

금형제작 및 보수를 위한 레이저 직접금속성형(DMT) 기술의 응용

지 해 성

홍익대 기계공학과

Die Manufacturing and Repair Using Laser-Aided Direct Metal Tooling

H. S. Jee

Mecha. Eng. Dept. HIU

요 약

레이저를 이용한 직접금속성형기술(영문명: DMT: Direct Metal Tooling)은 고 부가가치의 기능성 소재(금속, 합금, 세라믹 등)의 미세한 분말을 원하는 3차원 공간상에 주사함과 동시에 이를 레이저로 직접, 순간 용착 시키며 이것이 공간상에서 축적되면서 미리 정해진 3차원 파트형상이 자동적으로 빌드업되도록 하는 고도의 정밀제어 기술을 요하는 신기술이다. 이는 컴퓨터에 저장된 3차원 디지털 형상정보(digital data of 3D subjects)만 갖고 있으면 이로부터 그에 해당하는 금속파트형상을 적절히 소재분말을 이용하여 곧바로 실물로 재현하여 얻을 수 있게 됨을 의미하며 이로서 기존에 절삭기계를 이용한 가공 공법보다 손쉽고 빠르면서도 반면 기계적 성질은 종전기술보다 월등히 우수한 3차원 금속 파트나 금형형상을 소재의 낭비가 전혀없는 환경친화적인 방법으로 제작할 수 있는, 소위 밀레니엄시대를 대표하는 최첨단 미래형 기술의 구현이다.

1. 서 론

이 기술은 공정의 특성상 성형될 금속파트형상이나 금형형상부위의 기하학적 복잡성이나 반복성에 전혀 구애를 받지 않으므로 기존의 절삭형 가공 공법에서는 반드시 필요하면서도 한편으로는 매우 복잡했던 소위 공정설계라는 단계를 거치지 않고 곧바로 3차원 디지털 형상정보로부터 파트를 직접 제작할 수 있기 때문에 제작공정이 매우 신속할 뿐만 아니라 꼭 필요한 양 만큼의 분말소재를 적재적소에 빌드업하여 파트를 성형하므로 기존에 방법들이 해결하지 못했던 단점중의 하나인 고가의 소재를 불필요하게 낭비하는 일도 발생하지 않는다. 또한 레이저를 이용하므로 기존에는 가공이 어려웠던 난 가공 소재도 그 종류에 상관없이 모두 동일한 속도로 성형할 수 있다는 점도 매우 큰 장점이다.

지금까지 RP 기술에 토대를 둔 신속시작기술(迅速試作技術)이라고 불리우는 RT(Rapid Tooling) 기술들의 공통적인 특징은 우선 mold 나 die의 패턴(pattern)을 신속하게 제작하고 난 후에 이를 이용하여 tool의 net shape 형상을 제작하는 것이 주된 방식이었다. 가장 대표적인 예인 3D Systems사의 Keltool¹⁾ 공정은 RP 공정에 의해 생성된 silicone RTV submaster에 금속분말과 접착액의 혼합물을 부어 2차 공정을 거치면서 결과물의 재질은 bronze, stellite, A6 tool steel 등 hard tooling 용 tool이 제작되기 때문이다. 이와 같은 공정으로는 Keltool 이외에도 역시 3D Systems사의 QuickCast와 그리고 Soligen사의 DSP 등도 들 수 있는데 이 기술들은 이미 상용화되어 현재 산업체에서 적용 중이다²⁾.

최근에 이들과는 좀더 차별되는 기술로서 금속이

나 세라믹 등의 분말재료를 단독 혹은 상호 혼합하여 near-net shape에서부터 net shape tool 그 자체가 지를 마스터 모델없이 직접 RP 공정으로부터 얻어내는 직접금속성형기술(direct metal manufacturing)도 많이 개발되어 발표되고 있다. 이 기술들은 적층형 RP 조형 장비를 이용한다는 점에서는 별 차이가 없으나 중간의 마스터패턴제작 공정을 거치지 않고 곧바로 기능성 재료의 시작금형을 제작한다는 점에서 그 궤를 달리하는데 최근에는 DTM 사의 RapidTool³⁾이나 ExtrudeHone 사의 ProMetal⁴⁾이 널리 이용되고 있다.

이 밖에도 제작된 파트의 기능성 및 제작공정의 활용도 면에서 훨씬 뛰어난 또 하나의 직접금속성형기술이 최근에 주목을 받고 있는데 이것이 바로 레이저 직접 금속성형(laser-aided direct metal tooling)기술이다. 이 기술은 기존의 절삭에 의존한 tooling 공법에서와 같은 공정설계 단계를 거치지 않고 곧바로 프레스 금형과 냉간 단조 금형 파트, 그리고 복잡한 형상의 플라스틱 금형용 인서트 등에 이르기 까지 폭넓게 제작이 가능하며 무엇보다도 레이저가 갖고 있는 열 특성상, 기존의 용접용접에 의한 금형보수 분야에서 치명적인 단점으로 지적되어 온 고열용접 후의 모재와 용접부위간에 경도편차와 얼룩무늬의 발생, 그리고 기계적 재료성능 저하와 같은 문제점들을 수반하지 않으므로 금형의 직접적인 開補修 시에 보다 더 효과적으로 활용될 수 있다는 점이 최대의 장점이다.

이 분야의 상용업체로는 레이저에 의해서 생성된 용융풀에 금속분말을 사출하여 증착시킴으로서 금속파트를 직접성형할 수 있는 시스템을 개발하여 상용화한 Optomec 사⁵⁾와 POM 사⁶⁾를 들 수 있는데 Optomec 사에 의해서 상용화된 LENS(Laser-engineered-net-shaping) 시스템은 Sandia National Lab.에서 Nd:YAG(Neodymium: Yttrium Aluminum Garnet) 레이저를 이용하여 그리고 POM 사에 의해서 상용화된 DMD(Direct-metal-deposition) 시스템은 CO₂ 레이저를 사용하여 미시간 대학에서 각각 연구 개발된 것이다. 국내에서는 2001년에 미국에 이어 세계에서 2번째로 레이저 직접금속성형기술을 상용화하였다⁷⁾.

이 기술의 주된 응용분야인 국내 금형업계의 2001년 생산규모는 가전산업과 통신기기, 그리고

반도체 산업의 금형발주 증가에 따라 2조 5,640억 원에 이를 것으로 추정되며 금형수출 또한 약 6억 8천만 달러를 상회할 것으로 추정된다⁸⁾. 한편 각 회사마다 매년 마모 등으로 파손된 금형을 수리하거나 제품개발 시 갖은 설계변경에 따라 금형을 수정하는 작업이 많음에도 불구하고 이에 대한 정량적인 데이터는 발표되지 않아 금형보수와 수리 시장규모는 정확한 규모를 추측하기 매우 어렵지만 간접적인 통계 데이터를 바탕으로 금형 수리시장을 예측할 경우 국내 금형 시장규모의 20% 정도인 5,000억원 정도로 추정하고 있다. 특히, 금형제작에 있어서 한 품목 당 3~4회의 시방설계변경이 발생되고, 이로 인한 금형의 보수(refurbishment) 비용이 추가적으로 발생하게 되므로 실제 금형 보수시장 규모는 예상치를 훨씬 상회할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 이와 같은 레이저 직접 금속성형 기술의 원리를 먼저 소개하고 이를 금형제작과 보수에 적용하고 있는 최근의 기술동향에 대하여 서술하고자 한다.

2. 레이저 직접금속성형기술의 특징

2.1 직접금속성형기술(DMT)

직접성형기술의 일반적인 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.

첫째, 직접금속성형기술을 이용한 RT 기술의 장점 중에서 가장 중요한 점은 사출 금형용 tool의 성능에 직접적인 영향을 주는 냉각수로(cooling channel)를 자유자재로 금형에 삽입할 수 있다는 것이다. 한 예로 미국금형조합의 연구발표에 따르면 플라스틱사출금형에 의한 사출공정에서 냉각공정이 전체시간의 60%를 차지하므로 냉각수로를 최적으로 배치하면 전체 사출공정시간은 40%나 감소시킬 수 있는 것으로 보고되었다. 이와 같은 시간적인 잇점 이외에도 냉각수도가 자유형상주위로 최적으로 배치되므로 파트의 재질도 좋아지므로 불량률이 낮아지게 된다.

둘째, 직접금속성형공법은 한 개의 단일 파트내의 금형재질을 여러가지 복합재료로 다양하게 조합을 줄 수 있어(functionally graded material) 파트의 각 부위별로 필요한 재질성능을 최적으로 조절할 수 있다. 즉 예를 들어 하나의 파트내에서 내마모

성을 가진 재료와 내열성을 가진 재료를 부위별로 조합하여 제작하면 각각의 장점을 모두 갖춘 기계 부품을 제작할 수 있게 된다.

현재 직접금속성형기술을 이용한 시작금형(試作金型)의 제작은 SLS 기술을 이용하는 DTM 사의 RapidTool과 ExtrudeHone 사의 ProMetal이 알려져 있다. 예를 들어 미국 MIT 공과대학의 3D Printing 기술의 license를 넘겨받아 상업화 시킨 미국의 Extrude Hone Corporation의 ProMetal은 stainless steel, tungsten 그리고 tungsten carbide를 포함하는 여러 가지 금속재료의 분말을 소재로 하여 금속소재형상을 직접 제조하고 있는데 제조된 금속 소재 형상들은 후처리를 거치면서 이론적으로는 92% 정도의 밀도를 가지며 infiltration을 거치면서 보다 치밀한 소재조작을 얻을 수도 있기 때문에 플라스틱 사출금형의 tool insert로도 충분히 쓰여 질 수 있다. 그러나 3D Systemes 사의 Keltool 공법과 마찬가지로 DTM 사의 RapidTool 공법과 ExtrudeHone 사의 ProMetal 공법은 둘다 infiltration 작업에 필요한 추가적인 시간이 요구되므로 정밀도 측면에서 뿐만 아니라 내구성과 시간단축측면에서 조금 더 개선이 필요한 실정이다.

2.2 레이저 직접금속 성형기술

레이저 직접 금속성형(laser-aided direct metal tooling)기술의 특징은 기능성 소재(금속, 합금, 세라믹 등)의 분말을 컴퓨터에 저장된 3차원 디지털 형상정보(digital data of 3D subjects)에 따라 정밀하게 레이저로 직접 용착시키는 소위 레이저 클래딩(laser cladding) 기술을 이용하여 2차원의 조형층을 물리적으로 구현한다. 여기서 레이저 클래딩 기술이란 시편 표면에 레이저 빔을 조사하여 용융 풀을 만들고, 동시에 외부로부터 분말형태의 소재를 공급하여 시편표면에 새로운 클래딩 층을 형성시키는 기술이다(Fig. 1).

레이저 클래딩 기술은 기존의 플라즈마 용사, 아크 용접 등의 기존 기술에 비해 여러 가지 우수한 장점을 가지고 있다. 우선 모재와 클래딩 층이 완전한 용융접합(fusion bonding)을 이루기 때문에 모재와 클래딩 층 사이의 접합이 매우 우수하다. 그리고 모재에 적은 에너지가 흡수되므로 모재의 용융을 최소화(reduction in dilution)할 수 있고,

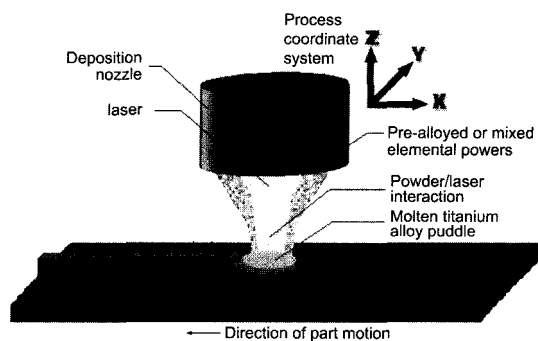


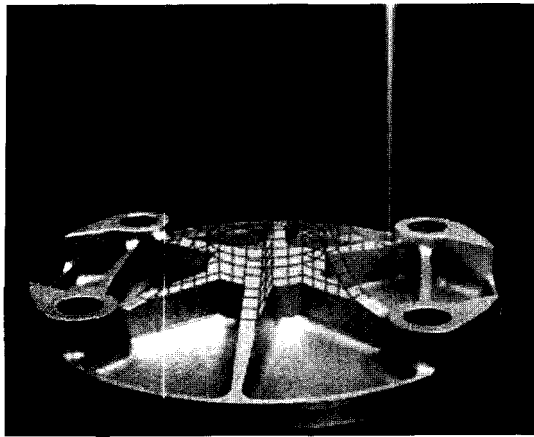
Fig. 1. An illustration of laser cladding process

따라서 기존의 방법에 비해 열 뒤틀림(thermal distortion)이 적고, 클래딩 층의 기공률을 낮추거나 없앨 수 있으며, 클래딩 층을 정밀하게 원하는 위치에 입힐 수 있어 추가공 비용을 줄일 수 있다. 또한 이 기술을 이용하면 대기 중에서 한 번의 공정으로 금속 응고조직이 형성되어 0.3에서 3 mm 두께의 클래딩 층을 얻을 수 있고 비교적 매끈한 표면(대략 25 μm RMS)을 얻을 수 있다는 점 이외에도 자동화가 용이하다는 특징도 갖추고 있다. Fig. 2는 이와 같은 레이저클래딩 층의 시편단면구조를 보여준다.

레이저 클래딩 기술은 기계부품이나 구조재의 모재 특성에 영향을 주지 않고 실제 응용에 요구되는 표면 특성을 갖는 클래딩 층을 입히는 데 이용된다. 선진국에서는 1981년 영국 Rolls Royce 사가 RG211 엔진의 “turbine blade shroud interlocks”을



Fig. 2. SEM photo of Laser-cladding specimen



Conceptual illustration of the AeroMet Lasform process

Fig. 3. An illustration of DMD process

레이저 클래딩 한 것을 시작으로, 자동차, 항공, 발전, 기계산업을 중심으로 부품 표면에 내마모성, 내열성, 내침부식성 등의 특성을 부여하기 위해 활발히 산업에 응용되고 있으나, 안타깝게도 국내에서는 이 기술에 대한 수요가 많음에도 불구하고 적절한 기술을 갖춘 상용업체가 없어 아직 산업에 적용되지 못하고 있다.

한편 레이저 직접 금속성형 공정은 이와 같이 증착된 레이저 클래딩 층을 한층 한층 적층하여 3차원 제품형상, 혹은 제품 생산에 필요한 tool 들을 기존에 tooling 공법과는 비교할 수 없는 매우 빠른 시간내에(통상 24시간 이내) 신속하게 성형할 수 있는 신기술이다(Fig. 3). 레이저 직접 금속성형 공정의 장점들을 열거하면 다음과 같다.

첫째, CNC 및 기타 가공기계를 이용한 절삭과 주조 등의 기존 어떤 가공방식과 비교할 수 없는 빠른 시간 내에 기능성 금속 시작품(functional metal prototype), 시작 및 양산 금형을 성형할 수 있다.

둘째, 기존 방법으로는 가공할 수 없었던 복잡한 형상의 금속파트와 각종 시작 tools의 신속한 제작이 가능하므로, 시작기간이 단축되고 신제품의 개발 기간 및 비용을 획기적으로 절감하는 효과를 얻을 수 있다.

셋째, 이 기술을 이용하면 매년 모델이 바뀔 때마다 쓸모없이 버려지고 있는 막대한 양의 금형에 동일한 소재로 적층하여 새로운 제품모델용 금형으로 다시 재 활용하여 리모델링할 수 있는 길이 트

여 제조업체의 원가절감과 그에 따른 산업체 전이 효과가 막대할 것으로 추산된다.

이와 같은 장점들로 말미암아 레이저 직접 금속 성형기술은 소품종 대량생산(mass production)에서 다품종 소량생산(mass customization)으로 생산방식이 변모하고 제품의 수명주기(life cycle)가 단축되어 제품의 시장진입시기(time-to-market)의 중요성이 점점 강조되고 있는 최근 제조산업의 환경변화에 유연하게 대처할 수 있는 기반기술로서의 역할을 수행할 수 있을 것으로 예측된다.

당장 이 기술의 가시적이고도 직접적인 혜택이 기대되는 곳은 자동차 및 일반제조업체를 대상으로 한 금형시장이다. 국내 금형시장은 그 규모가 작던 도 대비 약 10% 내외로 성장한 2조원을 상회할 정도로 금형이 제품의 외관 및 품질을 결정하는 데에 중요한 요소로 작용하고 있음에도 불구하고 금형작업중 금형에 가해지는 고속화, 고강도화 등의 가혹한 작업환경 특성으로 인해 금형의 마모 및 파손이 발생하며 이밖에도 양산 전후에 빈번하게 요구되는 제품 시방설계 변경으로 인해 금형의 잦은 開補修가 필수적이다. 그러나 기존의 육성용접에 의한 금형보수 분야에서는 고열용접 후의 모재와 용접부위간에 경도편차와 얼룩무늬의 발생, 그리고 기계적 재료성능 저하와 같은 문제점들이 치명적인 단점으로 지적되어 왔다. 따라서 레이저가 갖고 있는 열 특성상 이러한 문제들을 완벽하게 해결할 수 있어 당장 본 기술의 적용이 시급한 금형 開補修 분야 한 곳에서만도 전체 금형제작비의 10~12% 정도인 2,000억원 이상의 시장의 판도를 완전히 탈바꿈 시킬 수 있을 것으로 전문가들이 분석하고 있고 이로 미루어 볼 때, 레이저를 이용한 금속성형기술이 여타 금형시장에서 갖는 막대한 경제적 파급효과를 짐작할 수 있다.

3. 레이저 직접 금속성형과 금형제작

3.1 금형제작 및 보수

전통적으로 사출금형 분야에서는 경화처리된 철계열 블록을 밀링가공으로 절삭하여 금형 캐비티를 만들어 왔는데 이 공정은 정교하게 금형을 제작할 수 있는 장점을 가진 반면 제작시간이 매우 많이 소요된다는 단점이 있었다. 레이저 직접 금속 성형

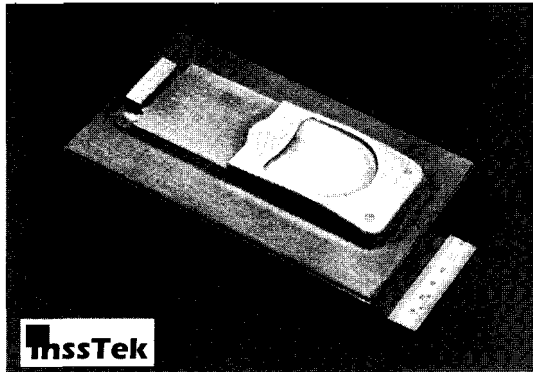


Fig. 4. Injection mold insert by DMD process

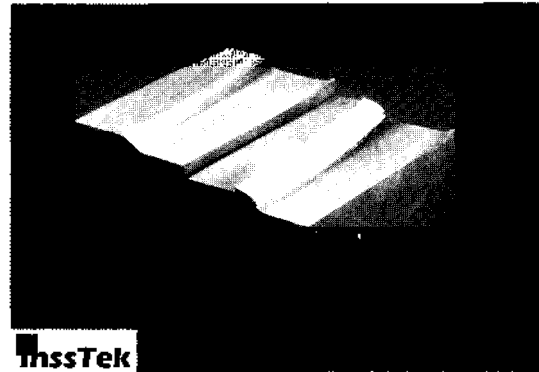


Fig. 5. Press die part by DMD process

기술은 기존의 절삭 방식보다는 정교함에서 다소 뒤떨어지나 금형 제작시간이 빠르고 특히 열영향을 거의 받지 않는다(Fig. 4). 미국 NCMS(National Center for Manufacturing Science)의 Westmoreland의 분석¹⁰⁾에 의하면, 성형 대상물에 따라 차이가 있지만, “직접 금속 성형기술은 기존 금형 제작시간을 40% 이상 단축시킬 수 있고, 미국 금형시장에서만 수십억 달러 가량 절감시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다(‘97년 미국의 금형생산 규모는 대략 \$10.8billion으로 추산됨).”고 발표되었다. 특히 금형육성보수의 경우 기존의 육성용접기법에 의한 방법보다 훨씬 우수한 금속재료적 성질을 갖는 금형보수가 가능하다.

금형보수분야는 그동안 손상된 각종 금형을 보수 및 재생하는 사업으로서 기존에는 균열(cracked), 파손(broken), 열손상(heat-checked) 등으로 인해 금형 혹은 tools가 손상되었을 때, 용접 방법을 이용하여 보수하고 있으나, 보수 후 제품의 품질이 크게 저하되고 용접보수를 위해 금형의 예열(pre-heat treatment) 및 후 열처리(post-heat treatment)가 필요하며 후가공 시간이 많이 소요된다. 따라서 생산중단에 따른 비용손실이 크게 증가하고, 더욱이 금형을 새로 교체할 경우 비용부담은 더욱 커지고 장기간의 생산지연으로 인해 발생하는 경제적인 손실이 막대하지만 직접 금속성형기술을 사용할 경우, 열처리 없이 공구장 또는 고객이 원하는 소재를 이용하여 금형의 손상된 표면을 기존의 용접공정에 비해 매우 짧은 시간에 새것처럼 보수 및 재생이 가능하다. 이 밖에도 자동차 프레스 금형의 trim

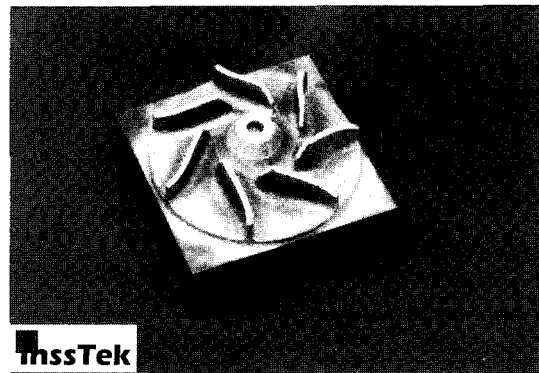


Fig. 6. Airo-metal part by DMD process

die cutting edges를 제작하거나(Fig. 5), 자동차 알루미늄 실린더 헤드의 밸브시트의 개질, 자동차 실린더 밸브 및 각종 밸브의 hardfacing 그리고 자동차 tarpet 및 디젤엔진 실린더 내벽의 경화 열처리 등이 가능하다. 금속, 합금, 등의 기능성 소재를 사용하여 기능성 시작품을 제작하거나 항공/군사/우주산업 부품의 제작 및 보수(Aerospace & Aircraft Component)가 가능하다(Fig. 6).

또한 금형내부에 conformal cooling channel을 삽입하거나 금형 내부에 열 전도도가 좋은 소재를 heat sink로 삽입시켜, 생산성을 크게 향상시키고 금형 내부의 온도분포를 항상 균일하게 유지시킬 수 있는데 사출성형 금형의 경우, 생산성이 30-50% 가량 증가하고, 제품의 품질도 향상된다. 또한, functional gradient materials 및 센서가 삽입된 고기능금형파트의 제작이 가능하다.

4. 결 론

레이저 직접 금속성형(laser-aided direct metal tooling) 기술의 특징은 기존의 tooling 공법에서의 공정설계 단계를 거치지 않고 곧 바로 프레스 금형과 냉간 단조 금형 파트, 그리고 복잡한 형상의 플라스틱 금형용 인서트 제작등에 이르기 까지 폭넓게 적용이 가능하며 무엇보다도 레이저가 갖고 있는 열 특성상, 기존의 육성용접에 의한 금형보수 분야에서 치명적인 단점으로 지적되어온 고열용접 후의 모재와 용접부위간에 경도편차와 얼룩무늬의 발생, 그리고 기계적 재료성능 저하와 같은 문제점들을 수반하지 않으므로 금형의 직접적인 開補修 시에 보다 더 효과적으로 활용될 수 있다.

이제 국내에서도 레이저를 이용한 직접금속성형 기술이 금형업체의 금형제조 및 보수기술과 연계된 기존의 상업용 시제품 개발 및 고부가가치 금속파트제조 공정에 투입되어 보다 효율적이고 바람직한 결과가 도출되기를 기대해 본다.

Acknowledgment

이 글은 2002년 1월 학술발표회에서 기발표된 논문을 재수정, 보완한 것임을 밝혀드립니다.

참고문헌

1. <http://www.3dsystems.com>
2. Jacobs, Paul F., Stereolithography and other RP&M Technologies, SME/RPA, ASME Press, 1996
3. <http://www.dtm-corp.com>
4. <http://www.extrudehone.com>
5. <http://www.optomec.com>
6. <http://www.pom.net>
7. <http://www.insstek.com>
8. 한국금형공업총람, 1999
9. Laser Surface Treatment of Metals, San Miniato, Italy, 2-13 Sept. 1985, p. 545-549 (Martinus Nijhoff Publisher 1986)
10. JOM, Vol. 49, No. 5, p. 55-60, May 1997

