

쇼트피닝가공한 평기어의 최적 피닝강도 탐색에 관한 연구

이동선⁺, 이국진⁺, 김태형⁺⁺, 정성균^{*}

A Study on the Investigation of Optimal Peening Intensity for Shot Peened Spur Gear

Dong-Sun Lee⁺, Kook-Jin Lee⁺, Tae-Hyung Kim⁺⁺, Seong-Kyun Cheong^{*}

Abstract

The shot peening process is often used to improve fatigue properties of metal parts. Among them, It is the most use in an auto-component. In order to achieve optimum, repeatable and reliable fatigue enhancement from the shot peening process, the important shot peening parameters must be controlled.

In this paper, the optimum peening intensity (Almen intensity) condition is investigated by experiment. The Spur Gear steel was used to investigate shot peening effects. The fatigue life at $\sigma_a=1,050$ and $\sigma_a=1,250$ MPa first gently increases, then drops gently as peening intensity increases compared with unpeened specimen. Experimental results show that the optimum peening intensity range is 0.391~0.434mmA. So the fatigue strength and fatigue life have been tremendously increased by optimum-peening treatment. However, the fatigue strength and fatigue life have been decreased by over peening.

Key Words : Shot peening (숫피닝), Shot ball (숫볼), Fatigue life (피로수명), Compressive residual stress (압축잔류응력)

1. 서론

동력 전달 장치로서 중요한 역할을 하며 모든 부품산업의 근간이 되는 기어는 이미 오래 전부터 경량화, 소형화등, 내구 신뢰성을 확보하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만 국내의 고강도화, 고정밀화 등의 기술력은 아직 여타 선진국에 비해 매우 낮은 것이 현실이며 이러한 것을 극복해 세계적으로 나아가기 위해서는 좀더 체계적이고 신뢰성 있는 연구가 필요하다.

기어에 관한 연구 중 고강도화를 위한 방법으로는 표면 경화처리가 가장 일반적인 방법으로 쓰여지고 있으며 표면

경화처리 방법에는 침탄법, 질화법, 고주파 열처리, 쇼트 피닝 등이 있다.⁽¹⁾ 이러한 방법으로 표면경화처리를 실시 하면재료에는 표면경화층과 압축잔류응력이 생성되고 이는 곧 기어의 굽힘 피로강도에 큰 영향을 미치며 그 중 쇼트피닝가공에 의한 피로강도 및 수명연장의 유효함은 많은 연구를 통해 입증되었다.⁽²⁾

근래에는 피로강도를 향상시킬 목적으로 쇼트피닝의 가공조건에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이 방법은 기어강 뿐만 아니라 기초기계, 자동차, 선박, 항공기용 스프링, 축류 등의 고강도화에도 많이 쓰이고 있다. 그러나 쇼트피닝에 의한 피로특성 향상에 대한 정성적 지식만 보편화되어 있을 뿐, 해당 재료 및 부품의 최대수명효과를

* 주저자, 서울산업대학교 기계공학과 (skjung@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

+ 서울산업대 산업대학원

++ 서강대학교 대학원

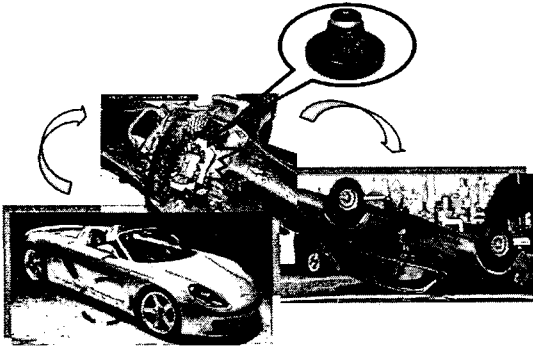


Fig. 1. Differential gear

낼 수 있는 최적 피닝강도 조건에 관해서는 국내에 쌓여진 경험과 지식이 매우부족한 상황이다.

이에 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 자동차 부품 중 차동기어(differential gear)에 많이 사용되어지고 있는 소재로 제작한 평 기어에 대해 샷피닝 공정과 피로시험을 통하여 부품산업 내구목표수명의 핵심적 결정 요소인 최적의 피닝강도를 탐색하였다.

2. 이론적 배경

샷피닝이란 금속 재료의 표면에 쇼트볼이라는 강구를 고속으로 투사하여 금속의 표면에 충격을 주는 냉간가공의 한 종류이다. 금속부품의 표면에 쇼트볼이 고속 충돌하면 쇼트볼이 지니고 있는 운동에너지가 순간 표면에 전이(transformation)되면서 표면부에 얇은 소성 변형층을 형성한다. 이 소성 변형층은 변형전의 상태로 유지하려는 반력이 작용하고 표면에는 압축응력, 내부는 인장응력을 갖고 평형을 이룬다.⁽³⁾

샷피닝의 정도를 나타내는 알멘강도 (Almen intensity)는 샷볼의 속도, 경도, 크기, 투사각 등에 따라 변하며 이 모든 것이 적절해야만 최적의 피닝강도를 갖는다.^(4,5) 이러한 최적 피닝강도는 아크하이트와 커버리지로 표시되며 일반적으로 100% 커버리지에서의 아크하이트를 기준으로 한다. 아크하이트는 알멘스트립의 굽어진 정도로서 SAE에서 규정하고 있다. Fig. 2에 알멘강도 측정 시스템을 나타냈다. 알멘강도를 측정하는 또 하나의 기준이 되는 커버리지는 투사된 샷볼이 표면을 타격한 밀도를 말하며 피닝 자국면적을 백분율로 나타낸다. 투사된 노출시간과 커버리지 정도의 사이에는 함수관계가 성립되며 다음 식 (1)과 같이 표현된다.⁽⁶⁾

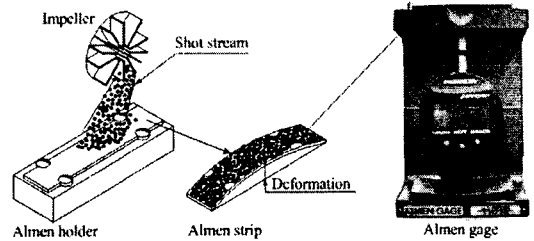


Fig. 2. Almen measurement system

$$C = 1 - (1 - C_1)^{n_e} \quad (1)$$

여기서, C 는 n_e 회 노출된 커버리지(%), C_1 은 1회 노출된 커버리지(%), 그리고 n_e 는 노출 횟수를 의미한다.

동력 전달장치인 기어의 강도설계는 이뿌리의 굽힘강도, 스크로잉 강도, 이 접촉면의 피로강도 등의 세 가지 항목의 계산 결과 중 최소의 허용하중으로 전달 마력을 결정 한다. 기어의 강도평가에 관한 규격으로는 AGMA, ISO, DIN, JIS 등 여러 가지가 있으나, 이중 AGMA 규격⁽⁷⁾은 기어 치의 굽힘 강도 및 면압 강도에 대한 평가에 있어 신뢰성이 높고 각종 계수에 대한 평가 방법이 잘 정비되어 있어, ISO 규격⁽⁸⁾과 함께 기어 강도평가에 가장 많이 사용되고 있다. 초기의 기어 강도계산은 제대로 확립된 규격이 없었기 때문에 기어 분야의 전문가들에 의해 확립된 기어 강도에 대한 공식에 주로 의지하였다. 이러한 공식에는 Lewis 식, Niemann 식 등이 있으며 AGMA 규격⁽⁷⁾은 Lewis 식에 기초하여 계산하며 굽힘 강도를 계산하는데 있어서 이를 외팔보로 보고 이뿌리에 생기는 반복응력이 재료의 허용응력을 넘지 않도록 설계를 하면 기어의 절손을 방지할 수 있다고 보았다.

노치란 재료가 가지고 있는 흠이나 구멍 등의 단면이 변화되는 부분을 말한다. 이러한 노치부에서는 부분적으로 높은 응력이 작용하게 되는데 이를 응력집중이라 한다. 그리고 이 응력이 집중되는 정도를 응력집중계수(K_t)라고 한다. 다음의 식(2)은 응력집중계수를 표현한 식이다. 여기서, σ_{max} 는 노치부에 작용하는 최대응력, σ_n 은 공칭응력을 나타낸다.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (2)$$

일반적으로 노치부에 작용하는 최대응력을 구하기 위해서는 탄성학의 기본이론을 바탕으로 구할 수 있지만 힘든 경우에는 유한요소 해석을 통하여 구하기도 한다. 또는 노치부에 스트레인 게이지를 부착하여 응력을 측정하는 방법도 있다. 그러므로 노치부에서는 부재에 작용하는 응력을 응력집중계수의 배만큼의 응력을 증가시킴으로 재료의 피로강도를 저하시키는 요인으로 작용하게 된다.⁽⁹⁾ 특히 기어의 노치 부분은 피로파괴의 기점이 되며 기어 설계 시 가장 신중히 고려해야 할 부분이다.

3. 실험

본 실험에서 사용한 기어(Spur gear)의 소재는SCM420H로서 실제 자동차의 차동기어(differential gear)부분에 사용되고 있는 현장 소재이다. 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 2에 나타내었다.

또한 기어의 주요 재원을 Table 3에 나타내었으며 Table 4와 같이 열처리 하였다.

시험편의 샷피닝 가공은 현장 실무 조건을 감안하여 Arch Hight 0.5mmA Coverage 100% 이상이 되는 속도 1400rpm과 시간을 기준으로 선택 하였으며, 이 중 속도를 변수로 하여 최적의 피닝 강도 및 Under와 Over peening을 각각 탐색하였다. 쇼트피닝에 관한 조건은 Table 5에 나타내었으며 실험에 사용된 피닝 장비는 임펠러 투사방식인 PMI-0608을 이용하였다.

기어의 피로시험은 1,050Mpa 과 1,250Mpa의 두 가지

Table 1 Chemical compositions (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
0.20	0.18	0.81	0.17	0.09	1.12	0.19	0.02	0.01	0.32

Table 2 Mechanical properties

	σ_y (MPa)	σ_t (MPa)	σ_r (MPa)	ϵ (%)
Normal	302	637	444	21.4
Heat treated	511	1059	1047	3.9

Level의 하중 조건을 선택하였으며 이 하중은 치구의 로드셀과 기어의 이 끝과의 각도를 40°로 하여 식(3),(4)에 의해 계산된 기어 이 뿌리 부분에 실제 주어지는 하중이다. 피로시험을 위해 직접 제작된 기어 치구를 사용하였으며, 피로시험기로는 Fig. 3에서 보는 것과 같이

Table 3 Dimensions of a test gear

Module	m	5
Number of teeth	z	18
Pressure angle	(deg)	20
Thickness	(mm)	10
Face wide	(mm)	10
Inside diameter	(mm)	25
Heat treatment		Carburized
Surface treatment		shot peening

Table 4 Machining and heat-treatment process

Item	T (±10℃)	C. P. (±0.1%)
Carburizing(1 zone)	850	0.8
Carburizing(2~3 zone)	850	0.8
Diffusion	850	0.75
Quenching	6 min	
Drain	4 min	
Cooling	0	
Oil temperature	140℃	
Dewaxing Furnace Temperature	530℃	
Stirring Rate(RPM)	600	
R.X(m ³ /h)	Carburizing12 Diffusion15	

Table 5 Conditions of shot peening

Shot ball dia.	0.8 mm
Shot velocity	0 ~ 75m/s (0~1600rpm)
Time	4~12min
Coverage	≥ 100%
Arc height	0 ~ 0.586mmA

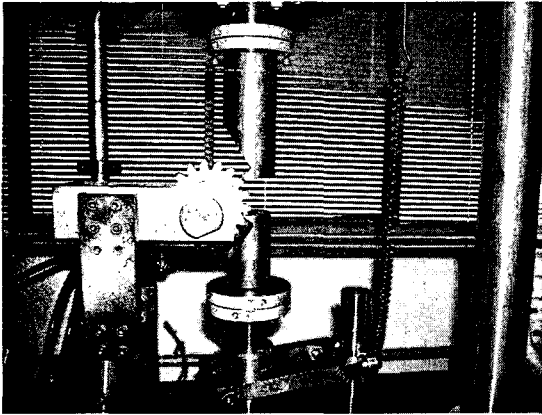


Fig. 3. Instron 8516

Instron 8516 유압 서보식 피로시험기를 사용하여 10Hz로 실험 하였다.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{12Pl}{bh^3} \times \frac{h}{2} = \frac{6Pl}{bh^2} \quad (3)$$

$$P = \frac{bh^2\sigma}{6\ell} \times \frac{1}{\sin 40^\circ} \quad (4)$$

여기서, b = 이 너비 (m)
 h = 이 뿌리 길이 (m)
 ℓ = 이 높이 (m)
 P = 하중

조도(roughness) 측정은 Mitutoyo, SJ-400을 이용하여, 기어의 이와 이가 맞닿는 치면 부분을 기준으로 최대 거칠기 (R_{max}), 중심선 평균거칠기 (R_a), 그리고 10점 평균거칠기 (R_z)를 측정하였다. 측정 구간은 0.8mm, 탐촉자의 속도는 4mm/s로 하였다. 또한 잔류 응력의 측정은 X-선 회절분석기를 이용하여 각 알멘강도에 따른 기어 표면 부분의 잔류 응력을 측정하였다. 측정조건은 Table 6과 같다.

파단면의 조직 관찰을 위해 전자 주사 현미경(Scanning Electron Microscopy)을 이용하여, 시험편의 파단면 초기 크랙 발생을 중심으로 각각 피로 파피의 진행 방향 및 특성을 평가하였다.

Table 6 Measuring condition of residual stress

X-Ray diffraction	Condition	
X-Ray source	Target	Cr-V
	Voltage	30 kV
	Current	30 mA
ϕ	0°, -10°, -20°, -30°, -40°, -50°	
2θ	154° ~ 159°	
Diffraction	Scintillation counter	

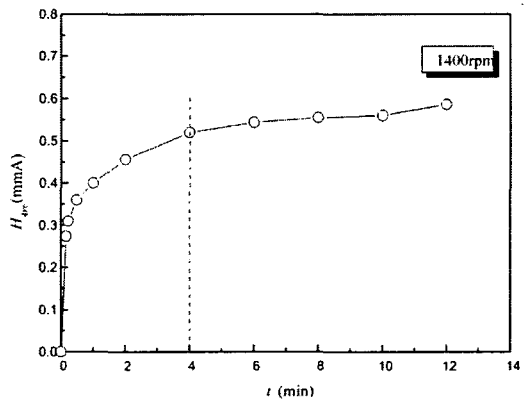


Fig. 4. Saturation curve

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 최적의 조건을 탐색하기 위해 현장 조건(Arch height 0.5mmA)으로 얻은 포화선도(saturation curve)이다. 이 그래프를 구함으로써 포화점(saturation point)를 찾을 수 있으며 또한 1400rpm 4min이 Arch Hight 0.5mmA 이상의 기준을 만족함으로써 4min이라는 시간 변수를 고정 할 수가 있었다.

피로시험을 통해 최대 수명을 갖는 최적 피닝강도를 탐색하기 위해 Fig. 4를 참고로 시간을 고정된 후 속도별 알멘강도로서 피로 시험을 하였다. Fig. 5는 피로시험의 결과를 나타낸 것이다. 1,050Mpa의 경우 알멘강도가 커질수록 피로 수명이 점차 증가하다가 알멘강도 0.391mmA를 기준으로 다시 피로 수명이 점차 감소 하는 경향을 보인다. 1,250Mpa도 마찬가지로 0.391mmA를 기준으로 알멘강도

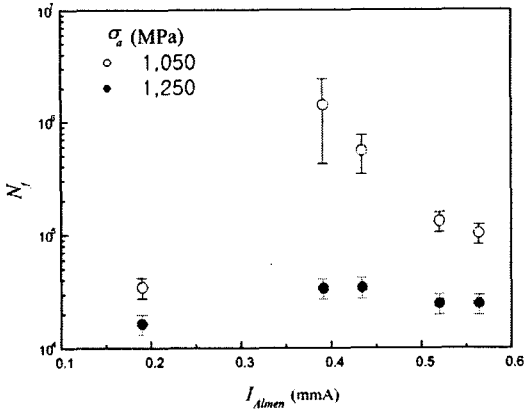


Fig. 5. Effect of Almen intensity on the fatigue life

가 커질수록 수명이 점차 감소하였다. 응력별로 각각 459.5%, 19% 증가한 것을 볼 수 있으며 따라서 최대 수명을 갖는 최적 피닝강도는 0.391~0.434mmA의 사이라는 것을 알 수 있다. 또한 1250MPa에서의 완전한 수명 분포에 반하여 1,050MPa의 경우 수명의 차이가 크게 나타났다. 이는 피닝이 고 응력 저 사이클보다 저 응력 고 사이클에서 효과가 더 크다는 것을 보여준다.

숫피닝이 기어강의 표면조도에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 앞에서 언급한 기어의 이와 이가 맞닿는 치면 부분의 조도측정을 알멘 강도 별로 측정 하였다. Fig. 6과 Table 7은 표면조도 측정값을 나타낸다. 결과로부터 최적피닝(Optimal Peening)의 10점 평균거칠기(R_z)가 $3.5\mu\text{m}$ 오버 피닝(Over peening)의 10점 평균거칠기(R_z)가 $3.8\mu\text{m}$ 로서 최적피닝강도 조건이 거칠기 측면에서도 오버피닝에 대해 더 뛰어난것을 알 수 있다. 일반적으로 피닝을 하게 되면 조도가 거칠어진다. 조도가 거칠다는것은 일종의 미세한 크랙(crack)으로도 볼 수 있다는것이다 그럼에도 불구하고 피닝을 하는 이유는 위의 Normal 시험편과 피닝 시험편에서도 볼 수있듯이 피닝으로 인하여 거칠어지는 측면보다, 피닝을 함으로써의 압축잔류응력으로 인한 수명이 증가하는 영향이 더 크기 때문에 사료된다.

파괴된 시편의 초기크랙 및 피로파괴의 양상을 관찰하기 위해 전자 주사 현미경(SEM)촬영을 하였으며 Fig. 7은 측정 결과를 보여준다. 결과에서 볼 수 있듯이 두 시편 모두 모서리 노치 부분에서 초기 크랙이 생성 되며 물결 무늬의 피로 파괴의 양상이 보였으나 피닝처리를 한 시편의 경우는 초기 크랙이 작고 내부에서 크랙이 생긴 반면 피닝처리를 하지 않은 Normal 시편의 경우는 초기 크랙이 크고 표면으로부터

Table 7 Roughness of specimen

μm	Heat treated (Normal)	Field (Over)	Optimum
R_z	2.20	3.80	3.50
R_a	0.55	0.96	0.75
R_{max}	3.50	6.20	5.60

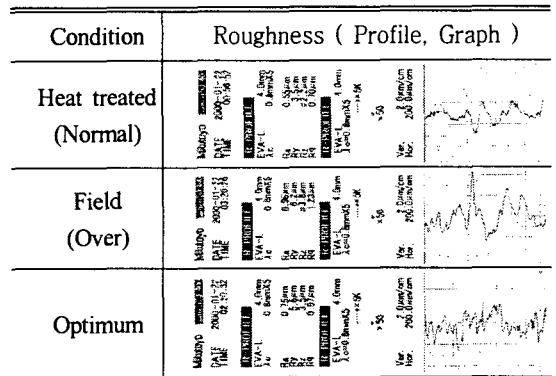


Fig. 6. Profile of roughness

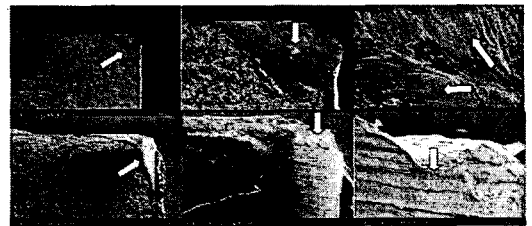


Fig. 7. Metallographic observation by SEM

크랙이 생긴 것을 볼 수 있다. 이것은 피닝시 생성되는 압축 잔류 응력으로 인한 크랙저지의 효과와 피닝시 표면 경화로 인한 내부크랙의 생성으로 사료된다. Fig. 8은 피닝후 측정 한 압축잔류응력이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 피닝 후 압축 잔류 응력이 생성되며 피닝강도가 셀수록 압축잔류응력은 더 많이 생성되는 것을 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 최적 조건의 피로 수명이 긴 이유는 오버피닝으로 인한 조도(roughness)의 증가와 또한 과도한 에너지로 인한 크랙발생의 이유로 사료된다.

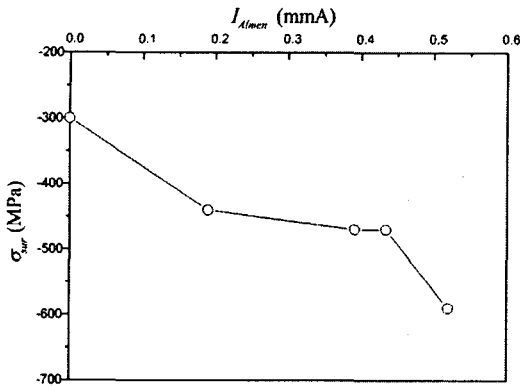


Fig. 8. Measurement of Surface Residual stress

4. 결론

본 논문에서는 샷피닝을 자동차 기어 부품 소재 평가에 적용을 하였고 최적 조건을 탐색함으로써 피닝 가공 후 피로 특성과 재료에 미치는 영향을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 포화선도를 통해 포화점을 구할 수 있었으며 피닝조건 4min으로 시간 변수를 고정 할 수 있었다.
- (2) 피로시험으로부터 0.391~0.434mmA 사이에서 최적의 피닝강도가 탐색되었으며, 1,050MPa 경우 최적 피닝과 오버 피닝의 차이가 495.5%, 1,250MPa의 경우는 19% 증가 하였다.
- (3) 조도 측정결과 최적피닝과 오버피닝의 차이가 각각 (R_z) 3.5 μ m, (R_z) 3.8 μ m로서 최적 피닝의 조도가 평균 0.3 μ m 차이로서 최적피닝이 더 우수한 것을 알 수있다.
- (4) SEM 사진 촬영의 경우 피닝가공 한 시편이 하지 않은 시편보다 크랙의 크기가 더 작으며 초기 크랙이 내부에서 생긴 것을 볼 수 있다.
- (5) 피닝의 강도가 높아질 수록 압축잔류응력의 크기가 커짐을 알 수 있으며 최적 조건의 피로 수명이 더 긴 이유는 오버피닝으로 인한 조도의 증가와 또한 과도한 에너지로 인한 크랙발생의 이유로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Xenophon J. K., 1989, "Shot Peening Viable Method to Extending Component Life.", SAE Technical Paper Series 891932, pp. 1-8.
- (2) Wohlfahrt. H., 1984, "The Influence of Peening Condition on the Resulting Distribution of Residual Stress." ICSP-2. pp. 316-331.
- (3) M. C. Sharma, 1996, "Assesment of Over Peening by time on Fatigue behavior of Spring Steel," Proc. of 6th International Fatigue Congress, pp.1397~1402.
- (4) S. K. Cheong., S. H. Lee and S. C. Chung, 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," Transations of the KSME A, Vol. 25, No. 10, pp. 1590~1596.
- (5) Ji-Hun Nam, Tae-Hyung Kim, Kook-Jin Lee, Dong-Sun Lee and Seong-Kyun Cheong 2003, "A Study on the Fatigue Characteristics of Automotive Gear Steel by Investigating the Optimal Peening Intensity," ,Transations of the KSAE
- (6) Eckersley, J. S., 1991, "Shot Peening Plays a Vital Roll in Rejuvenation of Aging Aircraft", Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International, pp.241~255.
- (7) AGMA2001-B88., 1990 "Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear teeth"
- (8) ISO/DP. 1980, "Principles for the Calculation of Tooth Strength of Spur and Helical Gears." pp.78-105.
- (9) Seong-kyun Cheong, 2001 "Theory of shot peening" . pp.184