

大韓熔接學會誌
第2卷第1號 1984年3月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 2, No. 1, Mar., 1984

고온 Brazed Joint의 파괴 거동에 대한 연구

스테펜스* · 배석천** · 비일라게*** · 다머***

Investigations about the Fracture Behaviour on High-Temperature-Brazed NiCr20TiAl/BNi-5 Joints

by

H. D. Steffens*, S. C. Bae**, B. Wielage***, R. Dammer***,

Abstract

With the use of a new method the deformation mechanism of high-temperature-brazed joints can be obtained in a very short time.

For that purpose a SEM(Scanning Electron Microscope) was equipped with a high temperature tensile testing machine.

By means of SEM-investigation the damage behaviour of high-temperature-brazed joints is examined at elevated temperature.

Based on these it is possible to make a qualification of the influence over single parts on the damage beginning and behaviour in dependence of temperature.

This shall be shown exemplarily for the high temperature material NiCr20TiAl (Nimonic 80A).

1. 서 론

Nimonic 80A는 nickel base의 superalloy로서, 기계 및 열적으로 높은 응력 상태를 보이는 구조물, 즉 turbine이나 reactor construction에 널리 사용되고 있다. 그러나, 이 합금은 합금 자체가 지니는 복잡한 structure로 인해 오직 한정된 범위 내에서만 용접이 가능하다. 보통 이 합금의 접합을 위하여 high-temperature-brazing 법이 사용되고 있다.¹⁾ 이 방법은 용접과는 달리 base metal이 용융되지 않은 상태에서 두

모재가 접합되므로 상당히 미소한 heat affected zone이 생긴다는 점과, 접합 후 joint 내에는 용접부에 비해 thermal stress에 의한 deforming이 적게 생긴다는 큰 장점을 가지고 있다.

일반적으로 고온 brazing 과정에서는 공기중의 산소에 의한 joint 내의 산화물 형성을 억제하기 위해 inert gas나 vacuum 상태에서 행하여 진다. 그러나, 이러한 과정을 통하여 생산된 high-temperature-brazed joint 역시 여러 가지 production parameter와, 이것으로부터 야기된 복잡한 금속학적인 반응 등에 의해 불균질한 조직 상태를 나타낸다.²⁾ 또 brazing 과정을 통하여 brazed joint에는 서로 다른 형태와 크기의 brazing

* Dortmund 대학 교수

** Dortmund 대학 연구원, 정회원

*** Dortmund 대학 연구원

fault가 생성되어" 여러 가지 기계적 특성이 변화된 single parts가 형성된다.

그러나, 이러한 brazing 과정을 통해 생성된 불균질 조직은 brazing process의 개선이나, 이후 열처리 과정에 의하여 완전 제거가 불가능하므로, brazed joint의 damage mechanism에 대한 특이한 관찰이 필요하다.

Photo. 1은 NiCr20Ti Al/B Ni-5에 나타난 high-temperature-brazed joint의 한 단면이다.⁴⁾

Photo. 1에서 알 수 있는 바와 같이 brazed joint와 그에 인접한 base material에는 joint의 deformation behaviour나 damage process에 영향을 줄 수 있는 single parts를 볼 수 있다. 이러한 single parts에는 brazed joint의 grain 내에 하나의 fault나, 또는 fault의 cluster로서 나타날 수 있는 brazing defects와 high temperature deformation 과정중 fracture mechanism에 큰 영향을 미치는 insoluble compounds (silicide, carbide), precipitations along grain seam과 grain boundary 등이 존재한다.

위의 점들을 바탕으로^{5,6)} 이러한 single parts의 cra-

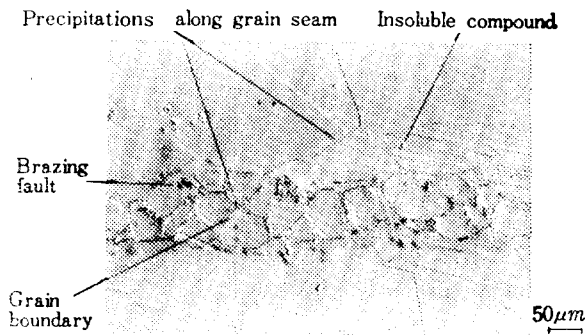


Photo. 1. High temperature brazed joint

ck initiation 및 damage 진행 과정을 관찰할 수 있다. 물론, 이러한 연구 목적을 위해 종래의 광학 현미경이나 전자 현미경의 도움만으로는 불가능하다. 왜냐하면, brazed joint 내에 존재하는 모든 single parts의 영향은 deformation process 마지막 단계에서 관찰될 수 있으며, 서로 다른 종류와 크기를 가진 결함들의 판단과 deformation 과정중 이들의 영향은 오직 한정된 load 상태에서서만 유도해 낼 수 있기 때문이다.

이상과 같은 점을 미루어 볼 때, brazed joint에 존재하는 여러 single parts에 대한 deformation process의 세분된 관찰과 거기에 따른 fracture mechanism의 논의가 요구된다. 이러한 실험은 SEM에 high temperature tensile testing machine을 연결하여 시편의 가열 및 동시에 quasi-static load를 가하면서 deformation 진행 과정을 직접 관찰할 수 있으며, 이후 fracture mechanism에 대하여도 상세히 논의할 수 있다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 실험 장치는 SEM에 high temperature tensile testing machine를 연결시킨 것으로 그 개략적인 장치를 Fig. 1에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이, high temperature tensile testing machine은 SEM의 관찰 room에 연결되어 시편의 deformation process의 직접 관찰이 가능하고, 이 장치에 의해 인장 시편은 0.2~200µm/sec의 일정한 cross head speed로 quasi-static load를 가할 수 있으며, 동시 conductive heating을 통하여 시편을 최대 800°C의 실험 온도까지 가열할 수 있다.

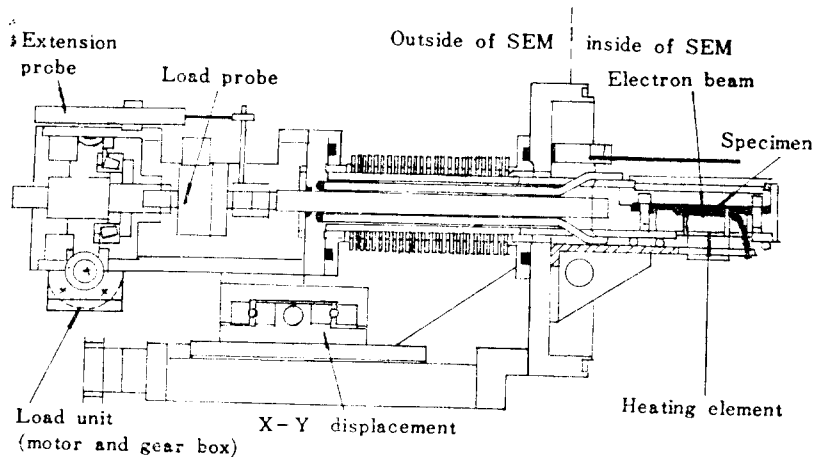


Fig. 1. High temperature tensile testing machine(schematic)

실험 조건으로는, 앞으로 진행될 연구 결과와의 계속적인 비교를 목적으로 $4\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 일정한 cross head speed와 350, 500, 800°C의 세 온도 영역을 채택하였다. 실험 과정은, 먼저 high temperature tensile testing machine을 통하여 시편에 일정한 load와 열을 가한 후, SEM을 통하여 표면 관찰을 하였는데, 이러한 실험 과정중 특히 brazed joint 내에 존재하는 single parts의 영향에 대해서 집중적으로 조사하였다.

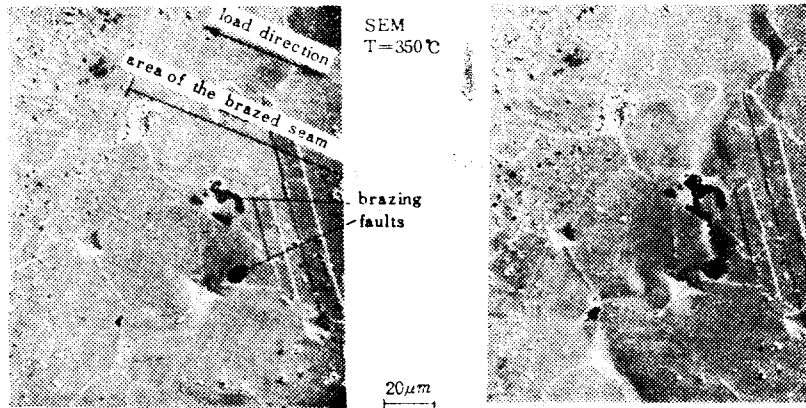
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 350°C에서의 파괴 과정

350°C에서 시편의 파괴 과정은 Photo. 2b에 나타낸 바와 같이, 먼저 단시간 내에 이 시편의 lower yield point 까지 load가 가해지면, 이미 이 정도의 load 상

태에서 brazing fault에 응력 집중 현상이 일어나 이로 인한 deformation cluster가 나타나고 이 후 Photo. 3a에서와 같이 percentage elongation before reduction의 영역에서 계속 하중이 상승되면 brazing fault는 crack initiation 뿐만 아니라 crack shape에도 결정적인 역할을 하게 된다.

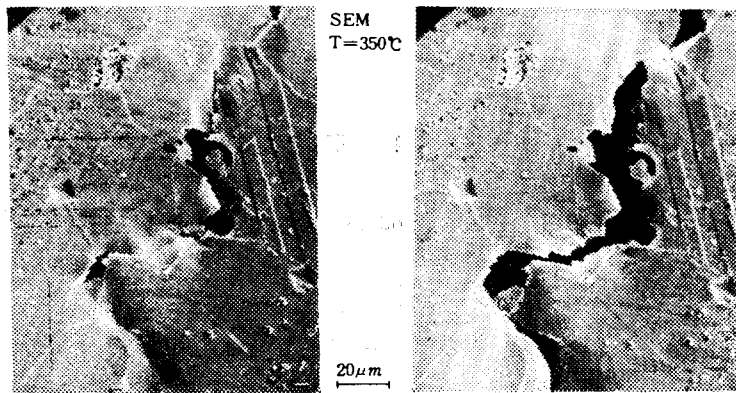
이에 반해 brazing fault나 결합의 cluster가 없는 brazed joint의 결정들은 precipitate가 많이 존재하지 않는 grain seam에서 일차적인 소성 변형이 일어나고, 이 후 precipitate free grain seam을 따라 계속적으로 강한 소성 변형이 일어나 slip band cracking과 함께 결합되어 있는 multiple slipping 현상이 나타난다. 그러나 여기서 주목할 사실이 insoluble compound는 이러한 하중까지 crack initiation이나 damage 진행 과정에 거의 영향을 받지 않는다. 즉 insoluble com-



a) Free load state specimen

b) Before plastic deformation

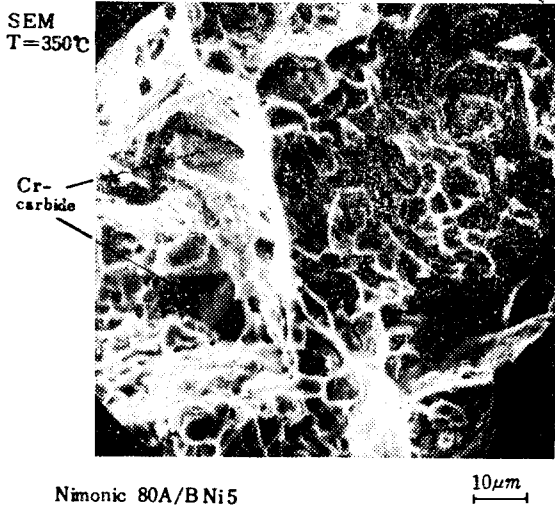
Photo. 2. Deformation behaviour of unnotched specimens Nimonic 80A/BNi5



a) Range of percentage elongation before reduction

b) Before fracture of the sample

Photo. 3. Deformation behaviour of unnotched specimens Nimonic 80A/BNi5



Nimonic 80A/BNi5

Photo. 4. Ductile transcrystalline fracture

pound에 의한 crack initiation은 관찰되지 않았으며, 이러한 insoluble compound는 이미 base material 상에서 관찰된 것과 같이 grain boundary의 seam, 또는 결정 내에 자기 분포되어 있다는 점이다.

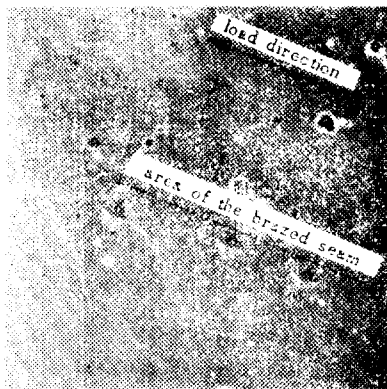
Photo. 3b에서 알 수 있듯이, 이 후 계속적인 하중의 상승은 서로 인접해 있는 brazing fault들이 함께 성장하여 결국 joint의 파괴를 초래하였다. 이 시편의 SEM을 통한 fracture surface의 fractograph 관찰 결과 주로 높은 인성을 가진 transgranular fracture mode를 나타내었다. Photo. 4에서 보는 바와 같이 fracture surface는 전형적인 honeycomb structure를 가지고 있다.

3.2 500°C에서의 파괴 과정

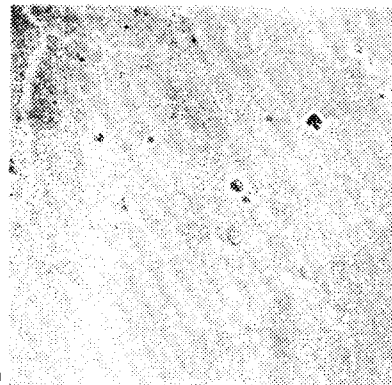
Photo. 5, 6에서 보는 바와 같이 500°C에서 시편의 파괴 과정은 350°C와는 약간 다른 damage shape를 보인다.

즉, 이 실험 온도에서는 deformation cluster가 integral 측정된 percentage elongation before reduction의 중간 지점에서 처음으로 관찰되었으며, 이러한 deformation cluster를 역시 brazing fault에 위치하고 있지 않은 것을 알 수 있다. 따라서, 500°C의 실험 온도에서는 brazed joint 내에 존재하는 이러한 brazing fault들이 crack initiation과 crack propagation에 대해 아주 미소한 영향을 보이며, 어느 정도 크기에 달한 fault만이 brazed joint의 deformation이나 파괴 과정에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 결국, 이런 미소한 영향은 변형 과정에서 deformation이 grain surface를 따라 균일하게 일어났기 때문이다. 그러나, insoluble compound나 grain boundary 등은 이러한 load moment까지 crack initiation에 미소한 영향을 나타내며, 따라서 deformation behaviour에 대한 이들의 영향은 매우 적다고 볼 수 있다.

위의 사실들은, Photo. 6a에서 시편 파괴 직전까지 joint에 계속적인 하중의 상승을 통하여 증명된다. 즉, deformation 과정에서 brazing fault가 crack initiation을 야기시킴 없이 slipping이 brazed joint 결정 내에 증가되고, 이 후 Photo. 6b에서와 같이 처음으로 파괴 과정에서, 또는 시편의 파괴 직전에 다소 brazing fault를 통과하면서 cracking이 일어난 것을 알 수 있다. 이 시편의 fracture surface는 Photo. 7에서와 같이 깨어진 바늘 모양의 carbide를 같이한 transgranular fracture mode와 이 외 부분적으로 intergranular

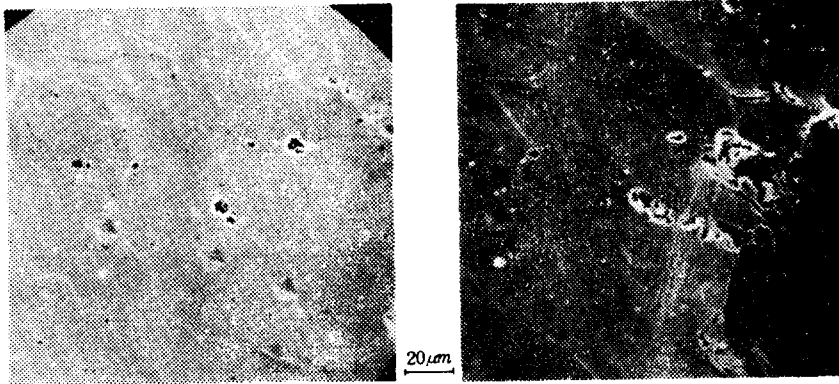


a) Free load state specimen
Nimonic 80A/BNi5 SEM. T=500°C



b) Range of percentage elongation before reduction

Photo. 5. Deformation behaviour of unnotched specimens



a) Before the fracture
SEM. T=500°C. Nimonic 80A/BNi5
b) Area of fracture

Photo. 6. Deformation behaviour of unnotched specimens

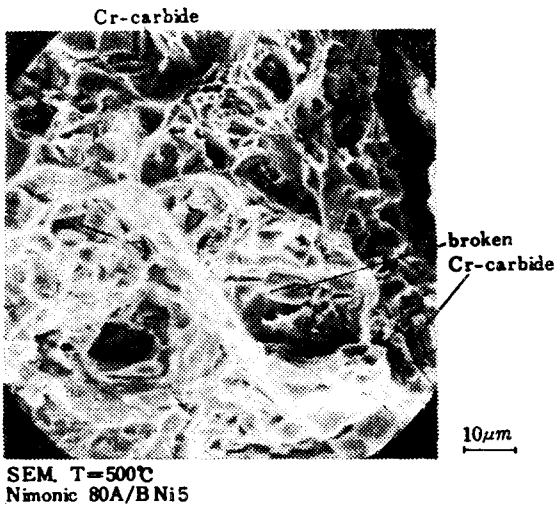


Photo. 7. Transcrystalline mixed rupture

fracture mode 를 보이고 있어 350°C의 fracture mode 와 비교될 수 있다.

3.3 800°C에서의 파괴 과정

지금까지의 실험 결과로 부터 (350°C와 500°C), brazed joint 의 single parts 는 deformation 과정중에 온도의 영향을 받는다는 사실을 추정할 수 있으며, 이러한 사실이 Photo. 8의 800°C 실험 결과에서 증명되었다.

위에서 기술한 바와 같이, 이 시편 역시 quasi-static load를 가하였으며, 시편은 파괴 직전 주로 base material 까지 transition zone 의 몇몇 결정에서만 미소한



a) Free load state specimen



b) Left part
c) Right part of the specimen after fracture
Nimonic 80A/BNi 5

Photo. 8. Deformation behaviour of unnotched specimens

deformation cluster 가 관찰되었으며, 이 실험 온도에서도 insoluble compound 나 brazing fault, 그리고 precipitate가 적은 grain seam에서 crack initiation 을 발견할 수 없었다.

Photo. 8b와 8c에서 명확히 알 수 있듯이 800°C 시

편의 파괴는 거의 결정 경계를 따라 순간적으로 일어나서 파괴 과정의 측정학적인 관찰은 거의 불가능하며, grain boundary 나 이에 인접한 영역에서 미소한 소성 변형을 일으키는 정도로 이러한 관계가 Photo. 9의 fracture surface fractograph 분석을 통해 증명되었다.

즉, brazed joint의 grain boundary를 따른 미시적 관찰을 통하여 약간의 인성을 지닌 영역을 찾아볼 수 있으나, 대다수의 영역이 취성 파괴면을 가진 intergranular fracture mode임을 알 수 있으며, Fig. 2의 load-elongation-diagram 상에도 나타난 바와 같이 800°C 시편이 가장 낮은 인장 강도를 보이고 있는 것

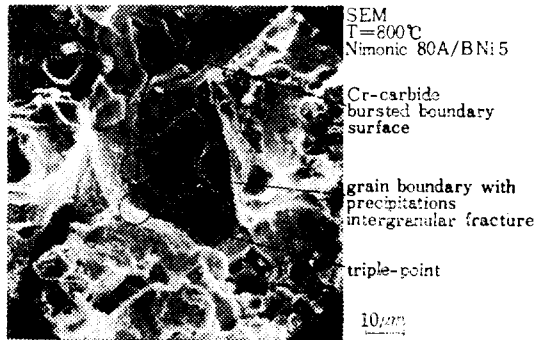


Photo. 9. Intercrystalline fracture

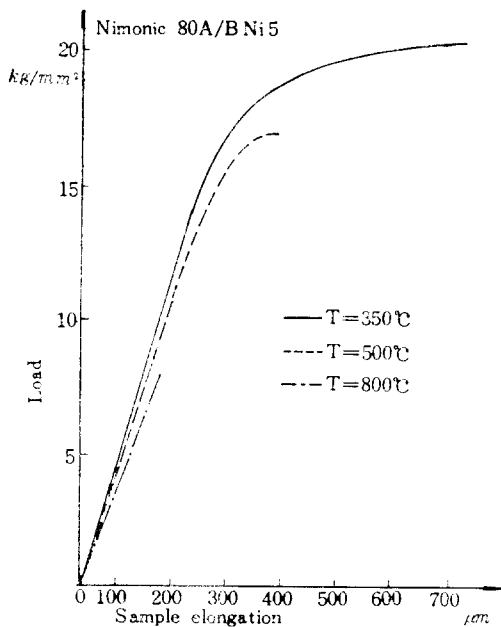


Fig. 2. Load-elongation-diagrams of single edge notched specimens

을 알 수 있다.

4. 결 론

이상의 실험 결과로부터, 350°C 실험 온도에서 시편의 파괴 과정은 일차적으로 시편에 존재하는 brazing fault에서 crack initiation이 일어나며, 이것과 더불어 damage 진행 과정에 결정적인 역할을 한다. 이에 반해 brazing fault가 없는 영역에서의 소성 변형은 일차적으로 precipitate가 적게 분포되어 있는 grain seam에서 일어나며, 이것으로 인하여 높은 deformation degree를 같이한 slip band cracking의 결과를 초래한다. 그러나, 이 실험 온도에서 존재하는 insoluble compound나 grain boundary들은 brazed joint의 crack initiation과 damage 진행 과정에 매우 미소한 영향을 보였다.

이에 반해 500°C 실험 온도에서는 brazing fault가 crack initiation에 직접적인 영향을 주지는 못하나, 파괴 과정중 crack의 진행 과정에 참여하고 있는 것으로 나타났으며, precipitate가 적은 grain seam이나 insoluble compound 등에 의한 결정적인 crack initiation 역시 관찰되지 않았다.

그러나, 800°C에서 시편의 파괴 과정은 시편 내에 존재하는 brazing fault나 precipitate free grain seam 등의 영향 없이, 오직 brazed joint의 결정 경계를 따라 순간적으로 파괴가 일어났다. 이런 결과를 미루어 볼 때, 파괴 과정중 brazed joint 내의 single parts는 cracking에 대해 확실한 온도 의존성을 가지고 있다는 사실을 알 수 있으며, 그 상호 관계를 Fig. 3에 개략

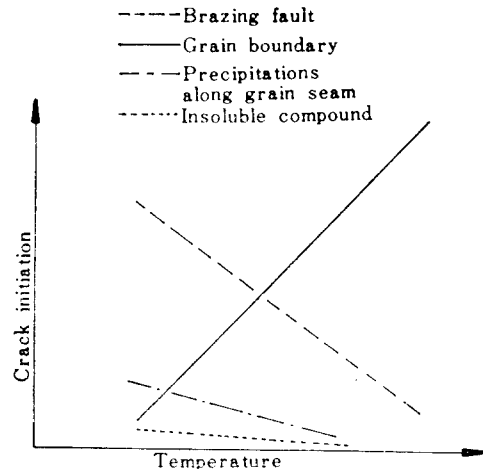


Fig. 3. Effect of crack initiation under tensile loading(schematic)

적으로 나타내었다.

이상과 같이, high-temperature-brazed joint 의 파괴 과정을 바로 이해하기 위해서는 자기 서로 다른 기계적인 특성을 가지고 brazed joint 내에 존재하는 single parts 의 deformation 과정에 대한 세분된 관찰이 있어야 한다. 또 이러한 연구를 통하여 brazed joint의 임계 인성치 및 임계 fault 크기에 대한 한계를 명시할 수 있으며, 이 외의 모든 기계적 특성에 영향을 미치는 parameter의 고려하에서 high-temperature-brazed joint의 광범위한 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

1. H.-D. Steffens and R. Dammer, *Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Temperaturen auf die Festigkeitseigenschaften und Bruchmechanismen von NiCr20TiAl und Hochtemperaturlötverbindung NiCr20TiAl/BNi-5*, demnächst in Zeitschrift für Werkstofftechnik, (1984)
2. H.-D. Steffens and K.-H. Hartmann, *Untersuchungen an Hochtemperaturlötverbindun-*
3. H.-D. Steffens, B. Wielage and R. Dämmer, *Hochtemperaturlötverbindungen an Bauteilproben mit Schallsignalen beurteilen*, Maschinenmarkt, Vol. 88, (1982), pp. 839~842
4. B. Wielage, *Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Hochtemperaturgelöteten NiCr20 TiAl/BNi-5- Verbindungen* Dissertation, Universität Dortmund, (1979)
5. H.-D. Steffens and B. Wielage, *Untersuchungen zum Rißmechanismus von Hochtemperatur-Lötverbindungen bei schwingender Beanspruchung*, Schweißen und Schneiden, Vol. 29, No. 10, (1977), pp. 1~4
6. H.-D. Steffens, B.Z. Weiss and B. Wielage, *Einfluß von Lötfehlern auf die Festigkeitseigenschaften von Lötverbindungen*, Unveröffentlichter Forschungsbericht Universität Dortmund, (1979)

科學技術者 倫理要綱

現代的 國家發展에 미치는 科學技術者의 役割의 重要性에 비추어 우리들 科學技術者는 우리들의 行動의 指針이 될 倫理要綱을 아래와 같이 制定하고, 힘써 이를 지키므로써 祖國의 近代化에 이바지 할 것을 깊이 銘心한다.

1. 우리들 科學技術者는 모든 일을 最大限으로 誠實하고 公正하게 處理하여야 한다.
2. 우리들 科學技術者는 恒常 專門家로서의 權威를 維持하도록 努力하며 自己가 所屬하는 職場 또는 團體의 名譽를 昂揚하여야 한다.
3. 우리들 科學技術者는 法律과 公共福利에 反하는 어떠한 職分에도 從事하여서는 안되며, 의아스러운 企業體에 自己의 名稱을 빌려주는 것을 拒絶하여야 한다.
4. 우리들 科學技術者는 依賴人이나 屬僚主로부터 取得 또는 그로 因해 얻어진 科學資料나 情報에 對하여는 秘密을 지켜야 한다. 또는 他人의 資料情報을 引用할 때는 그 出處를 밝혀야 한다.
5. 우리들 科學技術者는 誇張 및 無根한 發言과 非權威의 또 眩惑의 宣傳을 삼가야 하며 또 이를 制止하여야 한다. 특히 他人의 利害에 關係되는 評價報告 및 發言에 慎重을 期하여야 한다.
6. 우리들 科學技術者는 어떠한 研究가 그 依賴者에게 利益이 되지 않음을 아는 경우에는 이를 미리 알리지 아니하고는 어떠한 報酬를 위한 研究도 擔當하지 않는다.
7. 우리들 科學技術者는 祖國의 科學技術의 發展을 위하여 最大限으로 奉仕精神을 發揮하여야 하며 또한 이를 위한 應分의 物質的 協助을 아껴서는 안 된다.