

## HSS Roll의 흑피형성 및 표면거칠음 거동

최진원, 정진환

광양압연연구그룹, 기술연구소, 포항종합제철주식회사

### Black Film Formation and Surface Deterioration Behavior of HSS Rolls in Hot Strip Mills

Jin-Won CHOI, Jin Hwan CHUNG

Kwangyang Rolling Products Research Group, Technical Research Labs., POSCO

#### Abstract

The characteristics of the deterioration and oxidation of high speed steel("HSS ") roll materials applied to finishing work rolls for hot strip mills have been investigated. Experiments have been conducted with TGA analyzer and HSS rolls have been tested upto 5 roll campaigns continuously without dressing roll surface.

The procedures of the deterioration of roll surface were cleared. During the early stage of hot rolling, surface of work roll has been covered with the even black film formed by the self-oxidation of roll material at elevated temperature. These black films have been fractured to the net work shape microcracks. The black film falls off continuously from these microcracks, followed by the banding of the black film and sticking phenomena and then the material stuck on the roll surface has been worn out from the roll surface during successive rolling and then HSS roll surface has been recovered.

**Keywords** : HSS roll, surface deterioration, black film, sticking, oxidation

#### 1. 서론

치수 형상의 정도 향상, 전장 전폭 재질편차 감소, 고가공성고강도강, 특수강 등 제품의 다양화 및 박물 제품의 증가, 강판 표면의 염격화 등 수요가의 요구가 엄격해 지고 있으며 압연 line의 연속화 및 고속화, 압연용 roll의 극소구경화 등 열연조건은 더욱 가혹해지고 있는 실정이다. 따라서 압연용 work roll의 표면손상과 표면거칠음의 가속화, spalling 및 절손 등 roll사고가 빈번해지고 있다. 특히 열연 사상압연용 work roll의 표면상태는 제품의 표면품질에 직접적인 영향을 미치므로 제품의 표면 품질을 확보하는 측면에서 그리고 사고는 생산성 및 작업성에 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 제품의 생산비용 증가의 원인이 될 수있기때문에 roll관리가 아주 중요하다고 할 수있다. 최근에 제품품질 및 생산성 향상을 위하여 roll 재질 면에서 내마모성이 대폭 개선된 고속도공구강계 roll(이하 'HSS roll'이라 함)의 사용이 확대되고 있다. 고속도공구강계 roll은 V,W,Mo 등의 합금원소 첨가에 의해 내마모성 및 고온강도 등이 대단히 우수하며 내표면거칠음성도 우수하고 내사고성이 높아 사상압연용 work roll로서 널리 이용되고 있다.<sup>1-2)</sup> 그러므로 열간압연용 HSS roll에 대해 압연조건에 따라 roll 표면에 나타나는 여러 현상을 분석하고 그 원인규명을 통하여 압연제품 및 압연조건에 적합한 roll 재질을 선택하고 선택된 roll의 적정사용기준을 확립하는 것이 제품의 품질, 생산성 및 제조원가의 측면에서 매우 중요하다고 생각된다.

본 연구에서는 HSS roll재를 5연속압연 적용시 표면거칠음 및 마모거동 그리고 흑피형성 거동을 분석하기 위하여 work roll의 고온마모 거동 및 수증기 분위기에서의 흑피 형성 특성을 조사하였다.

## 2. 실험방법

실험에 사용된 roll은 H사에서 수평주조기로 제조하였으며 roll의 화학성분은 Table 1에 나타내었다. 이러한 HSS roll을 열연 사상압연기 1, 2 및 3번 stand에 동시에 투입하여 5단위 연속압연 test하였으며 1단위 압연 후마다 roll을 인출하여 육안관찰, roll 마모 profile, 표면조도 및 온도 등을 Portable profile-meter(자체제작)로 측정하였다. 대기분위기에서 Ni-Grain roll 및 HSS roll재의 산화속도를 비교하기위해서 열중량분석기(Setaram사, TG92)를 이용하여 530℃의 대기분위기에서 24시간 산화시켜 산화속도를 비교하였으며 수증기분위기에서 roll의 산화실험은 수증기 유입장치가 부착된 연속소둔 simulator(중일로공업사)를 이용하여 이슬점이 50℃ 및 80℃의 조건에서 530℃ 및 600℃로 180분 산화시켰으며 산화후 표면흑피 형성 및 성장 거동 그리고 5 roll단위 연속압연후 표면거칠음 거동의 분석을 위하여 광학현미경 및 주사전자현미경(Cambridge 사제)을 이용하였다.

Table 1 Compositions of HSS rolls and Ni-Grain roll (wt%)

specimen	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	V	W	Co	Ti
HSS A	1.750	0.369	0.006	0.021	0.920	5.900	0.918	1.740	4.940	2.030	0.004	0.004
HSS B	2.270	0.400	0.007	0.020	0.930	8.860	1.040	2.910	3.920	1.860	0.009	0.004
Ni-Grain	3.360	0.650	0.060	0.120	0.870	1.770	4.500	0.300	-	-	-	-

## 3. 실험결과

### 3.1 Roll표면의 흑피형성 특성

530℃의 대기분위기에서의 산화속도를 Fig. 1에 나타내었다. Ni-Grain roll재가 HSS roll재에 비해 매우 빠른 산화속도를 나타내고 있음을 알 수 있는데 후단용 work roll 소재는 내마모성이 크게 요구되기 때문에 strip과 roll 표면과의 마찰저항을 저감시키기위해서 전단용 work roll 보다 빠른 흑피생성속도를 가져야하며 전단용 work roll은 마모의 가속화 현상을 방지할 수 있도록 느린 흑피생성 속도를 가지는 특성과 잘 일치하고 있다.<sup>3-6)</sup>

실제 열간압연기에서 work roll은 고온상태에서 냉각수에 의해 냉각됨으로써 수증기 분위기에서 산화될 것이다. Fig. 2는 산화분위기의 이슬점과 온도 변화에 따른 roll재료의 산화증량의 변화를 나타낸 것으로 온도 및 이슬점 온도가 높을수록 산화속도는 증가하며 HSS A재가 HSS B재보다 산화속도가 다소 빠르게 나타났다. 그리고 대기중 산화보다 매우 빠른 속도로 산화되기때문에 짧은 압연시간에도 치밀

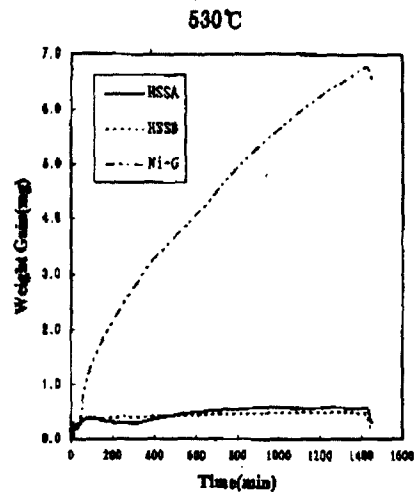


Fig. 1 Variation of weight gain of HSS rolls oxidized at 530℃ by TGA with various times

한 흑피가 형성될 것으로 판단된다. 80°C의 이슬점 분위기의 530°C 온도에서 roll 표면에 흑피가 생성되는 과정을 roll 종류 및 산화조건의 변화에 따라 관찰한 미세조직을 Fig. 3에 나타내었다.

Ni-Grain재의 경우 530°C에서는 60분간 산화되어도 표면이 완전히 산화되지 않고 탄화물은 잔존하고 있으나 600°C가 되면 산화분위기의 이슬점이 높을수록 두꺼운 흑피가 형성되었다. HSS roll의 경우는 530°C~600°C 범위에서 180분간 수증기 분위기에서 산화되어도 탄화물이 산화되지 않은 채로 존재하였다. 수증기 분위기에서 산화시간의 변화에 따라 Ni-Grain roll의 표면에 형성된 흑피의 조성을 분석한 결과, 약 5분간 산화 후에도 기지조직의 Fe<sub>3</sub>C가 아직 산화되지 않았으나 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 및 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 산화물들이 다량 형성되기 시작하였다. 또한 HSS A재 및 HSS B재의 표면 산화층 조성을 X선 회절시험으로 분석한 결과, 약 5분간 산화 후 비로소 roll의 기지조직에 산화물이 형성되기 시작하였으며 수증기 분위기에서 형성된 흑피 조성은 Ni-Grain 롤 재와 유사하게 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 및 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 주종<sup>7-9)</sup>을 이루

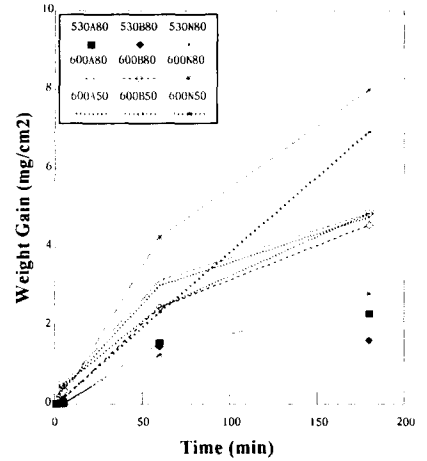


Fig. 2 Variation of weight gain of rolls oxidized under H<sub>2</sub>O atmosphere

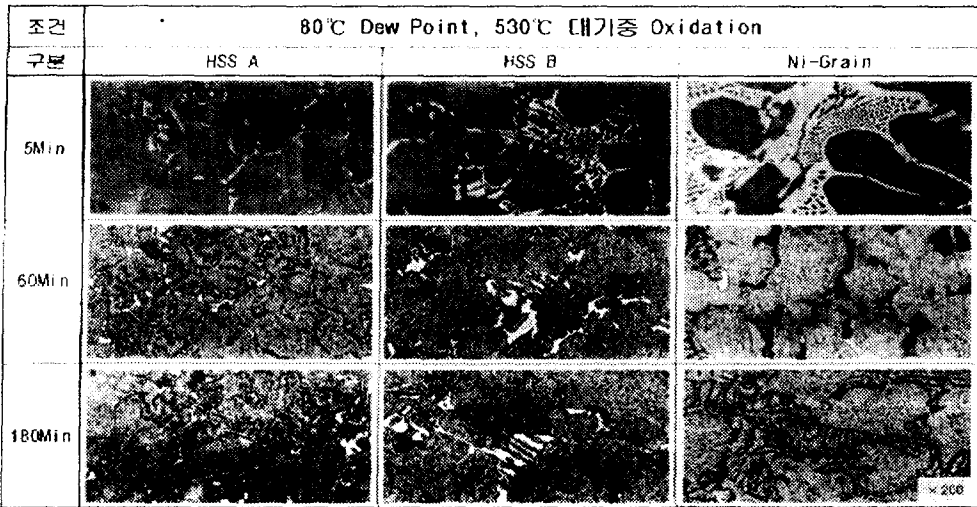


Fig. 3 Microstructures of roll surface oxidized under H<sub>2</sub>O atmosphere

었으며 300분 산화 후에도 기지조직이 완전히 산화되지 않고 잔존하는 부분이 있었다. 600°C의 50°C 이슬점 분위기에서 roll 표면의 산화과정의 미세조직을 Fig. 4에 나타낸 것처럼 HSS roll은 짧은 산화시간에도 얇은 흑피가 기지조직에 형성되는데 탄화물은 산화되지 않고 잔존하며 산화시간이 증가할수록 흑피는 두꺼워지며 산화되지 않은 탄화물 면적이 감소되고 있는데 이는 산화층의 lateral 성장에 의해서 탄화물이 덮혀지기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2 Roll의 표면거칠음

열간 공정에서의 사상압연기 1번째 stand에서 5 roll단위 연속압연 시험한 결과의 표면조도 변화를 Fig. 5에 나타내었으며 흑피 거동을 Fig. 6에 각각 나타내었다. 사상압연기의 1번 stand에서 압연량이 증가할수록 roll 표면조도는 조악해지며 barrel 중앙부가 가장 심하였다. 4 roll

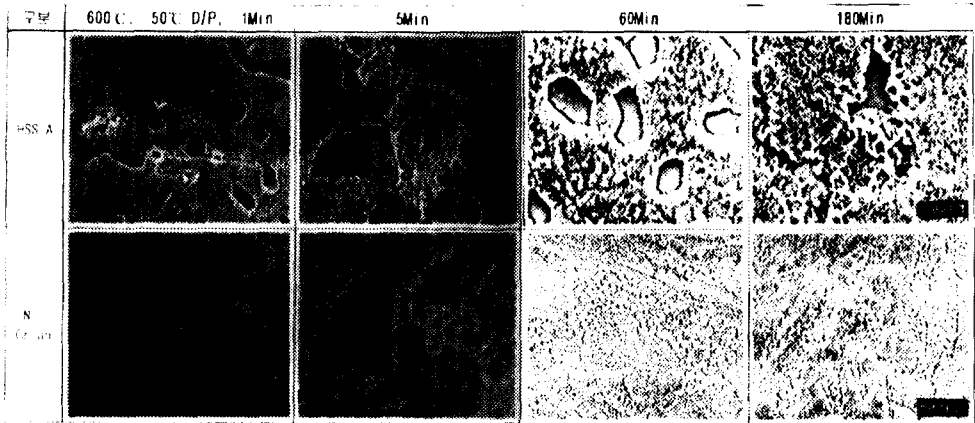


Fig. 4 Microstructures of roll surface oxidized under H<sub>2</sub>O atmosphere

단위 연속압연한 경우의 표면조도( $R_{max}$ )는 15( $\mu\text{m}$ ) 이상으로 나빠지나 5 roll단위 연속압연 후에는 오히려 조도가 향상되었다. 이는 roll 표면에 발생된 sticking 부위가 표면거칠음을 보충하였기 때문인 것으로 판단된다. HSS roll의 표면 흑피는 상, 하 roll이 거의 같은 형성 거동을 보이고 있는데 1 roll단위 압연 후에 양호한 흑피가 표면에 형성되며 heat crack이 형성되었다. 2 roll단위 압연 후에는 다소 조대한 heat crack의 grain이 보다 미세하게 세분화되며 heat crack 부위에서 부터 banding이 시작되었다. 4 roll단위 압연 후에는 roll 표면에 sticking이 심하게 발생되어 있는데 이러한 sticking은 3 roll단위 압연 후에 거칠어진 roll 표면의 마찰저항이 증대되었기 때문인 것<sup>10)</sup>으로 판단된다. 5 roll단위 압연 후에는 이러한 sticking 부위가 마멸되고 roll 표면의 흑피가 다소 회복됨으로써 표면조도가 향상되는 특징을 보이고 있다. 열간압연시 HSS계 roll은 고온의 압연재와 접촉함으로써 roll 표면온도는 600°C 정도까지 상승하며 roll 냉각수의 직접분사 및 비산분위기에서 자체산화에 의해 roll 표면에 흑피층이 형성되며 roll 냉각수에 의해 약 70°C로 냉각되는 열 cycle의 반복과정에 의한 thermal strain으로 heat crack이 발생되며 roll 표면에 압연재의 일부가 이착되는 소착현상도 발생한다. HSS roll의 표면에 형성된 흑피와 소착물은 압연과정 중 발생하는 응력에 의해 형성 및 탈락이 반복되며 이에 따라서 roll 표면의 거칠음이 발생한다.<sup>11-12)</sup> 열간압연시 HSS work roll의 표면거칠음의 발생과정을 Fig. 7에 나타내었다.

Roll단위 초기에 roll 표면은 고온의 압연재와의 접촉에 의해서 고온으로 되고 산소의 자유로운 확산반응에 의해서 균일하고 치밀한 흑피가 자기산화(self-oxidation)에 의해 가열-냉각의 반복과정에서 발생하는 thermal strain을 해소시키기 위하여 roll 표면의 흑피에 net work 형태의 heat crack이 발생된다.(Fig. 7①) Heat crack의 깊이는 얕으므로 계속되는 압연에 의해 roll 표면의 흑피는 계속 성장하며 heat crack은 점점 확대되어 heat crack의 상중점에서는 흑피의 미세한 spalling이 발생되기 시작한다.(Fig. 7②) 계속되는 압연하중에 의해서 roll 표면의 흑피는 더욱 심하게 탈락되어 banding을 유발시키며 흑피탈락 부위에 우선적으로 압연재의 sticking이 발생되게 되고 점점 성장하게 되어 roll 표면은 매우 거칠어진다.(Fig. 7③) Sticking은 흑피가

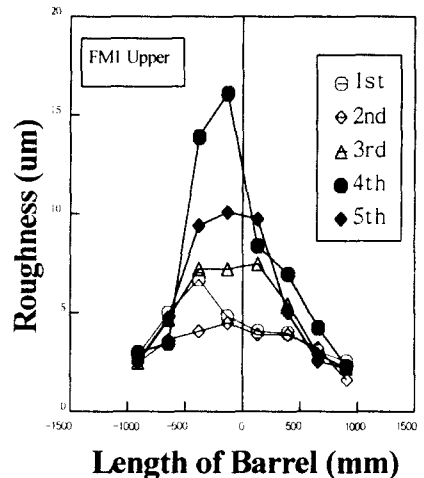


Fig. 5 Variation of surface roughness of rolls applied to various roll campaigns

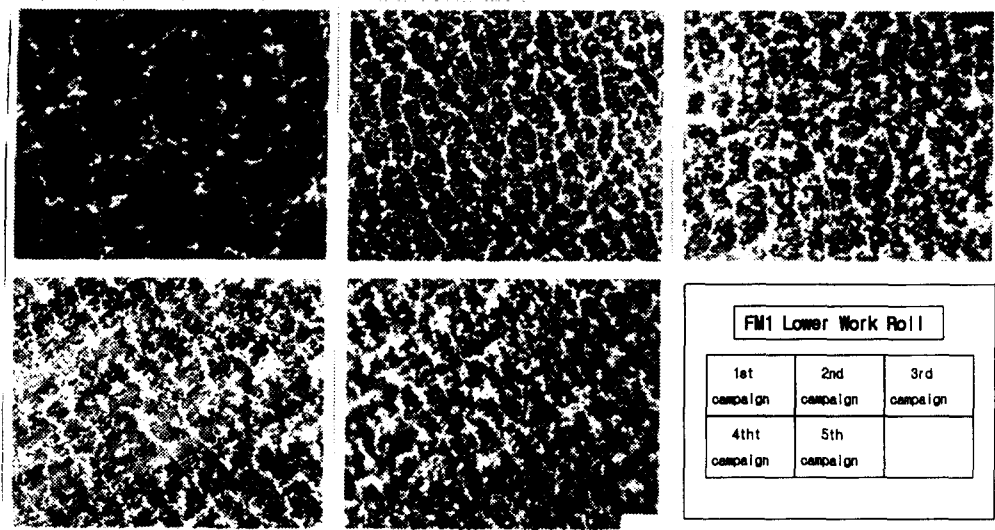


Fig. 6 Microstructures of black film formed on surface of rolls applied to various roll campaigns

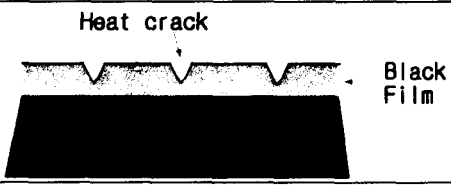
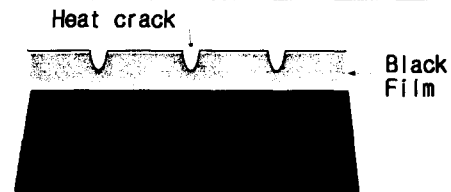
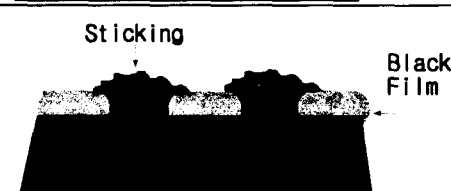
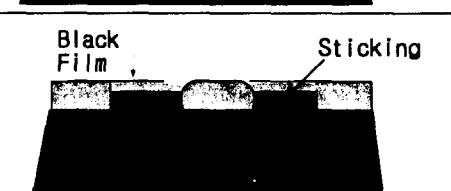
Schematic Diagram	Features
<p>Heat crack</p>  <p>Black Film</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i) High temperature oxidation</li> <li>ii) Heat cracks form</li> </ul>
<p>Heat crack</p>  <p>Black Film</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i) High temperature oxidation</li> <li>ii) Heat cracks broaden</li> <li>iii) Partial spalling of black film</li> </ul>
<p>Sticking</p>  <p>Black Film</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i) Micro-sticking occurrence</li> <li>ii) Continuous spalling of black film</li> <li>iii) Severe surface deterioration</li> </ul>
<p>Black Film</p>  <p>Sticking</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i) High temperature oxidation</li> <li>ii) Removal of stuck particles</li> <li>iii) Recovery of black film</li> </ul>

Fig. 7 Schematic diagram of procedures of HSS roll deterioration during hot rolling

탈락된 roll 기지조직에 scale 층이 소성변형으로 파쇄 탈락되어 노출되는 압연재가 이착되는 현상으로 계속 압연이 진행되면 이착물은 압연하중에 의해 roll 표면 흑피층 두께와 유사하게 마멸되어 평활화하게 되고 계속되면 고온에서의 압연조건에서 다시 roll 표면은 자기산화되기 때문에 roll 표면은 소착된 압연재의 산화에 의해 다시 균일한 흑피로 회복된다.(Fig. 7<sup>④</sup>)

그러므로 일반적으로 roll 표면의 흑피 생성거동은 roll 표면의 자기산화와 roll 표면에서 이착에 의해 발생하는 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

1) 수증기 분위기에서의 HSS roll의 표면산화는 대기중 산화 조건보다 매우 빠르며 이슬점 온도 및 산화 분위기 온도가 높을수록 가속되었으며 HSS roll 표면에 형성된 탄화물은 산화시간이 180 분 경과되어도 거의 산화되지 않았으며 기지조직의 산화층 성장에 의해서 뒤덮혔다.

2) HSS roll은 1 roll단위 압연 후에 양호한 흑피가 표면에 형성되고 heat crack이 형성된다. 2 roll단위 압연 후에는 미세한 heat crack grain으로 세분화되며 heat crack 부위에서 부터 banding이 시작된다. 4 roll단위 압연 후에는 roll 표면에 sticking이 심하게 발생되며 이러한 sticking은 3 roll단위 압연 후 거칠어진 roll 표면의 마찰저항 증대에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 5 roll단위 압연시에는 이러한 sticking 부위가 마멸되고 roll 표면의 흑피가 다소 회복됨으로써 표면조도가 향상되는 cycle을 갖는 특징을 나타낸다.

3) HSS roll의 표면거칠음 거동은 i)압연 초기의 치밀하고 균일한 흑피 형성과 heat crack의 발생, ii)heat crack의 발달 및 미세 banding 발생, iii)banding 부위에서의 sticking의 우선적 발생 및 roll 표면거칠음 가중, iv)sticking 부위의 마멸 및 산화 그리고 HSS roll 표면흑피의 성장으로 흑피 회복의 과정을 반복한다.

#### 참고문헌

1. O.Shitamura et al, Hitachi Review, vol.39, p.231(1990)
2. 佐野義一 ほか, 日立金屬技報, vol.4, p.91
3. 堀, 田部, 鐵と鋼, vol.55, no.3, p.163(1969)
4. C.E Peterson, Iron Steel Eng., vol.33, no.12, p.98(1956)
5. 添野, 玉村, 赤堀, 末永, 田中, 日立評論, vol.50, no.6, p.63(1968)
6. Y.Sekimoto, M.Tannaka and T.Yoshimura, 鐵と鋼, vol.61, no.6, p.95(1975)
7. 荒谷, 内田, 山本, 阿高, CAMP-ISIJ, vol.4, p.1570(1991)
8. 西山, 川上, 山本, 橋本, CAMP-ISIJ, vol.6, p.1320(1993)
9. 최진원, POSCO 연구결과보고서(1997P010), POSCO, p.47(1998)
10. 최진원, 정진환, 정병일, 이희춘, 제2회 압연심포지엄, 한국소성가공학회, p.411(1996)
11. 原, "壓延における Tribology" 第148回 西山記念技術講座, 日本鐵鋼協會, p.131(1993)
12. O.Kato, H.Yamamoto, M.Ataka and K.Nakajima, ISIJ International, vol.32, p.1216(1992)