



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0125759
(43) 공개일자 2024년08월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G16C 60/00 (2019.01) G16C 20/30 (2019.01)
G16C 20/80 (2019.01)
(52) CPC특허분류
G16C 60/00 (2019.02)
G16C 20/30 (2019.02)
(21) 출원번호 10-2023-0017645
(22) 출원일자 2023년02월09일
심사청구일자 2023년02월09일

(71) 출원인
경상국립대학교산학협력단
경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)
(72) 발명자
전만수
경상남도 진주시 에나로 100, 휴엔인 엘리시움아파트 102동 1301호
모하마드카스완디라자리
경상남도 진주시 가좌길29번길 78
(74) 대리인
특허법인 태웅

전체 청구항 수 : 총 10 항

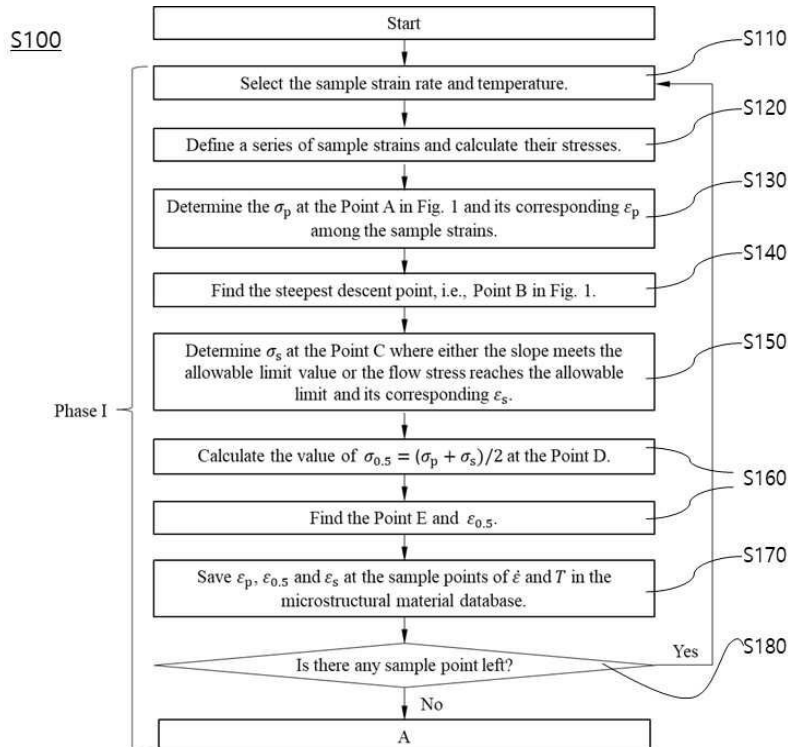
(54) 발명의 명칭 미세구조 예측을 위한 동적 재결정 파라미터의 직접적인 산출 방법

(57) 요약

본 발명의 파라미터 산출 방법은, 일반적이고 개선된 C-m 모델 등을 비롯한 고정도의 유동 계량화 방법을 사용하여 유동곡선을 얻고, 그것으로부터 유동 관련 DRX 운동 파라미터를 직접 계산하는 새로운 방법을 제시할 수 있다.

(뒷면에 계속)

대표도 - 도2



본 발명의 파라미터 산출 방법은, 소정의 변형률속도(strain rate) 및 온도에서, 시편의 최대 변형률(peak strain) 및 절반 변형률을 산출하는 제1 단계, 제1 단계의 최대 변형률 및 절반 변형률을 이용하여, 동적 재결정 분율(dynamic recrystallization fraction), 및 상기 동적 재결정 분율로부터 계산되는 상기 시편의 결정립 크기를 예측하는 제2 단계를 포함할 수 있다.

본 발명의 동적 재결정 분율은 시편의 소성 변형후 결정립이 재결정화되는 정도를 나타낼 수 있고, 최대 변형률은 시편의 유동곡선에서 최대 유동 응력(peak stress)에 대응하는 변형률일 수 있으며, 절반 변형률은 시편의 유동곡선에서 동적 재결정(DRX)이 50% 진행된 상태의 유동 응력에 대응하는 변형률일 수 있다.

(52) CPC특허분류

G16C 20/80 (2019.02)

이요셉

경남 진주시 상대동 307-30 201호

(72) 발명자

김민철

경상남도 진주시 정촌면 삼일로 13, 진주 우방아이
유셀 105동 1901호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415177788
과제번호	P0011877
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술진흥원
연구사업명	산업기술국제협력(R&D)
연구과제명	마그네슘 단조 공정 중 기계금속학적 예측 모듈 개발 및 전기자동차용 마그네슘 단조공정의 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	(주)엠에프알씨
연구기간	2021.01.01 ~ 2021.11.30

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415179338
과제번호	10081334
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술평가관리원
연구사업명	혁신성장동력프로젝트(산업부)(소특회계)
연구과제명	700oC이하 온간성형공법 활용 1100MPa급 항공용 Ti 합금 체결부품 상용화기술 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	주식회사진합
연구기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

소정의 변형률속도(strain rate) 및 온도에서, 시편의 최대 변형률(peak strain) 및 절반 변형률을 산출하는 제 1 단계;

상기 제1 단계의 최대 변형률 및 절반 변형률을 이용하여, 동적 재결정 분율(dynamic recrystallization fraction), 및 상기 동적 재결정 분율로부터 계산되는 상기 시편의 결정립 크기를 예측하는 제2 단계;를 포함하고,

상기 동적 재결정 분율은 시편의 소성 변형후 결정립이 재결정화되는 정도를 나타내며,

상기 최대 변형률은, 시편의 유동곡선에서, 최대 유동 응력(peak stress)에 대응하는 변형률이고,

상기 절반 변형률은, 상기 시편의 유동곡선에서, 상기 동적 재결정(DRX)이 50% 진행된 상태의 유동 응력에 대응하는 변형률인 파라미터 산출 방법.

청구항 2

제1 항에 있어서,

소정의 변형률속도 및 온도를 선택하는 단계, 및 샘플링 변형률(strains) 및 그에 대응하는 유동 응력을 계산하여 유동곡선을 산출하는 단계가 포함되고,

상기 유동곡선은 다음의 식 1로 주어지며,

[식 1]

$$\sigma = C\dot{\epsilon}^m$$

여기서, σ 는 유동 응력(stress)이고, ϵ 은 변형률이며, $\dot{\epsilon}$ 은 변형률속도이고,

여기서, 계수 C는 식 2로 주어지며, 지수 m은 식 3으로 주어지며,

[식 2]

$$C(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = C_0 + C_1 \dot{\epsilon} + C_2 \dot{\epsilon}^{\gamma_1} + C_3 \ln \dot{\epsilon}$$

[식 3]

$$m(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = m_0 + m_1 \dot{\epsilon} + m_2 \dot{\epsilon}^{\gamma_2} + m_3 \ln \dot{\epsilon}$$

상기 $C_i (i=0,1,2,3)$, $m_i (i=0,1,2,3)$, 및 $\gamma_i (i=1,2)$ 는 고정된 변형률 및 온도에서 정의되는 유동 상수(flow constans)이고,

상기 유동 상수는, 상기 식 1에 의해 계산된 유동곡선, 및 실험에서 얻어진 유동곡선 간의 오차를 최소화하여 계산되는 파라미터 산출 방법.

청구항 3

제1 항에 있어서,

소정의 변형률속도 및 온도를 선택하는 단계, 및 샘플링 변형률(strain) 및 그에 대응하는 응력을 계산하여 유동곡선을 산출하는 단계가 포함되고,

상기 유동곡선으로부터, 유동 응력의 최대값에 해당하는 최대 유동 응력(peak stress), 및 상기 최대 유동 응력에 대응하는 상기 최대 변형률을 산출하는 단계가 포함되며,

상기 유동곡선의 기울기가 안정화되는 정상 상태 지점에서의, 정상 유동 응력(steady-state flow stress), 및 정상 변형률(steady-state strain)을 구하는 단계가 포함되는 파라미터 산출 방법.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 유동곡선의 가장 경사가 급격한 급경사 지점을 찾는 단계가 포함되고,

상기 유동곡선의 기울기가 안정화되는 정상 상태(steady-state) 지점을 산출하는 단계가 포함되며,

상기 정상 상태 지점 산출 단계에서, 상기 정상 상태 지점의, 정상 유동 응력, 및 정상 변형률이 산출되고,

상기 정상 상태 지점은, 상기 급경사 지점의 기울기가 설정된 분율 이하가 되는 지점, 또는 유동 응력이 설정된 값에 도달하는 지점으로 선택되고,

최대 유동 응력 및 정상 유동 응력의 평균으로부터, 절반 유동 응력, 및 상기 절반 유동 응력에 대응하는 절반 변형률이 계산되는 단계가 포함되는 파라미터 산출 방법.

청구항 5

제1 항에 있어서,

복수의 변형률속도 및 온도에서의 유동곡선으로부터 일련의 최대 변형률, 절반 변형률, 및 상기 최대 변형률과 절반 변형률로부터 얻어지는 정상 변형률을 데이터베이스에 저장하는 단계가 포함되며,

상기 데이터베이스에 저장하는 단계 이후, 변형률속도, 온도, 또는 변형률을 포함하는 샘플링이 더 남은 경우 상기 제1 단계가 반복 수행되고,

상기 데이터베이스에 저장하는 단계 이후, 변형률속도, 온도, 또는 변형률을 포함하는 샘플링의 상기 제1 단계가 모두 수행되면, 상기 제2 단계가 시작되는 파라미터 산출 방법.

청구항 6

제1 항에 있어서,

소정의 변형률속도 및 온도에서, S-곡선을 최적화하는 미세구조 파라미터 산출 단계가 포함되고,

상기 S-곡선은 진변형률에 대한 상기 동적 재결정 분율을 나타낸 것이며,

상기 S-곡선의 최적화는 실험 데이터로부터 얻어진 S-곡선과 가깝도록 상기 동적 재결정 분율이 산출되는 것을 의미하고,

상기 동적 재결정 분율은 상기 미세구조 파라미터로부터 구해지는 파라미터 산출 방법.

청구항 7

제1 항에 있어서,

상기 제2 단계에는, 동적 재결정 파라미터를 포함하는 미세구조 파라미터를 산출하는 단계가 포함되고,
 상기 동적 재결정 파라미터에는 상기 제1 단계에서 산출된 상기 최대 변형률 및 절반 변형률이 포함되며,
 상기 미세구조 파라미터로부터 상기 시편의 동적 재결정 분율, 및 결정립 크기가 산출되는 파라미터 산출 방법.

청구항 8

제1 항에 있어서,
 상기 최대 변형률 및 절반 변형률을 포함하는 미세구조 파라미터를 산출하는 단계가 포함되고,
 상기 동적 재결정 분율(X_{DRX})은 상기 미세구조 파라미터로부터 Avrami 운동 모델에 의해 예측되며,
 상기 미세구조 파라미터에는, 상기 동적 재결정 분율의 운동 속도 상수(kinetic rate constant, β_d)인 제1 파라미터, 및 Avrami 지수(k_d)인 제2 파라미터가 포함되고,
 복수의 샘플링 변형률속도 및 온도에 대하여, 상기 제1 파라미터 및 제2 파라미터의 각 쌍이 계산되며,
 상기 동적 재결정 분율의 예측시 사용되는 상기 제1 파라미터 및 제2 파라미터 값은, 계산된 제1 파라미터 및 제2 파라미터의 쌍 사이에 구간 쌍선형 함수(piecewise bi-linear functions)를 사용하여 보간한 값이 사용되는 보간 단계를 포함하는 파라미터 산출 방법.

청구항 9

제1 항에 있어서,
 상기 최대 변형률 및 절반 변형률을 포함하는 미세구조 파라미터를 산출하는 단계가 포함되고,
 상기 동적 재결정 분율(X_{DRX})은 상기 미세구조 파라미터로부터 Avrami 운동 모델에 의해 예측되며,
 상기 동적 재결정 분율은 다음의 식 5에 의해 구해지고,
 [식 5]

$$X_{DRX,pred} = 1 - \exp \left[-\beta_d \left(\frac{\varepsilon - \alpha_d \varepsilon_p}{\varepsilon_{0.5}} \right)^{k_d} \right]$$

여기서, $X_{DRX,pred}$ 은 예측된 동적 재결정 값이고, ε_p 은 상기 최대 변형률이며, $\varepsilon_{0.5}$ 은 절반 변형률이고, β_d 은 제1 파라미터이며, k_d 는 제2 파라미터이고, α_d 은 제3 파라미터이고,

상기 미세구조 파라미터는 ε_p , $\varepsilon_{0.5}$, β_d , k_d , 및 α_d 를 포함하며,

상기 제1 파라미터 및 제2 파라미터는 예측된 동적 재결정 분율과, 실험된 동적 재결정 분율의 오차를 최소화하여 얻어지며,

상기 실험된 동적 재결정 분율은 다음의 식 6에 의해 주어지며,

[식 6]

$$X_{DRX,exp} = \frac{\sigma_p - \sigma_{DRX}}{\sigma_p - \sigma_s}$$

여기서, σ_p 는 최대 유동 응력이고, σ_{DRX} 은 동적 재결정되는 영역 내의 샘플 변형률에서의 응력이며, σ_s 은 정상 유동 응력이고,
 상기 정상 유동 응력은, 상기 유동곡선의 기울기가 안정화되는 정상 상태(steady-state) 지점에서의 유동 응력인 파라미터 산출 방법.

청구항 10

제1 항에 있어서,
 상기 최대 변형률 및 절반 변형률을 포함하는 미세구조 파라미터를 산출하는 단계가 포함되고,
 상기 미세구조 파라미터, 동적 재결정 분율, 및 결정립 크기가 이용되는, 상기 시편의 미세구조에 대한 유한요소해석 (Finite element analysis) 단계가 포함되며,
 상기 유한요소해석 단계에서, 상기 동적 재결정 분율과, 결정립 크기를 이용한 유한요소해석의 결과가 수렴하지 않으면, 상기 제2 단계가 반복 수행되고,
 상기 유한요소해석 단계에서, 상기 동적 재결정 분율과, 결정립 크기를 이용한 유한요소해석의 결과가 수렴하면, 상기 제2 단계가 종료되는 파라미터 산출 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은, 미세구조의 진화를 예측하도록, 유동-관련 동적 재결정(DRX) 파라미터(flow-related dynamic recrystallization parameters)의 직접적인 산출 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 본 발명의 파라미터 산출 방법은, 일반적이고 확장된 유동곡선 이론에 기초할 수 있고, 거시적 정보로부터 미세구조 예측에서 필요로 하는 정보를 직접 구할 수 있다. 이로 인해, 사용자는, 별도의 복잡한 수식을 개발하거나, 복잡한 방법으로 재료 상수를 계산하는 것을 배제할 수 있다.

[0003] 이에 불구하고, 본 발명의 파라미터 산출 방법은, 정확한 유동곡선 정보로부터 더 정밀하게 유동 특성과 관련된 동적 재결정 매개 변수를 산출할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명의 파라미터 산출 방법은, 일반적이고 확장된 유동곡선 이론에 기초할 수 있고, 거시적 정보로부터 미세구조 예측에서 필요로 하는 정보를 직접 구할 수 있다. 이로 인해, 사용자는, 별도의 복잡한 수식을 개발하거나, 복잡한 방법으로 재료 상수를 계산하는 것을 배제할 수 있다.

[0005] 이에 불구하고, 본 발명의 파라미터 산출 방법은, 정확한 유동곡선 정보로부터 더 정밀하게 유동 특성과 관련된 동적 재결정 매개 변수를 산출할 수 있다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 발명의 파라미터 산출 방법은, 소정의 변형률속도(strain rate) 및 온도에서, 시편의 최대 변형률(peak strain) 및 절반 변형률을 산출하는 제1 단계, 제1 단계의 최대 변형률 및 절반 변형률을 이용하여, 동적 재결정 분율(dynamic recrystallization fraction), 및 상기 동적 재결정 분율로부터 계산되는 상기 시편의 결정립 크기를 예측하는 제2 단계를 포함할 수 있다.

[0007] 본 발명의 동적 재결정 분율은 시편의 소성 변형후 결정립이 재결정화되는 정도를 나타낼 수 있고, 최대 변형률은 시편의 유동곡선에서 최대 유동 응력(peak stress)에 대응하는 변형률일 수 있으며, 절반 변형률은 시편의 유동곡선에서 동적 재결정(DRX)이 50% 진행된 상태의 유동 응력에 대응하는 변형률일 수 있다.

발명의 효과

[0008] 본 발명은, Avrami 모델에 대한 최대 변형률 및 절반 변형률을 포함하는 유동-관련 DRX 동역학 파라미터를, 유동곡선에서 직접 계산하는 직접적인 방법(direct method, DM)을 제시할 수 있다.

[0009] 본 발명은, 동적 재결정 분율 및 결정립 크기를 구하기 위한 미세구조 파라미터 산출시 복잡한 추가적인 수학적 모델링이 필요하지 않을 수 있다.

[0010] 본 발명의 직접적인 방법은, 유동곡선에 대한 정확한 기술에 의해 뒷받침될 수 있다. 이를 위해, 일반적이고 개선된 C-m 모델이 이용될 수 있다.

[0011] 본 발명의 직접적인 방법에 의해, 동적 재결정 분율(X_{DRX})의 평균 절대 상대 오차(AARE) 비교, 및 유한요소해석의 평균 또는 최대 결정립 크기 오차 비교 등을 통하여, 마그네슘 합금 AZ91D의 DRX 거동이 조사되었고 그 유효성을 확인되었다.

도면의 간단한 설명

[0012] 도 1은 이상적인 유동곡선을 나타낸다.

도 2는 본 발명의 제1 단계에 대한 흐름도이다.

도 3은 본 발명의 제2 단계에 대한 흐름도이다.

도 4는 동적 재결정 분율(X_{DRX})에 대한, 본 발명의 직접적인 방법(DM)의 예측 결과와, 실험 데이터를 비교한 것이다.

도 5는 동적 재결정 분율(X_{DRX})의 평균 절대 상대 오차(AARE)에 대한, 본 발명의 직접적인 방법(DM)의 예측 결과와, 실험 데이터를 비교한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0013] 도 1 내지 도 5를 참조하여, 본 발명의 파라미터 산출 방법에 대해 설명한다.

[0014] 본 발명의 파라미터 산출 방법은 제1 단계(S100, Phase I) 및 제2 단계(S200, Phase II)를 포함할 수 있다.

[0015] 도 2를 참조하면, 제1 페이즈(S100)은 소정의 변형률속도(strain rate) 및 온도에서, 시편의 최대 변형률(peak strain, ϵ_p) 및 절반 변형률(0.5 strain, $\epsilon_{0.5}$)을 산출하는 단계일 수 있다.

[0016] 제2 단계(S200)은 제1 단계(S100)에서 구한 최대 변형률 및 절반 변형률을 이용하여, 동적 재결정 분율(dynamic recrystallization fraction, X_{DRX}), 및 동적 재결정 분율(X_{DRX})로부터 계산되는 시편의 결정립 크기(d_{DRX})를 예측하는 단계일 수 있다.

[0017] 동적 재결정 분율은 시편의 소성 변형후 결정립이 재결정화되는 정도일 수 있다.

[0018] 열간 단조 등의 소성 가공 공정에 의해 제조되는 강재 등의 재료는 고온 변형 직후 냉각 중에 미세적 균열이 발생하기 쉽고, 이는 금형 및 기계의 수명 단축으로 이어지기도 한다. 이를 방지하기 위해서는, 동적 재결정(DRX, Dynamic Recrystallization)을 포함하는 제어 변형이 필요하고, 동적 재결정은 큰 변형량을 가하거나 복잡한 형상의 제품을 제조하고자 할 때 결함이나 불량을 최소화하고 미세화의 효과를 얻을 수 있는 방법일 수 있다.

[0019] 제1 단계(S100)에는, 변형률속도 및 온도 선택 단계(S100), 및 유동곡선 산출 단계(S120)가 포함될 수 있다.

[0020] 변형률속도 및 온도 선택 단계(S100)는, 소정의 변형률속도(Strain rate) 및 온도를 선택하는 단계(S110)일 수 있다. 도 4와 같이, 소정의 변형률속도 및 온도가 고정된 상태에서, 샘플링된 변형률(strain) 및 그에 대응하는 유동 응력의 유동곡선이 구해질 수 있다.

[0021] 유동곡선 산출 단계(S120)는, 소정의 변형률속도 및 온도가 선택된 상태(S110)에서, 복수의 샘플링 변형률(strain) 및 그에 대응하는 유동 응력을 계산하여, 유동곡선을 산출하는 단계일 수 있다.

[0022] 유동곡선 산출 단계(S120)에서, 본 발명은 예측되는 미세구조 진화의 정밀도를 향상시키기 위해, 샘플링된 변형률속도의 수를 증가시킬 수 있고, 이를 위해 고차원의 유동 응력 모델인 일반적이고 개선된 C-m 모델을 이용할 수 있다.

[0023] 따라서, 본 발명의 유동곡선은 다음의 [수학식 1]로 주어질 수 있다.

수학식 1

[0024]
$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m$$

[0025] σ 는 유동 응력(stress)이고, ϵ 은 변형률(strain)이며, $\dot{\epsilon}$ 은 변형률속도(strain rate)일 수 있다.

[0026] 수학식 1의 계수 C는 다음의 [수학식 2]로 주어질 수 있고, 변형률속도의 지수 m은 [수학식 3]으로 주어질 수 있다.

수학식 2

[0027]
$$C(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = C_0 + C_1 \dot{\epsilon} + C_2 \dot{\epsilon}^{\gamma_1} + C_3 \ln \dot{\epsilon}$$

수학식 3

[0028]
$$m(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = m_0 + m_1 \dot{\epsilon} + m_2 \dot{\epsilon}^{\gamma_2} + m_3 \ln \dot{\epsilon}$$

[0029] 여기서, $C_i(i=0,1,2,3)$, $m_i(i=0,1,2,3)$, 및 $\gamma_i(i=1,2)$ 는, 고정된 변형률 및 온도에서 정의되는 유동 상수(flow constants)일 수 있다. 유동 상수는 간단한 상수, 또는 변형률과 온도의 구간 쌍선형 함수(piecewise bilinear functions)로 볼 수 있다.

[0030] 유동 상수는 샘플링 변형률의 유동곡선, 및 실험에서 얻어진 유동곡선 간의 오차를 최소화하여 계산될 수 있다. 유동 상수는 다음의 [수학식 4]에 의한 보간 규칙에 의해 산출될 수 있다.

수학식 4

[0031]
$$\begin{aligned} \phi &= \frac{(T_{n+1}-T)(\epsilon_{m+1}-\epsilon)}{(T_{n+1}-T_n)(\epsilon_{m+1}-\epsilon_m)} \phi_{(m,n)} + \frac{(T_n-T)(\epsilon_{m+1}-\epsilon)}{(T_n-T_{n+1})(\epsilon_{m+1}-\epsilon_m)} \phi_{(m,n+1)} \\ &+ \frac{(T_{n+1}-T)(\epsilon_m-\epsilon)}{(T_{n+1}-T_n)(\epsilon_m-\epsilon_{m+1})} \phi_{(m+1,n)} + \frac{(T_n-T)(\epsilon_m-\epsilon)}{(T_n-T_{n+1})(\epsilon_m-\epsilon_{m+1})} \phi_{(m+1,n+1)} \end{aligned}$$

[0032] 여기서, ϕ 는 소정의 변형률 및 온도에서, 유동 상수(C, m, γ) 값을 의미할 수 있고, $\phi_{(m,n)}$ 은 각각 샘플 변형률 ϵ_m , 및 온도 T_n 에서 주어진 ϕ 의 값을 의미할 수 있다.

[0033] 제1 단계(S100)에는, 최대 유동 응력과 최대 변형률 산출 단계(S130), 급경사 지점 찾는 단계(S140), 정상 유동 응력과 최대 변형률 산출 단계(S150), 및 절반 유동 응력과 절반 변형률 산출 단계(S160) 중 적어도 하나가 포

함될 수 있다.

- [0034] 도 1은 최대 변형률과 및 절반 변형률 등을 설명하기 위한 이상적인 유동곡선을 나타내는 것이다.
- [0035] 유동곡선은 샘플링된 변형률에 대해 일련의 유동 응력을 수치적으로 계산하여 얻어질 수 있다. 샘플링된 변형률의 수는 예측 정확도를 높이기 위해 충분히 높게 잡을 수 있고, 바람직하게 변형률 간격은 0.001 이하일 수 있다.
- [0036] 도 1을 참조하면, 최대 유동 응력과 최대 변형률 산출 단계(S130)는 유동 응력 산출 단계(S120)에서 구한 유동 곡선 중 최대 응력을 가지는 지점(A 지점)을 찾는 것일 수 있다. A 지점에서, 최대 유동 응력(peak stress, σ_p) 및 최대 변형률(peak strain, ϵ_p)이 구해질 수 있다. 즉, 최대 변형률은, 유동곡선에서, 최대 유동 응력(peak stress)에 대응하는 변형률일 수 있다.
- [0037] 정상 유동 응력과 최대 변형률 산출 단계(S150)는, 유동곡선의 기울기가 안정화되는 정상 상태(steady-state) 지점을 산출하는 단계일 수 있다.
- [0038] 즉, 정상 유동 응력과 최대 변형률 산출 단계(S150)는, 유동곡선의 기울기가 안정화되는 정상 상태 지점(C 지점)을 찾고, 정상 상태 지점에서의 정상 유동 응력(steady-state flow stress, σ_s), 및 정상 변형률(steady-state strains, ϵ_s)을 구하는 단계일 수 있다.
- [0039] 급경사 지점 찾는 단계(S140)는, 유동곡선의 최대 변형률(ϵ_p) 이후, 가장 경사가 급격한 급경사 지점(B 지점)을 찾는 단계일 수 있다.
- [0040] 정상 상태 지점(C 지점)은, 급경사 지점(B 지점)의 기울기가 설정된 기울기 값 이하가 되는 지점, 또는 유동 응력이 설정된 값에 도달하는 지점으로 선택될 수 있다.
- [0041] 도 1의 후방에 도시된 네 가지 유형의 유동곡선(도 1의 유형 I, II, III 및 IV)이 있다. 특히, 유형 I, III 및 IV의 정상 상태 변형 및 안정화 정도는 경계가 모호할 수 있다.
- [0042] 따라서, 정상 상태 지점(steady-state point)는, 최대 변형률 이후 변형률 증가에 대하여 유동 응력의 기울기가 증가하는 지점, 최대 감소 기울기의 특정 분율(S) 이하(따라서 도 1의 최대 변형률 이후 가장 가파른 하강 지점인 B 지점에서의 기울기)가 되는 지점, 또는 응력이 최대 응력의 특정 분율(F) 이하인 지점 중 적어도 하나로 정의될 수 있다.
- [0043] 예를 들어, 정상 상태 지점은, 최대 유동 응력에 0.6(F)을 곱한 값에 대응하도록 설정될 수 있고, 최대 감소 기울기에 0.1(S)를 곱한 값에 대응하도록 설정될 수 있다.
- [0044] 절반 유동 응력과 절반 변형률 산출 단계(S160)는, 절반 유동 응력(D 지점, 0.5 stress, $\sigma_{0.5}$), 및 절반 유동 응력에 대응하는 절반 변형률(E 지점, 0.5 strain, $\epsilon_{0.5}$)이 계산되는 단계일 수 있다.
- [0045] 절반 유동 응력은 앞서 산출된 최대 유동 응력, 및 정상 유동 응력의 평균을 취해 구해질 수 있다.
- [0046] 절반 변형률은, 시편의 유동곡선에서, 동적 재결정(DRX)이 50% 진행된 상태의 유동 응력에 대응하는 변형률일 수 있다.
- [0047] 제1 단계(S100)에는, 데이터베이스 저장 단계(S170) 및 제1 단계 진행 여부 판단 단계(S180)가 포함될 수 있다.
- [0048] 데이터베이스 저장 단계(S170)는, 복수의 변형률속도 및 온도에서의 유동곡선으로부터, 일련의 최대 변형률, 절반 변형률, 정상 변형률을 데이터베이스에 저장하는 단계일 수 있다.
- [0049] 제1 단계 진행 여부 판단 단계(S180)에서는, 데이터베이스에 저장하는 단계(S170) 이후, 변형률속도, 온도, 또는 변형률을 포함하는 샘플링이 더 남은 경우 제1 단계(S100)가 반복 수행될 수 있다.
- [0050] 제1 단계 진행 여부 판단 단계(S180)에서는, 데이터베이스에 저장하는 단계 이후(S170), 변형률속도, 온도, 또는 변형률을 포함하는 샘플링의 제1 단계가 모두 수행되면, 제2 단계(S200)가 시작될 수 있다.

[0051] 도 3을 참조하면, 제2 단계(S200)에는, 미세구조 파라미터(microstructure parameters) 산출 단계(S210), 보간(interpolation) 단계(S220), 유한요소해석(FEA, finite element analysis) 단계(S230) 및 수렴 여부 판단과 제2 단계(S200) 진행 여부 결정 단계(S240) 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.

[0052] 본 발명의 파라미터 산출 방법은, 동적 재결정 분율(X_{DRX})을 구하기 위해, Avrami 운동 모델을 이용할 수 있다.

[0053] Avrami 운동 모델은, 동적 재결정(DRX)을 핵 형성, 핵 성장, 및 결정립 접착의 3 단계로 나타낼 수 있다.

[0054] Avrami 운동 모델에 의해, 동적 재결정 분율(X_{DRX})은, 미세구조 파라미터(ϵ_p , $\epsilon_{0.5}$, β_d , k_d , 및 α_d)에 의해 다음의 [수학식 5]로 주어질 수 있다.

수학식 5

$$X_{DRX,pred} = 1 - \exp \left[-\beta_d \left(\frac{\epsilon - \alpha_d \epsilon_p}{\epsilon_{0.5}} \right)^{k_d} \right]$$

[0055]

[0056] 여기서, $X_{DRX,pred}$ 은 예측된 동적 재결정 값이고, ϵ_p 은 상기 최대 변형률이며, $\epsilon_{0.5}$ 은 절반 변형률이고, β_d 은 제1 파라미터이며, k_d 는 제2 파라미터이고, α_d 은 제3 파라미터일 수 있다. 바람직하게 제3 파라미터는 1.0 일 수 있다.

[0057] 미세구조 파라미터는 ϵ_p , $\epsilon_{0.5}$, β_d , k_d , 및 α_d 중 적어도 하나를 포함할 수 있다. 제1 파라미터(β_d) 및 제2 파라미터(k_d)는 예측된 동적 재결정 분율과, 실험된 동적 재결정 분율($X_{DRX,exp}$)의 오차를 최소화하여 얻어질 수 있다.

[0058] 또한, 실험된 동적 재결정 분율($X_{DRX,exp}$)은 다음의 [수학식 6]에 의해 구해질 수 있다.

수학식 6

$$X_{DRX,exp} = \frac{\sigma_p - \sigma_{DRX}}{\sigma_p - \sigma_s}$$

[0059]

[0060] 여기서, σ_p 는 최대 유동 응력이고, σ_{DRX} 은 동적 재결정되는 영역 내의 샘플 변형률에서의 응력이며, σ_s 는 정상 유동 응력일 수 있다.

[0061] 제1 파라미터는 Avrami 모델의, 동적 재결정 분율의 운동 속도 상수(kinetic rate constant, β_d)를 의미할 수 있고, 제2 파라미터는 Avrami 지수(k_d)를 의미할 수 있다.

[0062] 보간 단계(S220)에서, 복수의 샘플링 변형률속도 및 온도에 대하여, 제1 파라미터(β_d) 및 제2 파라미터(k_d)의 각 쌍이 계산될 수 있다. 동적 재결정 분율의 예측시 사용되는 제1 파라미터 및 제2 파라미터 값은, 계산된 제1 파라미터 및 제2 파라미터의 쌍 사이에 구간 쌍선형 함수(piecewise bi-linear functions)를 사용하여 보간

한 값이 사용될 수 있다.

[0063] 계산된 동적 재결정(X_{DRX} , X_{DRX})과, 초기 결정립 크기(d_0)를 사용하면, 평균 DRX 입자 크기($d_{\text{DRX,avg}}$)는 다음의 수학적 식 7에 의해 구해질 수 있다.

수학적 식 7

$$d_{\text{DRX,avg}} = X_{\text{DRX}} d_{\text{DRX}} + d_0 (1 - X_{\text{DRX}})$$

[0065] 여기서, d_{DRX} 는 다음의 수학적 식 8과 같을 수 있다.

수학적 식 8

$$d_{\text{DRX}} = p d_0^h \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \exp(Q/RT)$$

[0067] 여기서, 상수 p , h , n , m , 및 Q 는 유한요소해석 및 최적화의 실질적인 조합을 통해 얻어질 수 있고, R 은 기체 상수일 수 있다.

[0068] 따라서, 미세구조 파라미터(micro-structure parameters)로부터 시편의 동적 재결정 분율(X_{DRX}), 및 결정립 크기(d_{DRX})가 산출될 수 있다.

[0069] 도 4는, AZ91D 합금에 대해, 유동곡선으로부터의 본 발명의 직접적인 파라미터 산출 방법에 의한 동적 재결정 분율(X_{DRX})의 결과와, 실험 데이터를 비교한 것일 수 있다.

[0070] 도 5는, AZ91D 합금에 대해, 유동곡선으로부터의 본 발명의 직접적인 파라미터 산출 방법에 의한 재결정 분율의 평균 절대 상대 오차(AARE, average absolute relative error)의 결과와, 실험 데이터를 비교한 것일 수 있다.

[0071] 도 4 및 도 5를 참조하면, 미세구조 파라미터 산출 단계(S210)는, 소정의 변형률속도 및 온도에서, S-곡선을 최적화하는 단계일 수 있다.

[0072] S-곡선은 진변형률(true strain)에 대한 동적 재결정 분율(X_{DRX})을 나타낸 것일 수 있다.

[0073] S-곡선의 최적화란 실험 데이터로부터 얻어진 S-곡선과 가깝도록 동적 재결정 분율이 산출되는 것을 의미할 수 있다.

[0074] 도 4의 (a) 내지 (e)는 복수의 변형률속도(strain rate)에 대해, 온도를 달리하여 동적 재결정 분율(X_{DRX})의 S-곡선을 구한 것일 수 있다.

[0075] 도 4의 (a) 내지 (e)에서, 본 발명의 동적 재결정 파라미터의 직접적인 산출 방법(DM, Direct Method)에 의해 구해진 동적 재결정 분율(X_{DRX})에 대한 S-곡선은, 실험된 동적 재결정 분율($X_{\text{DRX,exp}}$)에 대한 S-곡선과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

[0076] 이는 기존의 다른 연구진(Xu et al.)에 의한 파라미터 산출 결과와 비교해 더 정확히 실험 데이터와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 도 4 및 도 5에서 제시된, 기존 다른 연구진의 결과는 Xu Y, Chen C, Zhang X, Dai H, Jia J, Bai Z. Dynamic recrystallization kinetics and microstructure evolution of an AZ91D magnesium alloy during hot compression. Materials Characterization 2018;145:39-52. 를 포함할 수 있다.

[0077] 도 5를 참조하면, 본 발명의 파라미터 산출 방법에 의해 예측된 AARE(2.68%, $R^2=0.93$)는 다른 연구진(Xu et al.)에 의해 예측된 AARE(12.23%, $R^2=0.74$)보다 상당히 낮아 실제 실험 데이터와 가깝게 예측하는 것을 확인할 수 있다.

[0078] 유한요소해석 단계(S230)에서, 미세구조 파라미터, 동적 재결정 분율, 및 결정립 크기 중 적어도 하나를 이용한

유한요소해석이 수행될 수 있다.

[0079] 유한요소해석 단계(S230)에서 동적 재결정 분율과, 결정립 크기를 이용한 유한요소해석의 결과가 수렴하지 않으면, 제2 단계(S200)가 반복 수행될 수 있다.

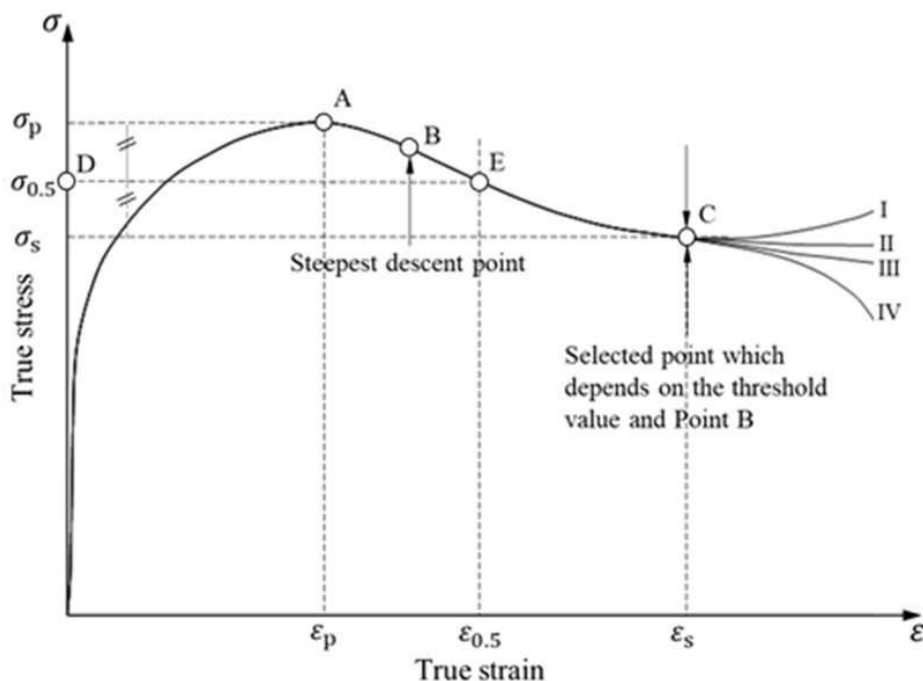
[0080] 유한요소해석 단계(S230)에서 동적 재결정 분율과, 결정립 크기를 이용한 유한요소해석의 결과가 수렴하면, 제2 단계(S200)를 종료하여 모든 파라미터 수행 방법을 완료할 수 있다.

부호의 설명

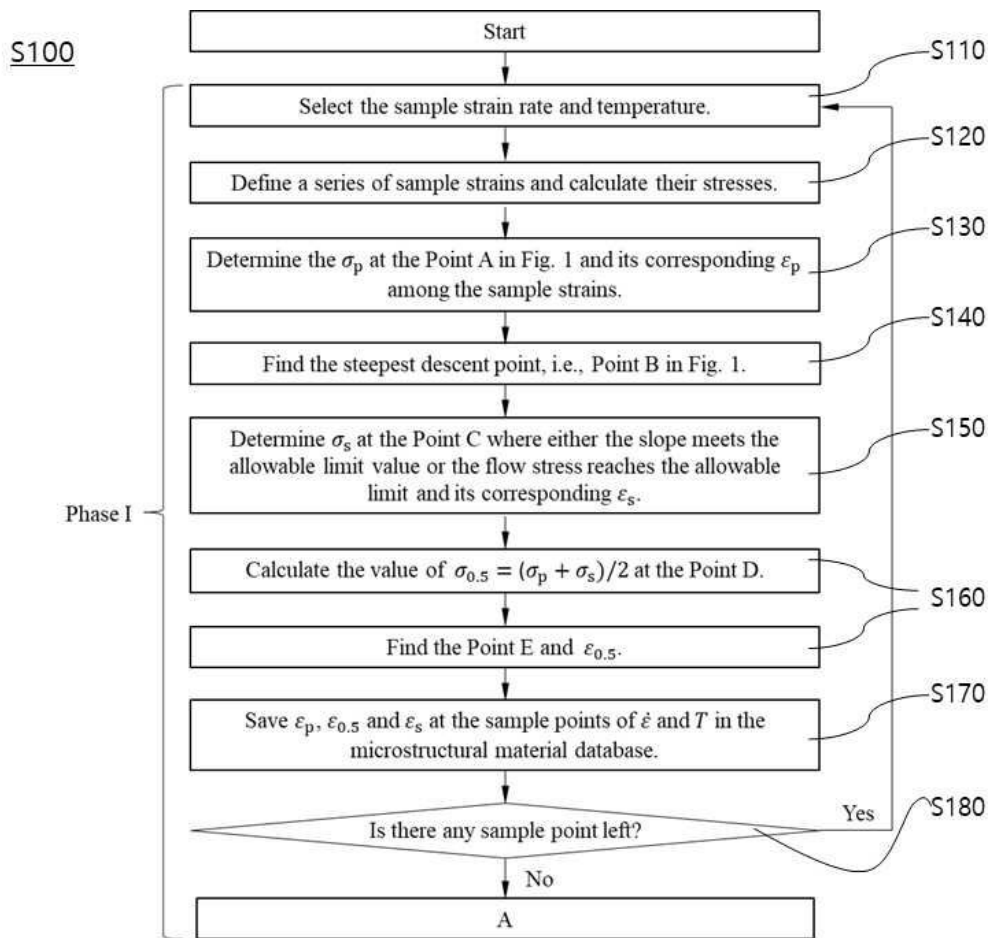
- [0081] S100... 제1 단계(Phase I)
 S110... 변형률속도 및 온도 선택 단계
 S120... 유동곡선 산출 단계
 S130... 최대 유동 응력과 최대 변형률 산출 단계
 S140... 급경사 지점 찾는 단계
 S150... 정상 유동 응력과 정상 변형률 산출 단계
 S160... 절반 유동 응력과 절반 변형률 산출 단계
 S170... 데이터베이스 저장 단계
 S180... 제1 단계 진행 여부 판단 단계
 S200... 제2 단계(Phase II)
 S210... 미세구조 파라미터 산출 단계
 S220... 보간 단계
 S230... 유한요소해석 단계
 S240... 수렴 여부 판단과 제2 단계 진행 여부 결정 단계

도면

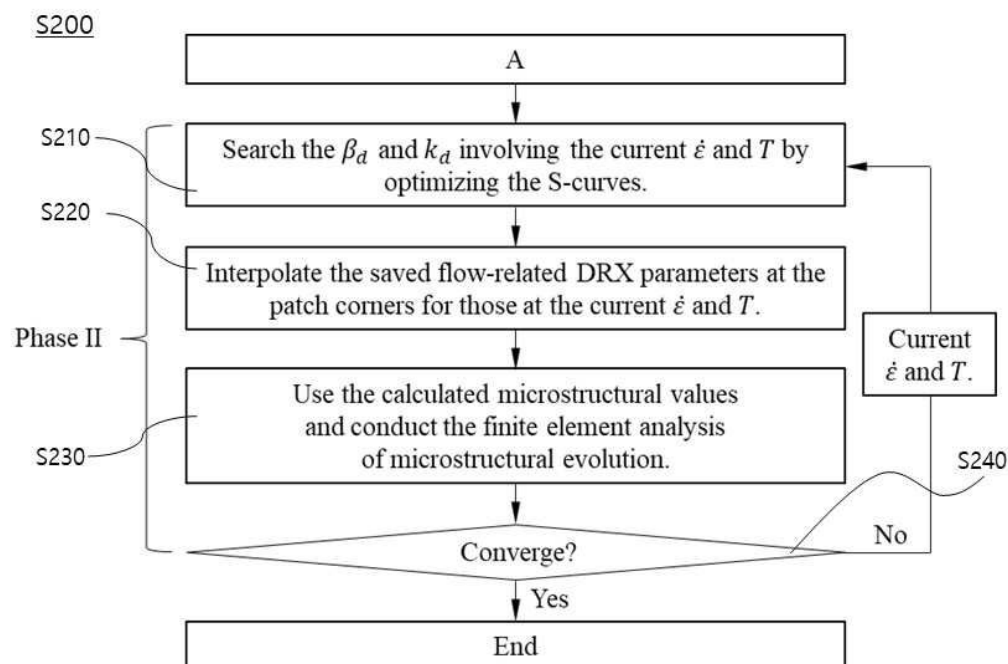
도면1



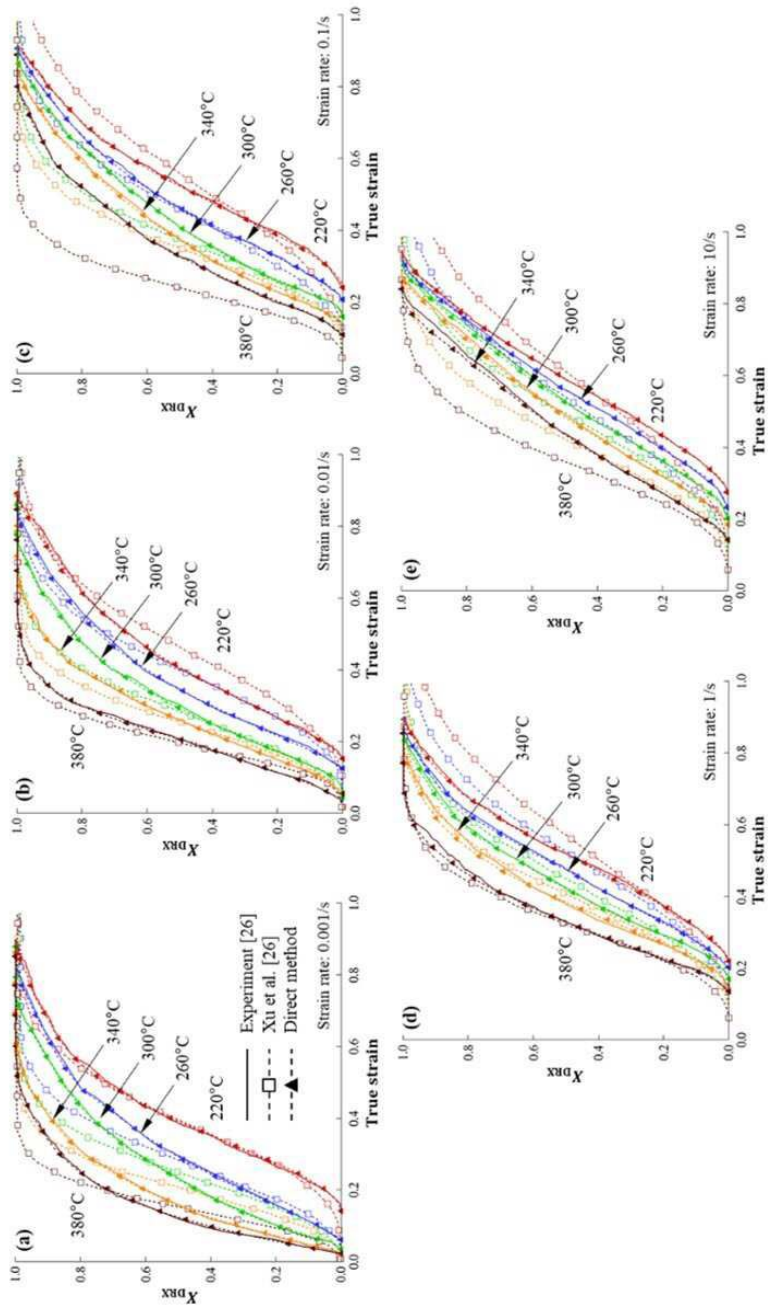
도면2



도면3



도면4



도면5

