

페라이트계 스테인레스강의 STICKING 발생 및 성장기구

진 원, 최점용
STS연구그룹, POSCO기술연구소, 포항제철(주)

"Nucleation and Growth Mechanism of Sticking Phenomenon in Ferritic Stainless Steel"

W. Jin and J. Y. Choi
Stainless Steel Research Group, Technical Research Laboratories,
Pohang Iron & Steel Co., Ltd.

Abstract

Nucleation and growth process of sticking particle in ferritic stainless steels was investigated using a two disk type hot rolling simulator. The sticking behavior was strongly dependent on the surface roughness of a high speed steel roll(HSS) and the oxidation resistance of the ferritic stainless steels. A hot rolling condition with the lower oxidation resistance of the stainless steel and the higher surface roughness of HSS roll was more sensitive to sticking occurrence. It was also illucidated that the initial sticking particles were nucleated at the scratches formed on the roll surface and were served as the sticking growth sites. As rolling proceeded, the sticking particles grew by the process that the previous sticking particles provided the sticking growth sites.

Key words : Ferritic stainless steel; sticking behavior; hot rolling; high speed steel roll

1. 서 론

페라이트계 스테인레스강을 생산하는 열연공장의 조압연 후단 및 사상압연 공정에서는 sticking 현상이 발생되어 열간압연재는 물론 roll표면에 심각한 결함을 발생시키고 있다. 이러한 sticking 현상은 열간압연시 roll과 압연재의 접촉호내에서 압연재표면의 스케일층이 모재의 소성변형량을 따라가지 못하여 과단될 때 나타나는 모재의 naked metal이 roll재 표면에 고온 응착되어 발생하는 현상^{1,2)}으로서 roll소재 및 압연재의 종류 그리고 압연조건등에 매우 민감한 발생경향을 나타내는 것^{3,4)}으로 알려져 있다.

Sticking 현상은 300계 스테인레스강에 비해 400계 스테인레스강에서 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있고²⁾, 400계 스테인레스강중에서도 그 발생정도의 차이가 큰 것으로 보아 스테인레스 압연재의 고온물성 및 고온산화거동에 매우 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다.⁵⁾ 또한 sticking 현상은 동일강종을 동일압연조건에서 열간압연하여도 roll재질 및 표면조건변화에 따라서 발생정도의 차이를 나타내며 압연조건변화에도 발생정도의 변화가 민감하여 sticking 현상은 어느 특정인자에 의존하는 것이 아니라 다양한 조건에 복합적으로 의존하는 것으로 판단된다. 이와같이 열간압연공정에서 발생하는 sticking에 관한 연구에 대해서는, 압연강종 및 열간압연

roll 재질에 따른 sticking 발생거동과 열간압연조건에 따른 발생거동등의 연구가 이루어져 왔으나 roll 표면조건에 따른 sticking 발생거동 및 sticking 현상의 발생 및 성장기구에 대해서는 충분한 연구가 이루어지지 않은 실정이어서 이에 대한 보다 폭넓고 심도 있는 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 sticking의 발생 및 성장과정을 규명하기 위해 sticking simulation을 통하여 roll 표면조도 변화 및 압연재표면의 scale층 생성시간에 따른 400계 스테인레스강종들의 sticking 발생거동을 분석하였으며, 또한 roll 표면에 인위적인 scratch를 형성시킨 후 sticking simulation을 하여 sticking 입자의 핵생성처 및 성장기구를 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

Sticking 현상에 미치는 roll 표면조건인 영향 및 sticking의 발생 및 성장기구를 규명하기 위해 고온마모시험기를 이용하여 sticking simulation을 하였다. 고온마모시험기의 구성은 시험본체 및 압연재를 가열하는 고주파유도장치와 roll과 압연재사이에 압력을 가하는 가압장치, roll 및 압연재의 회전수, 온도 그리고 slip ratio를 제어하는 control box 및 이를 monitoring 하는 computer로 이루어져 있다. Fig.1은 고온마모시험기의 시험본체 부분의 모식도로서 disc 형태의 roll재 및 압연재를 사용하여 이들이 서로 맞물려 회전하도록 설계가 되어 있으며, roll재는 50mmφ, 압연재는 120mmφ의 disc를 사용하고, 구동시에는 두 disc의 원주속도의 차를 주어 slip ratio를 변화시킬 수 있다. 압연재는 회전하는 동안 고주파유도 coil에 의해 가열되며 목적온도에 도달시 roll재와 소정의 압연하중으로 접촉하여 회전하게 된다. 한편 roll재에는 회전시 냉각수가 분사되도록 하여 현상 열간압연조건을 모사하도록 설계되어 있다.

본 장치를 이용한 sticking simulation시의 시험조건을 Table 1에 나타내었다. 압연소재는 Cr함량 11 ~ 26 wt%를 함유하는 4종의 페라이트계 스테인레스강을 선택하였으며, roll재는 High Speed Steel roll(HSS)을 사용하였다. 이들의 화학성분을 Table 2와 3에 나타내었다. 상기조건에서 모사시험을 행한 후, sticking 발생량은 시험후 roll disk의 무게에서 초기 roll무게를 감한 무게증량으로 평가하였으며, 다양한 조건에서의 시험후 roll의 표면과 단면을 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Sticking현상에 미치는 roll 표면조도와 압연재 표면 scale층 두께의 영향

HSS roll 표면조건 변화에 따른 sticking 발생거동을 조사하기 위하여 고온마모시험기를 이용하여 sticking simulation을 하였다. Fig.2는 4종의 페라이트계 스테인레스강을 대상으로 압연재 온도 1050℃에 도달하여 10초간 유지후 20회 roll 회전으로 sticking simulation을 하였을 경우, HSS roll 표면조도(Ra) 변화에 따른 sticking 발생량의 변화를 나타낸다. 모든 강종이 0.5μm이하의 조도에서는 sticking이 발생하지 않는 것으로 보이나 409L을 제외한 430, 444, 446 강종 경우, 0.5 ~ 1.0μm사이에서 sticking 발생량의 급격한 증가경향을 보이다가 1.0μm이상에서 서서히 증가하는 경향을 나타내었고, Cr함량이 많은 강종일수록 sticking 발생량이 많은 경향을 나타내었다. 한편, 409L의 경우는 roll 표면조도 변화에 무관하게 sticking 발생이 없는 경향을 나타내었다. Fig.3은 Fig.2의 조건에서 444강종을 sticking simulation한 후 roll표면을 polishing 및 Nital etching한 후의 광학현미경사진을 나타낸다. roll 표면조도가 증가함에 따라 scratch수가 증가하고 있으며, 일부 scratch에서는 사진의 흰 부분인 페라이트계 스테인레스

강 입자를 발견할 수 있다. 이러한 스테인레스강 입자는 조도가 증가함에 따라 입자수가 많아지고 그 크기 또한 커지는 것을 알 수 있다.

Fig.2의 경향으로부터 roll 표면조도 조건이 한계치 이상으로 되면 sticking 발생이 급격히 일어나는 경향은 Kato등⁵⁾이 제시한 바와같이 sticking 현상은 마모처럼 서서히 진행되는 것이 아니라 발생조건이 만족되면 급격하게 생성된다는 이전 보고와 잘 일치하는 결과이다. 상기 시험 조건에서는 sticking이 발생하지 않는 조도의 한계가 있는 것으로 판단되며, 이 한계치 이상의 조건에서 sticking의 발생확율을 높이는 어떠한 요인이 존재한다는 것을 알 수 있다. 여기서 sticking의 핵생성처가 roll 표면의 scratch라고 밝힌 이전보고의 결과⁴⁾를 Fig.3으로 부터 재차 확인할 수 있으며, roll 표면조도가 0.5 μ m 이상일 경우 roll 표면의 특정 scratch가 sticking의 핵생성처로 역할을 할 수 있다고 판단된다.

한편 Nakanishi등⁶⁾은 roll과 압연재사이의 접촉각내에 윤활재가 존재할 때 sticking 발생 확율을 낮출 수 있다고 밝힌 바 있으며, 압연재표면 scale층이 roll과 압연재 bare metal 사이의 직접적인 접촉의 기회를 줄여 sticking 발생의 기회를 감소시킨다고 밝힌 이전보고⁴⁾로부터 강종간의 sticking 발생량 차이의 원인은 동일 roll 표면조도 조건에서 scale층 생성두께의 차이에 기인된다고 판단된다. 이에 따라 상기 4 강종을 1050 $^{\circ}$ C에서 10 ~ 370sec 유지시 생성되는 scale층의 두께변화와 해당 조건에서의 sticking 발생결과를 Fig.4에 나타내었다. 그림에서 ○ 표시는 sticking이 발생한 경우, × 표시는 sticking이 발생하지 않은 경우를 나타낸다. 409L의 경우 10초 유지시간에서 10 μ m 정도의 scale층의 두께를 갖게 되고 유지시간이 증가할수록 급격하게 scale층의 두께가 증가하며 유지시간에 무관하게 sticking 발생이 없는 경향을 나타내나, 444 및 446의 경우는 유지시간이 증가하여도 scale층의 두께증가가 매우 미약한 경향을 나타내어 Cr함량이 증가함에 따라 scale층의 두께가 작은 것을 알 수 있다. Sticking 발생경향은 10 sec 유지시 430, 444 및 446강은 sticking 발생이 있으나 유지시간이 증가함에 따라 446을 제외한 타강종은 sticking발생이 없는 결과를 나타내었다. 이러한 결과로부터 409L의 경우는 1050 $^{\circ}$ C에 10sec 유지시 타 강종대비 두꺼운 scale층을 확보하게 되어 이 스케일층의 윤활효과에 의해 Fig.2의 결과에서 최대 roll 표면조도 3.5 μ m까지 sticking 발생이 없는 것으로 판단된다. 타 강종들은 roll 표면조도가 0.5 μ m 이하일 경우는 sticking의 핵생성처 역할을 할 수 있는 roll 표면의 scratch가 없어 sticking 발생이 매우 어렵지만 0.5 μ m 이상일 경우는 급격한 sticking 발생이 있는 것으로 보아 sticking이 발생하기 위해서는 roll 표면조도 및 압연재의 산화스케일층 두께에 입계값이 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 결국, roll 표면조도가 증가함에 따라 roll 표면의 scratch수가 상대적으로 증가하게 되어 sticking 발생의 핵생성처가 많아지고, 입자의 크기도 증가되어 sticking 발생량이 증가하는 것으로 판단된다.

상기의 결과들로부터 sticking 발생은 압연재의 산화스케일층 두께와 roll의 표면조도에 직접적으로 의존한다고 판단되어 이 두가지 인자를 변화시 sticking 발생을 억제할 수 있는 범위를 구할 수 있다. Fig.5는 산화스케일층 두께와 roll의 표면조도의 변화에 따른 sticking 발생 및 미발생 구역을 Cr 함량에 따라 표시한 결과로서 동일한 roll 표면조도에서 유지시간이 길수록, 동일한 유지시간에서 표면조도가 작을수록 sticking 발생이 없는 구역으로 포함됨을 알 수 있다. 이러한 경계선은 Cr함량이 높은 강종일수록 우측으로 하향 이동되어 sticking 발생구역이 증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 Cr함량이 높은 강종일수록 동일 유지시간에서 압연재 표면에 생성되는 scale층 두께가 얇아 roll gab내에서 윤활효과를 발휘하지 못해 roll 표면조도값이 낮은 범위에서도 sticking 발생이 일어남을 보여주고 있고, 또한 동일 표면조도값에서는 유지시간을 길게하여 충분한 scale층의 형성을 유도해야만 sticking 발생을 억제할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 Sticking입자의 생성 및 성장과정

Sticking 입자의 핵생성 및 성장과정에 대해서는 여러 연구자가 유사한 결과를 보고한 바 있다. Kato²⁾등은, sticking의 발생은 roll과 압연재가 마찰시 압연재 표층부의 소성유동 파괴에 의해 압연재입자가 roll표면에 이착하며, 반복되는 마찰에서 같은 압연재입자가 초기 압연재 입자위에 이착 및 적층되어 성장하는 것이라고 보고한 바 있다. 또한 Lee와 Kwon⁸⁾등은, sticking의 발생은 roll표면의 roughness와 carbide의 부피분율에 의존한다고 밝혔으며, 이어서 최근에 Lee와 Suh⁷⁾등은 sticking입자의 핵생성과정에 대해 roll의 hard phase에서 우선적으로 sticking 입자가 핵생성되는 것이 아니라 roll surface에서 homogeneous하게 발생하고 roll내의 phase (carbide, martensite)는 sticking에 영향을 주지 않으므로 sticking의 nucleation은 압연재의 property에 의존한다고 하였으며, 성장과정에 대해서는 sticking의 초기입자가 growth site로 작용하여 초기입자위에 다른 입자가 overlie되어 여러회전수를 거치면서 성장한다고 밝힌 바 있다.

상기의 보고들로부터 sticking의 성장과정에 대해서는 유사한 실험과정을 통해서 일치되는 결과를 나타내는 것으로 보이나 sticking의 직접적인 핵생성처에 관한 정확한 이해를 얻기는 어렵다고 판단된다. 한편, 이전보고⁴⁾에서 다양한 조건에서의 sticking simulation결과, sticking 입자는 항상 roll 표면의 scratch에서 형성된다는 것이 확인되어 sticking의 핵생성처가 roll표면의 scratch라는 판단이 가능하였으나 이에 대한 보다 정확한 확인과정이 있어야 할 것으로 판단되어 roll표면에 인위적인 scratch를 형성시킨 후 이 scratch를 기점으로 sticking 현상의 발생여부를 조사하였다. 먼저 HSS roll표면을 polishing상태로 만들고 예리한 diamond cone을 이용하여 polishing된 표면위에 인위적 scratch를 압연방향으로 형성시킨 후 sticking simulation을 하였다. Roll 표면에 인위적으로 형성된 scratch는 깊이가 5 ~ 6 μm , 최대폭이 20 ~ 30 μm 정도의 크기를 갖는다(Fig.6).

Fig.7은 446 압연재를 인위적으로 형성된 scratch가 있는 HSS roll시편을 대상으로 1050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 10초 유지후 20회 회전의 sticking simulation을 하였을 경우, roll 표면을 SEM 관찰한 사진이다. 사진a)는 가벼운 polishing후 Nital etching한 경우로서 polishing된 roll 표면부위에서는 carbide의 망상구조를 보이는 roll조직이 잘 드러나 있고 sticking 입자를 발견할 수 없으나 사진 중앙부분에 인위적으로 형성된 scratch위에는 밝은 색의 446 sticking 입자가 이착되어 있음을 알 수 있다. 한편, 이렇게 sticking 입자가 형성된 부위에 인위적 scratch가 분명히 존재하는가를 확인하기 위해 sticking 입자가 응착된 부위를 강하게 plishing한 후 Nital etching하여 SEM 관찰한 결과(사진 b)), 강한 plishing에 의해 덮여 있던 sticking 입자의 일부가 제거되어 인위적 scratch의 형태가 잘 드러나 보이고 있으며, 이 scratch부위에 446 sticking 입자가 응착되어 채워져 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 sticking 입자의 핵생성은 roll 표면의 hard phase(carbide)에서 발생되거나, 압연재의 property에 의존하여 homogeneous하게 발생한다는 이전 보고와는 달리 roll표면의 scratch에서 발생되어 sticking 입자의 핵생성처는 roll표면의 scratch임을 알 수 있다. 한편, roll 표면의 scratch가 sticking 입자의 핵생성처가 되기 위해서는 압연재의 표면 스케일층 조건에 의존하게 되어 접촉호내에서 압연재표면에 노출된 naked metal과 직접 접촉할 때만이 sticking의 발생가능성이 매우 높으나 상기의 조건이 충족되지 않은 경우에는 roll표면의 scratch가 sticking의 핵생성처 요건을 갖추었다 하더라도 sticking 발생이 없을 것으로 판단된다.

Sticking 입자의 성장과정을 조사하기 위해 인위적 scratch위에 형성된 sticking 입자의 표면과 단면을 보다 면밀히 관찰하였다. Fig.8 a)는 roll표면의 인위적 scratch위에 이착된 sticking 입자의 표면을 관찰한 결과로서 sticking 입자의 표면은 동일한 스테인레스강 입자이지만 상대적으로 타부분대비 밝은 흰색을 띠는 부분과 회색 부분으로 구분되어 있음을 알 수 있

다. 이러한 특성을 아래부분에 모식도(b)로 나타내었다. 먼저 짙은 회색부분은 sticking simulation과정의 20회 회전중에서 가장 초기에 이착된 입자로서 이착후 시험종료시까지 이어지는 수 회전 동안 고온의 압연재와 접촉하여 표면에 산화스케일층이 형성됨으로 짙은 회색을 띄고 있는 것으로 판단된다. 이에 반해 밝은 회색부분은 짙은 회색부분에 비해 상대적으로 늦게 이착되었으며, 밝은 흰색의 입자는 이 sticking 입자위에 최종으로 이착되어 회색부분에 비해 표면에 산화스케일층 형성이 상대적으로 적어 흰색을 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 sticking 입자의 적층은 ①, ②, ③의 순서로 이루어졌음을 추정할 수 있다. 이러한 적층과정은 sticking 입자의 단면사진으로부터 더욱 분명히 알 수 있다. Fig.9 a)는 roll표면의 scratch를 기점으로 형성된 sticking 입자의 roll축방향 단면 SEM사진으로서 sticking 입자 내부는 복잡한 metal flow를 보여주고 있으며, 많은 slip line들이 있으며, 경계층을 이루는 굵은 line들을 발견할 수 있다. Sticking 입자를 모식적으로 나타낸 그림 b)로부터 입자는 몇개의 부분으로 이루어져 있으며 그 경계층을 뚜렷이 구분할 수 있다. 이러한 경계층을 EDS 분석한 결과(c), 경계부분은 Oxygen의 무게분율이 약 20%, Cr이 50%, Fe가 30%로 스테인레스강 표면에 형성되는 전형적인 Fe, Cr 산화층임을 알 수 있었다. 따라서 sticking입자의 형성과정은 20회 회전중 어느 한 회전에서 발생되고 종료한 것이 아니라 형성된 초기 입자위에 다음 입자가 이착되어 적층되는 과정으로 이루어졌음을 알 수 있다. 즉, 입자의 적층은 인위적으로 형성된 scratch가 있는 부분을 기점으로 ① 그리고 ②, ③, ④의 순서로 발생되었음을 추정할 수 있다. 한편, 일반적으로 roll 표면에 이착된 sticking 입자를 관찰시 sticking 입자 하부에 scratch가 존재함을 관찰자가 확인하기 어려운 것은, 열간압연시 roll표면에 이전 이착된 압연재입자가 다음에 이착될 입자의 기점이 되는 방식으로 sticking 입자가 성장하므로 roll회전이 진행될수록 이착된 입자의 표면적은 더욱 넓어져 다음 입자의 이착이 용이해지므로 최종 확인단계의 sticking 입자는 scratch부분의 인접 부분까지 덮게 되는 현상이 나타나기 때문이라고 판단된다.

이상의 결과로부터 sticking 현상의 발생 및 성장과정을 Fig.10의 모식도와 같이 나타낼 수 있다. sticking 현상의 발생과 성장과정은, roll표면의 scratch가 접촉호내에서 압연재표면에 노출된 naked metal과 직접 접촉할때 압연재입자가 roll표면의 scratch부분으로 이착되며, 반복되는 압연과정에서 첫번째 압연재입자를 기점으로 두번째, 두번째를 기점으로 세번째 입자가 이착되는 방식으로 하나의 sticking 입자를 만드는 과정이라고 판단된다.

4. 결론

Sticking 현상의 발생 및 성장과정을 규명하기 위해 sticking simulation을 통한 roll 표면조도 및 압연재표면의 scale층 두께변화와 roll표면에 인위적인 scratch형성에 따른 sticking 발생경향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Roll 표면조도 변화에 따른 sticking 발생경향을 조사한 결과, 409L은 모든 조도범위에서 sticking 발생이 없었으며, 430, 444, 446강종의 경우, 조도가 증가함에 따라 또한 Cr함량이 많을수록 sticking 발생량이 많은 경향을 나타내었다.
- 2) 압연재의 고온 유지시간과 roll표면조도 변화에 따른 sticking 발생거동은, 동일한 roll 표면조도에서 유지시간이 길수록, 동일한 유지시간에서 표면조도가 작을수록 sticking 발생이 없는 경향을 나타내었으며, Cr함량이 높은 강종일수록 sticking 발생과 미발생 구역의 경계 curve가 우측으로 하향 이동되어 sticking발생구역이 증가되었다.
- 3) Roll표면에 인위적 scratch를 형성시킨 후 sticking simulation을 한 결과, polishing된 타부분에서는 sticking 발생이 없었고 scratch부분에서만 sticking 입자가 발생되었으며,

이 Sticking 입자내부는 복잡한 적층구조로 이루어져 있었다.

- 4) Sticking 현상의 발생과 성장과정은, roll표면의 scratch가 접촉호내에서 압연재표면에 노출된 naked metal과 직접 접촉할 때, 압연재입자가 roll표면의 scratch부분으로 이착되며, 반복되는 압연과정에서 첫번째 입자를 기점으로 두번째, 두번째를 기점으로 세번째 입자가 이착되는 방식으로 하나의 sticking 입자를 만드는 과정이라고 판단된다.

참고문헌

- 1) O. KATO and T. KAWANAMI: J. JSTP, 28(1987), 264.
- 2) O. KATO, S. UCHIDA and T. KIMURA: Steel Research, 335(1989), 35.
- 3) S. UCHIDA, H. YAMAMOTO, M. AKATA, K. WATANABE and O. KATO: What's New in Roll Technologies of the World, Report of Research Committee on Rolling Roll, Iron & Steel Society, Japan, (1995), 183.
- 4) W. JIN, J.Y. CHOI and Y.Y. LEE: ISIJ Int., 38(1998), 739
- 5) O. KATO and T. KAWANAMI: J. JSTP, 30(1989), 103.
- 6) T. NAKANISHI: J. Soc. Tribologists and Lubricant Engineers, 49(1993), 365.
- 7) S.H. LEE, D.W. SUH, S.C. OH and W.JIN: Metall. Trans. A, 29A(1998), 696
- 8) Y.D. LEE, Y.Y.LEE, O.J. KWON, G.S. KIM and Y.G. LEE: Development of Rolling Technology of 430 Stainless Steel, Report of POSCO Research Institute, unpublished, (1993).

Table 1 Experimental variables and conditions

	Variables	Conditions
1	Contact stress	400MPa
2	Test temperature	1050 °C
3	Holding time at 1050 °C	10, 280, 370, 570sec
4	Number of revolutions	5 ~ 20 rev.
5	Backward slip ratio	34%
6	Rolling speed	0.3m/sec
7	Surface roughness of roll(Ra)	0.5 ~ 3.5 μm

Table 2 Chemical compositions of steels used(wt%)

Steels	Cr	Ni	Mo	C	Nb
446	26.3	0.21	1.93	0.007	0.15
444	18.7	0.01	0.96	0.009	0.45
430	16.3	0.08	0.01	0.060	-
409L	11.4	0.07	-	0.025	-

Table 3 Chemical composition of roll material used(wt%)

	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	Ni
HSS	2.0	5.0	2.5	4.0	1.0	1.0	1.0

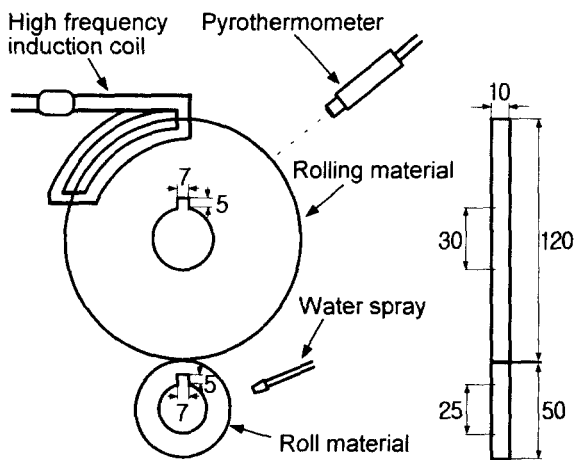


Fig.1 Schematic diagram of the sticking simulator

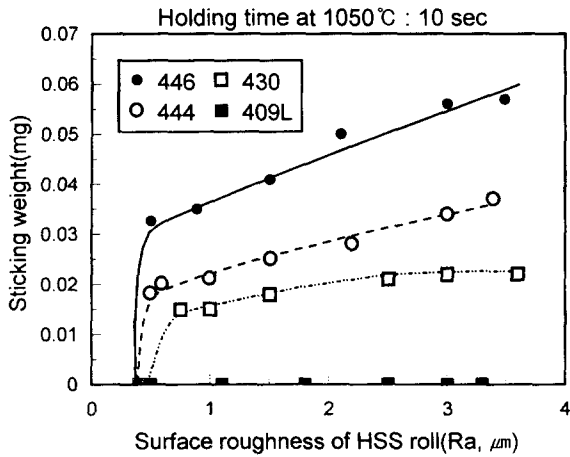


Fig.2 The changes of sticking weight of ferritic stainless steels with surface roughness of HSS roll.

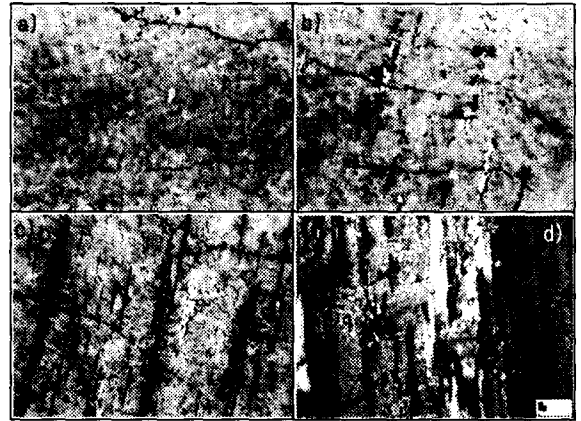


Fig.3 The optical micrographs of HSS roll surfaces polished and Nital etched showing the sticking behavior of STS444 with surface roughness of HSS roll.

a) $0.5\mu\text{m}$, b) $1.0\mu\text{m}$, c) $2.0\mu\text{m}$, d) $3.0\mu\text{m}$

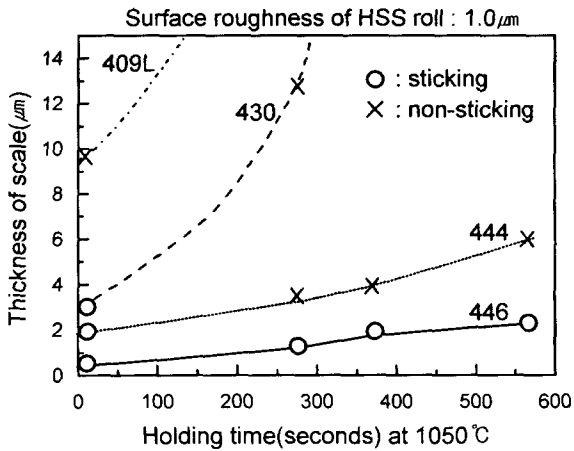


Fig.4 Change of sticking behavior and scale thickness for Ferritic stainless steels with holding time at 1050°C under HSS roll surface roughness, $1.0\mu\text{m}$.

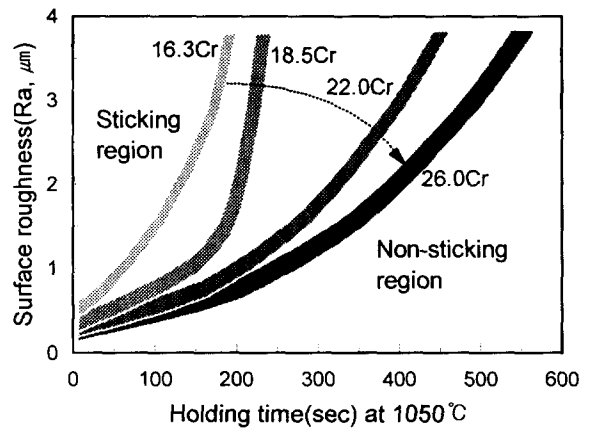


Fig.5 Change of sticking behavior for ferritic stainless steels with surface roughness and holding time at 1050°C

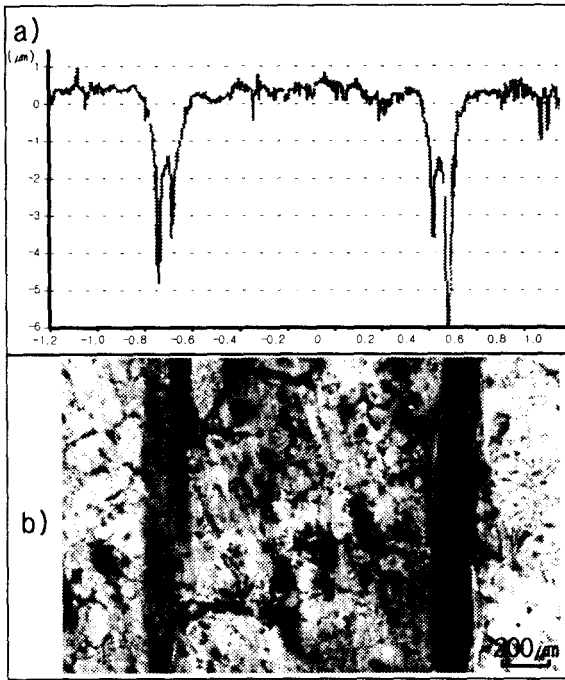


Fig.6 The photograph showing the artificially formed scratches on the polished HSS roll surface and the surface roughness of the scratches

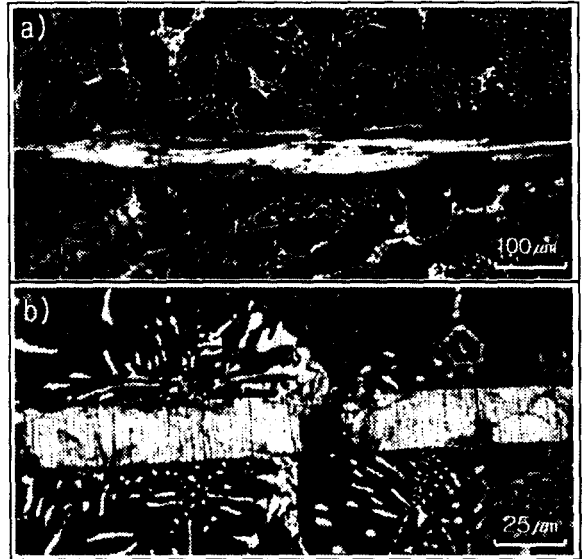


Fig.7 The photograph showing the 446 stainless steel particle stuck on the artificially formed scratch of HSS roll surface
 a) Light polished and Nital etched
 b) Strong polished and Nital etched

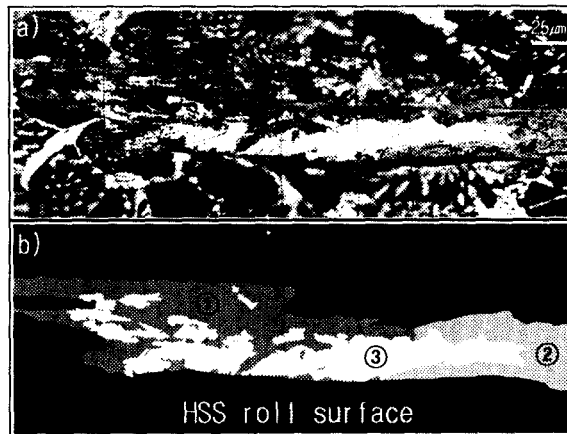


Fig.8 The photograph showing HSS roll surface after sticking simulation.
 a) the particle stuck on the artificial scratch of roll
 b) Schematic diagram of sticking particle

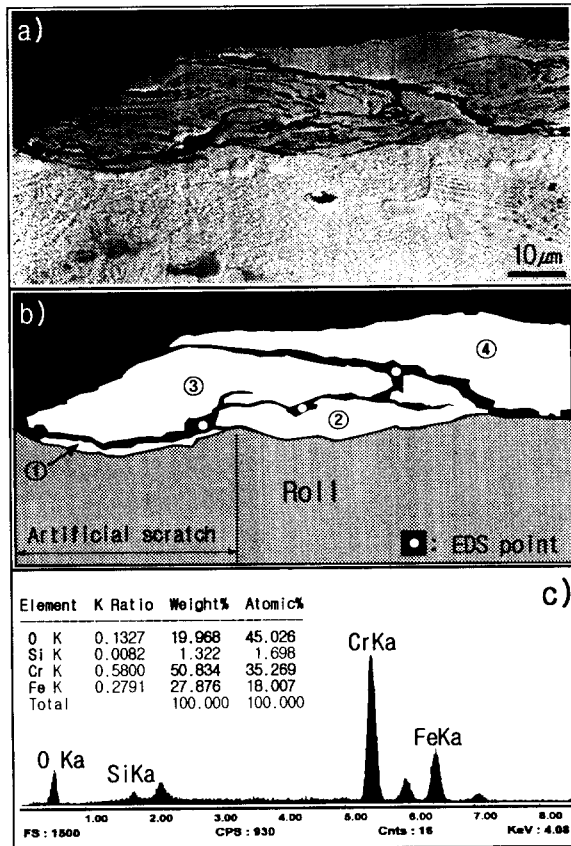


Fig.9 The photograph showing the cross section of roll
 a) The particle stuck on the artificial scratch of roll
 b) Schematic diagram of sticking particle
 c) The result of EDS analysis of scale layer in particle

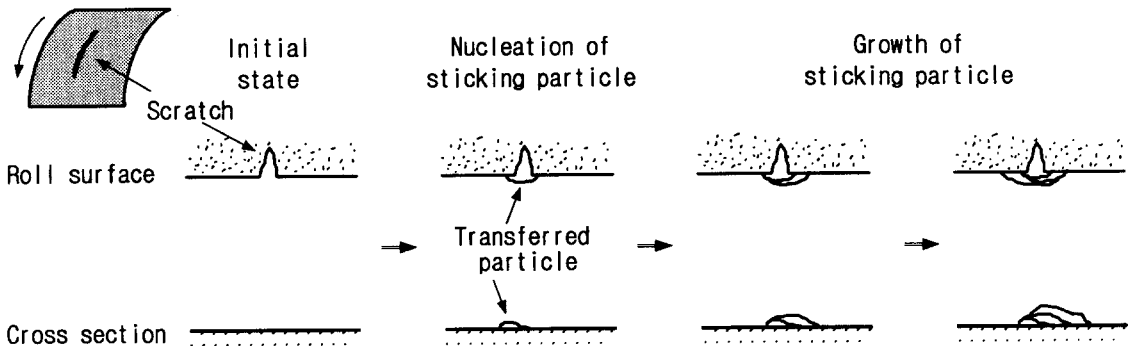


Fig.10 Schematic diagram showing the nucleation and growth process of sticking particle