Nd:YAG 레이저를 이용한 비정질 박판 용접부의 파괴에 대한 실험적 연구

이 건상

An experimental study on the fracture of Nd:YAG laser welded amorphous foils

LEE, Kun-Sang

Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University

국민대학교 자동차공학 전문대학원

ABSTRACT

In this paper, the possibilities of the laser overlap spot welding were studied to utilize the advantageous properties of amorphous metal foils. In order to estimate the usage of amorphous metals foils as structural members, the tensile shear strength and the fracture features were investigated.

Although the crystalline zone on the surface was formed, it was not the direct cause of the fracture of the weld. The fracture of the weld resulted from the geometry discontinuity between the workpiece and the protrusion zone, which was formed during the weld process. The vein pattern - the typical feature of the fracture of the amorphous metal - was formed on the fracture surface. The tensile shear stress was reached to 1200 N/mm^2 (2-foils overlap welding) and 900 N/mm^2 (10-foils overlap welding), whereas the tensile strength of the workpiece was 1500-2000 N/mm^2.

Key Words :
Nd:YAG laser, Amorphous metal, Tensile shear test, Fracture feature, Vein pattern

1. 서론

레이저를 이용한 비정질재료 용접의 목적은 용융부를 비정질 상태로 보존하여, 모재와 근사한 특성을 갖도록 하는 것이다. 따라서 여기서는 결정형성의 정도가 중요한 평가기준이 된다. 미세조직의 구조는 용융부와 그 주변부의 균열발생, 그리고 X-ray와 전자빔에 의한 회절검사

등을 통하여 규명할 수 있다. 용접 시 형성된 결정영역은 박판의 표면에 국한되어 있으며, 시편의 내부로는 확장되지 않다는 것은 이전의 연구결과에 나타나 있다[1]. 이때 형성된 결정은 결정구조를 만들 수 있는 원소나 조성의 조합이 아니기 때문에 부하지지능력을 갖지 못한다. 여기서는 전단인장시험(tensile shear test)에 의한 용접부의 파괴 특징에 관하여 연구하였다. 이러한 파괴양상은 용융부와 그 주변영역의 결정화 상태를 간접적으로 나타내는 것으로서, 이를 통해 용접된 비정질 박판에 기계적 부하가 작용할 경우 파괴에 대한 저항능력을 알아볼 수 있다. 따라서 비정질 박판을 구조용 재료로 응용할 경우, 용접부의 부하지지능력에 대한 연구가 필수적이다.

2. 실험재료 및 실험방법

용접실험에는 상용으로 생산된 Cobalt base의 비결정질 금속박판(Vitrovac 6025F,

Vacumschmelze GmbH)을 사용하였다[2]. 이 재료는 Co69.3 / Si7.9 / Mo6.3 / Fe3.5 / Nb2.6 / B10.4 (질량비)로 구성되어 있다. 이 박판은 폭 25 mm, 두께 25 ㎛이고, 길이는 수 백m에 달하는 데 임의의 길이로 절단하여 사용하였다. 실험에 사용된 레이저 장비는 Nd:YAG laser system(Type LAY 50K, HAAS-LASER GmbH)과 3축 CNC table(Type unipos-s 800f, Manfred Foehrenbach GmbH)이며, CNC table의 위치 및 반복정밀도는 1 ㎛ 이하이다. 사용된 레이저의 특성 중 중요한 것으로는 파장 1.064 ㎛, 작업렌즈의 초점거리 100 mm, 초점위치에서의 빔의 직경 약 50 ㎛, 펄스길이 0.1 ms~10 ms, 펄스주기 최대 300 Hz, 평균출력 최대 50 W 등을 들 수 있다.

용접은 비정질 박판을 2장, 4장 및 10장을 겹치게 하여 점용접을 수행하였다. 용접 시 시편의 고정구는 Fig. 1에 나타난 바와 같으며, 왼쪽은 고정 전의 상태이며, 오른쪽은 용접을 위하여 비정질 박판을 고정시킨 상태를 나타낸다. 전단인장시험은 맨 위, 가운데 그리고 맨 아래의 박판에 대하여 실시하였으며, 시험 전후의 용융부 및 파괴부를 관찰하였다. 용접 시 경우에 따라 발생할 수 있는 용융부와 열영향부의 결정영역은 시편의 표면을 식각(etching)시켜 증명하였다. 이때 사용된 식각액은 H_2O / glacial acetic acid / nitric acid / hydrochloric acid를 부피비율 1 : 1 : 1 : 4로 혼합하여 사용하였으며, 시편을 식각액에 30초간 담갔다가 증류수로 세척한 후 1시간 후에 관찰하였다. 인장시험 후의 파괴부는 SEM 사진에 의해 관찰하였다.

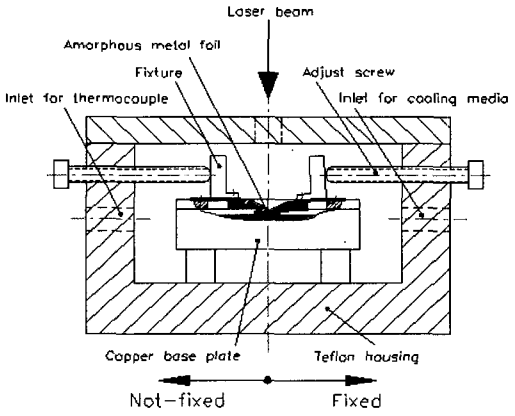

Fig. 1 The fixture for laser welding of amorphous metal

3. 실험결과 및 고찰

3.1 두 장의 비정질박판의 겹치기용접

두 장의 비정질 박판(두께 약 50 ㎛)을 겹치기 용접하였는데, 가능한 한 적은 펄스에너지의 유입을 이루면서 충분한 용융부가 형성되도록 용접변수를 선택하였다. 이때 결합부의 강도를 약화시키는 결정이 용융부와 열영향부에서 형성되지 않도록 주의하였다. 펄스길이 τ_p=0.1 ms, 초점위치는 재료의 표면에 위치하도록 하고, 펄스에너지 Q_p=20, 32 그리고 40 mJ로 변화시켜 실험하였다.

Fig. 2에서는 펄스에너지의 변화에 따른 용융

부의 표면을 나타내고 있다. 펄스에너지가 클 경우(Q_p=40 mJ)에는 위 박판의 열영향부에서 결정형성이 상당히 진행되었으며, 모재와 용융부 사이의 기하학적 형상이 급격하게 변화하는데, 이로 인해 전단인장시험 시 노치효과(notch effect)가 발생하여 펄스에너지 Q_p=32 mJ인 경우보다 인장력의 감소가 나타났다. 이보다 큰 펄스에너지 영역에서는 천공현상이 발생하였는데, 이때 형성된 구멍 주위에 좁은 링 형태의 용융부가 형성되었으며, 이 부분이 인장력을 지지하게 되는데, 이러한 부분의 면적은 더 낮은 펄스에너지에 의해 형성된 용융부의 면적보다 훨씬 작으므로, 매우 작은 전단인장력만을 지지하게 된다. 펄스에너지 Q_p=20 mJ보다 작은 경우에는 용융부의 면적이 매우 작아 인장력의 감소가 발생하게 된다.

Fig. 3에서는 전단인장시험 후 용융부의 파괴양상과 전단인장력 F_{ts}를 나타내고 있다. 최대 전단인장력은 펄스에너지 Q_p=32 mJ 일 때 나타났으며, 평균 20.4 N에 도달하였다. 이 값을 용융점의 지름 0.15 mm를 기준으로 전단인장응력으로 환산하면 약 1200 N/mm^{2}이며, 모재의 인장강도가 1500-2000 N/mm^{2}인데, 전단인장응력과 인장강도의 두 가지 값을 직접적으로 비교할 수는 없으나 매우 큰 값임을 알 수 있다.

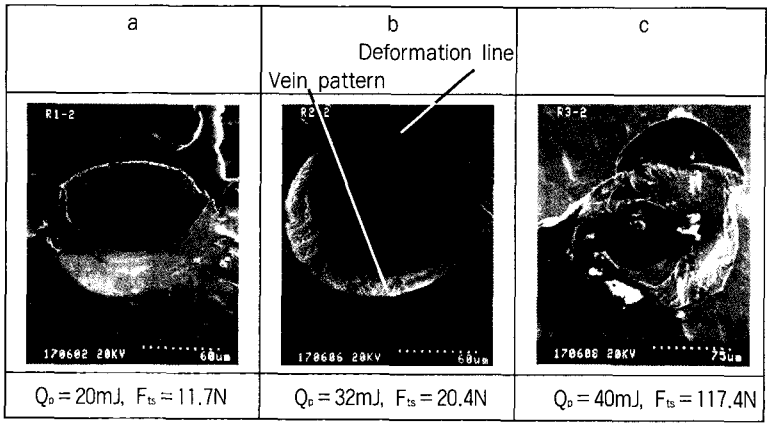

Fig. 3 Photomicrograph (SEM) of welding point after tensile shear test (2-foils, τ_p=0.1 ms)

인장하중 하에서 비정질 박판은 소성변형한다. 이러한 소성변형은 몇몇 장소에서부터 발생하는데, 이 변형은 시편 단면의 전체면적에 걸쳐 슬립면(slip plane)을 따라 퍼져나가 변형선(deformation line)을 형성한다(Fig. 3 b 참조). 이러한 현상은, 용융금속이 냉각되면서 재료 내부에 공공(vacancy)이 형성되는데, 이렇게 국부적으로 적은 밀도를 가진 영역이 기계적 부하상태 하에서 확장되어, 결국 소성변형을 가능하게 하는 것으로 이해할 수 있다[3].

겹치기용접에 의한 두 장의 비정질 금속 박판을 전단인장시험을 하면 두 가지 종류의 파괴양상이 발생한다. 파괴는 용융부의 경계 또는 두 장의 박판 사이의 결합부에서 발생한다. 두 장의 박판 사이의 결합부는 인장시험 시 전단응력과 수직응력에 노출된다. 용융부의 경계에서는, 발생된 굽힘모멘트에 의해 인장응력과 압축응력이 발생한다. 그 외에도 용융부의 경계에는 용접 시 발생한 링 형태의 돌출부에 의해 상당한 노치효과가 발생한다. 이러한 노치효과는, 용융부보다 그 주변 영역이 훨씬 더 유연하게 거동하므로 더욱 강화된다(Fig. 2 c 참조).

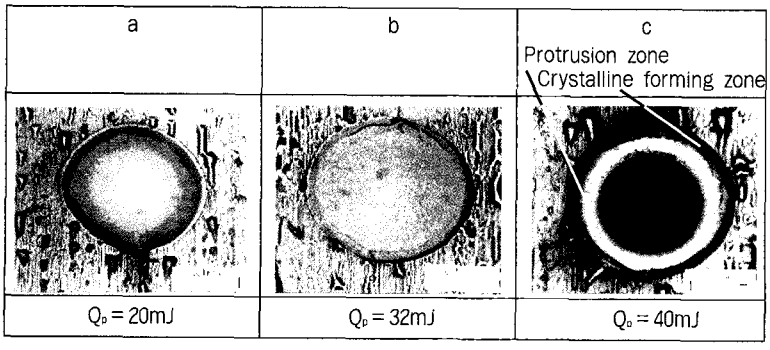

Fig. 2 Photomicrograph of welding point (2-foils, τ_p=0.1 ms)

파괴시작 전에 여러 개의 슬립면에 소성변형의 국부적 집중현상이 극심하게 나타난다(Fig. 3 b 참조). 이렇게 집중된 소성변형은 비정질재료의 변형경화 능력 부족에 기인한다. 두 장의 박판 사이의 결합부가 가지는 부하지지능력이 용융부의 경계에서보다 크면, 용융부의 경계에서 파괴가 발생하기 시작한다. 파단면에는 분리 이전에 발생한 변형, 즉 핏줄무늬(vein pattern)가 흔적으로 남게 된다. 이러한 핏줄무늬는 국부적 네킹(necking)에 의해 야기되어 형성된 돌출부이며, 이것은 비정질재료 파괴 시 나타나는 대표적인 특징 중의 하나이다[4].

3.2 네 장의 비정질박판의 겹치기용접

총 두께 약 0.1mm가 되도록 네 장의 비정질 박판을 겹치기 용접하여 가장 위, 가운데 그리고 가장 아래의 박판에 대하여 전단인장시험을 수행하였다. 이때 펄스에너지 Q_p=80 mJ, 펄스 길이 τ_p=0.1 ms로 일정하게 하고, 초점위치 Foc=-0.9, -0.8 그리고 -0.75 mm로 변화시켰다. 여기서 펄스에너지는 네 장의 박판을 용접하기에 충분하면서 결정형성을 최소로 하도록 예비실험을 통하여 구한 에너지이다.

Fig. 4에서는 초점위치와 와 출력밀도 E에 따른 용접점의 윗면과 아래면을 식각한 상태로 보여주고 있다. 윗면에서는 용융부의 둘레를 따라서 링 형태로 결정이 형성되어 있는데, 이것은 박판의 표면 위에만 형성된 것으로, 전단인장시험 중에는 형성된 결정영역에 의해 강도가 감소하는 것이 아니라 노치효과를 나타내어 응력집중에 의해 파괴가 발생하게 된다. 아래면에서는 용융부의 표면에 링 형태와 검은 점 형태의 결정이 혼합되어 형성되는데, 링 형태의 결정은 윗면과 마찬가지로 인장시험 시 노치효과를 나타낸다.

Fig. 5에서는 전단인장력을 초점위치 의 함수로 나타내고 있는데, 초점위치 Foc=-0.8 mm에서 최대값을 보이고 있다. 박판의 표면에 형성된 결정영역에도 불구하고 가장 위의 박판에서 최대 전단인장력을 나타내고, 가장 아래의 박판에서 최소 전단인장력을 보이는데, 이는 결합부의 면적 차이에 기인한다. 초점위치 Foc=-0.7 mm이상에서는 천공효과가 나타났으며, Foc=-0.9 mm 미만에서는 충분한 용접이 이루어지지 않았다.

Fig. 6에서는 전단인장시험에서 발생한 여러 가지의 파괴양상을 보여주고 있다. 용접된 결합부위의 파괴면에서는 대부분 결정구조가 형성된 영역과 돌출부에 의해 노치효과가 증대된 영역 사이에서부터 시작되어 모재로 전파되는 파괴선을 보여주고 있다.

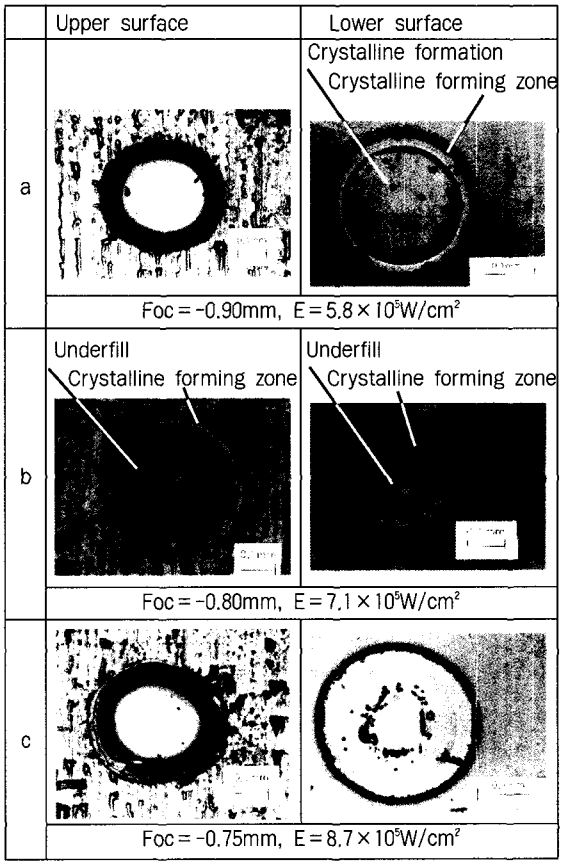

Fig. 4 Surface of welding point
(4-foils, Q_p=80 mJ, τ_p=0.1 ms)

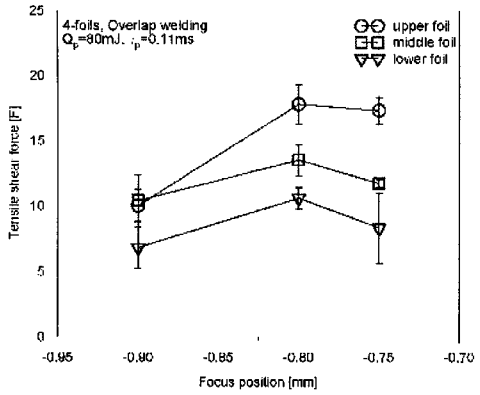

Fig. 5 Tensile shear force vs. Focus position (4-foils)

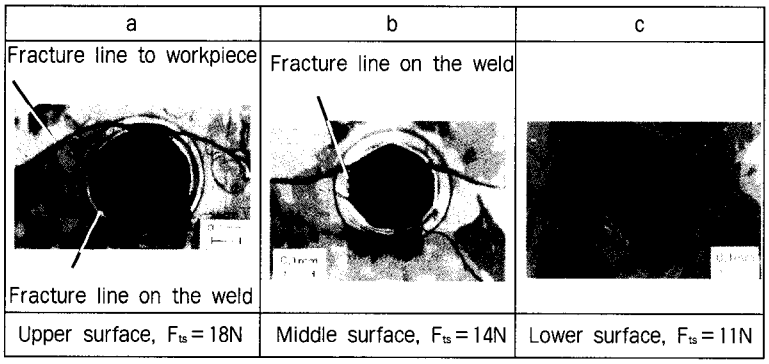

Fig. 6 Photomicrograph of welding point after tensile shear test (4-foils, Foc = -0.8 mm)

3.3 열 장의 비정질박판의 겹치기용접

열 장의 박판을 겹쳐 전체두께가 약 0.25 mm가 되도록 하여 용접하였다. 펄스에너지 Q_p=253 mJ, 펄스길이 τ_p=0.3 ms로 일정하게 유지하고, 초점위치 Foc=-1.07, -0.77 그리고 -0.47 mm로 변화시키며 실험을 수행하였다. 초점위치 Foc=-1.5 mm 이하에서는 박판이 아래까지 충분히 용접되지 못하였으며, Foc=-0.5 mm 이상에서는 스패터(spatter)에 의해 재료가 상당부분 제거되는 현상이 발생하였다. 이때 사용된 펄스에너지는 주어진 초점위치 구간에서 결정형성이 가장 적게 발생하며 최소한의 에너지임을 예비실험을 통해 설정된 값이다.

Fig. 7에서는 용융부의 단면을 나타내고 있으며, Fig. 8에서는 초점위치에 따른 용접점의 표면을 보여주고 있다. Fig. 8에서 나타난 균열은 냉각 시 냉각속도의 차이에 의하여 발생한 것이며, 초점위치 Foc=-0.77 mm에서는 이러한 균열이 보이지 않으며 최대 전단인장력을 보이고 있다. 가장 위, 중간 및 가장 아래 박판에서의 전단인장력은 Fig. 8에 나타나있는데, 가장 위와 중간 박판에서 거의 동일한 크기의 최대 전단인장력 F_{ts}=22 N을 보이고 있다. 이 값을 전단인장응력으로 환산하면 약 900 N/mm^{2}에 해당하는 매우 큰 값이다. 파괴면에서는 앞서 언급한 바와 같은 핏줄무늬가 형성된 것으로 보아 비정질의 고유한 특성을 그대로 지니고 있는 것으로 보인다.

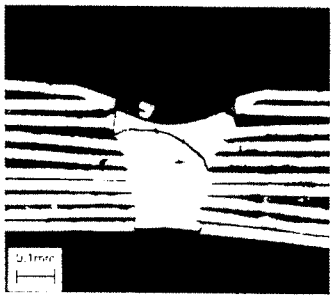

Fig. 7 Welding bead cross section (10-foils, Foc = -1.07 mm, E = 6.6×10^5 W/cm^2)

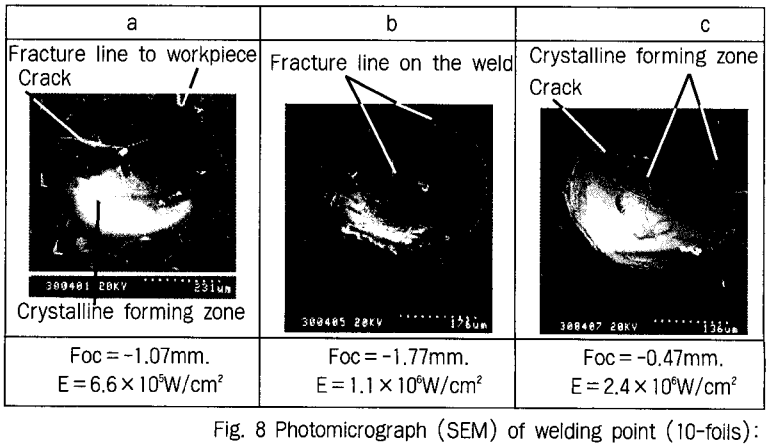

Fig. 8 Photomicrograph (SEM) of welding point (10-foils):

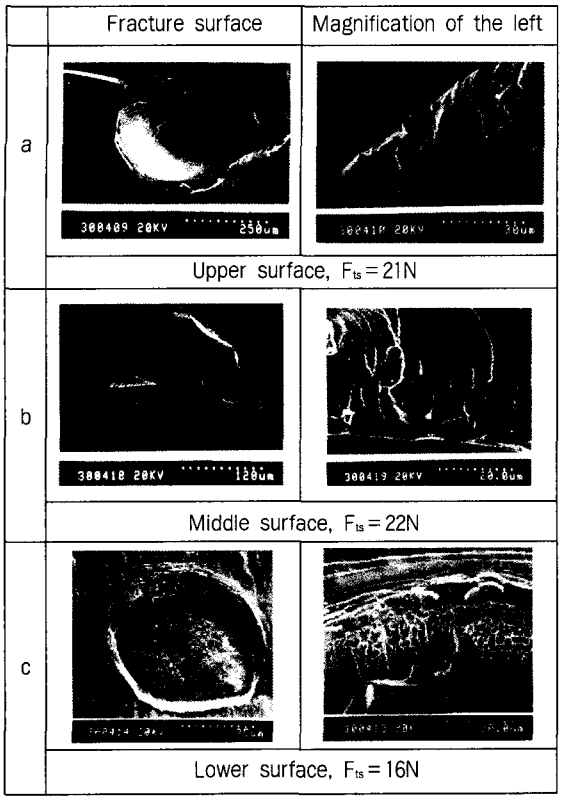

Fig. 9 Photomicrograph (SEM) of welding point after tensile shear test
(10-foils, Q_p = 330 mJ, τ_p = 0.3 ms, Foc = -0.77 mm):

4. 결론

본 연구에서는 레이저를 이용한 비정질 박판의 겹치기용접에 대한 가능성을 조사하였다. 일반적으로 비정질 박판은 생산방법(melt spinning)에 의한 한계성으로 인해 박판(약 25 μm)으로 만들어지므로, 이 재료를 구조재로서 사용하는 것은 매우 제한을 받고 있다. 이러한 박판을 더욱 두꺼운 재료로 만들거나, 결합을 통해 큰 부하를 지지할 수 있는 구조로 생산하는 것은 비정질 재료의 특성을 활용하는 데에 매우 유용할 것이다. 따라서 여기서는 열 장(약 250 μm)까지의 비정질 박판을 겹쳐서 용접한 후 전단인장시험을 통해 부하지지능력을 평가하고, 파괴양상과 파괴면의 특징에 대하여 연구하였다.

1. 용접 후의 결정발생영역은 가장 위와 가장 아래 박판의 표면 위에서 나타났는데, 이는 박판의 표면에만 국한된 것이었으며, 재료의 파괴에 직접적인 영향을 주지는 않았다.
2. 전단인장시험 시 재료의 파괴에 직접적인 영향을 미치는 요인은 모재와 용융부 사이에 발생한 기하학적 불연속 영역이었으며, 이로 인해 노치효과가 발생하고, 모재가 용융부보다 훨씬 큰 유연성을 나타내어 응력집중이 더욱 크게 나타났다.
3. 파단면에서는 비정질 박판의 파괴 시에 전형적으로 나타나는 핏줄무늬(vein pattern)가 발생하여, 용융부 부근에서 비정질 특성이 유지되고있음을 알 수 있다.
4. 인장강도와 전단인장강도를 직접 비교할 수는 없으나, 모재의 인장강도는 1500-2000 N/mm^2 인 반면, 두 장의 박판 용접에 의한 전단인장응력은 약 1200 N/mm^2, 열 장의 박판 용접에 의한 전단인장응력은 약 900 N/mm^2 의 매우 큰 값을 나타내고 있다. 따라서 적절한 수의 겹치기 점용접에 의해 구조용 재료로 사용할 가능성이 충분한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Lee, K.-S., Untersuchung des Absorptionsvorganges und der Schweissqualitaet beim Laserschweissen von amorpher Co-Si-Mo-Fe-B-Legierung, Dissertation, TU Berlin, 1993.
2. N.N., Amorphe Metalle VITROVAC, Firmenschrift, Vacuumschmelze GmbH, Hanau.
3. H.G. Hillenbrand, E. Hornbogen, U. Koseter, Verformung und Bruch von teilkristallinen Fe, Co, Ni-B-Glaesern,

Metall 36, Heft 10, 1982, pp.1059-1064.
4. C.A. Pampillo, Review Flow and fracture in amorphous alloys, Journal of materials science 10 (1975), pp.1194-1227.