

殘留應力の 工學的 應用

李 順 福

<韓國機械研究所 機械構造室長>

1. 殘留應力和 그 영향

1.1. 잔류응력

대부분의 기계제품에 흔히 內在하며 構造的 信賴性을 결정하는데 重要的 역할을 하지만 應力解析 과정에서 또는 공학교육과정에서 크게 관심을 기울이지 못했던 분야인 잔류응력에 대하여 技術的인 考察을 해 보자.

잔류응력(residual stress)이란 주위환경과 熱的인 平衡상태에 있으면서 외부에서 작용하는 하중이 없을 때 기계구조물이나 시편에 內在하는 잠금된 응력(locked-in stress)을 말한다. 잔류응력은 내부응력(internal stress) 또는 自體應力(self stress)이라고도 한다. 이 잔류응력은 매우 변화무상하고 현혹하는 듯한 특성을 가지고 있지만, 외부에 하중을 가해 생긴 어떠한 응력과 마찬가지로 實在應力이며, 構造的 보존에 미치는 영향에 있어서도 實在的이다.

주조, 압연, 성형, 스탬핑, 기계가공, 용접, 모울딩(molding) 등 거의 모든 가공공정이 가공물에 잔류응력을 남기므로, 대부분의 工業製品에 잔류응력이 생기게 된다. 이 잔류응력은 풀림(annealing)처리 같은 後처리에 의해 제거 또는 약화시킬 수 있다. 그러나 이러한 응력이란 공정이 가능하지 않을때가 많고, 아예 잔류응력의 存在를 의식 못하고 간과해 버릴 때도 많아서 이러한 殘留應力은 제품에 항상 머물면서 使

用應력과 相互作用을 하게 된다. 이러한 잔류응력에 의한 영향에 대해 살펴보자.

1.2. 殘留應力の 影響

잔류응력은 구조물의 신뢰성에 重要的 영향을 미친다. 構造物에 害로운 영향을 주기도 하고, 利로운 영향을 끼치기도 하며, 경우에 따라 中立的인 때도 있다. 이러한 잔류응력의 영향은 상호관련된 여러가지 要素들과 매우 복잡하게 얽히어 나타난다. 殘留應력과 作用應力の 부호, 크기, 방향, 분포상태가 重要的 要素들이다. 作用荷重이 정적하중인지, 피로하중인지, 아니면 들을 포함한 하중인지가 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 물론 사용한 재료의 형태연성인지 취성인지, 정적특성과 피로특성은 어떠한지 등도 매우 큰 영향을 미친다. 一般的으로 臨界作用應力(critical working stress)과 殘留應力の 방향과 부호가 같으면 害롭고, 방향은 같으나 부호가 다르면 利로운 영향을 준다.

殘留應力の 害로운 영향에 대해 먼저 생각해 보자. 잔류응력에 의한 파괴의 고전적인 例가 “自由의 鐘(Liberty Bell)”⁽¹⁾이다. 이 鐘을 1753 年 미국 필라델피아에서 주조했을 때, 鐘의 內表面이 먼저 냉각되고 後에 外表面이 식었다. 外表面이 식으면서 수축하려 했으나 內面층이 이미 단단히 굳어 있었으므로 수축이 저지되고 따라서 鐘의 外表面에 殘留引張應力이 남게 되었다. 1828 年 自由의 鐘 입술에 그림 1 과 같이 균열

■ 解 說

이 나타났고, 몇차례 수선을 시도했으나 균열은 계속 성장하여 결국 使用不能상태가 되었다. 自由의 鐘의 파피는 잔류응력을 무시하면 어떠한 결과를 가져오는가를 나타내는 매우 교훈적인 예이다. 그 외에도 荷重을 가하지도 않았는데 파피되거나 아직 사용도 하지 않은 제품이 갑자기 파피되는 등 殘留應力에 의한 제품 파손의 많은 경우 들이 참고문헌 (2)에 잘 정리되어 있다.

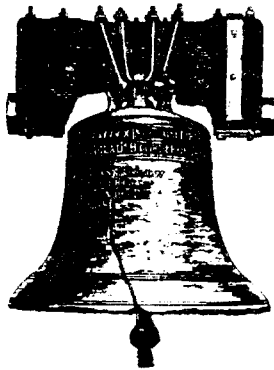


그림 1 자유의 종의 잔류응력에 의한 파피

이제 殘留應力の 利로운 영향에 대해 고찰해보자. 작용응력과 잔류응력의 중첩은 하중을 받는 部材를 強化시킬 수 있다. 일반적으로 취성 재료는 인장응력에 의해서 파손되고 연성재료는 피로하중의 인장응력에 의하여 파손되므로, 가장 혼한 파손형태는 引張應力에 의한 파손이라 볼 수 있다. 따라서 사용중에 높은 인장응력을 받는 표면에 殘留壓縮應力을 발생시킴으로 部材를 強化시킨다. 잔류응력을 有益하게 이용한 예가 담금질한 유리, 쇼트 피이닝한 기계부품, 표면압연한 부품, 질화, 침탄 등 열처리, 오토프리타지(autofrettaged)한 총구, 미리 응력을 가해 준 콘크리트 등이다. 이와 같은 잔류응력의 긍정적이고 적극적인 활용기술에 관하여 제 3장에서 좀더 다루기로 한다.

2. 殘留應力の 測定技術

殘留應力이 構造物에 미치는 영향은 매우 重要하므로 殘留應力の 存在를 측정 등 실험적으로 입증함은 바람직하다. 現在까지 利用가능한 測定

方法에 대하여 개략적인 설명을 하고 가장 널리 쓰이는 구멍뚫기방법(hole drilling method)를 소개하고자 한다.

2.1. 測定方法

다음과 같은 方法들을 殘留應力 測定에 使用할 수 있다.

- (1) 應力弛緩法(stress relaxation method)
Gunnert 方法(trepanning method)
절단방법(sectioning method)
구멍뚫기방법(hole drilling method)
취성재료도포법(brittle coating method)
- (2) X선 회절법(X-ray diffraction method)
- (3) 초음파법(ultrasonic testing method)
- (4) 자기장 측정법(magnetic field method)

이상 대부분의 方法들이 表面의 잔류응력 측정에 利用되지만 초음파법은 内部측정이 가능하다. 초음파법은 잔류응력이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 음파속도의 변화를 계측함으로써 두께 방향의 잔류응력 측정이 原理적으로 가능하여 앞으로의 많은 연구가 기대된다. 자기적 측정법은 강자성체의 금속에만 적용가능하며, X선 회절법은 表面의 잔류응력을 비파괴 방법으로 측정하며, 자동 X선 기계가 상품화 되어 쓰이고 있다.

應力弛緩法은 잔류응력을 弛緩시켜서 測定하는 기술이다. 오래전부터 널리 사용되어 온 Gunnert 법은 측정하고자 하는 부위에 신장계를 위한 표점 표시를 한 후에 표점 주위로 원형 홈을 파서 잔류응력을 이완하여 측정한다. 이 방법은 표점거리가 9mm로 크고, 홈의 직경이 15mm나 되어, 응력 구배가 심한 부분에는 부적합하다. 절단 방법은 파괴방법이며 측정에 많은 노력이 소요된다. 취성재료 도포법은 취성재료를 잔류응력이 있는 부위에 도포한 후 구멍을 뚫는 등의 방법으로 잔류응력을 이완시키면 취성 재료에 균열이 발생한다. 이 균열의 크기, 밀도, 방향 등을 관찰하여 殘留應力の 定性的인 분포를 알아 낸다.

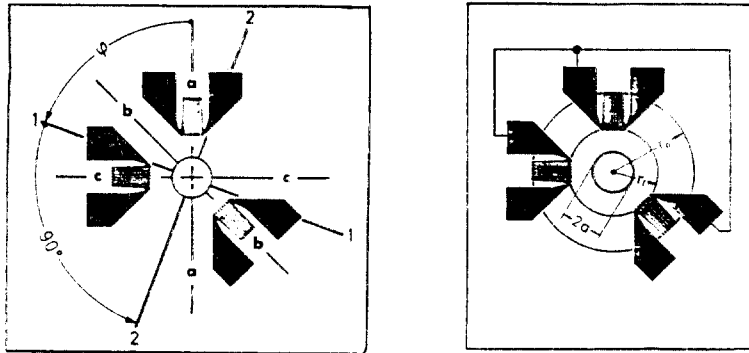


그림 2 스트레인 게이지 로셋트(strain gage rosette)

2.2. 구멍뚫기方法(Hole Drilling Method)

이 방법은 殘留應力이 존재하는 금속표면에 구멍을 뚫어 잔류응력을 이완시켜 측정하는 기술로서 대부분의 실험실에서 손쉽게 할 수 있는 가장 보편적인 應力弛緩方法이다. 측정하려는 부위에 그림 2와 같은 특수한 스트레인 게이지 로셋트를 설치하고, 변형율을 측정한 후 게이지의 中心의 원형 목표에 깊이 1.5mm, 직경 1.5mm의 구멍을 뚫고, 구멍주위의 응력이완으로 생긴 변형율의 변화 $\Delta\epsilon_a, \Delta\epsilon_b, \Delta\epsilon_c$ 를 측정한다. 표면의 잔류응력상태는 主應力 σ_1, σ_2 의 크기와 방향을 알면 명백히 얻을 수 있다.

(1) 主軸의 方向

主軸 1은 식 (1)로 계산한 방향각 ϕ 만큼 로셋트의 참고방향 a 에서 회전한 방향이고, 主軸 2는 主軸 1과 直交한 방향이다.

방향각 ϕ :

$$\tan 2\phi = \frac{\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c - 2\Delta\epsilon_b}{\Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_a} \quad (1)$$

(2) 主應力의 크기

식 (2)는 주응력의 크기 σ_1, σ_2 를 결정한다.

$$\sigma_{1,2} = -\frac{E}{2A}(\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c) \quad (2)$$

$$\pm \frac{E}{4B} \{(\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c - 2\Delta\epsilon_b)^2 + (\Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_a)^2\}^{1/2}$$

이 식에서 E 는 재료의 탄성계수이고 A 와 B 는 다음과 같이 결정되는 상수들이다.

$$A = \frac{a^2(1+\nu)}{2r_a r_i} \quad (3)$$

$$B = \frac{2a^2}{r_a r_i} \left[1 - \frac{a^2(1+\nu)(r_a^2 + r_a r_i + r_i^2)}{4r_a^2 r_i^2} \right] \quad (4)$$

여기서

ν = 재료의 프와송비

r_a = 측정 그리드의 外半徑

r_i = 측정 그리드의 內半徑

a = 구멍의 반경

이외에 殘留應力 測定技法으로 最近 MAE法 (Magnetomechanical Acoustic Emission Method)이 개발되어 실용화를 위한 연구가 진행되고 있다. 이것은 철과 같은 강자성체가 응력을 받으면 에너지 형태의 음파(Acoustic Emission: AE)가 발생함을 이용하는 것으로 AE신호를 증폭하여 잔류응력을 계측하는 것이다. 특징은 상당한 길이에 있는 내부의 殘留應力을 측정할 수 있으나 표점거리가 큰 결점이 있다.

잔류응력의 重要性에 비추어 이의 측정은 시간 비용이 많이 들어 역사적으로 어려웠다. 최근의 개발로 많이 단순화 되었으나 아직도 여러 실험응력기법중에서 가장 미확립된 기술로 남아있어, 앞으로 많은 연구가 뒤따라야 할 것이다.

3. 殘留應力의 活用技術

3.1. 압축잔류응력의 발생방법

壓縮잔류응력을 발생시키는 실제적인 많은 방법들은 크게 機械的 方法과 熱的 方法으로 대별할 수 있으며 다음과 같다.

◎ 機械的 方法

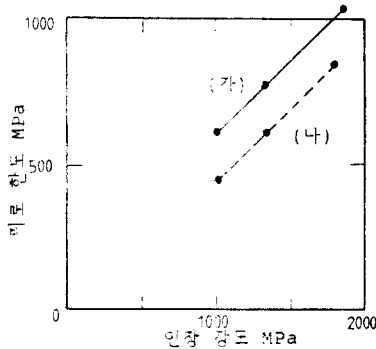
○ 引張초과하중(tensile overloading)

○ 오토프리타지(autofrettage)

- 쇼트피이닝(shot peening)
- 표면압연(surface rolling)
- 구멍주위 壓印(coining around holes)
- 구멍확장(expansion of holes)
- 용접부위 헤머피이닝(hammer peening of welds)
- ◎ 熱的 方法
 - 侵炭(carburizing)
 - 窒化(nitriding)
 - 誘導硬化(induction hardening)
 - 炭素鋼의 急冷(severe quenching of carbon steel)
 - 또는 유사한 방법

(1) 熱的 方法

압축잔류응력을 熱的인 方法으로 발생시키는 것은 기계부품의 피로저항을 向上시키는 가장 오래된 수단이다. 鋼의 表面을 침탄, 질화, 유도경화 또는 탄소강의 급냉등을 통하여 硬化시키면 단단하며, 壓縮상태의 表面을 갖게 된다.



(가) 프로펠라 軸, (나) 결합있는 平板
 그림 3 쇼트피이닝한 시편의 인장강도와 피로한도 관계

압축응력은 硬化된 表面의 항복응력까지 이를 수 있고, 이것은 균열의 성장을 매우 効率的으로 막는다. 그림 3에서 보는 바와 같이 硬度를 높이면 인장강도가 증가되어 피로강도가 向上됨을 알 수 있다. 그림 4는 얇게 급냉한 몇가지 鋼의 疲勞限度와 측정된 壓縮殘留應力の 關係를 보여주고 있다. 疲勞限度는 거의 압축잔류응력과 그 크기가 같다는 것을 알 수 있다.

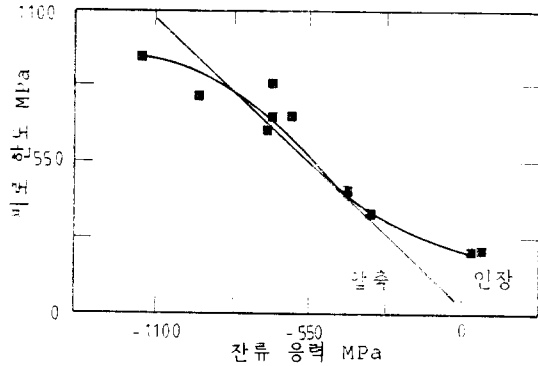
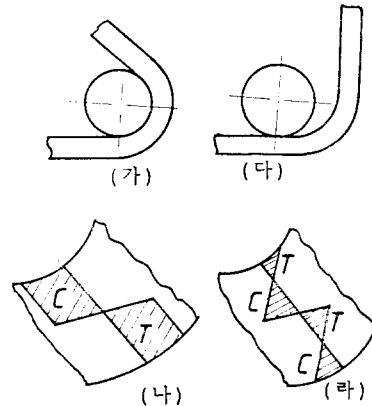


그림 4 노치있는 강봉의 피로한도에 미치는 잔류응력의 영향

(2) 機械的 方法

유익한 압축잔류응력을 발생시키는 機械的 方法은 극부적으로 引張降伏을 일으키는 變形率 句配에 의존한다. 降伏되지 않은 彈性部分에 의한 되튕김(spring back)은 引張降伏된 領域에 壓縮應力을 發生시킨다. 그림 5는 冷間굽힘에 의한 平板의 應力상태를 보여 준다. 應力집중이 있으면 인장초과하중이 압축잔류응력을 만든다. 포신의 오토프리타지(autofrettage)를 예로 들어 보자. 벽이 두꺼운 포신의 관은 內徑가까이 높은 인장응력을 받는다. 포신관벽 전체를 降伏시키지 않고 內壓으로 內徑을 降伏시킨다. 內壓을 제거하면 관직경의 탄성적 수축이 內徑 부근의



(가) 굽힘상태, (나) 탄성-완전소성을 가정한 應力분포, (다) 하중제거와 되튕김 후 상태, (라) 되튕김후의 應力분포(T:인장응력, C: 압축응력)

그림 5 평판굽힘에 의한 잔류응력

금속을 압축상태로 만들게 된다. 압축잔류응력으로 疲勞強度를 향상시키는 기계적 방법으로 구멍주위의 壓印(coining around holes), 구멍의 팽창, 용접부위의 헤머 피이닝 등과, 가장 일반적으로 널리 쓰이는 쇼트 피이닝(shot peening) 방법과 表面壓延(surface rolling) 방법이 있다. 마지막 두 方法은 모두 局部塑性變形을 利用하는데, 前者는 작은 球의 衝擊에 의한 압력으로, 後者는 좁은 로울(rolls)의 압력으로 국부소성변형을 얻는다. 이 두 方法의 工學的 應用에 대하여 알아 보겠다.

3.2. 쇼트 피이닝

유익한 압축잔류응력을 발생시키는 가장 일반적이고 널리 쓰이는 기계적 방법이 쇼트 피이닝(shot peening)이다. 쇼트 피이닝은 작은 금속 입자를 고속으로 금속표면에 衝突시켜 만든 국부적인 소성변형을 이용하는 工法이다. 좀더 자세히 설명하면 분사기를 이탈한 쇼트의 粒子는 $E = \frac{1}{2}mV^2$ 의 운동에너지를 갖고, 작은 망치의 역할로 금속표면을 강타한다. 이때 표면은 국부적인 항복점을 초과하고 영구변형을 받아 딩플(dimple)을 형성하고 길이는 表面에서 0.1~0.8 mm에 달한다. 변형층 바로 아래층은 彈性이 存續하여 늘어난 表面층을 늘어나기 전의 상태로 복원하려는 힘이 작용하여 表面은 殘留壓縮應力, 內部는 引張應力을 갖고 平衡을 이룬다.

壓縮층의 두께는 공작물의 재료와 쇼트의 크기, 재료, 분사속도 등으로 정해지는 쇼트의 強度에 의해 결정된다. 압축응력의 크기는 주로 공작물의 재료에 의해 결정된다. 쇼트의 강도는 알멘수(Almen number)로 정의된다. 지나친 強度는 공작물의 內部에 지나친 引張應力을 유발할 수 있고, 불충분한 強度는 充分한 보호를 주지 못할 수 있다. 여러가지 기계부품에 대하여 成功的으로 사용되었던 強度의 表는 참고문헌(3)에 나와 있다.

쇼트 피이닝에 의한 전형적인 응력분포는 그림 6과 같다. 그림 7은 재료의 경도와 최대압축잔류응력 크기와의 관계를 보이고 있다. 강철

과 티타늄에서 압축응력의 깊이를 피이닝의 強度로 나타낸 것을 그림 8에서 볼 수 있다.

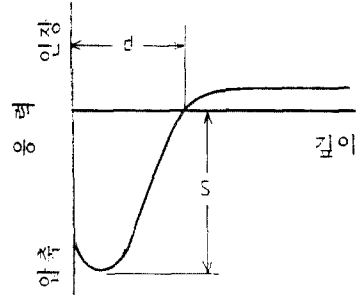


그림 6 쇼트 피이닝한 표면아래의 전형적인 잔류응력 분포

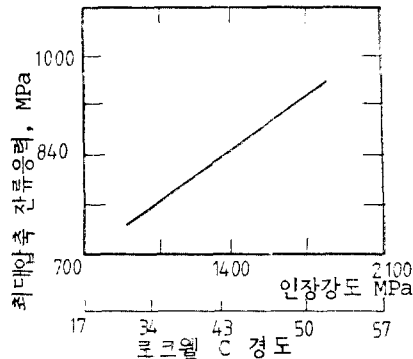


그림 7 쇼트피이닝으로 발생한 잔류응력과 재료의 인장강도의 관계

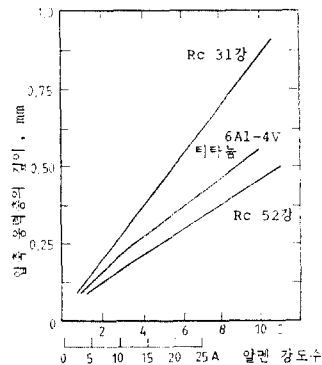


그림 8 鋼과 티타늄의 압축응력깊이와 Almen 強度의 관계⁽⁴⁾

쇼트 피이닝은 굽힘이나 비틀림을 받는 기계부품의 疲勞壽命을 연장시키는데 큰 효과가 있다. 쇼트 피이닝을 하는 部品은 조그만 피스톤 핀에서부터 大型 액슬 하우징(axle housing)에 이르

■ 解 說

기까지 매우 다양하며 특히 自動車 부품중 크랭크 축(crank shaft), 차 축(axle shaft), 프로펠러 축(propeller shaft), 엔진의 밸브 스프링(valve spring), 스티어링 너클(steering knuckle), 판 스프링(leaf spring) 등 매우 다양하며 토오션바(torsion bar) 등도 必須的으로 쇼트 피이닝을 하는 部品이다. 고성능 기어나 스프링에 쇼트 피이닝을 하는 것은 아주 보편적이 되었다. 그림 9는 칩탄한 기어에서 수평의 10배 증가, 10⁷ 사이클에서 강도의 40% 증가를 쇼트 피이닝으로 얻은 것을 보여주고 있다.

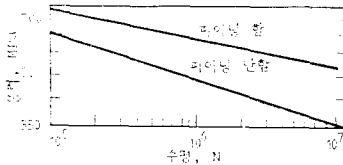


그림 9 칩탄기어의 피로특성

3.3. 表面壓延

압축잔류응력을 기계적으로 얻는 또 하나의 보편적인 방법이 表面壓延(surface rolling)이다. 表面壓延은 좁은 로울러의 압력에 의해 발생하는 국부적인 소성변형을 이용하는 것이다. 표면 압연은 나사를 만드는데 널리 쓰이고 있다. 볼트나 스크류를 형성하는 공정에서 疲勞저항을 동시에 증가시키므로 매우 경제적이다. 고강도 강으로 굴림에 의해 만든 나사는 기계가공한 나사보다 50%의 피로강도가 높은 것으로 나타났다. 경도가 낮은 강은 개선이 적게 나타난다. 인장강도가 550 MPa보다 낮은 경우 피로강도 증진은 표면압연에 의해 나타나지 않는다고 보고되어 있다.

表面壓延의 방법은 段달림棒의 펠레트部나 V 홈의 바닥등에 압축잔류응력을 발생시켜 피로한도를 向上시키는데도 쓰인다.

압연압력에 의한 피로한도의 向上率을 보면 그림 10과 같으며 최적 압연압력을 넘으면 피로한도의 증가율은 오히려 감소한다. 이때의 최적 압연압력을 限界壓延壓力이라 한다.

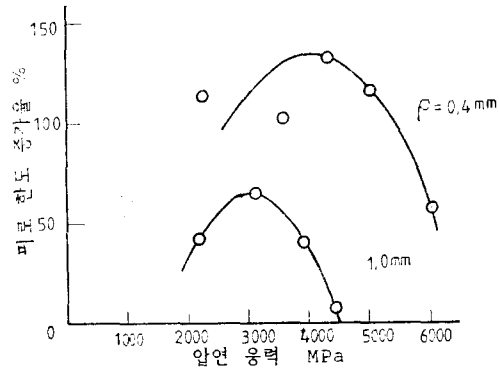


그림 10 V 홈 시험편의 홈바닥 압연에 따른 피로한도의 증가율(ρ 는 펠레트반경)

有益한 압축잔류응력을 最大로 活用하기 위하여 硬度가 높은 재료에 적용하는 것이 좋다. 이것은 높은 항복강도의 잠재성을 충분히 이용할 수 있기 때문이다. 또한 응용되는 부품에 가장 알맞는 압축압력층의 깊이를 알아서 적용해야 한다. 즉, 쇼트 피어닝에서 최적 알멘수, 표면 압연에서 한계압연압력 등을 알아서 적용하는 것이 매우 重要하다. 압축압력층은 균열발생을 저지할 수 있을만큼 충분히 깊어야 하지만, 너무 깊어서 재료가 단단해지면 임계균열길이도 짧아지고, 균열도 빨리 전파하기 때문이다.

以上 殘留應力과 그 영향, 측정기술과 응용기술에 대하여 살펴 보았다. 기계실제자나 현장 기술자에게 작은 보템이라도 되길 바라며 小考를 맺는다.

참 고 문 헌

- (1) "Residual Stress...The Nemesis of the Liberty Bell" *Epsilonics*, Vol. III, pp.10-11, 1983,
- (2) J. O. Almen and P.H. Black, *Residual Stresses and Fatigue in Metals*, McGraw-Hill Co. New York, 1963
- (3) "Shot Peening" *Metals Handbook*, Vol. 2, 8th ed. ASM, p.398, 1964,
- (4) *Shot-Peening Applications*, 5th ed. Metal Improvement Co., 1977