여준다.

비교를 위해 도 17, 18, 19 및 20은 붕소가 많이 함유된 포일과 접합시 생성된 구조를 도시한다. 공정의 입자는 접합(도 17 및 18)이 순차적인 고용화 처리(도 19)에 의해 제거된 후에 보여지고 최적구조에 접근하는 구조는 석출 열처리(도 20)에 의해 생성될 수 있다는 것을 주목하라.

[표 6]

접합 프로세스 및 열처리 순서 동안에 CMSX-4의 전이액상접합의 구조

포일	접합후의 구조	고용화열처리후의 구조	석출처리후의 구조	바람직한 프로세스 사이클
팅스텐-포일 1 (1.5% 붕소)	깨끗한 접합구역, 즉 입자가 없음	큰 입자 및 일정한 사전-입방형 $\gamma'$ 입자가 없음	일정한 $\gamma'$ 입방체가 잘 형성되어 있음	주물상태 조건으로 접합
팅스텐-포일 2 (1.5% 붕소)	깨끗한 접합구역, 즉 입자가 없음	큰 입자 및 일정한 사전-입방형 $\gamma'$ 입자가 없음	일정한 $\gamma'$ 입방체가 잘 형성되어 있음	주물상태 조건으로 접합
팅스텐-포일 3 (1.5% 붕소)	깨끗한 접합구역, 즉 입자가 없음	큰 입자 및 일정한 사전-입방형 $\gamma'$ 입자가 없음	일정한 $\gamma'$ 입방체가 잘 형성되어 있음	주물상태 조건으로 접합
팅스텐-포일 4 (1.5% 붕소)	깨끗한 접합구역, 즉 입자가 없음	큰 입자 및 일정한 사전-입방형 $\gamma'$ 입자가 없음	일정한 $\gamma'$ 입방체가 잘 형성되어 있음	주물상태 조건으로 접합
니켈-플렉스 110 (1.3% 붕소)	항상 깨끗한 접합구역	큰 입자 및 일정한 사전-입방형 $\gamma'$ 입자가 없음	기본재료와 동일한 매우 날카로운 $\gamma'$ 입자 입방체	주물상태 조건으로 접합
니켈-플렉스 110 (1.7% 붕소)	항상 깨끗한 접합구역	큰 입자 및 일정한 사전-입방형 $\gamma'$ 입자가 없음	기본재료와 매우 유사한 매우 날카로운 $\gamma'$ 입자 입방체	주물상태 조건으로 접합
니켈-플렉스 110 (2.5% 붕소)	고용화 열처리된 조건으로 접합된 경우의 입자	고용화 열처리로 입자가 용해됨	고용화 열처리된 재료가 접합된 경우에 있어서 보다 날카로운 $\gamma'$ 입방체	고용화 열처리된 조건으로 접합

[표 6a]

포일	접합후의 구조	고용화 열처리후의 구조	석출처리후의 구조	바람직한 프로세스 사이클
니켈-플렉스 115 (3.0% 붕소)	고용화 열처리된 조건으로 접합된 경우의 입자	고용화 열처리로 입자가 용해됨	기본재료의 것보다 더 크고 둥글게 된 모서리를 가진 입방체 $\gamma'$	고용화 열처리된 조건으로 접합
니켈-플렉스 115 (2.5% 붕소)	고용화 열처리된 조건으로 접합된 경우의 입자	고용화 열처리로 입자가 용해됨	기본재료의 것보다 더 크고 둥글게 된 모서리를 가진 입방체 $\gamma'$	고용화 열처리된 조건으로 접합
니켈-플렉스 115 (1.7% 붕소)	항상 깨끗한 접합구역	큰 입자 및 일정한 사전-입방형 $\gamma'$ 입자가 없음	기본재료의 것보다 더 크고 둥글게 된 모서리를 가진 입방체 $\gamma'$	주물상태 조건으로 접합
니켈-플렉스 120 (1.7% 붕소)	항상 깨끗한 접합구역	큰 입자 및 일정한 사전-입방형 $\gamma'$ 입자가 없음	기본재료에 매우 유사한 매우 날카로운 $\gamma'$	주물상태 조건으로 접합
니켈-플렉스 120 (2.5% 붕소)	고용화 열처리된 조건으로 접합된 경우의 입자	고용화 열처리로 입자가 용해됨	기본재료에 매우 유사한 매우 날카로운 $\gamma'$ ; 미리 용해된 재료에서 보다 날카롭다	고용화 열처리된 조건으로 접합

본 발명에 따라, 조립된 단결정 터빈부분의 전이액상접합은 매우 작고 잘 제어된 갭이 결함 면사이로 유도될 때 고질접합을 생성한다. 이들 공차 면 필요조건은 면 윤곽을 나타내는 처리기술에 의해 재생 가능하게 충족될 수 있다. 더욱이, 이들 윤곽을 나타내는 처리기술에 의해 만들어지는 응력은 접합 및 열처리를 포함하는 순차적인 열사이클링 냉각작업의 변형된 층으로부터 재결정화를 유도하지 않도록 충분히 낮아야만 한다.

전이액상 접합을 위한 면은 이 면이 충분히 편평하다면, 전기적 조건이 작업물과 작업 도구사이에 약 0.025cm(0.001인치)의 스파크 갭을 유지하기에 충분한 전기방전가공(EDM)에 의해, 낮은 응력 연삭에 의해 준비될 수 있다. 함께 끼워맞춤되어야만 하는 복잡한 윤곽의 부분을 위해, 이러한 면 윤곽은 프로세

스 양극으로서 결합하는 단편들중 하나와 음극으로서 나머지 하나를 채용하는 co-EDM 프로세스에 의해 생성될 수 있다. 순차적으로, 예컨대, 0.0025cm(0.001인치)두께 포일 재료나 페이스트에서 상당물을 사용하는 접합은 접합시 충분한 용융 및 재결정화에 제공한다. 접합구역재료와 접합재료에 인접한 재료는 접합사이클 또는 순차적으로 단 결정 재료의 고온 고용화 처리시 또는 접합사이클시 재결정화하지 않는다.

재결정화는 형성시 변형의 충분히 작은 지대를 유지함으로써 바람직하게 회피될 수 있다. 전이액상 접합프로세스가 없으므로, 재료는 매우 작게 변형되어 재결정화하지 않거나 예컨대 약0.0025cm(0.001인치) 접합포일의 두께의 정렬로 유일하게 재재결정화된다. 접합포일이 없으므로, 냉각공된 층은 전이용 프로세스에 의해 빠르게 소비되고, 재결정화 처리는 기본재료로부터 단결정 성장으로 발생한다. 이러한 상황 하에서, 재결정화는 접합구역에서 전이용융에 앞서 일어나지 않을 것이다. 순차적인 용융 및 재결정은 무결점 단결정을 재생한다. 단결정이 주조상태 조건에서 가공되고 접합되면, 순차적인 고용화 열처리는 접합구역에서의 재결정화를 야기시키지 않고 약 2,410 °F 만큼 높은 온도에서 이루어진다.

면이 이하에서 설명될 프로세스를 따라 저 응력 기반이라면 단결정 합금 CMSX-4는 주조상태조건에서 접합될 수 있고 순차적으로 열처리될 수 있다. 주조단결정부분; 90 그릿( grit)입자를 갖춘 100psi공기이하의 경샌드블라스트를 갖춘 몰드를 세정; 0.0025cm(0.001인치)내로 평형하고 편평한 면을 접합하는 저 응력 연삭; 진공실에서 약 60분 내에 1,600 °F에서부터 2,250 °F까지 급격한 가열에 의해 1.3무게퍼센트 붕소를 포함하는 포일 니켈-플렉스 110을 사용하는 약 2,250 °F에서의 접합; 표2(4시간 동안 2,408 °F의 최대온도)에서 표시한 사이클을 사용하는 진공실에서 실제 접합된 고용화 처리; 석출처리(예컨대, 24시간 동안 1,652 °F와 4시간 동안 2,084 °F에서 두 단계 석출처리).

낮은 응력 연삭은 1인치의 1000분의 1비율의 정도로, 매우 높은 공차로 다듬질 될 수 있는 편평한, 평평한 면을 생성할 뿐만 아니라 니켈계 초합금에서 상대적으로 무변형 면구역을 생성한다. 이러한 연삭면은 공급된 플라스틱 재료를 충분히 포함하지 않아서 인접 면구역에 재결정화를 야기시킨다. 이들 면이 열처리될 때, 이 면은 재결정화되지 않는다. 특히, 접합재료가 작업된 면위에서 용융될 때, 재결정화가 방지된다. 고체 상태 γ'용해, 국부 면 용융 및 재결정 프로세스를 완성시키기 위해, 국부용융은 가장 빠른 동역학을 갖춘 프로세스다.

도 21은 열처리와 접합에 앞서 저 응력 연삭에 의해 준비된 두 CMSX-4 단결정의 접합된 조인트의 단면을 보여주는 현미경사진이다. 면 기반을 갖는 샘플의 또 하나의 비 접합면에서, 또한 재결정화가 저지된다.

택일적으로, 만일 접합면이 약 0.0025cm(0.001인치)의 부분갭을 생성하는 전기적 조건을 사용하는 공통-전기방전 가공에 의해 준비되면, 단결정 합금 CMSX-4는 주조상태 조건에서 접합될 수 있고 순차적으로 열처리된다. 아래에 설명되는 프로세스가 채용될 수 있다: 주조단결정부분; 90 그릿( grit)입자를 갖춘 100psi공기이하의 경샌드블라스트를 갖춘 몰드를 세척; 0.0025cm(0.001인치)스파크 갭을 생성하는 충분한 전압 및 전류를 사용하는 co-EDM 결합 면; 진공실에서 약 60분 내에 1,600 °F에서부터 2,250 °F까지 가열된 1.3무게퍼센트 붕소를 포함하는 포일 니켈-플렉스 110을 사용하는 약 2,250 °F에서의 접합; 표 9(4시간 동안 2,408 °F의 최대온도, 약16 내지 24시간의 사이클시간)에서 표시된 것과 유사한 사이클을 사용하는 진공실에서 접합된 물품 고용화 처리; 석출처리(예컨대, 24시간 동안 1,652 °F와 4시간 동안 2,084 °F에서 두 단계 석출처리).

도 22는 co-EDM 후 샘플 면을 포함하는 단면을 보여준다. 이 도면에서 EDM에 의해 형성된 얇은 재주조 층은 샘플 면에서 매우 가벼운 필름으로서 나타난다.

도 23은 접합 및 열처리후의 CMSX-4의 단면을 보여주고, 이 프로세스가 단결정의 재결정을 생성하고 접합구역의 화학성질이 재결정화된 구조로서 유지되는 것을 보여준다.

본 프로세스는 접합면에 인접한 재료의 재결정을 방지하기 위해 충분히 변경되지 않게 한다. 이러한 특성은 CMSX-4같은 단결정 재료에서 만족스러운 전이액상 접합의 발생을 위해 요구된다. 이들 기계가공 프로세스에 더하여, 600 그릿 다듬질로의 기계적 연삭 및 연마, 예컨대 다이아몬드 연마재를 갖춘 0.25 μm로의 연마는 접합하기에 적합한 적절하게 낮은 변형 면을 생성하도록 채용될 수 있다.

지상기지의 터빈 구성요소의 큰 크기 때문에, 설계 명세서로부터 매우 작은 변형이 원하는 부분 윤곽으로부터 절대적으로 큰 편향을 발생시킬 수 있다. 이들 오프셋은 일체형 주물에서 현저하고, 접합된 부분 생성에 있어서 부분들 사이의 상대적인 설치의 영향으로 인해 중요하게 된다. 효과적으로, 두 부분들 사이에 매우 작은 상대적인 변형은 접합프로세스에 의해 불완전하게 또는 부적절하게 되는 매우 큰 갭을 생성시킬 수 있다. 만족할만한 질을 갖춘 접합 부분을 생성하기 위해 주물 프로세스를 제어하여 이러한 갭을 제한하거나 사후 주조처리 변형하여 부분들 사이에 갭을 조정하는 것이 바람직하다. 프로세스의 제안된 순서는 이러한 갭과 효과적인 접합 절차의 제어를 위해 제공하는 일련의 프로세스 샘플을 제공한다.

본 프로세스의 순서는 해로운 재결정을 회피하게 한다. 재결정은 금속작업프로세스와 뒤이은 열처리사이클이 조합하여 충분히 저장된 냉각작업과 충분한 열에너지를 제공하여 새로운 입자를 국부적으로 형성할 때 재결정이 일어난다. 터빈 구성요소에서 사용된 니켈계 단결정을 위해, 이러한 작업은 그릿 또는 슛블라스팅에의해 더욱 초과적으로 정밀한 세정과 금속 작업 도구에 의해 벤딩, 압입가공, 치핑을 포함할 수 있다. 이들 프로세스가 단결정을 위해 요구되는 약 2,400 °F에서 고용화 처리에 우선할 때, 이들 프로세스에 의해 유도된 손상은 재결정을 야기시킨다. 본 발명의 바람직한 실시예에 따라, 초기 주물로부터 제조된 부분을 가공하는 것에 대한 프로세스는 세정, 접합 및 열처리사이클의 순서를 요구한다. 접합된 부분을 위해 이 접합 전에 이 부분으로부터 주물셀의 모든 잔존물을 실질적으로 제거하는 것이 바람직하다. 추가적으로 접합은 고용화처리 이전에 바람직하게 실행된다. 따라서 이 부분들을 처리하는 단계를 제어하고 차례로 나열하여 잠재적인 재결정을 회피하는 것이 중요하다. 본 처리의 경로는 처리에 의해 부분내로 유도되는 변형량을 제한하고, 접합구역에서 뿐만 아니라 접합에서 떨어진 단결정에서

서 최적화된 특성을 제공하는 열처리사이클을 고려한다.

조심스러운, 낮은 압력 세정과 제어된 고온형상 그리고 끼워맞춤하는 부분의 co-EDMing을 활용하면, 이 프로세스는 저 단가의 효과적인 경로를 제공하여 복수의 주물부분으로 단결정 터빈블레이드를 제조한다.

단결정 가스터빈 블레이드는 아래에 설명되는 프로세스에 의해 별개로 주물부분으로부터 조립될 수 있다: 접합이전에 부분들을 기계적으로 세척; 고온 고용화 열처리를 적용하기 이전에 부분들을 접합; 세척 시 면의 국부변형으로부터 생겨날 수 있는 열처리시 재결정을 회피; 접합될 부분들의 양호한 설치를 제공(예컨대, 접합된 면을 가로질러 0.0025cm(0.001 인치)내에); 그리고 블레이드의 길이의 전부에 걸쳐 양호한 부분들 윤곽 제공. 처리된 부분의 전이액상 접합을 포함하는 완성된 순서는 이들 목적을 성취한다.

순차적인 열처리시 재결정을 부여할 변형을 포함하지 않고 바람직한 형상을 위해 주물부분을 세정하고 이 부분을 정확하게 일치시키게 한다. 재결정을 회피하기 위한 고용화 열처리 후에, 단결정 주물부분으로부터 몰드의 세정이 통상적으로 실행된다 할지라도, 본 구성요소는 접합에 앞서 완전히 세정된다. 최상의 특성은 접합이 고용화 열처리에 앞서 실행될 때 생성되기 때문에, 이러한 세정은 고용화열처리에 선행해야 한다. 재결정을 유도하는 위험 때문에, 기계적 마모에 의해 세정시 유도되는 변형이 최소화 되어야 한다. 이러한 요건은 저 응력 세정을 요구한다.

연마재 입자가 60그릿 이상으로 제한되며 (구동)가스 압력이 90 psi로 제한되는 CMSX-4에 대한 연마재 세정은 단결정이 표 5의 사이클을 사용하여 순차적으로 고용화 열처리될 때 재결정화를 회피하는 것을 나타내고 있다.

상기 부분의 차후 내면의 세정이 요구되고, 접합면을 가로지르는 단단히 폐쇄된 갭을 유지하도록 의도된 기계적 고정과 접촉할 모든 구역에 외면의 세척이 요구된다.

긴 주물에서 양호한 부분 윤곽을 유지하는 문제는 주물 정밀도를 개선시키거나 주물부분의 기계적 처리를 일으킴으로써 해결될 수 있다. 계속적으로, 주물과 열변형을 고려하도록 부분몰드를 적용하는 것은 부분과 몰드의 규칙적이고 육안으로 보이는 변형에 영향을 받기 쉬운 공차 내의 값의 윤곽을 생성하기 위한 수단을 제공할 것이다. 그러나, 부분과 몰드를 변형시키는 것은 원하는 윤곽으로부터 런투런(run-to-run)변형과 비 규칙적인 변형을 고려하지 않을 것이다. 작은, 단편적인 변형은 큰 지상기지의 터빈 구성요소의 길이를 걸쳐 요구된 윤곽으로부터 현저한, 절대적인 오프셋을 유도 할 수 있기 때문에, 이들 비규칙적인 또는 런투런 변형은 다른 수단에 의해 조절될 것이다. 다결정체인 합금이 공간온도에 기계적으로 정돈 될 수 있는 동안, 재결정의 위험 때문에 단결정의 종래적인 처리는 이러한 기계적변형을 회피한다. 그러나 온도와 변형율은 효과적으로 제어된다면, 재결정을 야기시키지 않고 니켈계 초합금의 단결정을 약 40퍼센트 변형으로 구부리는 것이 가능할 수 있다. 연속적인 고용화 열처리시 해로운 재결정을 방지하는 동안, 이러한 프로세스는 부분들의 직선화가공 예컨대 약 2 내지 3 퍼센트의 적합한, 날카로운 변형에 적용될 수 있다.

접합될 부분들 사이에 최소의, 일정한 갭을 생성하는 문제는 크기에 걸쳐 부분들을 주조하고, 조정되는 방식으로 결합면으로부터 과잉 스톱을 가공함으로써 본 발명에 따라 해결될 수 있다. 그 다음 결합면은 약 0.0025cm(0.001인치)내로 정렬되어 양호한 전이액상 접합을 확보한다. 공동-전기방전 가공은 결합 구성요소의 면을 다듬질하기 위한 능력을 가지고 있을 뿐만아니라 충분히 매끈한 다듬질을 제공한다. 더욱이 재 주조층이 제어된다면, 단결정의 사후 접합 재결정은 회피될 수 있다. co-EDM 가공에 있어서, 재료는 각각의 단편이 양극과 음극으로서 변경적으로 채용될 수 있기 때문에, 작업 단편들 양자로부터 재료가 제거된다. 부분들은 크기에 걸쳐 주조되어 재료제거를 위한 보다 큰 공차를 제공한다. 재료의 재거시 전류를 제어하는 것은 부분들(그리고 이러한 갭의 정밀도)사이에 갭을 제어할 뿐만 아니라 재 주조층의 깊이를 제어한다. 재 주조층의 깊이는 순차적인 열처리에서 면의 존재와 하위면 균열과 재결정을 회피하도록 최소화 되어야 한다. 또한 작업단편들 사이에 약 0.0025cm(0.001인치)갭을 제공하는 일정 레벨의 EDM 전류를 유지하는 것은 순차적인 전이액상 접합시 이 전류가 소비되도록 충분히 작게될 재 주조층을 억제한다.

도 24는 에어포일(30)의 캠버라인을 따라 분리된 2 개의 세그먼트(32, 34)를 포함하는 터빈블레이드 에어포일(30)의 단면도이다. 과잉 재료(36, 38)는 세그먼트(32, 34)의 접촉면에 제공된다. 도 24는 과잉 스톱의 적절한 결합구조와 EDM가공시 어떻게 이 결합구조가 전극의 모선에 관련되어 있는지를 예시한다. 바람직하게, 과잉 재료(36, 38)는 역방향으로 접합면을 가로질러 제공되며, 이 초과재료는 도 24에 도시된 바와 같이, co-EDM 프로세스에서 전극의 모선에 의해 역방향으로 제거될 것이다. 이러한 모선은 접합부의 전체 평면에 수직이지 접합부의 국부평면에 수직한 것은 아니다. 이러한 것은 내부 냉각된 가스 터빈블레이드 같은 늑골형상인 부분들을 위해 특히 중요하다.

결합면을 가로질러 주물에 대한 약 0.030인치 과잉 스톱 및 0.001인치 갭에 대한 co-EDM 기계가공의 적용은 전이액상 접합을 위해 필요한 우수한 부분 설치를 제공한다.

접합 동안에 설치된 상기 부분들을 유지하기 위해, 노 속의 상기 부분들이 가열될 때 접합면을 가로질러서 응력을 유지할 고정구가 요구될 수 있다. 상기 고정구는 접합 동안에 고온에 견딜 수 있어야 한다. 미세한 열팽창에 의해 상기 부분들 상에 응력을 차단하는 압축 갭을 유발하는 몰리브덴 고정구가 사용될 수 있다.

상기 고정구에 있는 부분들을 조립하기 전에, 포일 또는 페이스트와 같은 접합매체가 접합면에 가해질 수 있다. 상기 고정구는 상기 부분이 노 속으로 삽입되기 전에 갭 폐쇄를 보장할 뿐만 아니라, 상기 부분들이 가열될 때에 갭 폐쇄를 유지한다. 접합 열 및 압력 사이클은 원하기만 하면 접합페이스트내의 예를 들면 바인더 종의 기체제거를 허용하도록 제어될 수 있다. 계속해서, 상기 부분들은 단결정 재료에 대해 확인된 사이클을 사용하여 접합될 수 있다.

상기 부분에 있어서의 최적의 전반적인 특성을 나타내는 바람직한 프로세스/순서는: 설치 프로세스 중에

제거를 위한 충분한 스톱을 제공하기 위하여 접합평면에 대하여 수직인 약 0.030 인치의 과잉 스톱을 가진 크기 위로 블레이드의 단결정 부분을 주조하는(성장시키는) 단계; 전달된 진동(예를 들면, 손에 칠만한 크기의 햄머를 가지고 시드(seed), 램프(ramp) 또는 라이저(riser)와 같은 주물의 처분가능한 부분을 때리는것)를 이용하여 세라믹몰드를 청소하고 저압력 샌드블라스트(예를 들면 90 psi 이하의 공기압력, 120 그릿 이하의 모래입자)를 이용하여 보다 강한 접촉이 있는 세라믹을 청소하는 단계; 접합면을 가로질러서 양호한 설치를 제공하기 위해 상기 부분들을 공동-전기방전으로 기계가공하는 단계; EDM면(즉, 단결정면의 EDM 기계가공 중에 형성될 수 있는 탄소막)으로부터 탄소질의 잔여물을 제거하기 위해 알콜(메틸 또는 에틸), 아세톤 또는 물비누계 세정액을 사용하여 접합면을 청소하는 단계; 상기 면의 탄소막을 제거하고 찌꺼기의 부양을 세정액 속으로 녹아들게 조장하기위해 솔브러시를 사용하여 청소하는 중에 상기 면은 약간 조잡하게 될 수 있다; 접합매체를 부분들(전이액상 접합매체의 약 0.001 인치의 접합층 전물을 제공하기 위해 포일 또는 침착된 페이스트를 형성하도록 양자를 자른) 사이의 틈새 속으로 가하는 단계; 접합평면에 대해 수직으로 정렬되어 있고 모든 상기 부분들 위의 틈새의 최대 폐쇄를 만들도록 위치되어 있는 핀을 사용하여 상기 부분의 외면의 일부분에 대한 수직의 부하를 가하도록 접합면을 가로지르는 제어된 부하를 제공하는 접합고정구내에 상기 부분들을 고정하는 단계; 단결정 합금에 대해서 확인된 온도사이클(CMSX-4에 대해서 이것은 4시간 동안 2,250 °F) 및 고진공( $10^{-5}$  τ보다 더 큰)하에서 접합하는 단계; 상온으로 냉각한 후에 상기 고정구를 제거하는 단계; 상기 합금에 대해 통상적으로 채용되어 있는 처리법을 사용하여 고용화열처리를 하는 단계; 외부를 청소하는 것은 선택적으로 채용될 수 있다(비록 이것은 석출열처리 후에 수행될 수 있지만); 특성을 최적화하기 위해 석출열처리하는 단계(CMSX-4의 경우에 있어서 4시간 동안 2,084 °F 및 24시간 동안 1,652 °F 하에서 2 단계의 석출처리 프로세스); 그리고 기계적으로 형상화된 터빈블레이드를 드레싱하고 연마하는 단계이다.

부가적인 단계로서, 접합을 위하여 상기 부분들은 재응고를 유도하지 않을 프로세스를 사용하여 굽힘가공함으로써 선택적으로 곧게 펴질 수 있다. 이러한 프로세스는 재응고를 부여하기 위하여 충분한 변형손상을 발생시키지 않고 상기 부분의 비틀림을 유발하는 고온 저변형을 변형(초소성 변형에 유사한)을 포함한다.

완전한 터빈블레이드를 만들기 위해 단결정 부분들의 접합을 위한 일체화된 처리경로가 제공되어 있다. 연속된 처리단계는 가스터빈 엔진구성요소의 원하는 극단적인 온도에서 작용할 고품질의 단결정 구성요소를 생산하기 위하여 요구된 재료품질 및 열처리 단계를 제공한다. 그것은 최적의 접합틈새의 설치 및 처리 뿐만 아니라 최적의 부분외형을 생산하도록 모든 부분들 처리를 제공한다.

개략적으로, 상기 프로세스는: 경블라스트에 의해 세라믹몰드로부터 제거되어 있는 주물상태 구성요소, 설치를 확보하기 위해 압수결합하는 부분의 공동-전기방전 기계가공, 주물상태의 조건으로 유효하게 상기 부분들을 접합하는 단계, 그리고 상기 부분들을 계속하여 고용화열처리 및 석출열처리하는 단계를 채용한다. 이러한 순서의 변형은 또한 가능하고 그 변형에 있어서 외형 및 부분설치를 개량하도록 미리 접합된 부분들의 제어된 고온형성이 채용되어 있다.

(실시예)

미세구조 및 기계적인 특성에 대한 접합포일의 화학적 성질 및 열처리의 영향은 실험적으로 산정된다. 먼저, 몇개의 접합포일의 화학적 성질 및 열처리가 금속조직학적인 평가에 대한 샘플을 생산하도록 채용된다. 접합라인을 가로지르고 기본금속의 전체에 걸친 최상의 균질한 화학적 성질 및 미세구조를 생산한 프로세스는 보다 나은 평가를 위해서 장력 및 크리프특성을 시험함으로써 선택된다.

CMSX-4계 재료는 약 9.5×76.2×152.4 mm(0.375×3×6 인치)의 단결정 슬랩으로서 주조상태 조건으로 공급된다. 접합매체는 50μm(0.002 인치) 두께의 상업적인 접합포일이 사용된다.

접합포일의 붕소 레벨은 2 개의 포일이 약간 다른 붕소 레벨, 니켈-플렉스110은 1.3%, 1.7% 및 2.5% 붕소 레벨을 가지고서 공급되고 니켈-플렉스120은 1.5%, 1.7% 및 1.9% 붕소 레벨을 가지고 공급되는, 을 가지고서 몇개의 형태로 공급되기 때문에 사실상 붕소 변동범위이다. 더우기, 포일은 확산 프로세스에 의해 제조되기 때문에, 붕소농도가 포일의 깊이 전체를 통하여 일정하지 않다는 것을 주의해야만 한다. 표에 인용된 붕소 레벨은 포일의 깊이에 걸친 평균농도이다.

상기 프로그램의 금속조직학적 및 기계적인 시험 형태에 대한 샘플의 준비는 유사하다. 그 차이는 단지 기계적인 시험샘플에 대해서는 보다 큰 샘플이 채용되고 상기 프로그램의 초기 상태 동안에 개발된 정제된 면의 준비 방법은 기계적인 시험샘플을 접합하는 데 유용하다는 것이다. 금속조직학적인 샘플의 접합면은 저 응력 연삭, 120 그릿, 320 그릿 또는 600 그릿 정밀연마작업, 또는 전기정밀연마작업에 의해 다듬질되고, 반면에 기계적인 시험샘플의 접합면은 단지 저 응력 연삭에 의해서 다듬질된다.

샘플의 오설정방향에 관한 문제를 회피하기 위하여, 모든 접합샘플은 각각의 단결정을 자르고 재결합함으로써, 즉 고유 단결정 슬랩은 그것의 결정성장 방향에 수직으로 분할되고 그렇게 생산된 면은 면의 다듬질 후에 재접합되어, 준비된다. 샘플의 모든 초기의 커팅은 슬랩의 폭으로부터 보다 작은 금속조직학적인 샘플을 추출하도록 사용되는 금속조직학적인 실리콘 카바이드 연마휠을 사용하여 수행된다. 금속조직학적인 평가에 대한 접합된 샘플은 약 13×13×13 mm(0.5×0.5×0.5 인치)의 평행육면체였고 반면에 기계적인 시험샘플 제조에 대한 준비된 샘플은 9.5×76.2×38 mm(0.375×3×1.5 인치), 즉 전폭/4분의 1 슬랩높이였다.

접합은 고진공로에서 처리되고 그 동안 샘플은 몰리브덴 고정작업에 의해 적소에 유지된다. 접합에 앞서, 포일 및 단결정은 완전히 기름이 제거된다. 접합포일은 접합의 단면에 정확히 끼워지도록 잘려서 샘플이 고정상태로 조립될 때 2 개의 맞물림면 사이의 위치로 끼워맞추어 진다. 이러한 설치는 단결정의 정렬을 유지했을 뿐만 아니라 노의 열이 상승하고 그리고 접합온도에 있는 동안 접합라인을 가로질러서 0.1 내지 0.1 MPa(15-150 psi) 정도의 제어된 부하를 조성하였다.

CMSX-4 슬랩은 주물상태 또는 고용화열처리된 상태로 접합되어 있다. 이러한 합금에 대하여 전형적인,