

열간압연중 발생하는 미세조직 변화에 관한 연구

조현중*, 김낙수**

*홍익대학교 대학원 기계공학과

**서강대학교 기계공학과

A Study On The Microstructural Evolution In Hot Rolling

Hyunjoong Cho* and Naksoo Kim**

*Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

**Department of Mechanical Engineering, Sogang University

ABSTRACT

A full three-dimensional thermo-coupled rigid-viscoplastic finite element method and the currently developed microstructural evolution system which includes semi-empirical mathematical equations suggested by different research groups were used together to form an integrated system of process and microstructure simulation of hot rolling. The distribution and time history of thermomechanical variables such as temperature, strain, strain rate, and time during pass and between passes were obtained FEM analysis of multipass hot rolling processes. Then distribution of metallurgical variables were calculated successfully on the basis of instantaneous thermomechanical data. For the verification of this method the evolution of microstructure in plate rolling and shape rolling was simulated and their results were compared with the data available in literature. Consequently, this approach makes it possible to describe the realistic evolution of microstructure by avoiding the use of erroneous average value and can be used in CAE of multipass hot rolling.

1. 서론

냉간가공중 금속은 전위밀도의 증가로 인해 가공경화의 특성을 보이며, 유동응력은 전위밀도의 함수로 표현될 수 있다. 그러나, 높은 온도영역에서 금속을 가공할 때는 낮은 유동응력 수준으로도 재료의 파괴없이 큰 변형이 가능하다. 또한 작용 응력과 변형률속도가 큰 경우 금속조직의 변화가 생기게 되고, 이는 전위밀도의 감소로 인한 유동응력의 감소를 가져온다. 열간압연

중 일어나는 미세조직의 변화(structural change)를 동적회복(dynamic recovery)이라 하며, 재결정이 일어나는 경우를 동적재결정(dynamic recrystallization)이라 한다. 또한 이러한 미세조직은 변형후에도 불안정한 상태이기 때문에 압연 스탠드간에 정적회복(static recovery), 정적재결정(static recrystallization), 결정립성장(grain growth)으로 이어지는 조직변화를 겪게된다[1]. 한편, 열간압연중 생기는 미세조직의 변화는 압연후 제품의 기계적 성질(mechanical property)에 큰 영향을 미치고, 제품의 최종 미세조직을 예측하고 이것을 제어하려면 제품의 제조공정, 즉 가열, 열간압연, 냉각과정에서 일어나는 각종 조직변화에 대한 정량적인 기술이 이루어져 공정변수와의 상호관계가 명확하게 밝혀져야 한다. 이를 위해서는 열간에서 이루어지는 다단패스의 압연공정에 대한 체계적이고도 정량적인 공정해석이 필수적이다,

최근들어 미세조직의 제어기술은 열간압연공정설계에 있어서 매우 중요한 부분으로 다루어지고 있으며, 많은 연구가들에 의해 미세조직예측 모델들이 제시되고 있다. 또한 정확한 미세조직제어방법은 많은 소성가공 공정해석에 유용한 결과를 주고 있는 유한요소법을 이용한 컴퓨터시뮬레이션 기술과 결합되어 발전하는 추세에 있다. Pietrzyk(1990)은 압연 스탠드의 출구 단면에서 유한요소해석을 통해 미세조직의 변화를 예측하였고[2], Rantanen et al(1990)은 ABAQUS를 이용해 8패스의 열간압연공정을 해석한후 미세조직변화와 미세조직변화를 고려해 예측된 압연하중을 실제 측정치와 비교하였다[3]. C.Devadas et al(1991)은 Sellars, Nippon Steel, Kawasaki steel, IRSID에 의해 제안된 열간압연시 강(C-Mn steel)에 관한 미세조직 예측용 모델들의 특성을 비교분석 하였다[4]. 이외에도 많은 연구가 진행된바 있으나[5-9], 몇몇 모델들은 스탠드사이에서 생기는 소재내 온도구배를 근사하거나 계산시에 평균온도를 사용하였고 대부분의 경우 미세조직예측 모델의 적용이 스탠드의 출구 단면에 한정되어 있다. 그러나, 실제로 압연도중 정적재결정과 결정립성장은 스탠드와 스탠드사이의 영역에서 연속적으로 일어난다. 따라서, 실제 현상에 보다 근접한 수치적모델의 도출을 위해서는 롤 스탠드뿐만 아니라 롤 스탠드사이의 변화하는 온도와 시간의 고려가 반드시 필요하다.

본 연구에서 사용한 열간압연공정의 모델링 방법은 압연이 진행되는 동안, 압연로울 사이에서는 소재가 거의 동적정상상태(kinematically steady-state condition)를 이룬다고 가정한 후, 압연로울의 전후에 일정한 거리를 두고 검사체적을 설정하여 이를 통과하는 소재에 대해서만 3차원 강소성유한요소법(rigid-plastic finite element method)을 이용해 속도장을 구하고, 이로부터 변형되는 소재의 형상을 구하였다. 열전달해석시에는 압연도중 압연방향으로는 온도구배가 없다고 가정한후, 각 절점이 특정단면에 도달하는 시간을 계산하여 2차원 유한요소법으로 온도분포를 구하였다. 위의 과정을 다단패스의 압연공정에 대해 수행하여 미세조직의 예측에 필요한 가공이력(forming history)을 파악하였다. 즉, Fig.1에 나타낸것 처럼 FEM simulation결과 얻어지는 온도, 변형률, 변형률속도를 시간과 위치의 함수로 기록한 다음 미세조직 예측모델의 입력값으로 이용해 열간압연중 시간과 위치에 따라 정해지는 미세구조를 예측하였다.

2. 미세조직변화 예측방법

2.1 미세조직변화 예측모델

열간압연중 일어나는 미세조직변화를 예측하기 위해서는 회복과 재결정 현상을 기술해야 하며 이로인한 결정립 크기와 잔류 변형률의 양을 예측할 수 있어야 한다. 변형중에 일어나는

동적회복과 동적재결정은 일반적으로 가해진 응력, 온도, 변형률, 변형률속도에 의해 영향을 받으며, 후판압연에서는 압하율이 보통 20% 이하이므로 고온인 경우를 제외하고는 동적재결정이 일어날 가능성이 거의 없으며 가령 일어난다 하더라도 고온에서는 정적재결정이 빠르게 진행되어 스탠드사이의 구간에서 동적재결정 조직은 사라진다. 또한, 열간압연진행중 저온영역의 마무리 압연에서는 동적재결정이 일어나기에 필요한 유동응력의 수준이 높고, 정적재결정이 많은 경우 압연된 제품의 최종 기계적 성질에 영향을 준다.

본 연구에서는 열간압연중 스탠드사이에서 일어나는 정적재결정에 의한 미세조직의 변화를 예측하고자, 현재 널리 사용되고 있는 Sellars, Roberts, Yada 등에 의해 제안된 미세조직예측 모델들을 사용하였다[10-12]. 이 모델들은 C-Mn steel에 적용가능하고 재결정분률(the fraction recrystallized), 정적재결정 입도(static recrystallized grain size), 결정립 성장(grain growth) 등의 식으로 구성된다. 재결정속도에서 얻어지는 재결정분률은 식(1)과 같이 Avrami식 형태를 가지며 시간에 대해 sine곡선의 형태이다.

$$x = 1 - \exp \left[-0.693 \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^k \right] \quad (1)$$

정적재결정의 경우 k 값은 1이 되고 메타재결정(meta-dynamic recrystallization)의 경우는 2가 된다. $t_{0.5}$ 는 50% 재결정이 이루어 지는데 걸리는 시간으로 식(2)와 같이 나타내 진다.

$$\text{Sellars : } t_{0.5} = 2.5 \times 10^{-19} d_o \varepsilon^{-4} \exp(300000 / RT), \quad \varepsilon \leq 0.8\varepsilon_p \quad (2)$$

$$t_{0.5} = 1.06 \times 10^{-5} Z^{-0.6} \exp(300000 / RT), \quad \varepsilon \geq 0.8\varepsilon_p$$

$$\varepsilon_p = 4.9 \times 10^{-4} d_o^{0.5} Z^{0.15}$$

$$\text{Roberts : } t_{0.5} = 5.1 \times 10^{-21} d_o^2 \varepsilon^{-4} \exp(330000 / RT)$$

$$\text{Yada : } t_{0.5} = 2.86 \times 10^{-8} S_v^{-0.5} \varepsilon^{-2} \dot{\varepsilon}^{-0.2} \exp(150000 / RT)$$

$$S_v = \frac{24}{\pi d_o} [0.491 \exp(\varepsilon) + 0.155 \exp(-\varepsilon) + 0.1433 \exp(-3\varepsilon)]$$

정적재결정 완료시의 입경(d_{rex})은 식(3)에 나타난 것과 같이 변형률에 큰 의존성을 가지며, Z (Zener-Hollomon parameter)와 초기입경에 영향을 받는다.

$$\text{Sellars : } d_{rex} = 1.8 \times 10^3 Z^{-0.15}, \quad \varepsilon \geq \varepsilon^* \quad (3)$$

$$\varepsilon^* = 2.8 \times 10^{-4} d_o^{0.67} Z^{-0.15}$$

$$\text{Roberts : } d_{rex} = 6.2 + 55.7 d_o^{0.5} \varepsilon^{-0.65} \exp(-35000 / RT)$$

$$\text{Yada : } d_{rex} = 5 S_v^{-0.6} \varepsilon^{-0.6}$$

$$S_v = \frac{24}{\pi d_o} [0.491 \exp(\varepsilon) + 0.155 \exp(-\varepsilon) + 0.1433(-3\varepsilon)]$$

식(3)에서 Z는 온도와 변형률속도의 함수로 $Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$ 의 관계가 있으며, Q는 활성화에너지, R은 기체상수이다. 결정립의 성장은 100% 재결정이 완료된 후 스탠드사이의 남은 구간에 대

해서 다음 식(4)를 이용해 계산한다.

$$\begin{aligned}
 \text{Sellars : } d^{10} &= d_{rex}^{10} + 3.87 \times 10^{32} t \exp(-400000 / RT), T \geq 1273 \\
 d^{10} &= d_{rex}^{10} + 5.02 \times 10^{53} t \exp(-91400 / RT), T \leq 1273 \\
 \text{Roberts : } d^2 &= d_{rex}^2 + 4.0 \times 10^6 t \exp(-118500 / RT), t \leq 20s \\
 d^2 &= d_{bp}^2 + 1.26 \times 10^8 t' \exp(-172000 / RT), t \geq 20s \quad t' = t - 20s \\
 \text{Yada : } d^2 &= d_{rex}^2 + 1.44 \times 10^{12} t \exp(-266700 / RT)
 \end{aligned} \tag{4}$$

위의 식들은스탠드와 스탠드사이에 생성된 유한요소 모델의 각 절점에서 변형률, 변형률속도, 온도, 시간의 값을 대입해 계산되며, 최종적으로 결정립 크기의 변화가 예측된다. 본 연구에서 스탠드사이의 구간에서 변형률과 변형률속도는 상수로 취급하였고 온도와 시간만이 연속적으로 변화한다고 가정하였다.

2.2 미세조직변화 예측순서

Fig.2에는 미세조직 예측모델의 계산순서를 나타내었고, 앞절에서 설명한 미세조직변화 예측모델을 다단패스의 압연공정에 적용하는 경우 첫번째 스탠드사이 영역에서는 소재 전체에 균일한 초기결정 입도가 지정된다. 각 절점에서 정적재결정 입경, 재결정 분률, 95%재결정에 필요한 시간이 계산된다. 95% 재결정에 걸리는 시간이 스탠드사이의 시간보다 작은 경우 완전재결정(full recrystallization)으로 가정되고 남은 구간에 대해서 결정립 성장이 계산된다. 스탠드간의 시간이 95% 재결정에 걸리는 시간보다 작은 경우에는 부분재결정(partial recrystallization)의 경우로써, 한 절점에서 재결정된 부분과 재결정되지 않은 부분이 동시에 존재 한다고 가정한다. 재결정된 부분은 잔류 변형률을 갖지 않고 재결정된 결정입도를 갖고 있는 반면에 미재결정부분은 잔류 변형률과 초기 결정입도를 갖는 것으로 취급한다. 이 경우 잔류 변형률을 $\epsilon_r = \epsilon(1-x)$ 의 관계를 이용해 계산하고, $d_{eff} = (x)d_{rex} + (1-x)d_o$ 을 이용해 유효결정입도를 계산한다. 계산된 유효결정입도는 다음번 스탠드에서 초기 결정입도로 이용되며, 잔류 변형률은 누적 변형률로 취급되어 다음 스탠드에서 생성된 변형률에 더해진다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 미세조직변화 예측

3.1 평판압연에의 적용

Sellars, Yada, Roberts에 의해 제안된 미세조직예측 모델들의 특성을 살펴보기 위해 두께 250mm에서 20mm로 스탠드사이 시간 19초와 15%의 압하율을 갖는 단순화된 16pass 평판압연공정을 해석하였다. 이 조건은 Sellars가 이용했던 것과 동일한 스케줄이며 문헌[13]에 그 결과가 제시되어 있다. Fig.3에는 초기결정입도 300 μ m와 초기온도 1180 $^{\circ}$ C인 경우에 예측된 결정입도 변화를 나타내었다. 결정입도는 압연방향에 수직한 단면위의 절점에서 계산된 각각의 결정입도의 평균치를 사용하였다. 압연초기에 높은 온도에서 재결정이 빠르게 이루어졌고 결정립이 성장되었음을 알 수 있다. 이같은 경향은 압연이 진행되면서 온도가 낮아짐에 따라 둔화되고 있다. Sellars의 모델로 예측된 최종 결정입도는 20 μ m로 Yada와 Roberts의 40 μ m에 비해 작은 값을 나

타내었다.

초기 결정입도의 영향을 관찰하기 위해 초기결정립의 크기를 $1000\mu\text{m}$ 로 가정한 경우 Fig.4에 나타난 것과 같이 첫번째 스탠드후 결정입도가 크게 감소하였으나 7번째 스탠드를 지나면서부터 초기 결정입도의 차이에 의한 영향이 사라지고 나머지 구간에 대해서는 Fig.3과 비슷한 경향을 보이고 있다. 최종 예측된 결정입도는 $20\text{-}40\mu\text{m}$ 정도로 초기결정입도 $300\mu\text{m}$ 때와 비슷한 결과를 나타내었다. Fig.5에는 초기온도를 1180°C 에서 1280°C 로 높인 경우, 빠른 결정립 성장과 16번째 스탠드후에도 여전히 높은 온도의 영향으로 초기온도 1180°C 일때 보다 큰 결정립 크기인 $40\text{-}60\mu\text{m}$ 정도가 예측되었다.

3.2 형상압연에의 적용

평판압연 해석에 적용했던 모델중 Sellars의 모델을 이용해 산업용 6 패스의 형상압연 스케줄에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 전체 6패스의 단면 모습이 Fig.6에 나와 있고 소재의 재질은 AISI 1117(C-Mn steel grade), 초기온도 1148°C , 스탠드간의 거리는 6.1m 이다. 롤의 회전속도를 알고 있으므로 스탠드사이의 시간을 계산하였고 실제 공정에서 스탠드간의 냉각은 없었다.

Fig.7은 전체압연도중 예측된 결정입도의 변화 추이를 보여 준다. 초기결정입도 $300\mu\text{m}$ 는 압연이 진행되면서 미세화되고 있으며, 스탠드 구간 1,2,3,4에서는 100% 재결정이 완료된후 결정립이 성장하고 있는 반면 스탠드 구간 5,6에서는 부분재결정이 관찰되었다. Fig.8을 참조하면 스탠드 구간 1,2에서 온도가 낮아진 것을 알 수 있는데, 이 구간에서 시간이 30-40초 정도로 상대적으로 크기 때문이다.

3.2.1 스탠드간에 예측된 미세조직의 분포

Fig.9와 Fig.10에는 유한요소 해석결과 예측된 스탠드1과 스탠드2에서의 변형된 소재내 온도분포가 각각 출구와 입구쪽에서 본 그림으로 나타나 있고, Fig.11에는 스탠드 1과 2사이 구간에서 열전달해석에 의해 얻어진 소재내 온도분포가 나타나 있다. 스탠드 1에서 관찰된 물쪽으로의 열전달로 인한 심한 온도구배가 사라지고, 내부로부터의 전도열전달로 인해 표면온도는 증가하였다.

Fig.12, Fig.13, Fig.14에는 각각 첫번째 스탠드 사이 구간에서 예측된 소재내 결정입도, 재결정 분률, 잔류 변형률의 분포가 나타나 있다. 소재의 중앙부분에서 초기 $300\mu\text{m}$ 의 결정립은 $120\mu\text{m}$ 정도로 예측되었고 재결정 분률은 1.0에 가까운 값을 갖으므로 100% 재결정이 일어난 것으로 보인다. 그러나, 롤과 접촉했던 표면부분에서는 물쪽으로의 열손실로 인해 $150\mu\text{m}$ 이상의 결정립과 0.9정도의 재결정 분률을 나타낸다. 약간의 잔류 변형률이 예측되었으나 거의 모든 부분에서 재결정이 이루어진 것으로 보인다.

Fig.15는 4번째 스탠드 사이 구간에서 결정입도의 분포를 나타내었고, 결정립성장을 관찰하기 위해, 평균결정립의 크기가 가장 작게 예측된 14번째 단면과 마지막 단면인 20번째 단면에서의 결정입도 분포를 Fig.16과 Fig.17에 각각 나타내었다. 소재의 표면쪽에서는 미세한 변화만이 관찰된 반면 중앙부분에서 결정입도 $40\mu\text{m}$ 인 영역이 확대되었음을 알 수 있는데 이부위의 온도가 높기때문에 빠른 속도로 결정립이 성장했기 때문이다.

Fig.18에는 마지막 스탠드를 지난후 단면에서 예측된 결정입도 분포를 나타내었다. 표면에서 $15\mu\text{m}$ 정도로 중앙부분의 $35\mu\text{m}$ 보다 미세하게 예측되었는데 중앙부분 온도가 1100°C 로 표면

의 900°C보다 200°C정도 높기 때문에 온도차이에 의한 결정립성장속도의 영향이 크기 때문이다. 중앙부분의 거친 오스테나이트 결정입도는 냉각시 거친 퍼얼라이트 조직으로 상변태를 하게 되고, 결정립이 큰 경우에는 항복강도가 낮기 때문에 압연후 내부의 강도가 표면보다 낮을 것이라고 예측할 수 있다.

Fig.19와 Fig.20에는 최종적으로 예측된 재결정분률과 잔류 변형률의 분포를 나타내었다. 6번째 스탠드에서 롤과 접촉했던 위,아래 표면에서 재결정분률 0.25-0.5 정도를 갖고 이 부위에서 부분재결정으로 인해 중앙의 0.25 보다 큰 0.75정도의 잔류 변형률이 발생함을 알 수 있다.

3.2.2 가공이력에 따른 국부 미세조직의 변화

Fig.21에는 다단열간압연중 소재내 특정질점(material point)이 겪는 가공이력(forming history)을 파악하기 위한 지점의 위치를 나타내었다. Fig.22의 온도변화곡선을 보면 중앙부분의 3점 B,C,D는 적은 열손실과 소성일로 인해 높은 온도수준을 유지하고 있으나, 바깥쪽에 위치한 A,E,F의 경우는 압연스케줄에 따라 심한 온도변화를 겪고 있다. 부분재결정이 생기는 경우 축적되는 잔류 변형률의 변화는 F점이 가장 크므로 이점에서 완전재결정이 일어나지 않음을 알 수 있고, 중앙부분의 C점에서는 마지막 두 스탠드를 제외한 모든 스탠드 구간에서 100% 재결정이 일어남을 알 수 있다.

Fig.23에서 F점은 잔류변형률이 축적됨에도 불구하고 낮은 온도로 인해 계속해서 0.2전후의 낮은 재결정분률을 나타낸다. 결정입도의 변화는 Fig.24에 나타나 있고 초기결정입도 300 μm 은 6지점에서 모두 20-40 μm 정도의 크기를 갖게된다.

5. 결론

열간압연중 발생하는 미세조직변화를 예측하기 위해 강소성유한요소법을 이용해 전체공정중에 변화하는 소재내 온도, 변형률, 변형률속도의 이력을 파악하였고, 이를 여러 연구자에 의해 제안된 미세조직예측모델의 입력값으로 사용하여 다단열간압연중 발생하는 미세조직변화를 예측하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Sellars, Yada, Roberts에 의해 제안된 미세조직예측 모델을 단순화된 평판압연공정에 적용하여 문헌의 결과와 비교하였다. 소재의 초기온도는 미세조직변화에 뚜렷한 영향을 주는 반면 초기결정입도의 차이는 영향을 주지 못하였다.

(2) 3차원 강소성유한요소법에 의한 정상상태 변형해석과 2차원 열전달해석으로 다단열간압연공정을 해석하였고, 해석결과 얻어지는 정보를 이용해 시간의 경과에 따른 미세조직변화와 소재내 미세조직분포를 예측하였다.

(3) 소재내 특정질점이 겪는 가공이력을 파악한뒤, 국부적인 미세조직 변화를 예측하였고 형상 압연의 경우 소재내의 온도구배로 인해 중앙부분과 표면에서의 20 μm 정도의 입경차이가 생김을 알 수 있었다.

위의 해석결과로 예측된 압연공정중의 미세조직변화의 파악은 공정설계자에게 유용한도

음을 줄 수 있는 자료로 활용될 수 있으며, 제조과정중에 얻어진 미세조직과 기계적성질의 상호 관계가 밝혀지면 이로부터 최종제품의 기계적성질을 예측할 수 있다. 본 연구에 사용된 해석방법은 국부적인 평균값을 이용한 계산시에 발생할 수 있는 오차를 지양할 뿐만 아니라, 신속하고도 저렴한 비용으로도 공정변수가 미세조직 변화에 미치는 영향을 손쉽게 파악할수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] T. H. Courtney, Mechanical Behavior of Materials, McGraw-Hill, Inc., pp. 309-319, 1990
- [2] M. Pietrzyk, Finite element based model of structure development in the hot rolling process, steel research 61, No.12, 1990
- [3] A. S. Korhonen, A. Rantanen, and J. Larkiola, Microstructural Evolution During Hot Rolling, Annals of the CIRP, January, Vol.40, 1991
- [4] C.Devadas, I.V. Samarasekera, and E.B. Hawbolt, The Thermal and Metallurgical State of Steel Strip during Hot Rolling: Part III. Microstructural Evolution, Metallurgical Trans., Vol. 22A, Feb., 1991
- [5] S. Saimoto and R.G. Kamat, Microstructure and texture evolution in hot rolled AA 3004 aluminium alloy, Material Science and Technology October Vol.8, 1992
- [6] C.L. Davis and J.E. King, Effect of cooling rate on intercritically reheated microstructure and toughness in high strength low alloy steel, Material Science and Technology January Vol. 9, 1993
- [7] T. Gladman, Deformation and recrystallization of steels, Material Science and Technology November Vol. 6, 1990
- [8] K. Karhausen and R. Kopp, Model for integrated process and microstructure simulation in hot forming, Steel research 63 No. 6, 1992
- [9] A. Rantanen, M. Malinen and A. S. Korhonen, Prediction, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, 1990
- [10] J. J. Jonas, Microstructural evolution during hot rolling, Int. Symposium on mathematical modelling of hot rolling of steel, 1990
- [11] A. Laasraoui, J.J. Jonas and D. L. Baragar, Computer modelling - An efficient tool for the steel industry, Int. Symposium on mathematical modelling of hot rolling of steel, 1990
- [12] C. M. Sellars, Modeling microstructural development during hot rolling, Material Science and Technology November Vol. 6 1990
- [13] C. M. Sellars and J. A. Whiteman, Recrystallization and grain growth in hot rolling, Metal Science, March-April, pp. 187-194, 1979

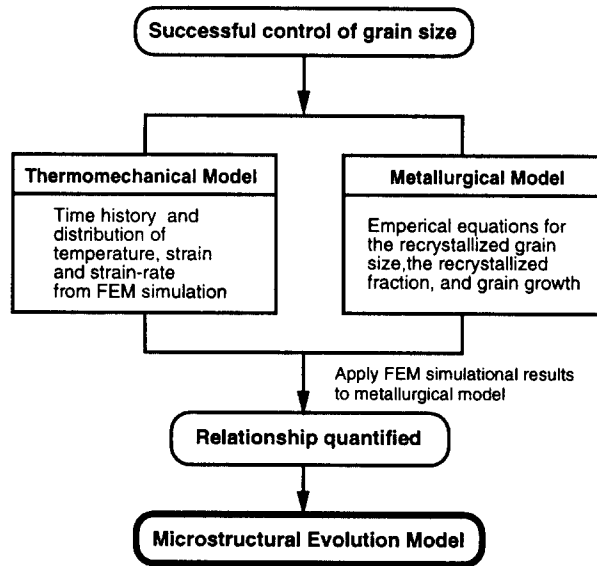


Fig.1 Calculational procedure for static recrystallization

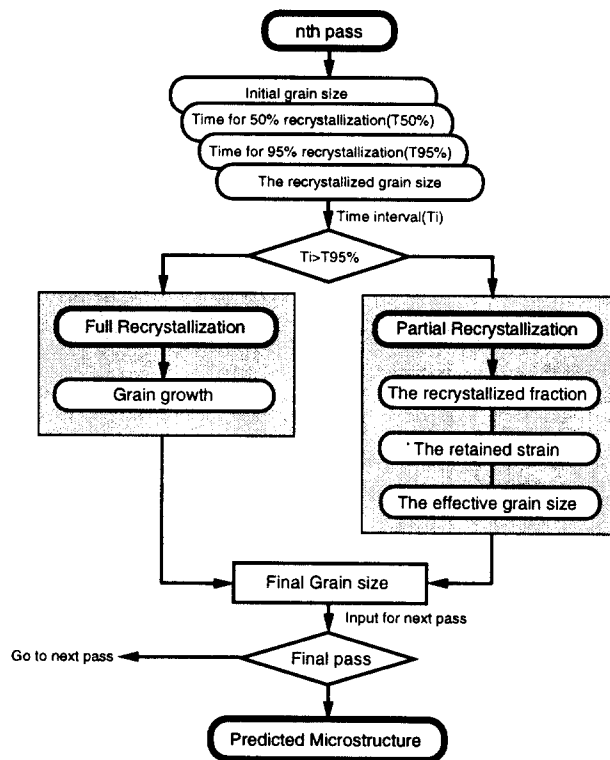


Fig.2 Model of microstructural evolution

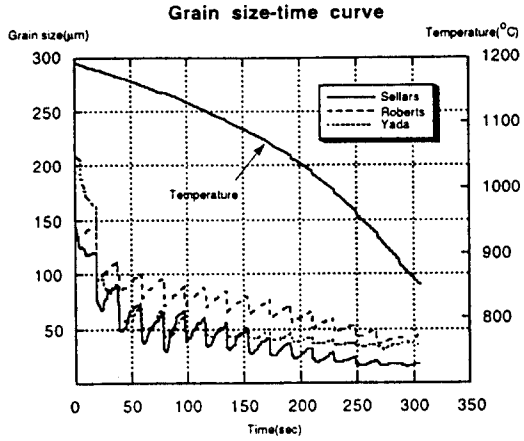


Fig. 3 Calculated grain size-time curve when $d_0=300\mu\text{m}$.

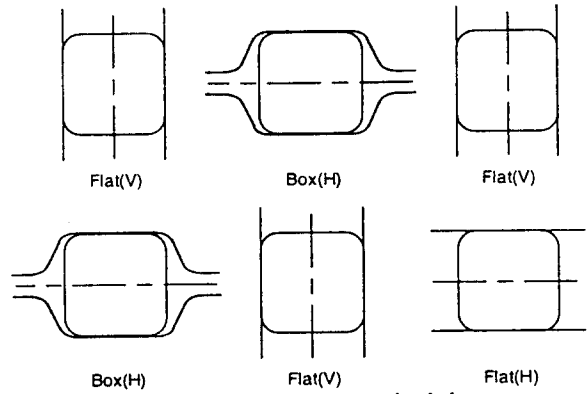


Fig. 6 Six pass rolling schedule

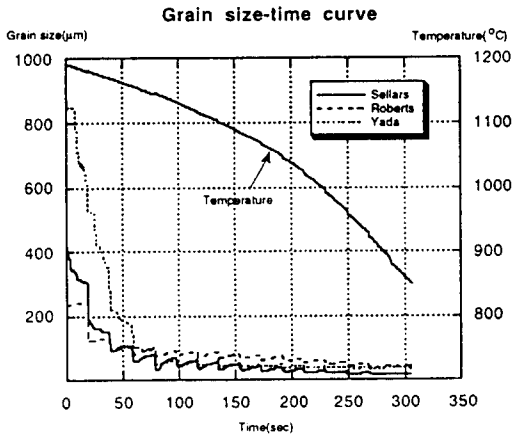


Fig. 4 Calculated grain size-time curve when $d_0=1000\mu\text{m}$.

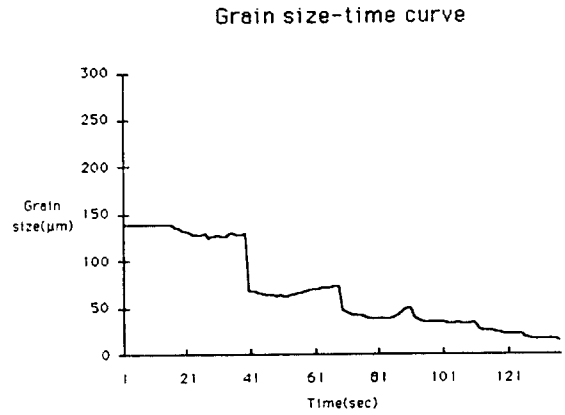


Fig. 7: Average grain size-time curve

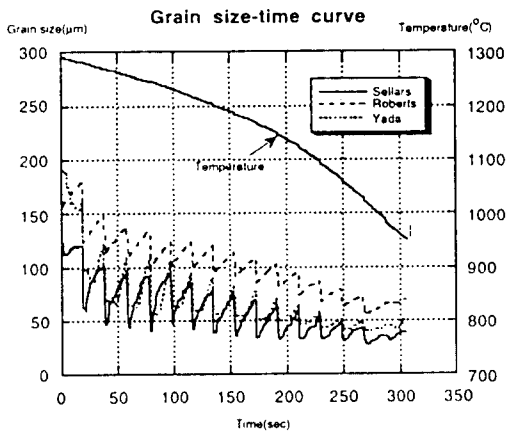


Fig. 5 Calculated grain size-time curve when the reheating temp.=1280°C.

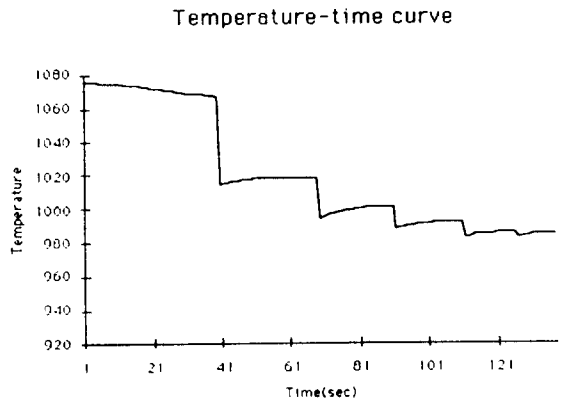


Fig. 8: Average temperature-time curve

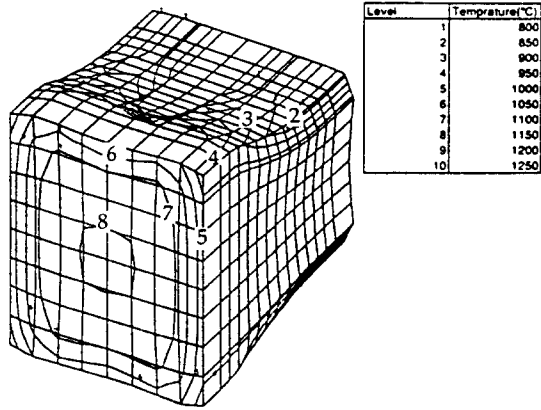


Fig. 10 Temperature distribution in the roll bite of stand 2.

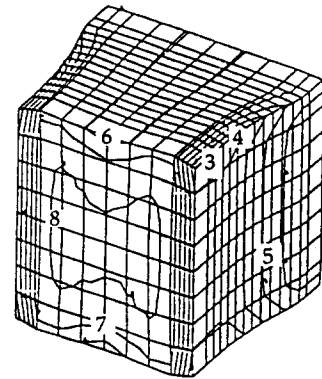


Fig. 9 Temperature distribution in the roll bite of stand 1.

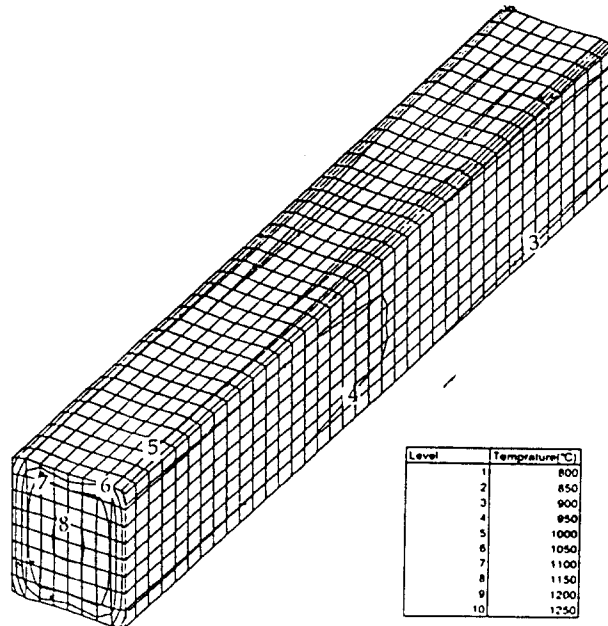


Fig. 11 Temperature distribution between stand 1 and stand 2.

Level	Grain size(μ m)
1	84
2	120
3	158
4	194
5	231

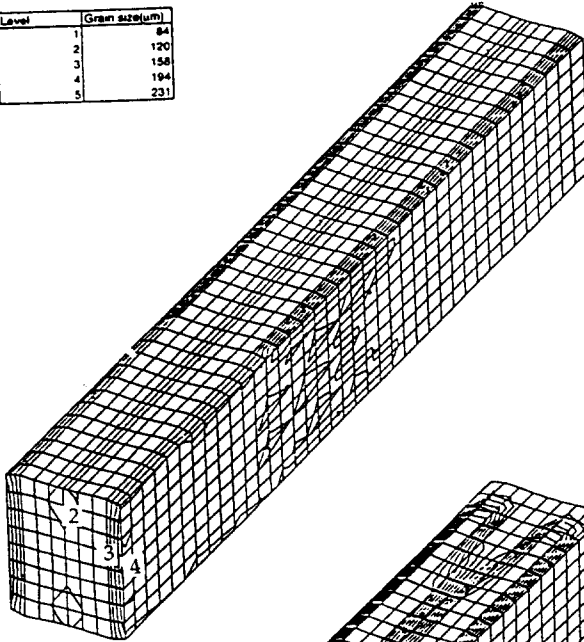
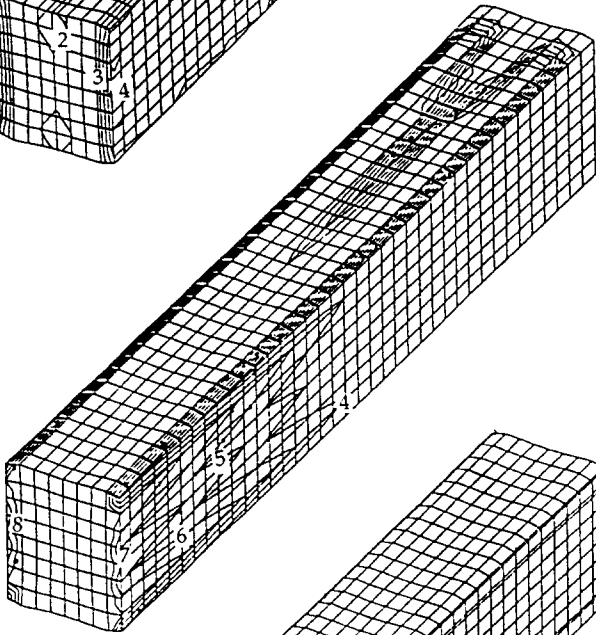
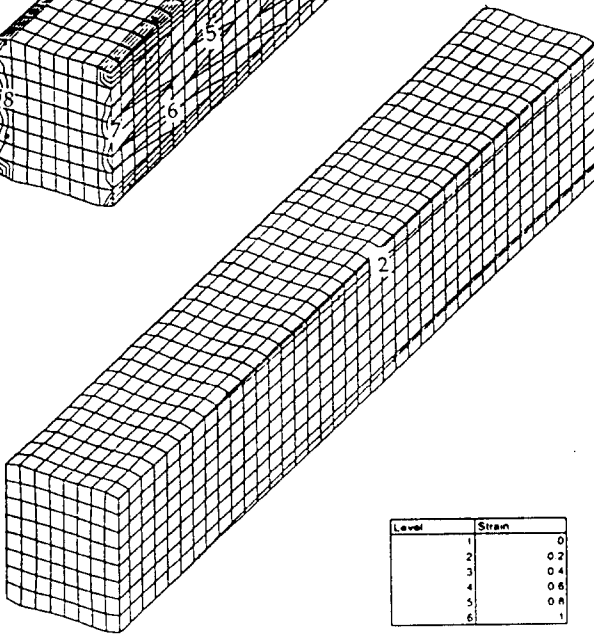


Fig.12 Recrystallized grain size distribution between stand 1 and stand 2.



Level	x
1	0.3
2	0.4
3	0.5
4	0.6
5	0.7
6	0.8
7	0.9
8	1

Fig. 13 Fraction recrystallized distribution between stand 1 and stand 2.



Level	Strain
1	0
2	0.2
3	0.4
4	0.6
5	0.8
6	1

Fig. 14 Retained strain distribution between stand 1 and stand 2.

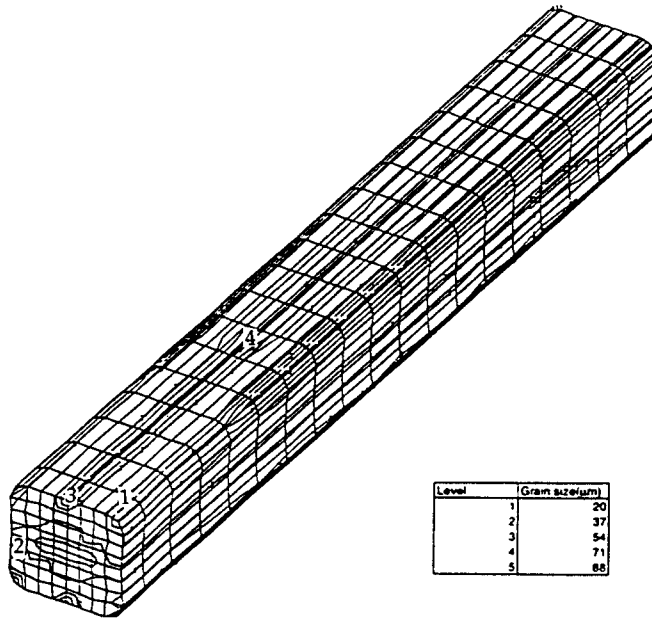


Fig. 15 Recrystallized grain size distribution between stand 4 and stand 5.

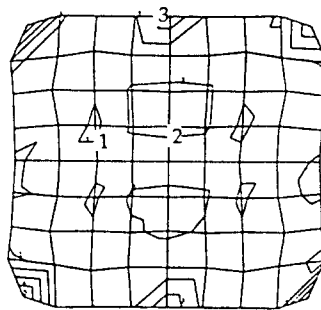


Fig.16 Recrystallized grain size distribution on the 14th cross-section during the interstand 4.

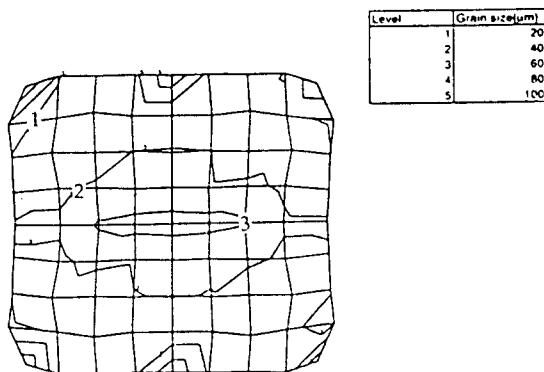


Fig. 17 Recrystallized grain size distribution on the exit cross-section during the interstand 4.

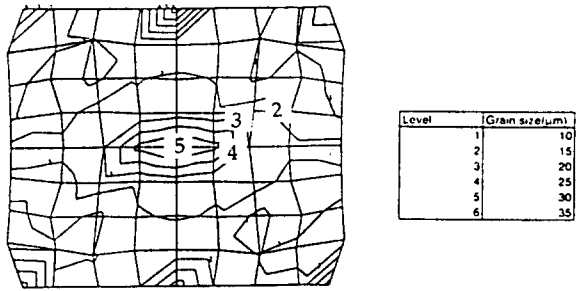


Fig. 18 Recrystallized grain size distribution on the exit cross-section after final pass.

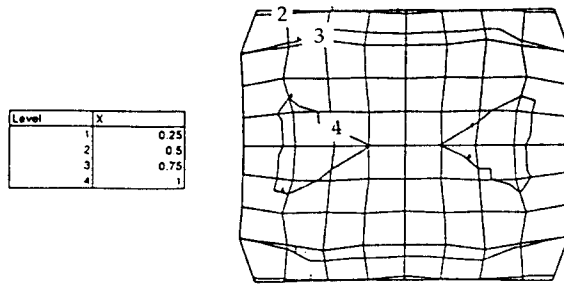


Fig. 19 Fraction recrystallized distribution on the exit cross-section after final pass.

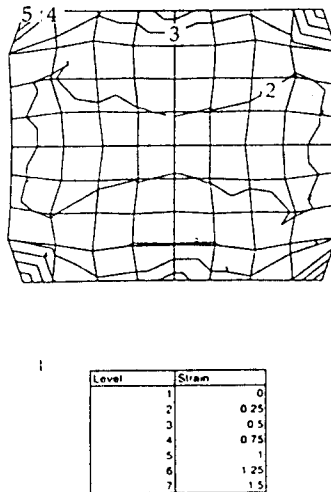


Fig. 20 Retained strain distribution on the cross-section after final pass.

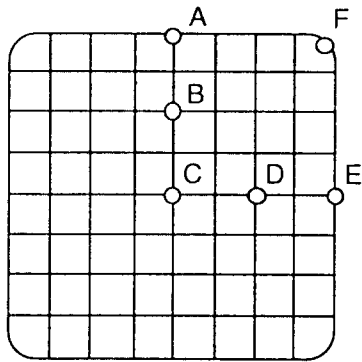


Fig. 21 Initial time history tracing points on workpiece.

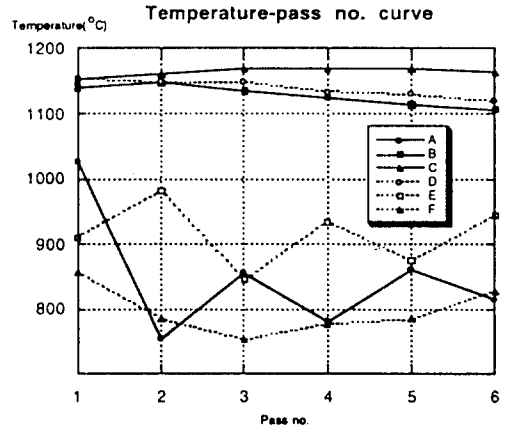


Fig. 22 Temperature-pass no. curve

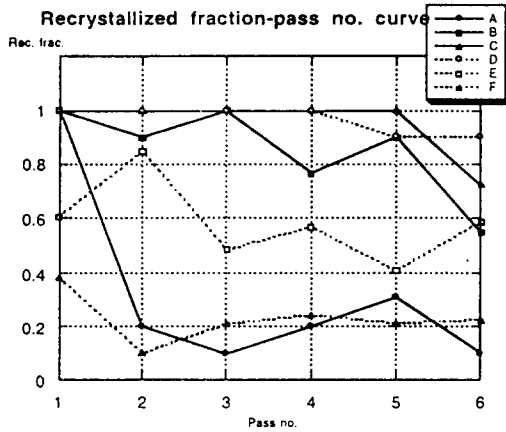


Fig. 23 Fraction recrystallized-pass no. curve

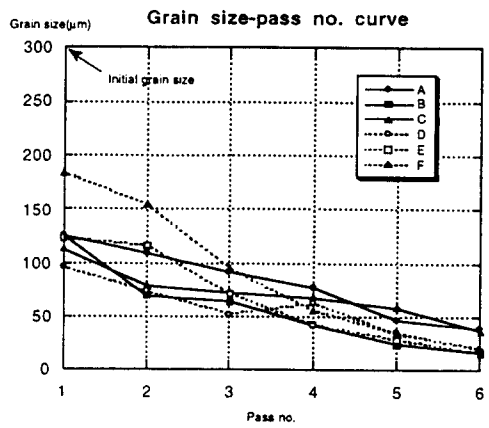


Fig. 24 Grain size-pass no. curve