

레이저 유리 접합 공정의 유한요소해석

홍석관*, 강정진, 변철웅

*한국생산기술연구원 정밀금형팀

Finite Element Analysis of Laser Glass Bonding Process

Seok Kwan Hong*, Jeong Jin Kang, Cheol Woong Byun

*Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

This study is aimed to analyse the laser glass bonding process numerically. Due to the viscoelastic behaviour of glass, the extremely large deformation of the frit seal is resulted continuously over the transition temperature, so that the thermal boundary condition be changed in the entire calculation process. The commercial FEM algorithm is restrictively able to remesh the large geometrical boundary shape and to adapt the boundary conditions simultaneously. According to our manual adaptation of increasing the laser line intensity to 700 mW/mm, it is possible to estimate the thermal glass bonding process under the fracture stress in principle. But it should be studied further in the case of high laser line intensity.

Key Words: Laser glass bonding, FEM, Large deformation

1. 서 론

기존의 brazing 방법이 오븐 내에서 filler material의 용융온도까지 모재 전체를 가열하는 공정임에 반하여, laser brazing 기술은 잘 집속된 laser beam를 이용하여 filler material 만을 가열함으로써 모재에 대한 열영향을 최소화할 수 있는 장점이 있기 때문에 오래 전부터 주목을 받아 왔고, 최근에는 용융온도가 매우 다른 재료 사이의 접합에 많이 적용되고 있다[1].

본 논문에서 관심대상으로 설정하고 있는 제품은 평판디스플레이(FPD) 중의 한 종류인 PDP 디스플레이 제품으로, 후공정 기술의 하나인 유리판의 봉착기술은 제조공정상 brazing 기술과 동일한 공정을 따른다. 즉 frit glass 또는 frit seal이라고 불리는 저융점 유리로 접착제층을 형성한 후, 연속로에서 가압을 하며 장시간에 걸쳐 가열, 용융, 접합 및 냉각을 한다는 점에서 동일하다.

봉착공정은 PDP 제품에서는 방전을 위한 진공

도 유지의 기능이 있고, OLED 디스플레이 제품의 경우에는 산소와 습기에 취약한 OLED를 보호하는 역할이 있으므로 품질상으로도 매우 중요하지만, 공정순서 상 모든 작업이 이루어진 후에 최종적으로 적용되므로 불량에 따른 경제적인 중요도도 매우 높다. 이러한 glass bonding 공정이 PDP 제품에서는 두 곳에 적용되는데, 첫째는 ITO 전극과 Bus 전극, B/S 형성 및 유전층이 형성된 상판과 하판의 봉착이고, 두 번째는 방전 가스의 주입 및 밀봉 기능을 가진 관상의 유리 주입구의 접합이다[2].

연속로를 이용한 기존의 공정의 단점은 frit seal의 용점 및 frit seal 내의 결합제를 제거하기 위한 높은 온도까지 유리원판 전체를 가열함으로써 제품 전체가 고온에 노출될 뿐 만 아니라, 전체 과정 중에 유리원판에 발생하는 온도불균일성과 Volume 효과를 고려한 취성재료의 열충격을 배제하기 위하여 매우 낮은 가열속도와 냉각속도를 적용하기 때문에, 봉착공정이 전체공정 중에 bottle neck이 되기도 하고

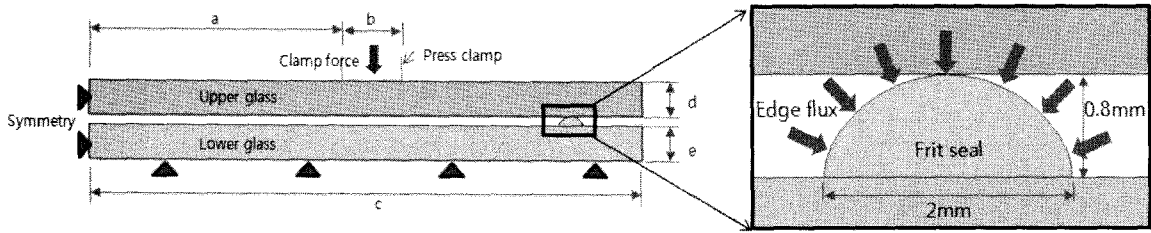


Fig. 1 Schematic diagram of laser bonding system.

전체적인 공정시간이 매우 길어 경제성이 낮다는 점이다.

이를 해결하기 위해 여러 가지 방법이 제안되고 있는데, 그 중의 한 가지 방법은 이전 공정에서 접합라인 위치에 열선을 metal coating을 하여 국부적으로 가열하는 방법으로 열원의 종류만 다를 뿐이고 개념적으로 국부적인 열원을 사용한다는 점에서 laser brazing과 동일한 개념이다[3]. 이 방법은 laser brazing 공정과 같이 열충격을 방지하기 위한 예열부위를 최소함에 의해 구속조건은 커지겠지만, PDP Panel 전체에 미치는 열영향을 줄일 수 있고, 결과적으로 승온과 냉각에 소요되는 시간을 단축함으로써 생산속도, 생산 공간의 축소, 에너지 절약효과를 기대할 수 있다. 그러나 고열을 가하기 위해 충분한 크기의 열선 제조를 위한 공정과 소모재가 필요하다는 단점이 예상된다.

본 논문에서는 공간적으로 잘 정의된 열원을 사용함으로써 비접촉으로 frit seal 만을 가열하여 접합하는 점에서는 laser brazing과 동일하고, laser beam을 작용부위까지 도달하는 방법에서는 플라스틱 재료에 적용되는 laser transmission welding과 동일하지만, 피접합체의 공간적인 이동이 상대적으로 매우 크다는 점에서 상이한 glass bonding 기술을 대상으로 한다. 이 방법은 추가적으로 열선과 같은 소모재없이 접합하는 장점을 가지고 있고, frit seal의 결합제를 기화시키기에 충분한 고온을 자유롭게 변화시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

그러나 laser beam의 조사에 의해 용융되는 부분이 유리판과 직접 접촉하고 있으므로 유리판 내에서의 열충격량에 대한 추정이 필요하다. glass bonding 기술은 laser welding이나 laser cutting 기술과 비교하여 용융물질의 유동이나 evaporation의 영향이 크지 않으므로 고상의 모델링이 가능하다. 그러므로 본 논문에서는 대변형

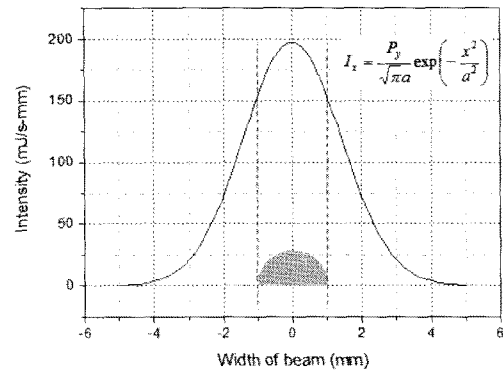


Fig. 2 Gaussian distribution of laser energy: $P_y = 700$ mW/mm, $a = 2$ mm.

거동을 고려한 FEM Simulation의 가능성을 검토하고, 요구되는 laser line Intensity density, 가압력, 소요시간에 대한 추정을 하려고 한다.

2. 해석 방법

본 논문에서 대상으로 하는 laser glass bonding의 열해석상 특징은 다음과 같다. 에너지원인 laser beam은 Gaussian 분포에 의해 공간적으로 고정되어 있고, transmission welding 현상처럼 흡수된 laser energy에 의해 변형된 frit glass 표면의 기하학적 형상에 따라 열적 경계조건(thermal boundary condition)이 연속적으로 변화한다는 점이다. 즉 표면과 laser beam과의 교차 각도가 커짐에 따라 흡수량이 감소하다가 어느 기하학적 크기보다 커진 경계면은 더 이상 에너지 교환에 관여하지 않게 된다.

PDP에서의 모서리 부분에서의 접합선은 3차원 해석을 하여야 하지만 전체적으로 2차원 거동이 지배적이므로 Fig. 1과 같이 2차원 uniform strain으로 모델링을 할 수 있고 전체적인 laser bonding 공정의 해석 절차를 Fig. 3에 나타내었다.

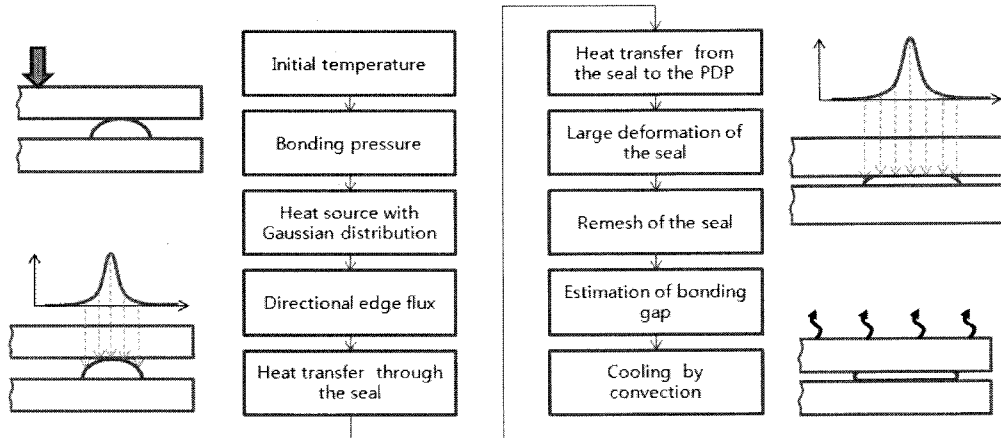


Fig. 3 Numerical procedure for Laser bonding process.

2.1 기계적 경계조건

용융된 frit seal을 유리원판에 접착시키기 위해 상부 유리원판을 가압한다. 이때 가압력은 laser 가열 전부터 일정한 하중으로 유지되기 때문에 필요 이상의 과도한 가압력은 최대 허용 fracture stress에서 이용하려는 유효 열응력을 낮추는 영향이 있다. 또한, 가압력의 크기는 용융된 seal의 변형형상을 결정할 뿐 만 아니라, 새로운 형상의 표면을 생성하여 laser beam과의 열교환을 결정하는 중요한 인자의 역할을 하게 된다. 따라서 해석으로부터 적절한 가압력을 구하는 것이 본 연구의 목표 중의 하나라고 할 수 있다. 본 해석에서는 0.15 N/mm를 초기 조건으로 설정하였다.

2.2 열적 경계조건

Thermal stress는 온도편차에 의해 발생하므로 예열을 한 후 laser bonding을 하므로 초기온도를 오븐의 분위기 온도와 동일하게 설정한다. Laser beam은 투명한 PDP glass를 관통하여 frit seal

표면에만 조사된다. 통상 laser의 intensity는 Fig. 2와 같은 특성을 가진 Gaussian 분포를 갖기 때문에 가열대상에 흡수되는 에너지의 크기는 위치마다 변하게 된다. 이는 frit seal의 온도 분포에 직접적으로 연관되어 있기 때문에 해석에서 반드시 고려되어야 한다. 또한, laser beam의 진행 방향과 피가열물 표면의 법선방향과의 각도에 따라서 흡수되는 에너지가 다르게 적용되어야 하며, 용융된 seal의 형상이 압축되어 변할 때마다 표면의 각도가 매번 변하기 때문에 이 역시 해석에서 반영할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 이와 같은 현상을 구현하기 위해 상용해석 소프트웨어인 MSC.MARC의 DHF(directional heat flux) 기법을 사용하였다[4].

계속해서 seal의 표면에서 흡수된 에너지는 seal의 내부로 전달되며, 동시에 PDP glass에도 열이 전달된다. 이때 열원의 분포가 매우 국부적이고, 게다가 순간적으로 열이 발생하기 때문에 PDP glass에 열충격이 가해져 파괴될 수 있다. 따라서 PDP glass의 열응력을 최소화 할 수 있는 적절한

Table 1 Material properties of PDP glass and frit seal.

		Unit	PD200	IWF-DT430
Mechanical	Young' modulus	MPa	7.60E+04	-
	Poisson's ratio	-	0.225	-
	mass density	Mg/mm ³	2.27E-09	7.20E-09
Thermal	thermal expansion		8.70E-06	7.20E-06
	Conductivity	mW/mm-K	1.15	0.756
	Specific heat	mJ/Mg-K	7.00E+08	7.00E+08
Viscosity fixed point	Annealing point	°C	620	310
	Softening point	°C	830	353
	Working point	°C	-	430

laser power와 beam 폭을 구해야 한다. 이를 위해서는 열과 구조의 연성 해석기법이 요구된다. 한편, 유리의 파괴는 유리의 표면상태, 응력 증가율(stress rate), 부하속도, 응력을 받는 면적, 압축과 인장 강도의 물성차이 등 여러 가지 변수에 민감하게 반응하기 때문에 정확하게 예측하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 논문의 단계에서는 유리의 파괴 모델을 이용한 예측은 논외로 하였고, 단순히 PDP glass의 열응력을 평가하였다.

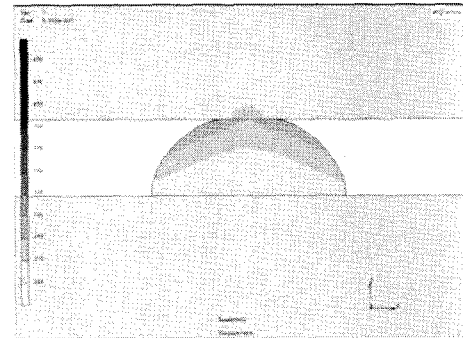
2.3 유리 재료의 온도에 따른 거동에 대한 모델링

Frit seal은 초기에는 고상으로 존재하다가 laser로부터 가열되어 온도가 상승하고, 어느 순간 변형을 시작한다. 일반적으로 유리는 유리전이온도(glass transition temperature) 아래에서는 brittle-elastic 거동을 하며, 유리전이온도 근처에서는 thermo-rheological simple visco-elastic 거동을 하고, 그 보다 훨씬 높은 온도에서는 thermo-dependent viscous flow 거동을 하는 것으로 알려져 있다[5]. 본 laser bonding 공정에서는 seal 내부의 온도범위가 넓기때문에 점성과 탄성을 동시에 고려해야 한다. 그러나 기초 연구 단계이므로 Newtonian flow로 가정하여 해석을 단순화하였다. 따라서 식(1)과 같이 rigid-visco-plastic의 유동응력식을 사용하였으며, 점도와 온도의 관계를 정의하기 위해 VFT (Vogel-Flucher-Tammann) equation을 이용하였다. 여기서 T 는 현재의 온도이고, A , B , T_0 는 상수이며, 참조점(reference point) 3개의 정보는 아래의 Table 1과 같은 값을 가지고 결정한다.

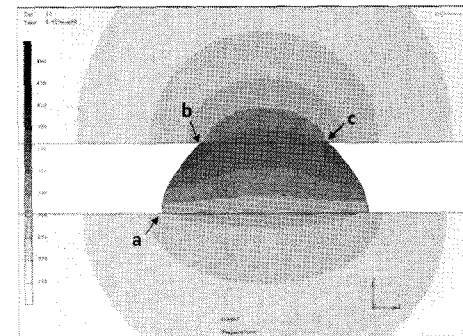
$$\sigma = 3\eta(T)\dot{\epsilon} \quad (1)$$

$$\log\eta = A + \frac{B}{T - T_0} \quad (2)$$

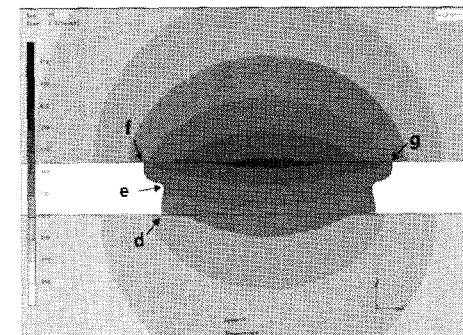
반면, PDP glass는 seal의 working point 보다 더 높은 transition point를 가지므로 elastic model로 가정하였다. 본 단계에서는 seal이 대변형 거동을 하면서 요소망이 재구성될 때 초기에 seal 표면에 부여된 edge flux 경계조건이 유지되는 것이 중요하다.



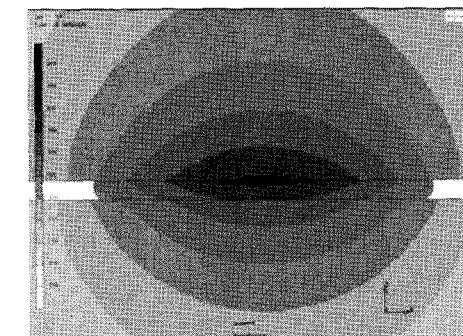
(a) 0.5 seconds



(b) 5 seconds



(c) 10 seconds



(d) 15 seconds

Fig. 4 Deformed shape of frit seal along bonding time.

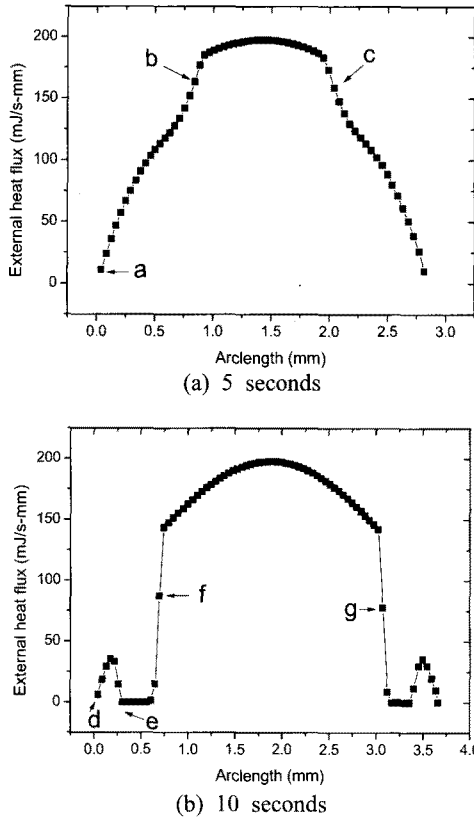


Fig. 5 External heat flux distribution on Frit seal surface.

Laser bonding 공정이 진행되면서 용융된 seal 이 점점 더 압축되어 PDP glass 사이의 간극이 좁아지고, 원하는 거리가 형성되면 laser power를 차단하여 가열 및 압착 단계를 완료하고, 마지막으로 오븐에서 꺼내어 자연냉각 또는 공냉하여 모든 공정을 완료한다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 laser power가 700 mW/mm, beam 폭 이 2 mm 일때 laser 공정해석의 결과를 나타낸 그림이다. 초기의 간극이 0.8mm에서 0.2mm까지 압축되었으며, 이때 공정시간은 약 15초가 소요되었다. Fig. 4(a)는 laser를 0.5초 동안 조사하였을 때 frit seal과 PDP glass의 온도분포를 확인 할 수 있다. 0.5초만에 seal의 온도가 최고 310도까지 상승하였고, 최고 intensity가 부여된 중심부의 온도는 PDP glass로 열이 전도되어 상대적으로 낮은 온도를 보였다. 이때 seal의 하부는 거의 열이 전달되지 못한 것을 알 수 있다. 이러한 온도차이로 인해 seal이 압축되면서 Fig. 4(c)와 같이 버섯모양을

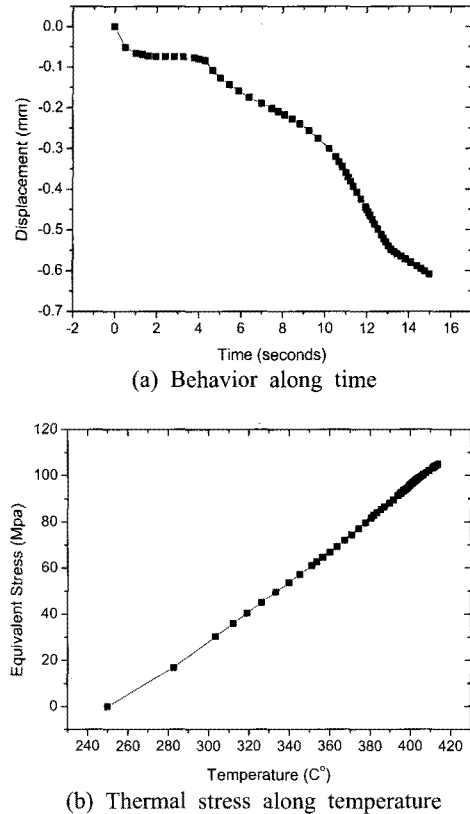


Fig. 6 Results of upper glass.

형성하였다. 또한, 초기에 급속으로 상승한 seal의 온도는 최고 400도 부근에서 더 이상 증가하지 못하고 유지되었다.

본 해석에서 가장 핵심이 되는 해석기법인 DHF (directional heat flux)와 RHF(remesh with heat flux)의 적용 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 5와 같이 각각 다른 time step 즉, 요소망 재구성 후 seal의 표면에서 external heat flux를 해석 결과로부터 산출하여 그래프로 나타내었다. 먼저, Fig. 5(a)의 결과를 살펴보면 frit seal 표면의 중심부에 최고 heat flux가 유입된 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3과 같이 초기에 입력한 laser intensity에 대응되는 값으로 입력대비 출력값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 4(b)에 표시한 a-b 구간과 b-c 구간에서의 heat flux를 볼 수 있는데, 각 구간에서 표면의 기울기에 따라 flux의 크기가 잘 적용된 것을 확인 할 수 있다. 특히, Fig. 5(b)에서 e-f 구간에서의 flux는 laser beam 방향과 element edge의 normal방향이 서로 상충되어 0으로 예측된 것은 실제 현상을 잘 반영한 결과라 하겠다. 그러나 d-e 구간에서는 e-f 구간의 소재가 laser 진행을 막아 실제로는 에너지 유입이 없

어야 하지만 해석에서는 이와 같은 현상을 반영하지 못하고 단순히 표면의 각도에 대응되는 결과를 계산하였다.

마지막으로 Fig. 6에 상부의 PDP glass의 변위 및 응력이력을 그래프로 도시하였다. Fig. 6(a)에서 보이는 바와 같이 glass의 거동이 심한 비선형성을 보이는데, 이는 seal의 변형형상에 기인한다. 또한, 상부 glass에 발생한 최고 응력은 약 100MPa로 예측되었으며, 250도부터 400도까지 거의 선형적인 증가를 보이는 것으로 예측되었다.

4. 결론

본 논문에서는 laser glass bonding 공정에 대한 FEM simulation 적용가능성에 대해서 검토하였다. 본 수치해석에서 주요하게 다루어야 하는 해석 기법은 laser intensity의 Gaussian 분포를 피 가열물의 표면에 반영시키는 기법과 요소망이 재구성되어도 피 가열물 표면의 경계조건을 일정하게 유지시키는 기법이다. 또한, 피 가열물 표면의 각도에 따라 다른 에너지 흡수율이 고려되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 해석기법을 해석 결과를 통해 검증하였다. 향후 연구에서는 유리재료의 접탄성 물성을 고려하여 가열 후 냉각 시 발생하는 잔류응력을 해석에 반영할 예정이며, 유리의 파괴 모델을 적용해 다양한 공정 조건에서의 거동을 예측하고, 테스트 장비를 구축하여 본 해석 기법을 실험결과와 비교 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부(산업자원부)에서 시행한 부품소재 전문기업 기술지원 사업에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) A. Mathieu, S. Pntevicci, J. Viala, E. Cicala, S. Mattei, D. Grevey, Laser brazing of steel/aluminium assembly with hot filler wire, Mat. sci. and Engin., A.435-436 (2006), pp. 19-28.
- 2) 강정원 외 5인, 플라즈마 디스플레이 공학, 인터뷰전, 2006.
- 3) S.J. Kwon, J.H. Kim, A Low Temperature Vacuum In-Line Sealing Technology for a High-Performance Plasma Display Panel, J.Kor.Phys.Soc., Vol. 45, No. 4, 2004, pp. 1109-1113.
- 4) MSC.Software, Theory and User Information, Vol. A, 2007.
- 5) 나진욱 외 3인, 개방형 금형을 이용한 유리 렌즈 성형 해석, 한국소성가공학회지, 제12권, 제4호, 2003, pp. 296-301.
- 1) A. Mathieu, S. Pntevicci, J. Viala, E. Cicala, S. Mattei, D. Grevey, Laser brazing of steel/aluminium assembly with hot filler wire, Mat.