

研究論文
------

大韓熔接學會誌  
第8卷第3號 1990年 9月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.8, No.3, Sep., 1990

## 2024 알루미늄의 마찰용접에 관한 연구

송 오 성\* · 강 춘 식\*\*

### A Study on Friction Welding of 2024 Aluminium

O.S. Song\*, C.S. Kang\*\*

**Key Words** : Friction Welding(마찰용접), 2024 Aluminium(2024알루미늄), Welding Parameter(용접변수), Welding Condition(용접조건), Fine Recrystallized Zone(미세재결정부), Heat Input(입열량), FDM(유한차분법)

#### Abstract

2024 Aluminium was welded by domestic manufactured continuous type friction welder. The problems and optimum condition were studied in 2024 Al-2024 Al cases. Mechanical tests and microstructure analysis were studied. Interfacial temperature of welding was predicted by FDM. The obtained results are as follows :

- 1) In case of Al-Al, the optimum condition range was wide.
- 2) At the boundary zone, fine recrystallized zone was not harmful to the mechanical property and no growth of precipitaion was observed.
- 3) In case of Al-Al, temperature gradient can be predicted by FDM and heat input can be taken as weld parameter.

#### 1. 서 론

마찰용접이란 재료간의 마찰시에 발생하는 열을 이용하여 모재를 접합하는 고상용접법의 하나이

다. 즉, 압접면의 면간 마찰을 통한 발열작용으로 기계적 에너지를 열에너지로 변환시켜 동종 재료 뿐만 아니라 이종재료 나 비금속과의 접합도 가능한 접합방법이다.

\* 서울대학교 대학원

\*\* 정회원, 서울대학교 공과대학

역사적으로 마찰을 이용한 접합방법은 부분적으로 오래 전부터 사용되어 왔으나 공업적으로는 소련에서 1957년 A.I. Chudikov<sup>1)</sup>가 성공한 이래 괄목할 만한 성장을 이루었다.

마찰용접기의 유형은 크게 continuous형과 inertia형의 2가지로 나눌 수 있는데, 소련, 일본, 유럽 쪽은 주로 continuous형을 사용하는 추세이고, 미국쪽은 주로 inertia형을 사용하는 경향이 있으나 원리적으로는 2가지 방법 모두가 차이가 없고 각각의 방법마다 용접하려는 재료에 따라 약간의 장단점이 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구는 국내에서 개발한 SNF30H형 마찰용접기를 써서 실험하였고, 재료로는 2024 알루미늄을 사용하였는데 축대칭인 재료 형상에 용이하게 적용가능하므로 자동차 부품, 기계부품, 항공기 부품등 적용대상이 매우 큰 장점이 있다.

Continuous형의 마찰용접기는 특히 회전수(N), 용접 시간( $t_n$ ), 업셋시간( $t_u$ ), 용접압력( $P_n$ ), 업셋압력( $P_u$ ), 표면처리여 따른 마찰계수등 용접조건에 미치는 변수가 많다.

이제까지 용접변수(welding parameter)를 여러 가지로 정량적으로 규정하려는 노력이 있었으나 아직 확립되었다고 보기는 어렵고, 용접조건은 마찰 용접기 제조회사마다 know-how로 되어 있다.

따라서 본 연구는 주어진 마찰용접기를 hardware로 하여 software적인 적절한 마찰용접 조건을 찾는데 연구의 초점을 맞추었다.

## 2. 시편제작 및 실험

### 2.1. 시편의 제작 및 실험조건

재료는 상용되는 2024 알루미늄을 사용하였다. 지름 19mm인 봉재를 길이 100mm로 절단하고 절단면을 절삭유 없이 선반 가공하여 용접면의 표면 조도가  $100\mu\text{m}$  이내가 되게 하였다.

용접직전 아세톤과 알콜로 용접 면을 세척하였다.

이후의 모든 조직사진은 Keller's reagent로 약 2분간 부식시켰다.

실험조건은, 회전수(N)은 2000rpm, 업셋압력( $P_u$ )은  $P_u=2P_n$ 로, 업셋시간( $t_u$ )은 3초로 각각 고정시키고, 용접압력( $P_n$ )을 2, 4, 6, 8 kgf/

mm<sup>2</sup>로 변화 시키고 용접시간( $t_n$ )을 각 용접압력( $P_n$ )하에서 변화시켰다.

### 2.2. 실험과정

접합시 온도측정을 위해 알루미늄끼리 접합한 경우에 고정축에 물리는 쪽에 계면에서 7mm 떨어진 곳에 지름 2mm의 drill로 구멍을 뚫었다. 이때 깊이를 4.75와 9.5mm가 되게 하고 그 안에 열전대를 넣어 고정시킨 후 온도를 측정하였다.

접합된 시편을 표준인장시험편을 만들고 각 접합조건에서 2번씩 만능시험기(INSTRON)를 이용하여 최대인장강도, 연신율을 측정하고 용접전후의 줄어진 길이를 측정하였다.

접합된 시편을 표준 Charpy 충격시험시편을 만들었다. 이때 접합부가 정확히 notch의 중심이 되도록 사전에 부식을 시켜 접합부를 확인하고 가공하였다.

시험기는 CI-No. 30으로 용량은 30kg-m를 사용하였다.

비커스 경도기와 마이크로 경도기를 이용하여 1mm간격으로 계면부를 중심으로 경도를 측정하였으며 전자의 경우는 가공경화효과를 고려하여 간격을 2mm로 하여 시험하였다.

인장시험과 충격시험에서 파괴된 시편을 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 파면을 관찰하였다.

광학현미경으로 400배 이내에서 접합부와 미세조직을 관찰하고 SEM으로써 미세조직을 조사하였으며 석출물의 거동이나 접합부의 미세조직을 알기위해 200KV TEM을 이용하였다.

TEM 관측시 시편은 1000A이내로 thinning하여 Perchloric acid로 jet polish하여 관측하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 인장시험 결과

Fig. 1은 용접압력에 따라 최대인장강도(UTS)를 도시한 것으로서 압력이 작을수록 인장강도가 낮아짐을 알 수 있었다. 안이 채워진 점들은 모재에서 파괴가 일어났음을 의미하는데 이렇게 모재 파괴가 일어남에도 불구하고 모재의 약 80%의 인장강도만 나타나는 것은 시험편의 중앙에 미세한

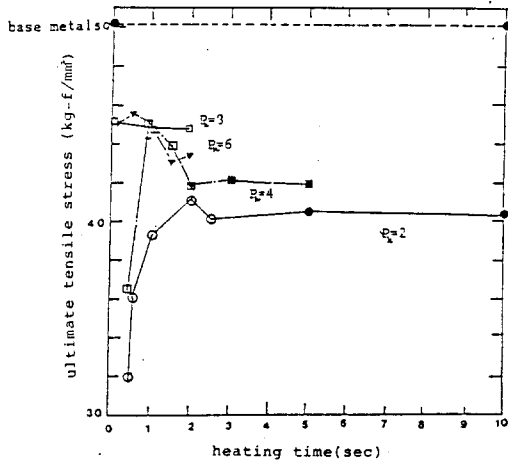


Fig. 1 Result of tensile test with heating pressure and heating time (2024Al-2024Al)

재결정부가 존재하여 이것이 인장되는 과정에서 불균일한 인장을 일으켜 상대적으로 인장시험의 수치가 떨어지는 인장시험 자체의 특성에 기인하는 것이라고 생각되었다. 이러한 문제는 접합부를 holder 쪽에 놓는 configurational change를 통해서 해결이 가능하나<sup>2)</sup> 이에 따른 시험편의 적절한 규격에 문제가 발생하였다.

인장시험편은 표준규격으로 제작하였는데 이러한 시험편의 인장시험자료는 용접제품의 상대적인 건전도를 손쉽게 비교하거나 실제 제품에서 접합부가 중앙부에 있게되는 경우에 자료로써 유용하나, 실제의 정량적인 건전도 비교는 bend test가 적절하다고 생각되었다.

이러한 실험결과로써, 동종의 경우에는 용접압력( $P_h$ )이 높을수록 모재부위의 파괴가 일어나 실험적으로 접합이 우수함을 알 수 있었고, 건전한 접합이 되는 용접조건 범위는 비교적 넓었다.

3.2. 충격시험 결과

Fig.2에서 볼 수 있듯이 조건에 따라 대부분 일정하게 인성이 증가했음을 알 수 있었다.

용접조건에 따라 용접부에서 인성이 커지는 이유는 미세재결정부(Fine Recrystallized Zone: FRZ)가 생긴 접합부에 노치를 만들었기 때문에 결정립미세화 효과로 인하여 인성이 커진 결과를 초래했다고 생각되나 이는 비슷한 실험을 한 다른

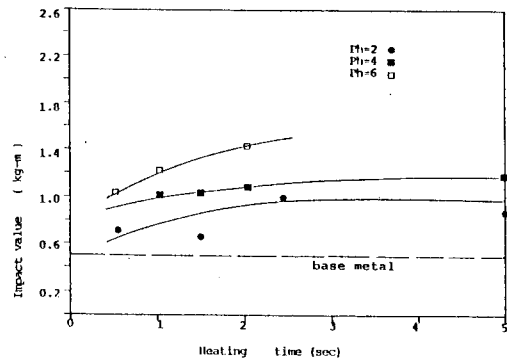


Fig. 2 Result of V-notch Charpy impact test (2024Al-2024Al)

연구자의 보고와 상충되고 있다<sup>3,4)</sup>.

이원인은 시험편의 노치부분의 위치조건이 달랐기 때문인 것으로 생각되었다.

3.3. 경도시험 결과

Fig.3에 비커스 경도시험 결과를 도시하였다.

알루미늄 합금의 경우 적층결합에너지가 커서 동적회복이 용이하며 비교적 용접계면에서 멀리까지 경도가 저하되는 원인이 된다고 생각하였다. 그러나 이러한 현상이 기계적 성질 -특히 인장시험 결과- 에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각되었으며 이러한 경도시험 결과의 의의는 마찰용접에서 일반용접에서와 같이 HAZ를 정의하는 기준이 될 수 있었다.

Fig.3에서 B는 용접압력( $P_h$ )이 2kgf/m<sup>2</sup>, 용접 시간( $t_h$ )=1초, W는  $P_h=6$ ,  $t_h=0.1$ , K는  $P_h=4$ ,  $t_h=1.5$ 의 용접조건으로서 정성적으로는 입열량이 클수록 HAZ 폭이 넓어졌다고 생각되었다.

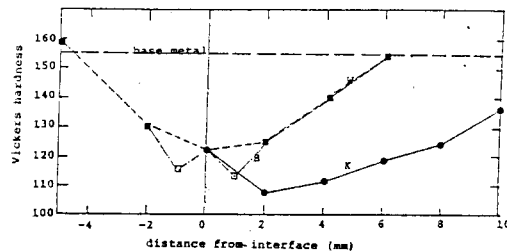


Fig. 3 Result of Vickers hardness with distance from weld interface (2024Al-2024Al)

3. 4. 미세조직과 파면조직의 검토

Photo.1에 마찰용접된 2024 알루미늄의 전형적인 미세조직을 나타내었다.

마찰용접은 동적인 접합방법이기 때문에 정적인 일반 방법과는 매우 다른 특이한 조직과 현상을 수반한다.

마찰용접의 접합기구는 고온확산에 의한 것과 기계적인 혼합에 의한 것으로 알려졌다<sup>2)</sup>. 그러나 약 2초 정도의 용접시간을 고려할 때 고온확산기구에 의한 접합기구는 주목할 만 하다.

마찰용접에서는 계면에서 100-10000배 정도의 strain rate가 적용되기 때문에 이에 따른 excess void 생성이 수반된다. 따라서 열역학적으로 주어진 온도에서의 평형 공공 농도와 온도구배에 비례하여 확산속도도 엄청나게 빨라져서 짧은 시간에도 불구하고 고온확산이 주된 접합기구가 될 수 있음을 시사한다<sup>5,6)</sup>.

동종의 경우 이러한 증거는 가시적으로 곤란하지만 이종의 경우 확산에 의해 취성의 금속간화합

물의 발생등을 통하여 추론이 가능하였다.

따라서 용접계면부근의 온도분포를 아는 것은 매우 중요하며 이러한 접근방법으로 접합부에 FRZ의 발생영역이나 새로운 화합물의 생성등의 예측이 가능하다.

정성적으로는 이전에 Hazallet<sup>3,4)</sup>의 연구보고가 있었으나 다음절에서 좀 더 정량적으로 논하기로 한다.

Charpy 충격시험의 파면은 노치가 용접계면에 있기 때문에 파괴양상을 비교하는데 더 효과적이었는데, SEM으로 분석한 결과 입열량이 점점 커져가면서 취성파괴에서 연성파괴인 모재와 파괴양상이 같아짐을 알 수 있었다.

Photo. 2는 TEM(Transmission Electron Microscope)사진이다. (a)는 동종의 경우 접합계면의 모습이고 (b)는 모재의 모습인데 모재에 비해 접합부에서 섭그레인(subgrain)이 많이 발달한 것이 특징이나, 석출물의 성장은 없었다.

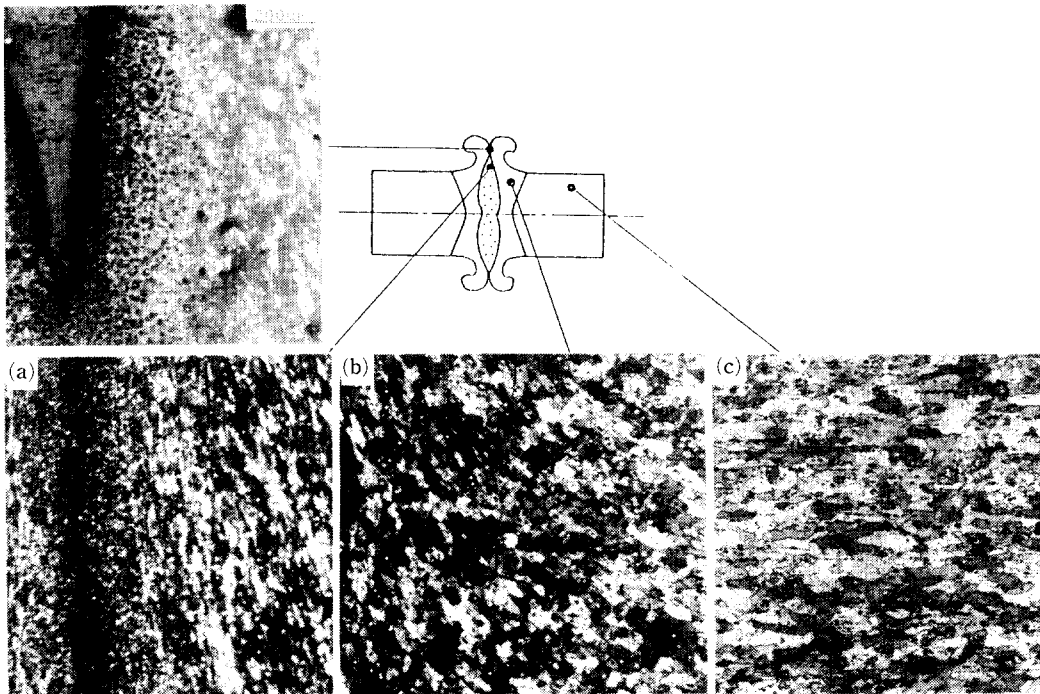
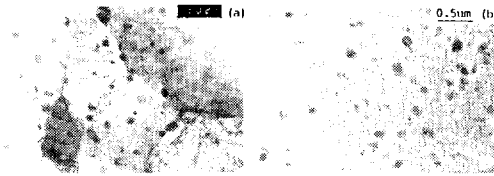


Photo. 1 Microstructure of welded zone  
 (a) fine recrystallized zone  
 (b) transition zone  
 (c) base metal



**Photo. 2** Transmission electron micrographs  
(a) weld interface  
(b) base metal

3. 5. 온도측정 결과와 FEM을 이용한 온도 예측 및 검토

전술한 바와 같이 접합부에서의 온도분포를 알기 위해 K.K. Wang의 연구<sup>7,8,9)</sup>를 토대로 접근해 보았다. 계산을 간단히 하기 위해 몇가지 가정을 하였다.

- 1) 용접시간( $t_h$ ) 동안의 소성은 업셋시간( $t_u$ )에 비해 매우 적다.
- 2) 용접압력( $P_h$ )은 모든 node에서 일정하다고 가정한다.
- 3) 물성치는 온도에 따라 일정하다고 가정한다.
- 4) 마찰계수는 상수라고 가정한다.

열유동방정식을

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

로 하고

이때의 경계조건을

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} - \rho Lu(z) = q(r, t)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} - \rho Lu(r) = h(T_s - T_\infty)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0$$

이라 하고 방정식을 이산화시켰다.

여기서,

$k$ ; thermal conductivity.

$L$ ; latent heat of 2024 Al,

$T$ ; temperature,

$\alpha$ ; thermal diffusivity,

$h$ ; convection heat transfer coefficient,

$u(z)$ ;  $z$  방향의 소성속도,

$u(r)$ ;  $r$ 방향의 소성속도.

이때 입열량을 생각하면 계면에서의 단위발생량은

$$q = \frac{1440}{778} \mu PrN \text{ (Btu ft}^{-2} \text{ hr}^{-1}\text{)}$$

이 된다.

여기서,

$P$ : 용접압력(psi)

$N$ : 회전수(rpm)

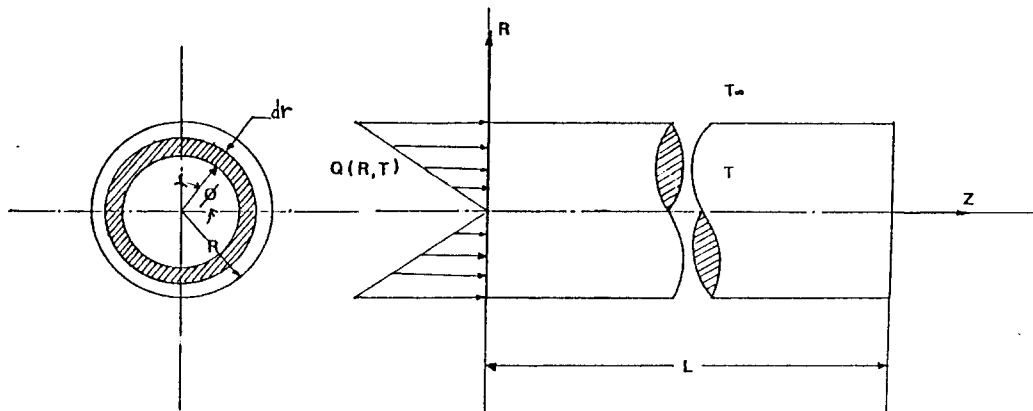
$r$ : 봉재중심으로부터의 거리(in)

$\mu$ : 마찰계수

인데 단위를 MKS로 고치고 정리하면

$$q = 2\pi \mu PrN \text{ (mkg-fm}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$$

가되며 이때 발생열량이 양쪽시편에 1/2씩 분배되어 전도되는 것이라고 생각하였다. Fig.4와 같은 단위요소애 들어가는 specific 입열량  $q$ 는



**Fig. 4** Heat distribution

$$q = \frac{20\pi^2}{778} \mu P_r^2 N \, dr \quad (\text{Btu hr}^{-1})$$

$$= 4\pi^2 r^2 \mu P N \, dr \quad (\text{Js}^{-1})$$

또한 계면에서 용접시간( $t_h$ ) 동안 발생하는 total heat input  $Q$ 는,

$$Q = 4\pi^2 P N \int_0^{t_h} \int_0^R \mu(r, t) r^2 dr dt$$

$$= 4\pi^2 r K P N \int_0^{t_h} \int_0^R \mu(t) r^2 dr dt$$

$$= K \mu P R N t_h$$

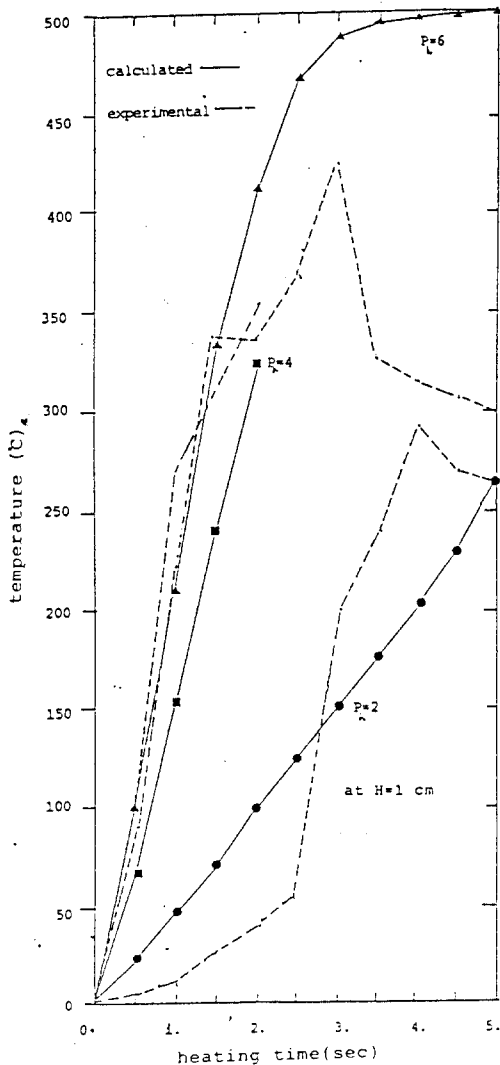


Fig. 5 Result of welding temperature with heating time measured at the center of specimen (2024Al-2024Al)

이 된다.

이를 전진차분법으로 계산하면 Fig. 5와 같은 결과를 얻는다. 여기서 실선은 계산된 결과이고 점선은 주어진 위치에서 실측결과인데 용접시간( $t_h$ )이 길어질수록 오차가 커짐을 알 수 있었다.

그러나 알루미늄계의 마찰용접시간이 2초 이내 임을 고려할 때 짧은 시간에서는 적용가능한 접근 방법이 가정에서 생긴 오차를 보정하면 더욱 정확한 예측이 가능하다.

#### 4. 결 론

- 1) 마찰용접시, 건전한 접합이 되는 용접조건의 범위는 비교적 넓었고, 비교적 높은 용접압력( $P_h$ )에서의 결과가 실험적으로 우수하였다.
- 2) 접합부에 나타나는 재결정부는 기계적 성질에 악영향을 끼치지 않았으며 접합부에서 석출물의 성장등의 문제는 볼 수 없었다.
- 3) 2024 Al의 경우 입열량을  $Q = K \times N \times P_h \times R \times t_h$ 로 잡아 물성치만으로 비교적 간단히 용접시간( $t_h$ ) 동안의 용접계면과 접합부의 온도예측이 가능하였다.

#### 참고문헌

- 1) R.F. Tylecote: The Solid Phase Welding of Metals, Edward Anorld Ltd., (1968), pp.226-257.
- 2) D.Yasan, S.Tsang, W.L. Johns, M.W. Doughty: Inertia friction welding of 1100 aluminium to type 316 stainless steel, Welding J., Aug., (1987), pp.27-37.
- 3) T.H. Hazlett, K.K. Gupta: Friction welding of high strength structural aluminum alloys, Welding J., Nov., (1963), pp.490-s-494-s.
- 4) M.Rao, T.H. Hazlett: A study of the mechanisms involved in friction welding of aluminum alloys, Welding J., Apr., (1970), pp. 181-s-188-s.
- 5) Seregin., S.A., Seregin. A.S., and Sabantsev, V.P.: The degree of strain in the friction welding of metals. Welding Production 23 (8), (1976), pp.42-44.

- 6) N.B. Sada and A.S. Bahrani, : Friction welding of metals : the role of forging stage. The joining of metals : practice and performance, pp.38-46.
- 7) K.K. Wang, P.Napappan : Transient temperature distribution in inertia welding of steels, Welding J., Sep. (1970), p.419-s-425-s.
- 8) K.K. Wang, Wenlin : Flywheel friction welding research, Welding J., Jun. (1974), p. 233-s-426-s.
- 9) C.J. Cheng : Transient temperature distribution during friction welding of two dissimilar materials in tubular form. Welding J., May, (1963), p.233-s-550-s.