

열간압연의 트라이볼로지

김 철 회 박사

포항산업과학원 철강제품연구부 설비공정연구팀

1. 서 론

열간윤활압연은 판재의 소성압연가공시 롤바이트에 윤활을 행함으로써 롤과 판재사이의 과도한 마찰을 억제하여 압연동력을 절감하고, 또한 롤마모를 감소시키는 등을 목적으로 한다. 실제로 강판의 열간윤활압연은 냉간압연과 알루미늄의 열간윤활압연에 비해 적용이 상당히 늦었다. 이 이유로서 강판의 열간윤활압연 기술은 냉간압연에서와는 달리 롤냉각기술의 진보 혹은 내구성롤의 개발로 열간압연윤활제를 사용하지 않고 냉각수만으로 압연을 행한다 하더라도 비교적 충분한 조업성적을 얻을 수 있었던 것도 열간윤활압연의 기본적 연구의 필요성을 감소시켰다 할 수 있다.

그후 압연동력 및 마모의 절감을 목적으로 시작된 열간윤활압연기술은 현재 전 세계적으로 거의 모든 선진 제철소에 적용되고 있으며, 초기에 FM(Finishing Mill) 스탠드에만 주로 적용되던 열간윤활압연은 상위공정인 RM(Roughing Mill)스탠드에까지 확대 적용되고 있다.

열간윤활압연의 당초의 목적은 압연동력의 감소에 주안이 두어졌지만, 이속고 스케줄 프리압연의 목적으로 재검토되기에 이르렀다. 즉, 열간윤활압연의 목적은 롤마모를 방지함으로써 롤원단위를 절감하는 동시에 밀의 정지시간을 최소화하는 데서 오는 생산성의 향상에 보다 더 큰 비중이 두어지게 되었다.

이제까지의 열간윤활압연 연구의 동향을 살펴보면 주로 현장설비에 윤활을 적용할 때 발생하는 조업상의 문제점 해결에 최우선을 두는, 소위 현장주도형 연구가 대부분으로 열간윤활압연의 기구나 윤활제, 그 밖의 연구는 비교적 적은 실정이다[1-7].

이제 열간윤활압연시의 롤마모에 대해서는 여러 열간윤활마모시뮬레이터를 이용하여 롤재질, 사용조건과 윤활제 조성과의 상관관계 등에 대한 기본적인 연구가 이루어지게 되었지만 일반적으로는 특정 압연

기, 특정 사용조건하에서의 롤마모상황에 관한 보고가 여전히 많다[8].

최근 HSS 롤의 본격사용 등으로 인해 열간압연의 트라이볼로지 상황은 크게 변화하고 있으며, 이와 함께 신연속열간압연기술(연연속 압연), 고윤활압연기술 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 여기에 강판의 열간윤활압연에 대한 제문제를 정리하고 향후 개발과제를 전망해 본다.

2. 열간윤활압연의 제문제[10-17]

2-1. 열간압연의 마찰

압연에 있어서 마찰의 문제는 이해하기가 상당히 곤란한 현상이다. 그렇지만 냉간압연의 경우는 피압연재가 단단하며, 압연윤활유가 분명히 피압연재와 롤에 부착된 상태로 윤활압연이 행해진다. 또한 압연한 후의 판재에는 상당량의 기름이 남아있음을 알 수 있다. 이와 같은 압연상태에서는 접촉면에 어느 정도의 윤활유가 공급되었는지를 알 수 있으며, 접촉면을 미끄럼 마찰로서 취급하는 것도 자연스럽게 때문에 마찰계수의 개념도 이해하기 쉽다. 그러나 열간압연에서는 재료가 극히 무른뿐만 아니라 표면에는 산화막도 존재하기 때문에 표면이 상당히 거친 상태이다. 따라서 일반적인 마찰계수의 개념을 단순히 도입하는 것은 위험하다. 현재 열간압연의 이론식으로서 널리 이용되고 있으며 실제 조업에 있어서의 압연기 설정 계산의 모델로서 이용되는 경우에도 비교적 양호한 압연하중의 추정을 행할 수 있는 것으로 알려져 있는 Sims의 압연이론식[9]은 피압연재표면과 롤의 표면이 고착한 상태, 즉 고착마찰을 전제로 하여 유도되었다. 이 이론식이 열간압연상태를 비교적 잘 표현하고 있다고 하는 것은 열간압연이 다른 마찰요인이 아닌 피압연재 바로 그 자체의 소성변형특성에 주체적으로 지배되고 있음을 의미하고 있기 때문에 그만큼 열간

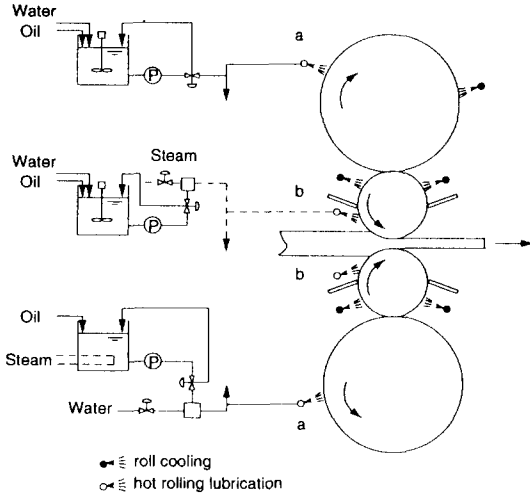


Fig. 1. Typical rolling oil application methods.

압연이 단순화되어 있는 것이 된다. 이것은 열간압연이 안정성이 높은 압연상태에 있음을 의미하고 있다. 그러나 고착마찰만의 열간압연이론에서는 미끄럼이 수반되는 상태는 고려하고 있지않기 때문에 양방의 마찰상태를 동시에 고려한 해석도 행해지고 있다. 이렇게 되면 실제조업에의 압연기설정 계산보다는 상당히 복잡해지는 곤란에 직면한다.

2-2. 열간압연의 롤냉각

열간압연에서는 작동롤표면은 800°C이상의 고온의 피압연재와 접촉을 반복한다.

1965년도 후반에는 압연속도가 600~750 mpm으로 낮고, 롤냉각수의 압력도 5~10 kg/cm² 정도로서, 수량도 한 스탠드당 300~500 m³/h 정도였지만, 현재의 최신에 밀어서는 압연속도가 1500 mpm을 넘고, 롤냉각수 압력도 30~60 kg/cm² 정도가 보통이다. 수량도 한 스탠드 당 1000 m³/h를 넘는다.

이와 같은 고압의 다량의 냉각수 스프레이의 세정작용에 이길 수 있는 압연유를 롤표면에 공급할 필요가 있다. Fig. 1은 롤냉각수의 스프레이와 압연유의 스프레이의 배치를 나타내지만, a는 일단 보강롤에 압연유와 물의 혼합용액을 스프레이하고, 전동에 의해 작동롤에 전착시키는 경우이며, b는 에멀션을 증기로 무화시킨 것을 작동롤에 직접 스프레이하는 경우이다. 이와 같이 제약을 받는 환경가운데서 전착성이 우수하면서 또한 물의 세정작용에도 불구하고 씻겨내려가

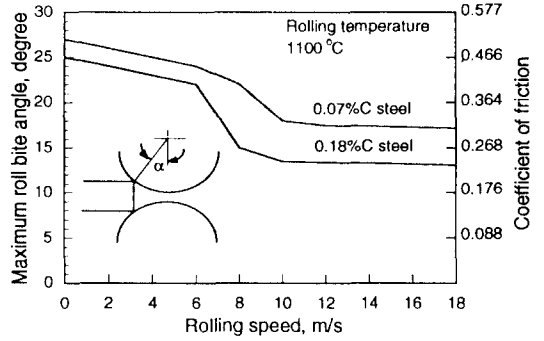


Fig. 2. Rolling speed and maximum roll bite angle α and coefficient of friction $\tan \alpha$.

지 않는 압연유와 효율이 높은 분사기술이 얼마만큼 열간유회압연에 있어서 필요한지 알 수 있을 것이다. 한편, 롤냉각수의 총량은 수천에서 수만 m³/h를 넘는 양이지만, 사용 후의 물속에는 강제표면으로 부터 떨어져 나간 다량의 미립의 스케일이 포함되어 있기 때문에 수처리설비에 의해 여과할 필요가 있다. 냉간압연에서와 같이 압연유와 물의 혼합상태로 순환사용하는 방법은 이용할 수 없기 때문에 롤에 대한 효율적인 분사가 극히 중요한 기술적 과제가 된다.

2-3. 스트립의 물림성

열간압연의 목적은 압연변형을 용이하게 하여 큰 변형을 부여하는 것은 말할 필요도 없다. 현재와 같이 에너지 절약이 절실히 요구되는 상황에서 압연라인 내에서의 재료의 온도강하를 줄이기 위해 얼마만큼 큰 압하량을 주어야 하는지가 중요한 과제로 된다. 윤회율은 롤바이트 내에서의 부하를 경감하고 롤표면의 손상을 완화시키지만 한편으로 판물림성을 저하시킨다. 최대물림각(슬립이 일어나는 일없이 판재가 롤바이트에 물러들어가는 Fig. 2의 a) 및 마찰계수와 압연속도와의 관계에 대한 실험적 연구보고를 Fig. 2에 나타낸다. Hot strip밀 사상압연기의 전단스탠드에서는 물림각에 그다지 큰 여유가 없다. 과윤회율은 슬립의 발생을 초래하여 미스롤발생의 원인이 된다. 보통 윤회율을 행하는 경우, 윤회효과를 최대한으로 발휘하고자 하는 것이 일반적이다. 그러나 열간압연에서의 윤회율은 압연의 조건에 따라 최적으로 윤회율을 제어할 필요가 있다. 따라서 마찰계수가 한계를 넘지 않도록 개개의 스탠드의 압연조건에 따른 윤회율의 최적배분과 분사유량을 정확히 제어할 수 있는 압연유 공급장치

가 필요하다. 한계를 넘은 과운활의 경우에 일어나는 손실은 실로 막대하다. 더욱 후단의 스탠드에서는 압연재의 두께도 얇고 큰 압하량을 줄 수 없기 때문에 판물림의 염려는 작아 운활효과를 보다 높일 수 있는 여지는 충분히 남겨져 있다고 할 수 있다.

2-4. 압연장력

열간압연작업의 최대의 특징은 압연장력이 극단적으로 작다는 점이다. 열간에서는 1 kg/mm^2 정도의 작은 장력하에서도 재료표면이 축소한다. Hot Strip밀을 비롯한 열간의 연속압연기에서는 치수정도를 높이기 위하여 어느정도 소장력하에서 안정되게 압연할 것인가가 중요한 기술적 과제가 된다. 장력을 작게 한다는 것은 서로 근접하고 있는 압연기가 서로 독립적인 압연이 가능하도록 하는 것이다. 물품통길이방향의 불균일한 운활은 스트립을 좌우로 미끄러지게 하고(사행), 압연기간의 운활의 불균일은 루프 콘트롤(Loop control)을 혼란시킴으로써 치수정도의 악화나 미스롤 발생의 원인이 된다. 급격한 운활변화가 스트립폭의 변동에 큰 원인이 되기 때문에 한장의 스트립을 압연하는 도중에 서서히 운활을 가감하는 테이퍼식 급유법이 채용되기도 한다.

이상으로 열간압연의 운활을 둘러싼 제문제에 대하여 정리해보았다. 이 이외에도 안정된 운활압연을 실현하기 위한 제어기기, 장치 등의 문제도 함께 고려할 필요가 있다. 그러나 Hot strip밀 사상압연기의 후단 스탠드에서는 마찰에 의한 구속에 의해 마찰이 없는 경우의 수배이상의 압연하중이 발생하고, 그 결과로서 큰 에너지를 여분으로 필요로 하고 있다. 압연의 운활은 결국 이 마찰에 요하는 에너지를 감소시킴과 동시에 큰 마찰력에 의해 가속되는 물의 손모 또한 감소시키는 기술이다. 덧붙여 Hot strip밀의 사상압연기에서는 1t의 스트립을 압연하기 위하여 20~40 kWh의 전력을 필요로 하고 있다. 실제로는 이 밖에도 롤냉각을 위한 펌프, 디스케일용의 펌프, 조압연기용 모터 등을 포함한 전라인의 전력은 스트립 1t당 80~100 kWh를 소비하고 있다. 또한 1t당 0.4~0.7 kg의 물을 소비하는 것으로 알려지고 있다[17].

2-5. 압연윤활유 공급방법

열연강관의 압연에 있어서는 경계윤활이 지배적인 것으로 추측되고 있으나 윤활유가 기대되는 성능을

발휘하기 위해서는 그 윤활성능과 동시에 물에 대한 부착성이 매우 중요하다. 대량의 고압으로 공급되는 롤냉각수와 경합하면서 롤표면에 균일하게 또는 충분히 윤활유를 부착시키기 위하여 현장에서는 여러 가지 방법을 채용하고 있으며, 현재 주로 사용되는 공급 방법은 다음의 3가지 방법이 있다(Fig. 1).

2-5-1. 워터 인젝션(Water injection) 법

전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 방법으로, 냉각수 배관 중에 윤활유를 주입하여 배관 중에서의 난류에 의해 강제적으로 물과 기름의 혼합액을 만든다. 특히 유화제를 사용하지 않기 때문에 롤표면에서의 플레이트 아웃(Plate out)성이 우수하다는 점과, 폐수처리가 쉬운점 등의 장점이 있지만, 윤활유의 배관이 매우 가늘어져 보수 및 응답성에 약간 문제가 있다.

2-5-2. 프리믹스(Premix)법

냉간압연운활에 있어서의 에멀션법과 마찬가지로 유화제를 첨가하여 미리 안정된 에멀션을 만든 다음 나중에 롤 표면에 분사한다. 작업의 안정성 및 응답성이 좋은 반면, 물에 대한 플레이트 아웃성이 여타 방법에 비해 떨어진다.

2-5-3. 스팀 어토마이징(Steam Atomizing) 법

프리믹스법의 일종이지만, 분사직전에 에멀션에 스팀을 혼합함으로써 에멀션의 파괴 및 수분의 증발을 행하여 물에 대한 부착효율을 향상시킨다. 스팀을 혼합하기 때문에 장치가 여타 방법에 비해 복잡해진다. 또한 윤활유를 롤표면에 분사하는 방법으로는, (1) 보강롤(Backup roll) 출측에 공급한 후 접촉하여 회전하는 보강롤과 작동롤(Work roll) 사이의 압력에 의해 작동롤에 균일하게 전사하는 방법, (2) 작동롤 입측에 직접 분사하는 2가지의 방법으로 주로 행해지고 있다.

이상에서 설명하는 바와 같이 공급방법, 공급장소에 대해서는 여러 방법이 사용되고 있지만, 서로 일장일단이 있기 때문에 간단히 그 우열을 비교할 수는 없다. 개개의 생산현장의 특수성에 제약을 받기 때문에 그 압연기에 가장 적합한 공급방법이 시행착오적으로 선택되고 있다.

열연강관의 압연에 윤활제를 사용하는 것은 관점을 달리하면 판물림슬립, 판폭, 압연압력 및 장력변동 등의 압연불안정 현상을 촉진하는 것이기도 하다. 판물림슬립을 방지하기 위해 실제 조업에서는 코일의 선단이 물에 물린 다음에 윤활유의 공급을 개시하고, 코

일의 압연이 완전히 끝나기 전에 급유를 정지하여 코일의 후단에서 롤에 잔존하는 윤활유를 소각함으로써 다음 코일의 압연에 지장이 없도록 준비하는 방식이 일반적으로 행해진다.

따라서 윤활유의 공급장소에 대하여 말하자면 부착 윤활유의 박리, 응답성 등의 점에서 롤에 공급되는 냉각수를 충분히 잘 닦아낸 후 작동롤 표면에 직접 공급하는 방법이 윤활유 부착량을 확보하는데 있어 보다 우수한 것으로 생각되지만, 냉각수를 차단하여 롤표면을 닦아주는 와이퍼의 성능이 윤활성능확보의 관건이 된다.

윤활제의 롤에 대한 부착과 냉각수에 의한 롤로부터의 박리는 유효공급량을 결정하는데 있어 매우 중요한 문제이다.

3. 열간윤활압연의 효과

3-1. 압연하중 · 동력에 대한 영향

열간윤활압연효과를 직접적으로 볼 수 있는 것은 압연하중의 감소이다. 하중의 경감효과를 가지고 윤활의 양부를 판단 내릴수 있다. 이제까지의 보고에 의하면 하중의 감소율은 대략 10~30%정도이다. 이 감소율은 압하율이 높을수록 그 경향이 큰 것으로 나타나고 있다. Fig. 3에 보는 바와 같이 사상압연 전단일수록 압연하중의 감소가 크고 후단일수록 감소율이 작다. 그 결과 후단 스탠드에서 큰 윤활효과를 기대하였으나 실제로는 그렇지 못하다. 또한 Fig. 4에 윤활에 의한 압연동력의 감소효과를 나타내었다. 이 점에 관해서도 압연가공에너지 측면에서 후단스탠드일수록 압연효율이 낮은 까닭에 후단에서 보다 큰 압연동력의 경감효과를

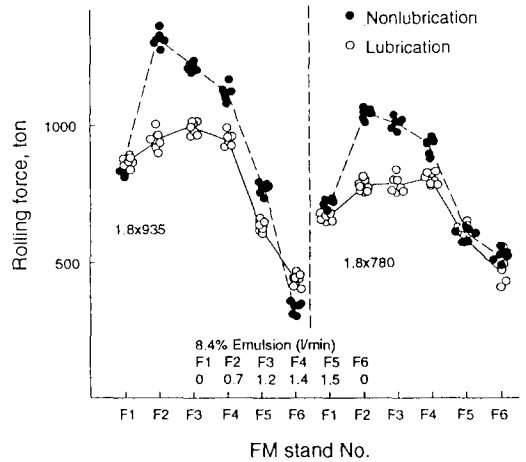


Fig. 3. Effect of hot rolling oil lubrication on roll force reduction.

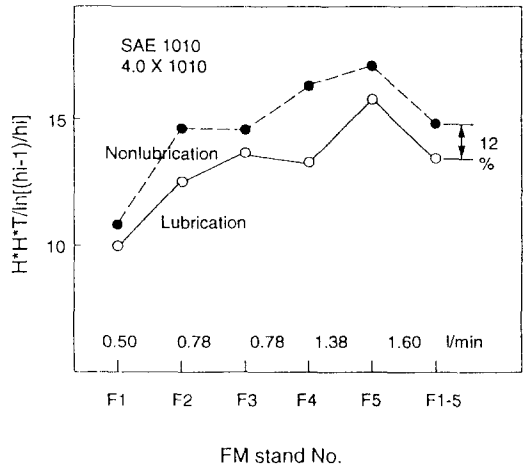


Fig. 4. Effect of hot rolling oil lubrication on rolling power.

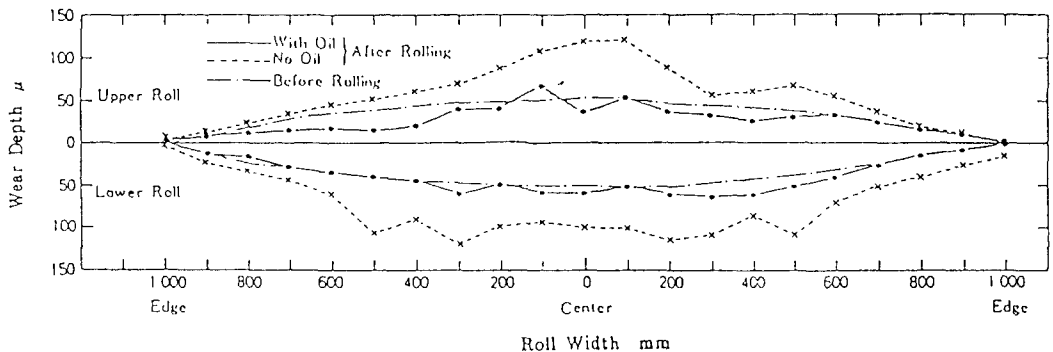


Fig. 5. Effect of hot rolling oil lubrication on roll wear profile.

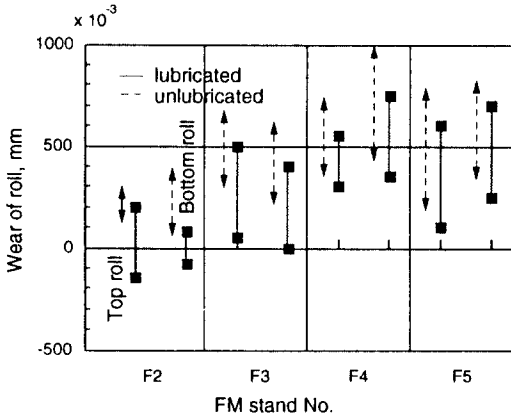


Fig. 6. Effect of roll lubrication on wear of roll.

기대하지만 충분하다고는 하기 어렵다. 후단 스탠드에서의 효과를 높이기 위해서는 더욱 새로운 형태의 윤활제가 필요한지 혹은 단지 압연유의 공급량을 늘이는 것이 좋은지, 또는 실제 공급유량을 늘이더라도 롤냉각수의 세정효과에 의해 어느 일정 부착량에서 포화하고 말것인지에 관한 연구가 필요하다.

3-2. 롤마모에 대한 영향

롤마모량의 감소에 대한 윤활압연의 효과는 20~250%로 그 편차가 크게 벌어지지만, 마모량 비교를 행한 스탠드에 따라 감소율은 크게 달라질 것으로 예상된다. Fig. 5에 F2스탠드의 작동롤에 대한 열간윤활압연에 의한 롤마모프로필의 변화예를 나타낸다. 그러나 Fig. 6에 나타내는 바와 같이 전단 스탠드에서는 일반적으로 마모량도 적고, 감소율로 표현하면 대단히 큰 수치로 된다. 후단 스탠드에서는 일반적으로 마모량이 크고 감소율은 작아질 것으로 생각된다. 현재의 윤활압연에서는 압연가공에 수반되는 마찰에너지가 후단에서 큰 비율을 차지하는데 반해 그 감소가 충분하지 않는 결과 당연한 것으로 생각된다.

4. 맺음말

이상으로 강판의 열간압연에 있어서의 트라이볼로지기술의 제문제점과 효과에 대하여 설명하였다. 압연동력의 절감 및 롤마모의 감소를 목적으로 채용되기 시작한 강판의 열간압연윤활기술은 이제 거의 완숙기에 접어든 것으로 생각되지만, 최근 신열간연속

압연기술의 실현, HSS롤 등 고내마모성물의 본격적인 사용으로 열간윤활압연의 트라이볼로지 환경이 급속히 변화를 보임에 따라 이에 상응하는 기술개발이 진행되고 있다. 특히, 향후 HSS롤, 고윤활압연유제, 연연속 압연기술의 3대 테마를 중심으로 열간압연기술이 발전될 것으로 기대되기 때문에 열간압연에서의 트라이볼로지기술의 중요성이 그 어느때보다도 크게 인식되고 있다.

참고문헌

- Edmundson, M. R., "High Temperature Rolling Oils Aid Hot Rolling," Iron & Steel Engineer Year Book, 47-10(1970), pp.523-525.
- Neport, G., Iron & Steel, 4-2 (1971), 103.
- Hossteter, R. S. and Vyas, M. M., "Increasing Hot Strip Mill Roll Life by Spray Lubrication," Iron & Steel Engineer Year Book, 50-10 (1973), 435-439.
- Hachiya, et.al, Seitetsu Kenkyu, 276(1972-10), 10296.
- Roberts, W. L., Iron & Steel Engr., 51-7(1974), 56.
- Kalay, A., and Sparling, G.L.M., Journal of Iron & Steel Inst., 206-2 (1968), 152.
- Tamano, Yanagi, Trans. JSME, 36-281 (1970-1), 126.
- Kihara, J., Doya, K., Nakamura, K., Yoshihara, T. and Sano, Y., Tetsu-to-Hagane 69(7)(1983), pp.782-789.
- Sims, R. B., Proc. Inst. Mech. Engrs., 168 (1954), 191.
- Wusatowski, Z., Fundamentals of Rolling. (1969), 130, Pergamon Press.
- Nishizawa, K., Hase, N., Mase, T. and Kono, T., "Effect of Rolling Oil on Hot Strip Rolling," The Sumitomo Search, No. 17 (1977), pp. 18 - 26.
- Globus, A. R., Iron & Steel Engr., 47-8(1975), 93.
- Kamii, Terakado, Sosei to Gakou, 17-182 (1976-3), 202.
- Wandrei, C. L., "Review of Hot Rolling Lubricant Technology for Steel," ASLE SP-17(1984).
- Robinson, C. L., and Westlake, F. J., "Roll Lubrication in Hot Strip Mills," CEL/PH/1/73.
- Roberts, W. L., "Tribological Considerations in the Hot Rolling of Low-Carbon Steels," Journal of the American Society of Lubrication Engineers, (1975), pp.575-580.
- Tetakado, R., "Tribology in Hot Rolling," Transaction of JSME, Vol.81, No.719 (1978), pp.1069-1974