

알루미늄 합금의 저항점 용접에 관한 연구 (I)

(A study on the resistance spot welding of Aluminum-Alloy (I))

김상필* 홍태민* 장희석** 배경민*** 김대영***

서론

저항 점 용접은 일종의 전기저항 용접공정으로, 저항 발열이 생길 수 있는 강재, Stainless, Aluminum, Nikel, Titanium 합금등의 접합에도 이용된다. 특히 알루미늄 소재는 자동차 및 선박에 있어서 에너지의 효율적 사용과 함께 경량화의 필요성이 요구되는 추세에 힘입어 경량이면서 우수한 강도를 가지는 알루미늄 합금의 개발과 저항점용접에 관한 연구가 요구되고 있다.

알루미늄합금은 고유저항이 작고, 저항의 온도계수가 작기 때문에 용융점에 도달하기까지 저항의 대폭적인 증가는 기대하기 어렵다. 또한 알루미늄합금의 열전도율이 연강보다 약 3배정도 높아서 용융부주위의 온도상승에 의한 용접열손실이 크므로 약 10,000~30,000A 정도의 높은 용접전류를 필요로 하며, 낮은 용융온도와 높은 전기전도도로 인하여 짧은 용접수행시간을 필요로 한다. 또한 소성영역(약 95~200℃)이 극히 좁아서 용접시 전극가압력과 전류에 따른 용접물의 지나친 함입(Indentation) 등 용접불량이 발생하기 쉽다.

따라서 본 연구에서는 경량이면서 우수한 내식성을 가지는 알루미늄합금의 저항점용접 과정에서 동저항파형과 전극분리신호를 측정하고 분석하여 용융부의 성장 및 거동을 해석하였다.

실험장치 및 과정

용접에 사용된 용접기의 용량은 150KVA이고, 현재 산업현장에서 많이 사용되는 공기압 작동식의 정치식 점용접기를 사용하였으며, 전극의 Tip은 전류의 밀집도가 크고 용접물과의 용착이 적어 현재 자동차 생산현장에서 많이 사용중인 Dome Type을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 용접시편은 Mg-Si계열의, 내식성이 우수하고 경량이면서 기계적강도가 뛰어나 차량구조용으로 적합한 일본 KOBE(神戸) Steel社의 KS6383 T4 알루미늄 합금을 사용하였으며 재료의 기계적 성질 및 조성은 아래 표에 명시하였다.

| Alloy | THK(mm) | Temper | 주성분 (Wt%) | Tensile Property | |
|--------|---------|--------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | | | σ_y Kg/mm ² | σ_t Kg/mm ² |
| KS6383 | 1.0 | T4 | Al-Mg-1.2Si | 14.1 | 25.7 |

Table 1. Mechanical Properties of Typical Al-alloy (KS6383)

용접조건에서 용접전류는 20KA에서 36KA까지 2,000A씩 증가시키면서, 용접가압력은 200kgf~350kgf 사이에서 50kgf씩 증가시키면서 용접하였다.

* 명지대학교 대학원 기계공학과

** 명지대학교 기계공학과

*** 현대자동차 생산기술개발부

용접진행 과정을 정성적으로 잘 보여줄 수 있는 용접 공정변수(Weld processing parameter)들인 동저항파형과 전극분리신호의 측정 system 및 실험장치를 그림1,2에 도시하였다. 용접이 끝난 후 시편의 정중앙을 Cutting, Mounting, Polishing, Etching 과정을 거친 후 용융부의 크기를 측정하기 위하여 CCD Camera로 촬영하였다. 이때 얻어진 화상은 Image Processing Unit을 이용해 PC에 화상을 저장한 후 용융부의 크기(Diameter, Penetration)를 화상처리 프로그램인 Global Lab에서 정확한 용융부의 크기를 측정하였다[15]. 동시에 알루미늄의 저항점용접에 의한 용융부의 조직과 기공 및 균열의 용접불량을 검사하기 위하여 ISI, APT社의 SEM(Scanning Electron Microscope) SM-32를 이용하여 500배로 용융부의 각 부분을 촬영하였다.

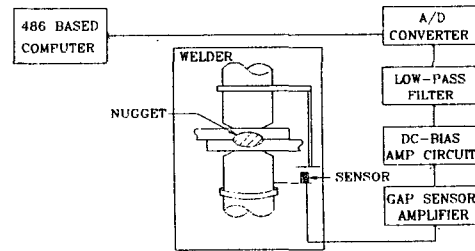


Fig.1 Block diagram of electrode movement measuring system.

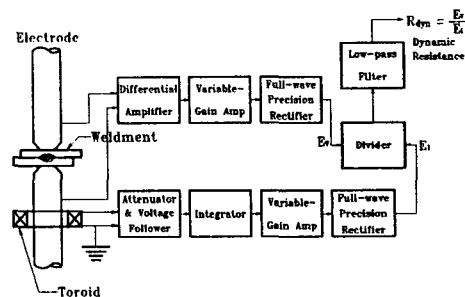


Fig.2 Block diagram of electronic instrumentation system for computing dynamic resistance of weld.

동저항파형 변화와 용융부 성장 과정

동저항(Dynamic Resistance)은 용접과정중 전극양단의 전압신호를 전류신호로 나누어서 용접사이클별로 변화하는 곡선으로 얻어진다. 알루미늄합금의 경우는 아연도금강판의 경우보다 공기중에서 더욱 쉽게 산화막을 형성하여 용접초기의 저항에 큰 영향을 미치며, 연성(ductility)이 풍부하기 때문에 용접가압력의 변화와 시편표면의 작은 돌기들의 영향으로 큰 저항을 나타낸다.

Fig. 3(a)는 아연도금강판과 알루미늄합금의 동저항파형의 변화곡선 및 용융부형성의 모식도이다. [1, 5, 7, 8] 구간 I에서, 용접시편의 접촉면에서의 표면 산화막때문에 절연저항이 수 mega ohm(MΩ)정도로 나타난다. 전류가 흐르기 시작하면 접촉면의 절연상태가 급격히 파괴되어 동저항의 매우 빠른 감소현상이 일어난다. 구간II에서는 전류가 흐르면서 알루미늄합금의 동저항은 재료의 낮은 용융온도와 높은 열전도도 때문에 접촉부위에서 국부적으로 발생된 열은 쉽게 잃어버리며, 전극가압력에 의하여 연화된 조직이 파괴되어 접촉면적이 증가하며 이로 인한 저항감소효과가 지배적이지만, 동시에 온도상승에 의한 저항증가로인해 동저항은 I구간보다 완만하게 감소를 하게 된다. 구간III에서의 동저항은 온도상승에 의한 체적저항증가의 효과와 통전면적의 증가에따라 저항은 감소되면서, 이 구간이 끝나는 부근에서 부분적으로 용융이 일어나기 시작한다. 구간IV에서는 계속되는 열입력에 의해 온도가 상승하며 저항이 증가되는 효과와 용융부의 형성에 의한 체적저항 증가의 효과가 온도의 증가에 따른 재료의 연성증가와 접촉면의 확산에 의한 저항감소효과를 상쇄시키며 동저항은 완만하게 감소한다. 용융부 주변의 전체적인 온도가 상승함에 따라 접촉면에서 용융부로부터 발생하는 잠열에 의하여 저항의 감소율은 둔화된다. 구간V에서는 용융부 주변이 소성역에 도달하여 전극의 가압력을 지탱하지 못하고 함입현상이 계속 진행되어 전극이 가까워지며 전류의 경로를 짧게하여 저항은 감소되면서 용융부 확산에 의한 접촉면적의 증가로 저항감소의 효과가 온도상승에 의한 체적저항증가 효과와 거의 평형상태를 유지하며 용융부가 형성된다.

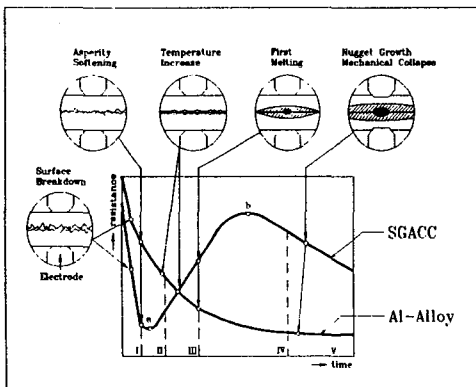
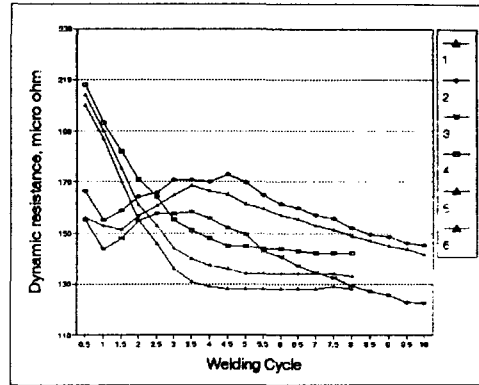


Fig. 3(a) Typical dynamic resistance curves.

Fig. 3(b)는 실제 용접과정에서 얻어진 아연도금강판

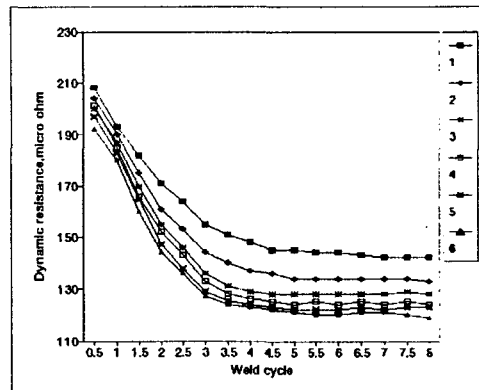
과 알루미늄합금의 동저항 파형의 변화이다. 아연도금강판의 경우보다 알루미늄합금의 경우 접촉표면에서의 산화피막에의한 초기저항이 매우 크며 용접이 진행되면서 저항은 낮아지고 용융부의 확산이 일어나며 용접 후반부에서 동저항이 일정하게 나타나는 현상이 아연도금강판이나 연강의 경우와 좋은 대조를 보인다.



(Weldment Thickness: SGACC=0.8mm, Al-alloy=1.0mm)

| | SGACC | | | Al-alloy | | |
|--------------|-------|-----|-----|----------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Current (kA) | 8.5 | 8.5 | 9 | 20 | 24 | 30 |
| Force(kgf) | 250 | 300 | 250 | 300 | 250 | 300 |

Fig. 3(b) Experimental dynamic resistance curves.



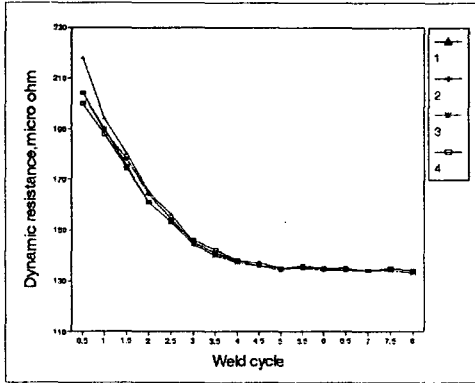
(Weldment Thickness=1.0mm, Force=300kgf)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|----|----|----|----|----|----|
| Current(KA) | 20 | 24 | 28 | 30 | 32 | 34 |

Fig. 4(a) Dynamic resistance of Al-alloy.

Fig. 4(a)는 동일 가압력하에서 전류의 증가에 따른 실제 용접공정의 동저항파형변화를 나타내며, 전류 증가에 따라 용접시편의 열입력량이 많아지며 동저항은

급격하게 변화한다. 전류가 증가됨에 따라 용융부의 온도 상승에 의한 용접시편의 저항증가 효과보다 재료의 연성에 의하여 접촉면이 무너지며 전극사이의 거리가 가까워져 전류의 경로를 짧게함과 동시에 용융부의 확산이 쉽게 일어나며 빠른 열전도도에 기인한 온도상승 억제효과 때문에 전류가 증가율에 비례하여 동저항이 심하게 변화하지 않음을 보여준다.



(Weldment Thickness=1.0mm, Current=24kA)

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|-----|-----|-----|-----|
| Force(kgf) | 200 | 250 | 300 | 350 |

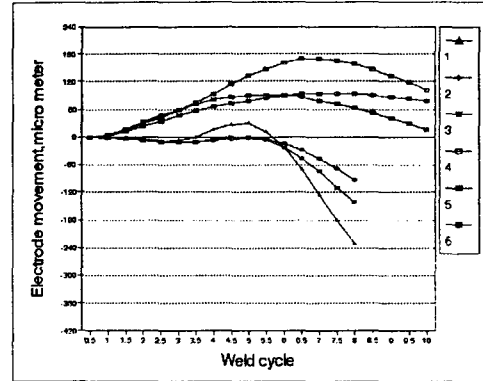
Fig. 4(b) Dynamic resistance of Al-alloy.

Fig. 4(b)는 동일 전류 조건하에서 전극가압력의 변화에 따른 동저항의 변화곡선을 도시한 것이며 가압력의 증가는 알루미늄합금 용접시편의 표면돌기 및 산화막의 파괴에 기인한 용접초기의 저항의 변화만을 야기하며 용접이 진행됨에 따라 전극의 가압력이 200kgf~350kgf범위로 증가하여도 저항의 변화는 거의 나타나지 않는다.

전극분리 파형과 용융부의 성장과정

저항점용접시 용융부의 열팽창은 용접시스템의 열물리현상(Thermophysical phenomena)을 잘 반영해 주는 일반적으로 많이 사용되는 파라미터이다. Fig. 5(a)는 실제용접과정에서 용접사이클별로 나타나는 아연도금강판과 알루미늄합금의 전극분리신호변화 파형을 도시한 것이다. 아연도금강판의 경우 용접 후반부에서 최대점에 도달하지만 알루미늄합금은 용접 중반부에서 최대점에 도달한다. 즉 알루미늄합금은 아연도금강판보다 재료의 연성이 풍부하여 용융부 주위의 소성역에 도달한 금속조직이 쉽게 밀려나며, 재료의 열팽창에 의한 전극분리신호의 증가 효과보다 용융부의 확산 및 합입에 의한 전극분리신호의 감소효과가 더욱 크게 나타난다. 실제 용접 공정에서 외란(Disturbance)의 효과를 해석할 수 있는 용접 전원의 변동, 전극가압력의 변동, 전극의 마모, 표면산화, 용접물의 불균일, 분류효과(Shunt Effect) 등의 현상은 용융부로 흐르는 유효전류의 변동을 야기시키며, 용접질의 저하 및 동일 조건에서 용융부 형성의 불규칙을 유발하며, 이러한 외란의 영향은 전극 분리신호의 파형 변화에 영향을 주기 때문에, 이를 측정함으로써 위의

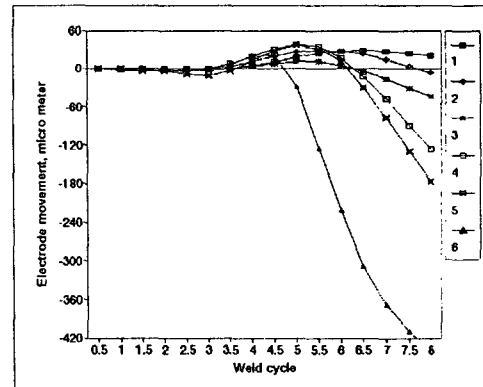
같은 현상을 간접적으로 모니터링 할 수 있다. [8-12]



(Weldment Thickness: Al-alloy=1.0mm, SGACC=0.8mm)

| | Al-alloy | | | | SGACC | |
|-------------|----------|-----|-----|-----|-------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Current(kA) | 32 | 28 | 32 | 8.5 | 8.5 | 9 |
| Force(kgf) | 250 | 300 | 300 | 250 | 300 | 350 |

Fig. 6(a) Experimental electrode movement.



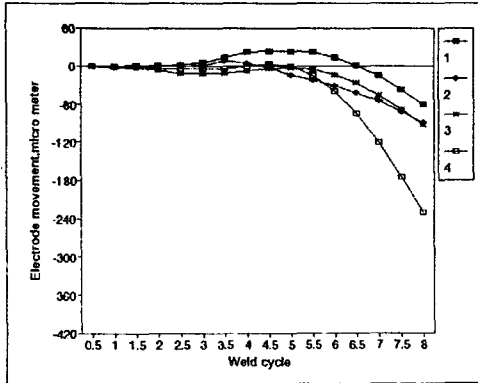
(Weldment Thickness=1.0mm, Force=250kgf)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|----|----|----|----|----|----|
| Current(kA) | 22 | 24 | 26 | 30 | 32 | 34 |

Fig. 5(b) Electrode movement of Al-alloy.

Fig. 5(b)는 동일가압력하에서 전류를 증가시켰을때 알루미늄합금의 전극분리신호이다. 3cycle까지는 시편의 표면이 열의 영향을 받아 연화되는 구간으로 Fig. 4(a)의 구간II이다. 5-6cycle 동안은 거의 선형적으로 증가하면서 최대점에 도달하는 Fig. 3(a)의 구간IV의 후반부를 넘어서면 용융부가 급속히 확산되면서 용융부 주변의 연화된 조직이 전극의 가압력을 지탱하지 못하고 전극이 서로 가까워지는 합입이 일어나는데 이때가 Fig. 3(a)의 구간V으로, 열입력의 증가에 비례하여 합입률이 증가한

다. Fig.5(c)에서와 같이 전류를 높임에 따른 열입력이 많아지는 경우 전극분리신호의 최대점에 도달하는 시간은 짧아지며 전극분리신호의 최저점은 극히 낮아짐을 보인다. 과도한 열입력의 경우는 용융부가 시편과 시편의 연화된 조직들 사이를 통하여 외부로 분출되는 용출(Expulsion)현상을 초래하게 된다.



(Weldment Thickness=1.0mm, Current=28kA)

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|-----|-----|-----|-----|
| Force(kgf) | 200 | 250 | 300 | 350 |

Fig. 5(c) Electrode movement of Al-alloy.

실험 및 결과

Fig. 7는 알루미늄합금의 용접시 용융부 절단면이며 용융부에 발생한 균열을 찍은 사진이다. Fig. 7(a)는 알루미늄합금의 base metal이며, Fig. 7(b)는 base metal과 HAZ의 경계면이며, Fig. 7(c)는 HAZ와 nugget의 경계면으로 HAZ부분은 접합이 되지 않았으며 이는 표면처리를 하지 않은 결과이다. Fig. 7(d)는 용융부 정중앙의 조직이며 용융에 의한 재결정이 일어나 형성된 사진이다. Fig. 7에서처럼 용접시 형성된 시편표면과 전극사이의 접촉면이 전극과 쉽게 반응하여 오손된 형상을 나타내며, Fig. 7(e)는 용융부의 중앙 부근에 균열(crack) 및 기공(porosity)이 관찰된다. 이러한 균열의 원인은 알루미늄합금의 첨가원소가 용융되어 냉각되면서 용질원소들이 재분배를 일으켜 응고시 균열생성에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있고[9], 용융에 의하여 팽창한 용융부가 응고시 수축하며 발생된 것으로 알려져 있다.[10] 이러한 균열 및 기공은 용접물의 인장 및 굽힘강도의 저하와 파괴에 큰영향을 미치므로 알루미늄합금의 저항점용접시에는 용접 후반부 이후에 균열 및 기공의 감소를 위하여 전극가압력을 높여 주는 이단가압과 용접 후기에 전류를 흘려주는 후열처리과정이 필요하다.

결론

본 연구에서는 알루미늄합금의 저항점용접성을 고찰하기 위하여 전류와 전극가압력을 광범위한 조건으로 변화시켜 가며 실험하였다. 알루미늄의 저항점용접도중 생성되는 용융부의 형성과정을 정성적(qualitatively)으로

잘 나타내 주는 용접공정변수인 동저항파형의 변화와 전극분리신호를 측정함으로써 용융부의 성장과정을 규명할 수 있었다.

알루미늄합금은 고유저항이 낮고 열전도율이 높기 때문에 대전류 단시간의 통전이 필요하며, 용융에 따른 열팽창이 크기 때문에 응고시 갈라짐이나 기공등의 용접불량이 발생하기 쉽다. 알루미늄합금의 용접에서 발생하는 균열 및 기공의 방지를 위하여 용융부의 성장과정을 잘 반영하여 주는 동저항파형변화와 전극분리신호를 측정하여, 이를 근거로 후열처리를 위한 전류를 조절하고, 용접 후반부에 전극에 이단가압 할 수 있는 Welding schedule의 개발이 절실히 요구된다.

참고문헌

- (1) Godern S.A., Sorensen C.D., Ulrich K.T. and Eagar T.R., 1987, "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds", Welding Journal, Dec., pp387-385.
- (2) Waller D.N and Knowlson P.H., "Electrode Separation Applied to Quality Control in Resistance Welding", Welding Journal, April, (1965), pp.168s~174s
- (3) Chang H.S., Cho Y.J, Choi S.G., and Cho H.S., "A proportional-Integral Controller compensating Spot Weld Quality Variation due to Electrode Wear", Modeling Sensing and control of Manufacturing Process, PED-Vol.23/DSC-Vol.4, ASME, Book NO.Hoo370, New York, (1986), pp83~93.
- (4) Chang H.S., Cho Y.J, Choi S.G., and Cho H.S., "A proportional-Integral Controller for Spot Welding Using Nugget Expansion", ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurement, and control, Vol.111, NO.2, June, (1989), pp.332~336.
- (5) 장희석, 조형석, "용접질 향상을 위한 저항점용접 공정의 제어기 개발에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 제 13권 6호 (1989), pp.1156~1169.
- (6) Chang H.S., "In-Process Monitoring and Control of Weld Nugget Geometry for Resistance Spot Welding Process", Ph.D. Thesis (1989) KAIST.
- (7) 김상필, 신현욱, 최덕준, 장희석, "용융부 형상 판독을 위한 영상처리기법", 대한용접학회 춘계학술대회 논문집, (1993), pp.132-134.
- (8) 최용범, 장희석, 조형석, "저항점용접에서 인공신경 회로망을 이용한 용융부 추정에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 2월호, (1993), pp393-406.
- (9) 김환태, 황선효, 남수우, "용접구조용 7000계열 고장력 Al-Zn-Mg합금의 용접특성과 용접균열에 관한 연구", 대한용접학회 논문집, 제12권 제1호, 3월, (1994), pp28-37.
- (10) KAISER ALUMINUM & CHEMICAL SALES, INC., "Welding Kaiser Aluminum", 2nd Ed., Kaiser Aluminum, (1978), pp11-6~11-30.

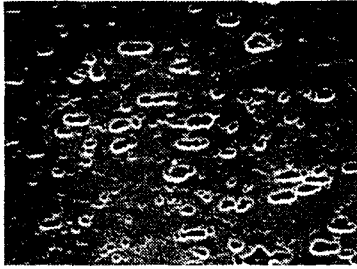


Fig. 7(a) Base metal, 500X

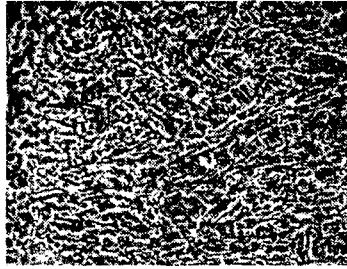


Fig. 7(b) Nugget, 460X

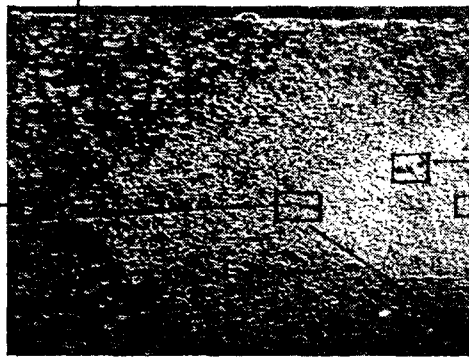


Fig. 7 Photomicrographs of cross-sectional area of spot weld in Al-Alloy

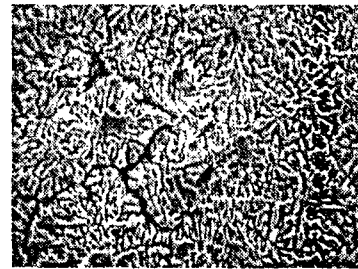


Fig. 7(c) Crack in nugget, 500X

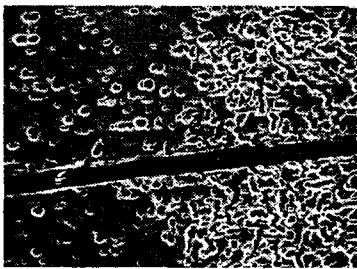


Fig. 7(e) HAZ and base metal, 200X

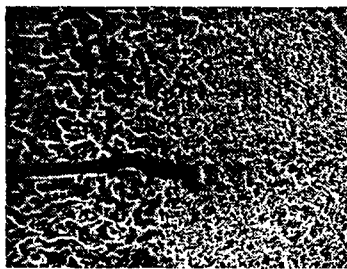


Fig. 7(d) Nugget and HAZ, 250X