

Waspaloy의 열간 단조 공정중 재결정 거동과 결정립 성장에 대한 유한요소해석

강경필[#] · 이경훈¹ · 이승욱²

Computer Simulation of Recrystallization and Grain Growth during Hot Forging Process of Waspaloy

G. P. Kang, K. H. Lee, S. U. Lee

(Received October 11, 2007)

Abstract

Computer simulation of microstructure evolution during hot forging process is of great interest in recent years. Recrystallization model and grain growth model which use a phenomenological approach were summarized. The upsetting and cogging processes of waspaloy were simulated using DEFORMTM and the change in grain size were investigated in each deformation procedure.

Key Words : Microstructure Evolution, Grain Growth, Recrystallization, Hot Forging, Computer Simulation

1. 서 론

항공우주용 부품, 가스터빈, 열교환기 부품 등 700도 이상의 고온조건에서 사용되는 부품들은 고온에서의 피로강도, 크립 특성이 중요한 문제이다. 터빈엔진 디스크의 경우 허브(hub)에서는 크랙 발생(crack initiation)을 방지하기 위해서 결정립의 크기(grain size)가 작아야 하나 림(rim) 부위에서는 크립저항성(creep resistance)과 관련하여 결정립의 크기가 클 것이 요구된다. 이와 같이 원하는 미세조직 분포를 얻기 위해 잉곳은 빌렛으로 단조되고, 다시 업세팅, 형단조 등의 성형과정과 용체화처리 및 시효처리 등 열처리 과정을 거치게 된다.

금속은 가공열처리(thermo-mechanical) 공정을 거치며 전위구조가 형성되고, 여기에 저장된 에너지가 동적회복과 동적재결정을 가져오는 구동력이 된다. 재결정 과정은 전위가 없는 결정립의 핵생성과 이후의 핵의 성장을 포함하며 재결정 과정

이 끝나면 더욱 안정한 상태를 만들기 위해 결정립의 성장, 즉 결정립계의 면적이 줄어들며 에너지 준위도 낮아지게 된다. 최종 제품에서의 결정립 크기의 분포에 대한 예측을 위해서는 제조과정(빌렛 제조, 최종 단조, 열처리 등을 포함)에서의 미세조직의 변화를 나타내는 동역학(kinetics)에 대한 이해가 필요하다. 미세조직 변화의 제어를 위한 공정설계의 필요성에 기존의 금속유동에 대한 모델링에서 벗어나, 근래에는 열간압연공정 중 미세조직 변화에 대한 재결정 모델이 제시되었고, 성형해석과 함께 재결정과 결정립의 성장에 대한 전산모사해석이 이루어지고 있다.

기존 열간압연공정에서의 미세조직변화에 대한 유한요소해석은 공정자체가 단조공정에 비해 단순할 뿐만 아니라 정상상태 가정이 가능하여 자유단조공정보다 전산모사가 용이하였다. 본 논문에서는 재결정과 결정립 성장에 대한 모델을 정리하고, 3차원 유한요소코드(DEFORMTM-3D, -HT)에

1. ㈜마케팅랩
2. 포스코특수강주식회사 기술연구소 연구개발그룹
교신저자 : ㈜마케팅랩, E-mail: kkpil@deform.co.kr

서 waspaloy에 대한 대형 잉곳 업세팅과 코킹 공정에서의 미세조직 변화를 살펴보도록 한다.

2. 재결정 및 입자 성장 모델

2.1 재결정 거동의 분류[1~5]

재결정 거동은 다음과 같이 3개의 큰 카테고리 로 분류할 수 있다.

- 정적 재결정(SRX) : 변형율이 임계변형율 (critical strain) ϵ_c 이하인 경우에 변형공정후 발생하는 재결정으로 핵이 없는 환경에서 재결정이 시작된다.
- 준동적 재결정(MRX): 변형율이 임계변형율보다 큰 경우에 발생하며 변형공정후 발생하는 재결정으로 재결정이 시작될 때 결정핵이 존재한다.
- 동적 재결정(DRX): 변형율이 임계변형율을 초과하는 경우로 재결정이 변형공정중에 발생한다.

초합금(superalloy)의 미세조직의 변화는 γ' , γ'' , δ 상 등의 석출에 의해 보다 복잡한 양상을 나타내지만 여기에 사용된 모델은 현상학적 접근법 (phenomenological approach)으로 그러한 상들이 미세조직의 변화에 미치는 영향을 무시하고 있으며 아래에서 보다 구체적으로 살펴본다.

2.1.1 정적 재결정(SRX)

변형공정이 끝나고, 변형율 속도가 $\dot{\epsilon}_{SS}$ 이하인 경우는 정적 재결정이 시작된다. 재결정된 체적분율(X_{srx})과 시간과의 관계에 대한 재결정 동역학 모델은 수정된 Avrami equation을 따른다. 재결정된 결정립의 크기(d_{srx})는 초기 결정립의 크기(d_0), 변형율(ϵ), 변형율속도($\dot{\epsilon}$) 그리고 온도(T)의 함수로 표현할 수 있다. $t_{0.5}$ 는 50%가 재결정하는데 소요되는 시간이다.

$$\dot{\epsilon}_{SS} = A \exp(b_1 - b_2 d_0 - Q_2 / T) \quad (1)$$

$$X_{srx} = 1 - \exp\left[-\beta_s \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{k_s}\right],$$

$$t_{0.5} = a_3 d_0^{h_3} \epsilon^{n_3} \dot{\epsilon}^{m_3} \exp(Q_3 / RT) \quad (2)$$

$$d_{srx} = a_6 d_0^{h_6} \epsilon^{n_6} \dot{\epsilon}^{m_6} \exp(Q_6 / RT) + c_6 \quad (3)$$

2.1.2 준동적 재결정(MRX)

준동적 재결정 과정은 정적 재결정 과정과 유사하나, 변형율속도가 $\dot{\epsilon}_{SS}$ 이상인 경우 시작하게 된다는 점과 재료상수에 있어 차이가 있다.

$$X_{mrx} = 1 - \exp\left[-\beta_m \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{k_m}\right],$$

$$t_{0.5} = a_4 d_0^{h_4} \epsilon^{n_4} \dot{\epsilon}^{m_4} \exp(Q_4 / RT) \quad (4)$$

$$d_{mrx} = a_7 d_0^{h_7} \epsilon^{n_7} \dot{\epsilon}^{m_7} \exp(Q_7 / RT) + c_7 \quad (5)$$

2.1.3 동적 재결정(DRX)

동적 재결정은 변형율이 임계변형율보다 큰 경우 발생하게 되며 그 값은 일반적으로 최대유동 응력이 발생할 때(이후 동적 재결정이 시작되며 연화됨)의 변형율 값인 ϵ_p 와 연관된다. 동적 재결정 과정은 원칙적으로 전위의 발생과 재결정에 의한 소멸이 동시에 발생하는 복잡한 과정이나 현상학적 접근에 의해 변형율, 변형율속도, 온도, 초기 결정립 크기의 Avrami equation으로 나타낼 수 있다. $\epsilon_{0.5}$ 는 50%가 재결정할 때의 변형율이다.

$$\epsilon_p = a_1 d_0^{n_1} \dot{\epsilon}^{m_1} \exp(Q_1 / RT) + c_1, \quad \epsilon_c = a_2 \epsilon_p \quad (6)$$

$$X_{drc} = 1 - \exp\left[-\beta_d \left(\frac{\epsilon - a_{10} \epsilon_p}{\epsilon_{0.5}}\right)^{k_d}\right] \quad (7)$$

$$\epsilon_{0.5} = a_5 d_0^{h_5} \epsilon^{n_5} \dot{\epsilon}^{m_5} \exp(Q_5 / RT) + c_5 \quad (8)$$

$$d_{drc} = a_8 d_0^{h_8} \epsilon^{n_8} \dot{\epsilon}^{m_8} \exp(Q_8 / RT) + c_8 \quad (9)$$

모델링 관점에서, 변형공정 중 동적 재결정 거동을 예측하기는 어려우므로, 실제로는 변형과정 중의 평균온도와 변형율속도를 입력으로 하여 미소변형 후마다 계산된다.

2.2 결정립의 성장

결정립의 성장은 재결정이 일어나기 전이나, 재결정이 완료된 후 변형이 없는 상태에서 발생하는 것으로 결정립계 에너지의 감소분이 결정립의

성장을 일으키는 구동력이 된다. 결정립계에 작용하는 구동 압력(driving pressure)은 결정립의 평균 직경에 반비례한다는 가정하에 다음과 관계식이 유도되어 널리 사용되고 있다[6].

$$d_{gg} = \left[d_0^n + a_0 t \exp\left(-\frac{Q_0}{RT}\right) \right]^{1/n} \quad (10)$$

3. 유한요소해석

3.1 재료물성과 유한요소모델

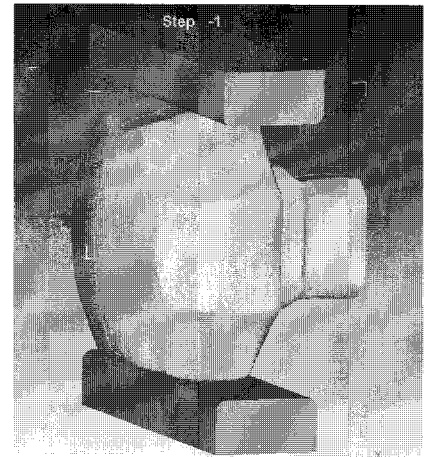
해석에 사용된 미세조직 변화 모델의 물성치는 Shen의 논문[7]과 DEFORM™ 에서 인용하였으며 Table 1에 보였다. 성형해석은 상기 재결정 모델을 적용한 DEFORM™-3D, -HT를 사용하였다. 대형 잉곳의 업세팅과 코깅을 위한 금형과 소재의 배치는 Fig.1에 나타내었는데, 업세팅 공정은 소재높이의 50%까지 진행하였으며, 코깅공정은 업세팅된 소재의 직경에 대해 약 10% 압하량으로 진행하였다. 재결정 해석은 잉곳의 그립(grip) 성형이후인 업세팅과 코깅공정에서만 수행하였고, 업세팅 공정전에 결정립의 크기는 임의로 39μm로 초기화하였다.

Table 1 Microstructure evolution model data of waspaloy

a_1	0.000538	n_1	0.54
m_1	0.106	Q_1	49610
a_2	0.83	Q_2, b_1, b_2, c_1	0
a_3, a_4	4.54E-5	h_3, h_4	0.51
n_3, n_4	-1.28	m_3, m_4	-0.073
Q_3, Q_4	80690	$\beta_s, \beta_m, \beta_d$	0.6931
k_s, k_d	2	k_m	1
a_6, a_7	14.56	h_6, h_7	0.33
n_6, n_7	-0.44	m_6, m_7	-0.026
Q_6, Q_7	-2098	c_6, c_7	0
a_5	0.056	h_5	0.32
n_5, a_{10}, c_5	0	m_5	0.03
Q_5	14040	m	3
a_9	2E26	Q_9	595000



(a) Upsetting process

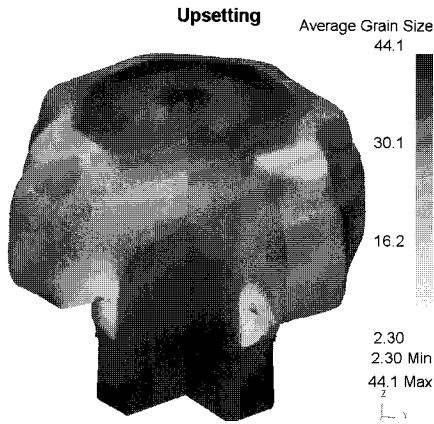


(b) Cogging process

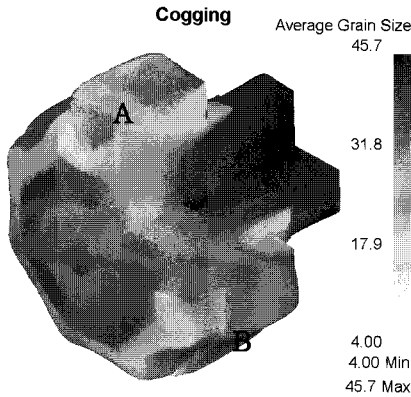
Fig. 1 Tool set-up for upsetting and cogging of waspaloy ingot

3.2 해석결과 및 고찰

Waspaloy에 대한 미세조직 변화를 관찰하기 위해 대형 잉곳의 업세팅 공정과 코깅 공정중의 재결정 거동을 유한요소해석을 통해 경향을 살펴보았다. 업세팅 공정에서의 그립부는 변형량이 적어 결정립의 성장이 지배적이므로 결정립의 크기가 커졌으나, 변형량이 많은 부분일수록 동적 재결정이 지배적으로 발생하여 결정립의 크기가 감소하고 있음을 Fig.2 a)를 통해 확인할 수 있다. 코깅에 있어서는 Fig.2 b)에서 A부분만이 성형되었고, 성형되지 않은 B부분과 비교하여 동적재결정에 의한 결정립 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있다 (A: 15.9μm, B: 33.1μm).



a) Upsetting process (50% reduction)



b) Cogging process (10% reduction in diameter)

Fig. 2 Average grain size distribution for upsetting and cogging of waspaloy ingot

4. 결론

재결정 과정과 결정립 성장에 대해 현상학적 접근법에 의한 모델을 정리하였고, 이를 적용한 유한요소해석 프로그램(DEFORMTM)을 사용하여 대형 잉곳의 업세팅과 코깅 공정에서의 결정립의 변화과정을 살펴보았다. 본 논문에서 소개한 재결정과 결정립 성장에 관한 모델의 타당성은 이미 실험결과와 비교·검토되어왔다[8~9]. 마찰거동의

정확한 모사, 유동응력의 정확한 데이터, 물체간 접촉열전달 계수 등의 적합한 입력값이 주어진다 면 실제와 근접한 해석결과를 얻을 수 있을 것이며, 앞으로는 단순한 금속유동에 대한 성형해석에서 벗어나 전산모사를 통해 바람직한 미세조직 분포를 제어할 수 있는 공정설계가 일반화될 것이다.

참고 문헌

- [1] M. Avrami, 1939, J. Chem. Phys., Vol. 7, p. 1103.
- [2] I. V. Samarasekera, D. Q. Jin, J. K. Brimacombe, 1997, The Application of Microstructural Engineering to the Hot Rolling of Steel, 38th MWSP Conf. Proc., ISS, Vol. XXXIV, pp. 313~326.
- [3] G. Shen, S. L. Semiatin, R. Shivpuri, 1995, Modeling Microstructure Development during the Forging of Waspaloy, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 26A, pp. 1795~1803.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, 1996, Recrystallization, Related Annealing Phenomena, (Oxford, England: Pergamon Press, Elsevier Ltd.), pp. 363~392.
- [5] J. G. Byrne, 1965, Recovery, Recrystallization, Grain Growth, (New York: Macmillan), pp. 93~109.
- [6] J. E. Burke, D. Turnbull, 1952, Prog. Metal Phys., Vol. 3, pp. 220.
- [7] G. Shen, 1994, Modeling Microstructural Development during the Forging of Waspaloy, (Ph. D. Thesis, The Ohio State University, Columbus, Ohio).
- [8] D. Huang, W. T. Wu, D. Lambert, S. L. Semiatin, 2001, Computer Simulation of Microstructure Evolution During Hot Forging of Waspaloy and Nickel Alloy 718, Proceedings of the 2001 TMS Fall Meeting on Microstructural Modeling and Prediction during Thermomechanical Processing, pp. 137~146.
- [9] D. Y. Kim, J. J. Park, 1998, Prediction of Recrystallization Behavior in a Steel Billet during Hot Forging, Metal Mater. Inter., Vol. 4, pp. 760~764.