

냉간압연용 작업롤의 Spalling 발생원인에 관한 연구 (A study on the Spalling causes of Work roll for Cold rolling)

김순경 (연합철강 냉연부), 전언찬(동아대 기계공학과), 전태옥(동아대 기계공학과)

Abstract

A study on the spalling causes of work roll for cold rolling was performed in the cold rolling mill. Performance of work roll is dependent to a great extent on spalling so that both roll manufacturers and users show great interest in spalling. So this paper shows that spalling phenomena were investigated and causes determined because of more than 85% of spalling has its origin on the roll surface. As being well known, spalling mostly occurred due to developing fatigue fracture originated a crack on a roll. But such spalling can be prevented by proper roll maintenance. The spalling accidents have sharply decreased since 1981 because of the use of ultrasonic test to detect cracks on a roll.

I. 서 론

냉간압연제품의 생산량은 과거 10년간 급속하게 늘어나 거의 3배정도로 증가되었다. 이와 같은 생산량의 급증은 압연설비가 2,500rpm 정도로 고속화되었고 연속 압연기와 같은 연속화 설비의 증가와 고정도 압연이 가능한 A.G.C system의 개발을 들 수 있다.¹⁻²⁾

최근 냉연제품의 표면품질 특성에 관한 몇 가지 요구사항을 충족시키기 위하여 냉간 압연기의 고속화·고압하에 견딜 수 있는 고내마모성과 내균열성을 갖는 고크롬형태의 롤이 개발되어온 동시에 40~70mm(직경)의 경화심도를 갖는 롤들이 공급되고 있다. 롤의 제조공정도 마찬가지로 V.A.R. (Vacuum Arc Remelting)과 E.S.R. (Electroslag Remelting) 방법이 개발되어 롤의 품질이 급속히 개선되었다.

그러나 최종제품은 반대로 판의 폭이 다양화되어지고 있으며 표면조도의 미려화와 박물화가 되고 있어 냉간압연 가공시 압하량이 많고 입하율이 큰 고부하 고속압연화의 경향을 나타내고 있다.³⁻⁴⁾

따라서 냉간압연 가공시 작업롤과 보강롤이 받는

하중이 증가되어 가공조건이 까다로워지고 롤 사고도 다발 되므로 이를 감소시키기 위하여 롤의 강도와 설계에도 세심한 검토가 필요하게 되었다. 그러나 이 부분은 실험이 곤란하고 정확한 원인 규명이 어려워 이 분야의 연구는 거의 없고 롤 제조 업체에서 조사한 보고서가 대부분이다.

본 연구에서는 이와 같은 롤 사고의 원인중 가장 빈번하게 발생하는 Spalling에 관해서 발생형태별 발생원인을 규명하고 예방대책을 수립코자 실제 냉간압연 제품을 생산중인 기계에서 실험하였다.

II. 실험장치 및 실험방법

1. 실험장치

본 실험에 사용된 냉간압연기는 Fig.1에서 보는 바와 같이 실제 냉간압연제품을 생산하는 냉간압연 가공기로써 작업롤과 보강롤이 각각 두개인 4단이며 왕복으로 압연가공이 가능한 가역압연기이므로 연속 압연기와는 달리한 개의 스탠드로 구성되어 있다. 최대 압하력은 2,800톤까지 가능하지만 1,400톤이하에서 냉간압연가공이 주로 이루어지므로 본 실험에서는 1,300톤 이하에서 행하였다. 냉연강관 가공시 가장 중요한 판 두께 제어는 자동 두께제어

제어장치를 사용하였다.

자동두께제어장치는 냉간 압연기의 입측과 출측에 설치되어있는 X선 두께측정기에서 측정된 값과 컴퓨터에 입력된 값을 비교하여 두께 측정기에서 측정된 두께가 지시된 값보다 작으면 입하력을 줄이고 반대로 실제 측정된 냉연강판의 두께가 지시된 수치보다 클 경우 압하력을 증가시켜 롤과 물사이의 틈새를 크게 하여 컴퓨터에 지시한 값과 가장 가깝게 가공이 되게 한다. 그리고 압연기 실험조건은 Table 1과 같다

Table 1 Cold rolling conditions for experiment

Mill type	4 Hi reversing mill
Line speed	800 m/min. (max.)
Work roll dia.	450 (mm)
Back up roll dia.	1,360 (mm)
Separating force	920, 1,300 Ton
Gauge control	Automatic gauge control
Flatness control	Automatic flatness control

2. 실험재료

본 실험에 사용한 작업롤의 화학적 성분은 Table 2와 같이 크롬함량이 3%인 가장 보편적인 작물을 사용하였고 Fig. 2에서 보는바와 같이 경화심도가 직경으로 35mm인 작업롤을 사용하였다.

Table 2 Chemical compositions of work roll (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.7~0.9	0.5~1.0	0.15~0.6	0.03	0.02	2.5~3.5	0.05~0.4

3. 실험방법

냉간 압연용 작업롤 및 보강롤은 정상적으로 마멸에 의한 폐기는 거의 없고 대부분이 여러 가지 요인에 의한 Spalling 발생의 정도에 따라 그 수명이 결정된다.⁵⁾

그러나 실제 사용중인 롤은 값이 비싸고 항상 롤 사고가 발생하는 것은 아니므로 실기계에서 롤 사

고를 인위적으로 만들 수가 없다. 따라서 본 실험은 냉간압연 가공조건을 일정하게두고 압연용 작업롤을 계속 투입하여 사고가 발생 될 때 마다 그 형태별 발생원인을 조사하였으며, 연속적으로 발생하는 Spalling사고에 대해서는 정밀하게 원인을 규명하고자 사고 발생 당시의 가공조건을 부여하여 재연 실험을 하였다. 보강롤은 거의 Spalling사고가 발생되지 않으므로 여기서는 작업롤의 경우만을 조사하였고 사고롤은 냉간 압연기에서 조사 할수가 없으므로 롤 정비장에서 실시하였다. 냉간압연가공이 이루어지는 과정은 Fig.3에서 보는 바와 같다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 중앙부위의 Spalling

롤표면은 압연가공중 압연강판과의 Pinching과 Skidding등 이상으로 인해 열 충격을 받게 된다. 이러한 작업중의 이상은 자주 발생되며, 열 충격에 대한 저항성은 롤의 가장 중요한 특성이다.⁶⁻⁷⁾

이러한 열 충격에 대응하는 롤의 저항성을 평가하기 위한 시험방법이 개발되었는데 그 장치는 먼저 롤의 재질과 동일한 회전체를 만들고 이를 정지상태의 냉연강판에 접촉시켜 회전시키는 것이다. 회전체는 마찰에 의해 열을 받게 되며, 이를 Water jet spray를 이용하여 급냉시킨다. 이러한 반복운동에 의해 회전체에는 균열이 발생하게 된다.

이 실험에 사용된 회전체는 0.85% C - 2.15% Cr 강을 이용하여 Hs 80~90으로 제작되었다. 아래 Fig.4의 실험결과치를 통해 롤의 경도가 열 충격에 대한 저항성에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 결과를 보면 동일한 조건에서 실시된 실험재료(회전체)에서 경도가 높을수록 균열이 커짐을 알 수 있다.⁸⁾ 따라서 사고가 자주 발생하는 압연설비의 롤은 경도를 가능한 낮게 관리하여야 한다.

Fig.5는 실제 사용중인 작업롤의 중앙부분에서 Spalling이 발생된 형태이다. 파단면을 자세히 보면 양 원주방향으로 롤 내부로 향한 띠모양의 피로파

피가 일어난 단면이 나타나 있다. 이는 냉간압연가공시 가역가공을 하기 때문에 나타난 것으로 볼 수가 있고, 한 방향으로만 가공을 하는 연속압연기의 경우는 한 방향으로만 나타난다. 띠 모양의 피로파 단면이 존재하고 있다는 것은 파단면의 특징을 고려 할 때 표면을 기점으로한 피로파피로 볼 수가 있고 물 표면에 잔존하고 있거나 압연가공중에 발생한 균열이 기점이 되어 Spalling이 발생되었다고도 생각되어진다.

Pinching은 압연작업중 국부압력에 의해 압연강판이 롤에 감기거나 소부될 경우 발생한다. Pinching 발생시 열적 충격이 롤 표면에 가해지게 된다. 사고의 정도에 따라 롤이 입는 손상의 깊이가 달라지게 되는데 약한 경우 롤의 표면의 국부적으로 담금질되며, 심한 경우에는 담금질에 의한 변형이 깊어지고 균열을 동반하게 된다. 대부분의 심각한 Pinching사고의 경우 Spalling이 발생하게 된다. 균열과 Pinching에 의해 발생하는 Spalling의 발생기구를 통해 다음의 결과가 예상된다. 롤 표면층이 열 충격에 의한 압축탄성변형의 영향을 받으면, 잔류응력은 압축에서 인장으로 변하고, 인장응력이 증가하는 담금질 과정에서 체적 수축이 일어나게 된다.

균열을 갖고 있는 롤을 아무런 조치를 취하지 않은 상태에서 압연작업에 사용하는 경우가 있으며, 롤표면의 균열에 의한 Spalling 사고가 전체의 발생원인중 80%이상에 해당된다.

2. 끝부분 Spalling

Fig. 6은 롤의 몸통 끝부분에 발생한 Spalling사고의 예이다. Spalling의 시작점은 몸통 끝부분 선상에서 시작된 균열의 한 부분이며, 균열은 롤내부로 진행하여 Spalling을 일으키게 된다. 이러한 형태의 Spalling은 앞서 설명한 Spalling의 발생 기구와는 다르다. 여기서 몸통 끝부분은 가장 높은 경도를 보이므로 압연가공시 롤의 전체면 중 몸통

끝부분에 가장 큰 압력이 작용함을 추론할 수 있다. 따라서 이 피로층이 균열을 발생시키고 이를 기점으로 하여 균열이 진행하여 결국 Spalling을 야기시키는 것이다.

Fig. 6은 작업롤의 끝부분에 Spalling이 발생한 것으로 세 가지 모두 외관상으로 매우 유사함을 알 수 있다. 작업롤의 끝부분에서 발생한 이 Spalling은 많은 균열은 볼 수가 있지만 열적 충격흔적은 찾아 볼 수가 없고, 이 파편의 외관을 자세히 보면 어떤 충격흔적이 있다. Fig. 7은 파손된 파편의 파단면으로서 피로파피에 의한 두 가지 파편이 있지만, 피로파피는 같은 지점에서 시작되었다. 그러나 파편 1)이 파편 2)보다 더 빨리 파피가 진행되었다. Fig. 8에서는 파손된 롤의 길이방향을 나타낸 것으로 균열의 형태를 보면 부분적인 과압하에 의하여 발생한 것으로 생각된다.

3. 조개껍질형태의 Spalling

Fig. 9에서 보는바와 같이 Spalling의 형태가 한번에 파단되지 않고 물결모양으로 몇 바퀴씩 층을 이루면서 조개껍질형태의 피로파피가 발생되었다. 이와 같은 형태의 Spalling은 최근에는 거의 없어졌는데 이는 롤의 제조과정과 계측기의 개발 때문인 것으로 보인다.

최근의 고속 압연설비에서는 금속 결합이 존재하지 않는 한 롤 내부에서 시작되는 Spalling사고는 발생하지 않는다. 소형 저속 압연설비에서는 이러한 Spalling이 종종 발생한다. 비금속개재물이나 다른 결합들은 최고 전단응력의 이론상 위치에 비해 깊이 위치하고 있다. 금속결합에 의한 Spalling은 피로균열 띠 형태의 Spalling과 다른 양상으로 추정되고 있다. 대형 비금속개재물은 최고 전단응력의 이론상 위치보다 깊은 균열의 중심에서 관찰되어진다. 이런 유형의 금속결합은 피로강도의 감소와 응력의 증가로 생각되어진다.

조개껍질형태의 Spalling사고에 있어서도 경도와

잔류응력의 분포, 그리고 압연작업중의 열응력이 중요 변수로 작용된다. 이런 종류의 Spalling 사고를 방지하는 방법으로는 경도와 잔류응력의 분포를 개선할 수 있는 열처리방법과 압연유의 사용량 증가를 통한 열응력의 감소, 그리고 유해한 비금속 개재물의 영향을 최소화할 수 있도록 물을 예열하는 것 등이다.

편석부분에는 C, Cr, Mo 등이 집중되어 있으므로 여기가 다른 부분보다 단단하게 된다. 따라서 이 물을 조도가공 처리하여 사용할 때 이 부분의 결합이 선명하게 나타나게 되고 나중에는 문제점으로 대두된다.

금속결합은 자동 초음파탐상장비를 이용하여 발견할 수 있으며, 이 장비는 아주 작은 결합까지 검출할 수 있다.

4. 물 몸체의 파단

강의 생산기술과 열처리기술의 향상으로 강괴 내부에 존재하는 수소 등에 의해 발생하는 냉간압연 작업용 롤의 파괴형태는 가끔 나타난다. 하지만 최근에는 냉간 압연용 롤들에 대한 요구가 다양해지고 있으며, 보다 더 철저한 정련방법이 필요하게 되었다. 열처리방법에 따라 대형 롤 뿐만이 아니라 작은 롤도 문제를 야기시킬 만큼의 높은 잔류응력을 가지므로 과거에 모르고 있던 작고 미세한 결합에 관해서도 보다 세심한 주의가 필요하다.

내부응력의 분포가 균일하지 않을 때는 피로가 파단을 발생시키거나 때로는 롤의 완전한 파단을 일으킨다.

Fig. 10은 파단이 일어난 단면을 나타낸 것으로 불균일한 내부응력분포에 의하여 발생한 것과 피로 파괴가 롤 중공의 벽면 미세 균열로부터 중공벽면에 대해 직각방향으로 피로파괴가 발생한 전형적인 형태가 있다. 이 결합의 원인은 아래와 같은 응력의 종류를 고려할 수 있다. 첫째 압연가동 중에 발생하는 반복인장응력과 둘째 롤 내부 잔류응력의

분포를 들 수 있고, 셋째 중공벽면이 안정되기 전에 순간적으로 열응력이 인장응력으로 변환되었을 때 발생된다.

IV. 결 론

냉간압연가공에서 사용되는 작업롤의 수명은 Spalling과 같은 대형 사고의 유무와 직결된다. 작업롤은 열적으로 불안정하고 균열에 민감하여 외부의 다양한 충격에 의해 결국 강도가 저하되고 Spalling사고가 발생된다. Spalling 사고 중 80% 이상이 롤 표면에 잔존하는 균열을 비롯한 결합에 의해 비롯된 것이며, 작업롤의 Spalling발생원인을 조사한 결과 여러 가지가 요인이 있으나 주요 원인은 다음과 같다.

- 1) 롤 표면에 띠모양의 흔적이 남는 경우는 슬립, Pincher와 연삭결합과 같은 표면결합이 내부로 전파되어 피로파괴가 일어난 것이다.
- 2) 롤 몸체의 끝부분에 발생한 Spalling은 외부의 충격에 의하여 발생되며 크게 파손되는 경우가 많다.
- 3) 조개껍질과 같은 흔적이 남는 경우는 편석과 같은 제조시 발생한 내부결합이 시작점이 되어 표면으로 전파되어 피로파괴가 발생한 것이다.
- 4) 롤 몸체의 파단은 Spalling과 같은 심각한 문제와는 다르며, 이 문제점들의 대부분은 롤의 제조 과정에서 발생한 결합이다.

참 고 문 헌

- 1) 北村章, "冷延加減速時におけるケインのAGCの最適化", 鐵と鋼, 第15號, pp. 276-285, 1981
- 2) Kobasa D., and Schultz, R.A., "Experimental Determination of the Arc of Contact in Cold Rolling", Iron and Steel

Engineering, vol. 45, p. 97, 1968

3) 전언찬, 김순경, "냉간압연가공시 Work roll 마멸과 판면조도에 관한 연구" 한국정밀공학회지, 제8권, 제4호, p. 2. 1991

4) 전언찬, 김순경, 김문경, "냉간압연가공시 압연재료와 Work roll 마멸에 관한 연구" 한국정밀공학회지, 제10권, 제4호, pp. 128-129. 1993

5) Shuichi Iwadoh, Toshikazu Mori, "Effect of work roll Materials and Progress of Manufacturing Technology on Cold rolling and Future Development in Japan", ISIJ International, Vol.32, No 11, pp. 1131-1140, 1992

6) W. H. Tait, "Roll Shop; The nature and Causes of in Service roll defects", Roll for the Metalworking Industries, Dofasco, Inc., pp.135-142

7) S. J. Maganello, "Performance of Roll in Service", Roll for the Metalworking Industries, USS, pp.227-242

8) Mitsuo Nakagawa, "Causes and countermeasures of spalling of cold mill work rolls", Iron and Steel Engineer, March, pp. 44-49, 1981

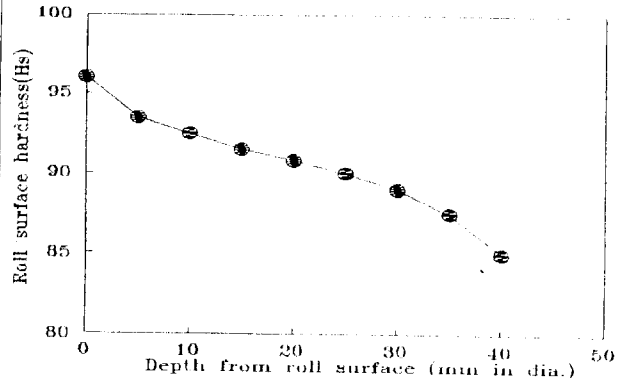


Fig. 2 Variation of work roll hardness from surface (hardness depth ; φ)

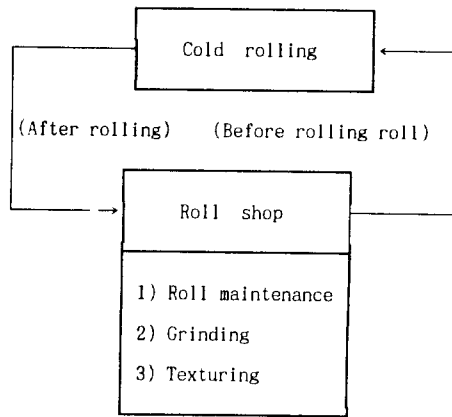


Fig.3 Diagram of experimental procedure

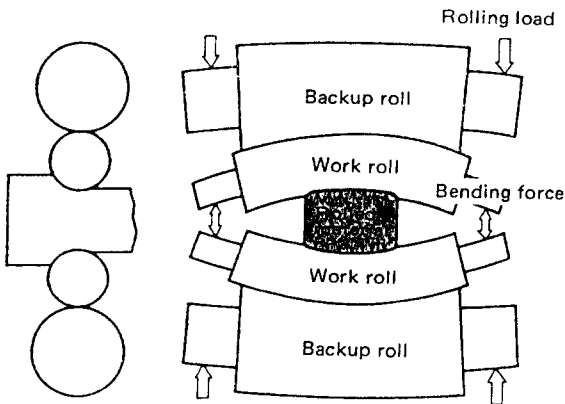


Fig. 1 The schematic experimental apparatus

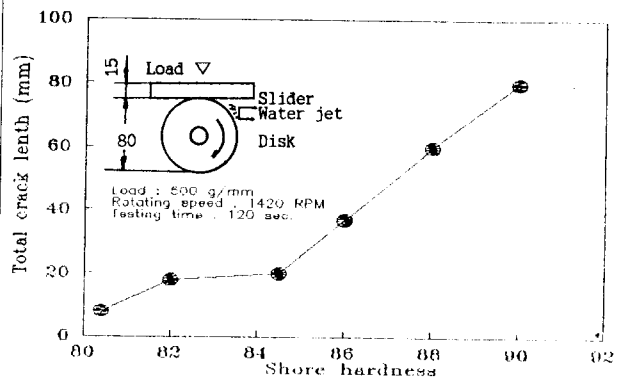


Fig.4 Influence of hardness on strength, Lower hardness increases thermal shock resistance

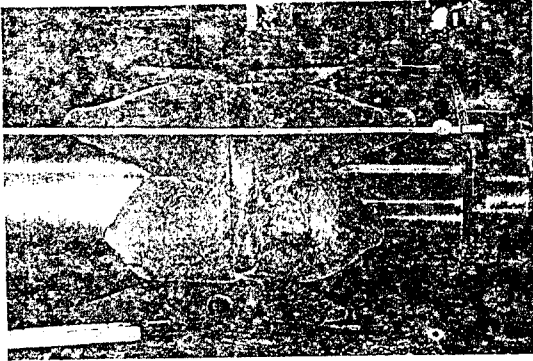


Fig. 5 Photo. of the spalled rolls

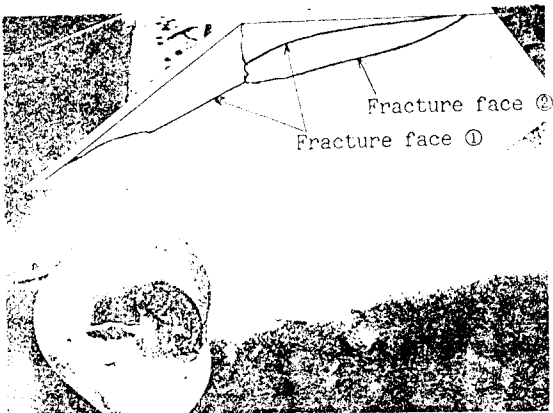
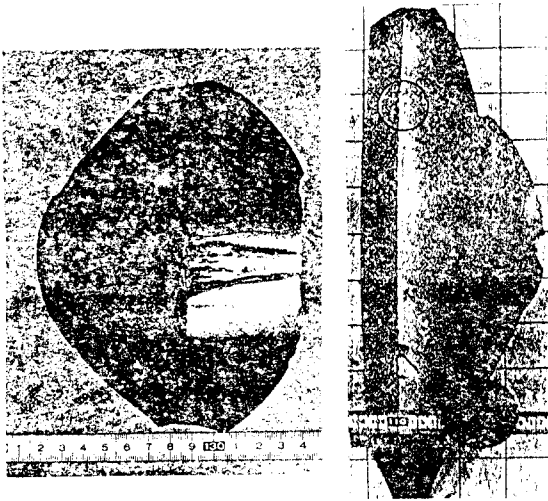
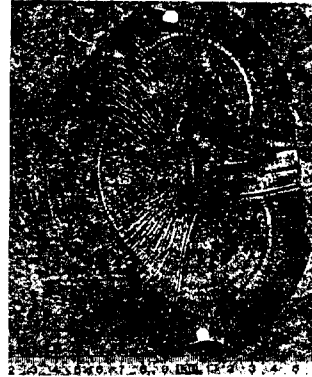


Fig. 6 Appearances of the spalled work rolls



1) Fracture face



2) Under fracture face

Fig. 7 Appearances of the fracture faces

Barrel surface

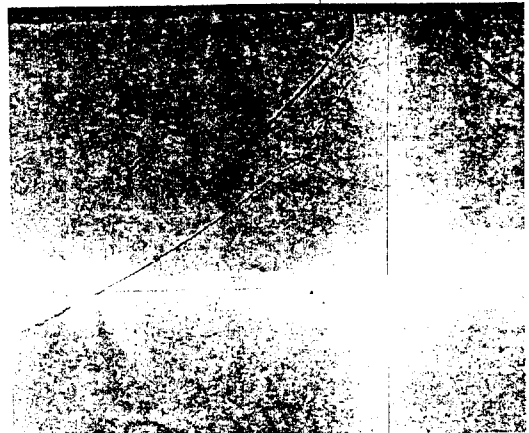


Fig. 8 Microscope observation of the damage at barrel end (longitudinal section)

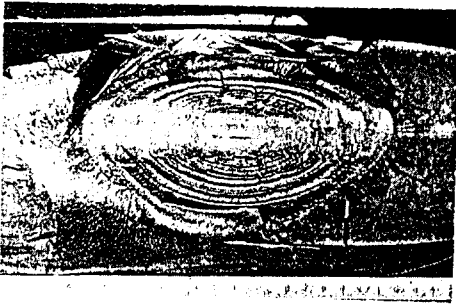
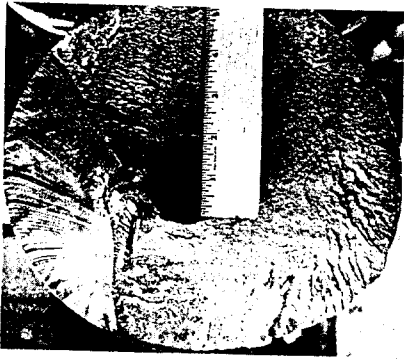
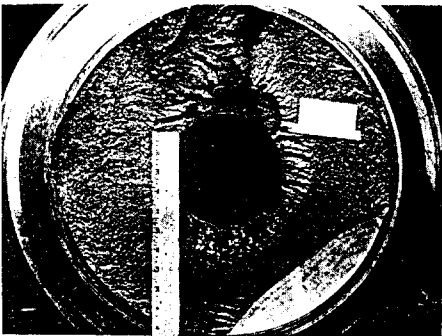


Fig.9 Fatigue fracture of shell type



1) Fracture face showing fatigue crack(neck)



2) Fracture face showing fatigue crack(neck body)

Fig. 10 Forged steel work roll that broke through the neck and neck body