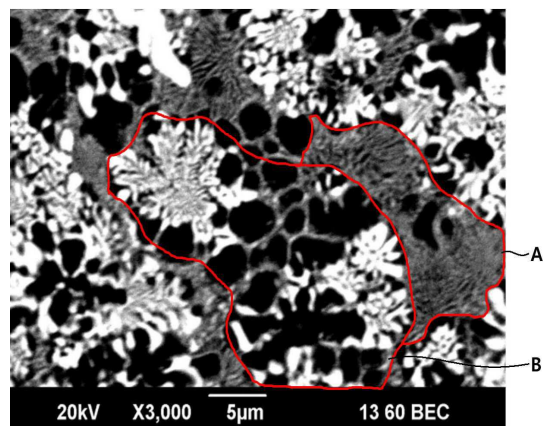


	(19) 대한민국특허청(KR) (12) 공개특허공보(A)	(11) 공개번호 10-2014-0097696 (43) 공개일자 2014년08월07일
(51) 국제특허분류(Int. Cl.) C22C 38/12 (2006.01)		(71) 출원인 세종대학교산학협력단
(21) 출원번호	10-2013-0009696	서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(22) 출원일자	2013년01월29일	(72) 발명자
심사청구일자	2013년01월29일	김기범
		서울 강남구 압구정로 401, 53동 1102호 (압구정동, 한양아파트)
		김정태
		서울 송파구 성내천로21길 12, 102동 1006호 (마천동, 신동아아파트)
		홍성환
		대전광역시 중구 문화1동 계룡아파트 1310호
		(74) 대리인
		특허법인이상

(57) 요약

B를 함유하는 Fe-Nb 공정합금을 제공한다. 상기 Fe-Nb 공정합금에 $(\text{Fe}_{0.9}\text{Nb}_{0.1})_{100-x}\text{B}_x$ ($5 \leq x \leq 12.5$)의 조성으로 B를 포함시키고, 새로운 콜로니를 생성하여 미세조직을 제어하게 된다. 상기 콜로니는 합금 내에서 화학적 불균일성(chemical heterogeneity)을 야기한다. 또한 미세한 전단 밴드(shear band)의 형성으로 전위의 이동도를 증가시켜 재료의 강도와 연성을 동시에 증가시킬 수 있다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1345171618

부처명 교육과학기술부

연구사업명 중견연구자지원사업(핵심)

연구과제명 불균일도 제어형 극미세 공정조직 합금의 고장력화 원리 규명

기 여 율 1/1

주관기관 세종대학교 산학협력단

연구기간 2010.05.01 ~ 2013.04.30

특허청구의 범위

청구항 1

$(\text{Fe}_{0.9}\text{Nb}_{0.1})_{100-x}\text{B}_x$ ($5 \leq x \leq 12.5$)의 조성을 갖는 Fe-Nb 공정합금.

청구항 2

제1항에 있어서,

NbFeB상을 포함하는 Fe-Nb 공정합금.

청구항 3

제2항에 있어서,

α -Fe 수지상과 Fe_2Nb 수지상이 반복적으로 배치된 라멜라 구조를 갖는 제 1콜로니; 및

α -Fe 수지상 및 NbFeB 수지상을 포함하는 제 2콜로니를 포함하는 Fe-Nb 공정합금.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 B는 상기 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 5 내지 7.5의 원자수로 함유되는 Fe-Nb 공정합금.

청구항 5

제 2항에 있어서,

NbFeB 구상 또는 α -Fe 구상; 및

상기 구상을 둘러싸고 NbFeB 수지상 및 α -Fe수지상이 반복 배치된 라멜라 구조를 갖는 콜로니를 포함하는 Fe-Nb 공정합금.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 B는 상기 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 7.5 내지 12.5의 원자수로 함유되는 Fe-Nb 공정합금.

청구항 7

α -Fe 수지상과 Fe_2Nb 수지상이 반복적으로 배치된 라멜라 구조를 갖는 제 1콜로니; 및

α -Fe 수지상 및 NbFeB 수지상을 포함하는 제 2콜로니를 포함하는 Fe-Nb 공정합금.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 Fe-Nb 공정합금은 $(\text{Fe}_{0.9}\text{Nb}_{0.1})_{100-x}\text{B}_x$ ($5 \leq x \leq 7.5$)의 조성을 갖는 Fe-Nb 공정합금.

청구항 9

NbFeB 구상 또는 α -Fe 구상; 및

상기 구상을 둘러싸고 NbFeB 수지상 및 α -Fe수지상이 반복 배치된 라멜라 구조를 갖는 콜로니를 포함하는 Fe-Nb 공정합금.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 Fe-Nb 공정합금은 $(\text{Fe}_{0.9}\text{Nb}_{0.1})_{100-x}\text{B}_x$ ($7.5 \leq x \leq 12.5$)의 조성을 갖는 Fe-Nb 공정합금.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 금속 합금에 관한 것으로, 자세하게는 Fe-Nb합금에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 금속합금은 금속의 성질을 개선하기 위하여 다른 원소를 한 가지 이상 첨가하여 만든 금속이다. 첨가하는 원소는 금속 원소, 비금속 원소, 기체 및 원소 등 여러 가지 형태이다. 합금을 하는 목적은 금속의 강도를 높이고 내식성, 경도, 자기, 및 전기저항 등 특정 성질을 개선하기 위함이다.

[0003] 한편, 금속결정에 외력이 가해지면 전위의 이동에 의해 변형이 일어나기 때문에 이상적인 전단 강도보다도 훨씬 작은 응력에 의해서도 금속결정의 변형이 일어난다. 또한, 금속합금의 경우 전위의 이동도를 감소시켜 제한된 연성을 갖는다.

[0004] 다른 한편, Fe계 금속합금은 Fe와 합금하는 원소에 따라 종류가 수십 가지에 이르며, 용도 또한 다양하다. 순금속에 비해 가격이 낮으며 용융점이 낮아 저온에서 쉽게 녹고 용탕에 균일하게 분포하기 때문에 대표적으로 주철의 제조에서 부원료로 사용된다. 특히 Fe-Nb 합금은 공구용 소재 및 IT산업용 부품에 사용되는 핵심소재로서, 대표적으로 특수강의 합금소재로 사용빈도가 높아지고 있다. 이러한 Fe-Nb 합금은 순수 Fe(철)에 비하여 강도가 향상되지만, 여전히 연성이 제한적이어서 소성변형구간이 길지 않고 항복강도가 낮은 단점이 있다.

[0005] 2008년 연세대학교 박사학위논문(벌크 나노/극미세 구조 복합체의 기계적 거동, 박진만)을 참조하면, Fe-Nb 합금에 Al을 첨가하여 수지상의 형성을 촉진시키며 동시에 연한 조정상을 고용강화 시켜 합금의 압축강도와 압축연신율을 증가시킨다. 하지만 연신율의 증가가 여전히 제한적이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 이에 본 발명은 상기의 문제점을 해결하기 위하여 착안된 것으로서, 재료의 미세구조를 제어할 수 있는 Fe-Nb 공정합금을 제공하는 데 그 목적이 있다.

[0007] 또한, 본 발명은 기존 금속합금의 제한된 연성을 향상시키고, 우수한 강도의 Fe-Nb 공정합금을 제공하는 데 또 다른 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기 과제를 이루기 위하여, 본 발명의 일 측면은 Fe-Nb 공정합금을 제공한다. 상기 공정합금은 $(\text{Fe}_{0.9}\text{Nb}_{0.1})_{100-x}\text{B}_x$ ($5 \leq x \leq 12.5$)의 조성을 갖는다.

[0009] 한편, 상기 Fe-Nb 공정합금은 NbFeB상을 포함할 수 있다. 또한, α -Fe 수지상과 Fe_2Nb 수지상이 반복적으로 배치된 라멜라 구조를 갖는 제 1콜로니와 α -Fe 수지상 및 NbFeB 수지상을 포함하는 제 2콜로니를 포함할 수 있다. 상기 B는 상기 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 5 내지 7.5의 원자수로 함유될 수 있다.

[0010] 또한, 상기 Fe-Nb 공정합금은 NbFeB 구상 또는 α -Fe 구상과 상기 구상을 둘러싸고 NbFeB 수지상 및 α -Fe수지상이 반복 배치된 라멜라 구조를 갖는 콜로니를 포함할 수 있다. 상기 B는 상기 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 7.5 내지 12.5의 원자수로 함유될 수 있다.

[0011] 상기 과제를 이루기 위하여 본 발명의 다른 일 측면은 α -Fe 수지상과 Fe_2Nb 수지상이 반복적으로 배치된 라멜라 구조를 갖는 제 1콜로니와 α -Fe 수지상 및 NbFeB 수지상을 포함하는 제 2콜로니를 포함하는 Fe-Nb 공정합금을 제공한다. 상기 Fe-Nb 공정합금은 $(\text{Fe}_{0.9}\text{Nb}_{0.1})_{100-x}\text{B}_x$ ($5 \leq x \leq 7.5$)의 조성을 가질 수 있다.

[0012] 상기 과제를 이루기 위하여 본 발명의 또 다른 일 측면은 NbFeB 구상 또는 α -Fe 구상과 상기 구상을 둘러싸고

NbFeB 수지상 및 α -Fe수지상이 반복 배치된 라멜라 구조를 갖는 콜로니를 포함하는 Fe-Nb 공정합금을 제공한다. 상기 Fe-Nb 공정합금은 $(\text{Fe}_{0.9}\text{Nb}_{0.1})_{100-x}\text{B}_x$ ($7.5 \leq x \leq 12.5$)의 조성을 가질 수 있다.

발명의 효과

[0013] 본 발명을 따르면 B를 함유하는 Fe-Nb 공정합금은 상기 Fe-Nb 공정합금에 B를 포함시킴으로써 새로운 콜로니를 생성하여 미세조직을 제어하게 된다. 상기 콜로니는 합금 내에서 화학적 불균일성(chemical heterogeneity)을 야기한다. 또한 미세한 전단 밴드(shear band)의 형성으로 전위의 이동도를 증가시켜 재료의 강도와 연성을 동시에 증가시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0014] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 Fe-Nb 합금의 SEM사진이다.
 도 2는 본 발명의 일 실시예에 Fe-Nb 합금의 미세조직을 개략적으로 나타낸 도면이다.
 도 3은 시편 2 내지 6의 상온에서의 압축응력하의 응력-변형 커브(stress-strain curve)이다.
 도 4은 시편 1의 SEM 사진이다.
 도 5은 시편 2의 SEM 사진이다.
 도 6은 시편 3의 SEM 사진이다.
 도 7은 시편 4의 SEM 사진이다.
 도 8은 시편 5의 SEM 사진이다.
 도 9은 시편 6의 SEM 사진이다.
 도 10은 시편 2 내지 6의 X선 회절 그래프이다.
 도 11a는 일부 변형된 시편 2의 측면을 촬영한 SEM 사진이다.
 도 11b는 일부 변형된 시편 4의 측면을 촬영한 SEM 사진이다.
 도 12a는 시편 2의 AFM 사진과 사진과 그래프이다.
 도 12b는 시편 4의 AFM 사진과 사진과 그래프이다.
 도 13a은 시편 2의 TEM 명시야(bright-field) 사진이다.
 도 13b은 시편 4의 TEM 명시야(bright-field) 사진이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015] 이하, 본 발명을 보다 구체적으로 설명하기 위하여 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 첨부된 도면을 참조하여 보다 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명은 여기서 설명되어지는 실시예에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.

[0016] 본 발명의 일 실시예에 따른 Fe-Nb 합금은 $(\text{Fe}_{0.9}\text{Nb}_{0.1})_{100-x}\text{B}_x$ ($5 \leq x \leq 12.5$)의 조성을 가질 수 있다. 이러한 조성을 갖는 Fe-Nb 합금은 새로 생성된 NbFeB상을 포함할 수 있는데, 이러한 새로운 상의 형성은 B 첨가 전의 Fe-Nb 합금 대비 미세 조직의 변화를 발생시킬 수 있고, 이러한 미세 조직의 변화는 강도의 향상과 동시에 연성의 향상을 가지고 올 수 있다.

[0017] 강화상을 기지 내에 인위적으로 첨가하는 기존의 ex-situ 방식은 기지금속과 강화상 간의 계면반응으로 인하여 취성이 강한 금속간 화합물이 생성되는 한계가 있고 강화상이 기지 내에 고르게 분포되기 어렵다. 이러한 단점으로 인한 기계적 특성의 저하를 보완하기 위하여 본 실험에서는 기지금속 내에서 직접 강화상이 반응 생성되는 in-situ 방식을 적용했다.

[0018] Fe-Nb 합금은 먼저 모합금을 제조한 후, 이 모합금을 사용하여 제조될 수 있다. 상기 모합금은 99.9% 이상의 순도를 갖는 원소들 즉, Fe, Nb, 및 B를 고순도 아르곤 가스분위기하에서 아크 용해법을 사용하여 제조할 수

있다. 이 후, 이 모합금을 재료로 하여 금속응고법을 수행함으로써 B포함 Fe-Nb 합금으로 형성할 수 있다. 일 예로서, 상기 Fe-Nb 합금은 흡입주조(arc suction)법을 사용하여 형성할 수 있다.

[0019] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 Fe-Nb 합금의 SEM사진이다.

[0020] 도 1을 참조하면, 본 실시예에 의한 Fe-Nb 합금은 α -Fe 수지상 및 Fe_2Nb 수지상이 반복적으로 배치된 라멜라 구조를 갖는 제 1콜로니(A) 및 α -Fe 수지상 및 NbFeB 수지상을 포함하는 제 2콜로니(B)를 포함한다. 상기 콜로니는 주변 영역들과 서로 다른 결정(crystal) 형태를 가져 주변 영역들과 구분되는 영역으로서 결정립을 말한다. 초정상은 용융 금속(균일 액체)에서 처음으로 나오는 결정, 즉 정출하는 결정을 초정이라 하며 초정은 비교적 자유롭게 정출할 수가 있다. 초정상은 초정의 상으로 그 모양은 주로 수지상(樹枝狀), 구상(球狀), 또는 침상(針狀)을 포함한다. B를 첨가함에 따라 수지상 NbFeB를 포함한 제 2콜로니가 형성되고, 합금 내에서 원소들의 화학적 불균일성(chemical heterogeneity)을 야기할 수 있다. 외부에서 발생된 응력은 콜로니 경계의 전단밴드(shear band)를 따라 전파되는데, 상기 화학적 불균일성은 전단 밴드의 길이를 짧게 한다. 짧아진 전단밴드는 응력의 전파를 방해하여 연속적으로 전파되는 응력을 차단시킬 수 있다. 그래서 연성의 증가에 기여할 수 있다. 이러한 화학적 불균일성은 B가 상기 초정상 α -Fe 또는 Fe_2Nb 에 대한 용해도가 다를 때 발생할 수 있다. 구체적으로, B의 Fe_2Nb 에 대한 용해도가 α -Fe에 대한 용해도보다 높아 NbFeB 수지상을 형성할 수 있었다.

[0021] 도 2는 본 발명의 다른 일 실시예에 Fe-Nb 합금의 미세조직을 개략적으로 나타낸 도면이다.

[0022] 도 2를 참조하면, 본 실시예에 따른 Fe-Nb 합금은 구상의 NbFeB상 또는 구상의 α -Fe상을 포함한다. 상기 구상을 둘러싸는 NbFeB 수지상 및 α -Fe수지상이 반복 배치된 라멜라 구조가 배치된다. 상기 구상과 상기 라멜라 구조는 유사 구형의 콜로니를 형성한다. 상기 B는 상기 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 7.5 내지 12.5의 원자수로 함유될 수 있다. 다시말해 Fe-Nb 합금은 $(\text{Fe}_{0.9}\text{Nb}_{0.1})_{100-x}\text{B}_x$ ($7.5 \leq x \leq 12.5$)의 조성을 가질 수 있다.

[0023] 상기 유사 구형의 콜로니는 도 1을 참조하여 설명한 제 2 콜로니(도 1의 B)와 비교하여 크기가 더 미세하기 때문에 더 많고 짧아진 전단 밴드를 형성한다. 이와 같은 더 미세한 전단 밴드를 형성함에 따라 응력에너지의 전파를 더 효과적으로 방해할 수 있다. 또한, 상기 유사 구형의 콜로니에서 중앙부 구상에 가해진 응력은 NbFeB 수지상과 α -Fe 수지상의 계면들을 통해 완화될 수 있어 응력의 전파를 또한 방해할 수 있다.

[0024] 이하, 본 발명의 이해를 돕기 위하여 바람직한 실험예(example)를 제시한다. 다만, 하기의 실험예는 본 발명의 이해를 돕기 위한 것일 뿐, 본 발명이 하기의 실험예에 의해 한정되는 것은 아니다.

[0025] <모합금 제조예>

[0026] 99.9% 이상의 순도를 가지는 약 4 내지 5g의 Fe, 약 0.7 내지 1g의 Nb, 및 약 0.04 내지 0.2의 B를 챔버 내의 수냉중인 Cu몰드 위에 놓고, 10^{-5} Torr의 진공도와 고순도 아르곤(99.9%)가스 분위기 하에서 아르 용해하여 모합금을 제조하였다. 이 때, 합금 성분의 편석 발생 방지를 위해 시료를 5회 반전시키며 용해하였다.

[0027] <합금 시편 제조예>

[0028] 모합금 제조예에서 제조한 모합금을 원료로 하고 흡입주조법을 사용하여 합금 시편으로 제조하였다. 구체적으로, 모합금 제조예 1에서 제조한 용탕상태의 모합금을 메인 챔버와 석션챔버의 진공도 차이를 이용하여 수냉되고 있는 구리 몰드로 흡입하여 직경이 2mm이고 길이가 50mm인 봉상시편을 제조하였다.

[0029] <합금 시편 평가예 1: X선 회절 분석>

[0030] 제조된 합금 시편을 X선 회절 분석 장비(Rigaku Model: D/MAX-2500/PC)를 이용하여 분석하였다. X선 회절 분석은 파장 $\lambda=1.5406\text{\AA}$ 의 $\text{CuK}\alpha$ 1타겟을 사용하였고, 튜브 전압은 40kV, 전류는 100mA의 조건에서 행하였다. X선 회절 스펙트럼은 연속주사의 방법으로 $30^\circ \sim 90^\circ$ 의 범위에서 $2^\circ/\text{min}$ 또는 $4^\circ/\text{min}$ 의 속도로 얻어졌다.

[0031] <합금 시편 평가예 2: 미세조직 분석>

[0032] 제조된 합금 시편을 주사전자현미경(JEOL JSM-6390)과 투과전자현미경(JEOL JEM-2100F, Tecnai-F20) 이용하여 분석하였다. 주사전자현미경 분석은 제조된 합금을 정밀 연마한 후 진행하였다. W 타겟으로부터 발생된 전자를 20kV의 가속전압으로 설정하여 행하였으며, 이때 작동거리는 약 12 내지 15mm로 설정하였고 이차전자모드와 후

방산란전자모드를 이용하였다. 투과전자현미경 분석은 두께가 1mm 이하가 되도록 기계 연마를 한 시편을 이온 밀링(Gatan MODEL 600) 또는 집속이온빔(Helios D 456 FIB)을 통하여 시편을 준비한 후 투과 전자 현미경을 이용하여 제한 시야 회절 도형과 명시야상을 관찰하였다.

[0033] <합금 시편 평가에 3: 기계적 특성 분석>

[0034] 제조된 합금 시편의 기계적 특성을 평가하기 위하여 인스트론 타입(Instron Type)의 만능시험기를 이용하여 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정은 상온에서 등축압축응력으로 시험하였으며 일정한 변형속도(strain rate= 1×10^{-3} /s)의 조건에서 수행되었다. 제조된 합금 시편을 길이 4mm로 절단하였으며, 시편의 파괴가 일어날 때까지 변형되었다.

[0035] <합금 시편 평가에 4: 표면 특성 분석>

[0036] 제조된 합금 시편의 기계적 특성 평가 후 변형된 시편의 표면 특성 분석을 위해 원자간 힘 현미경(AFM, Parksystems XE-100)을 이용하여 관찰하였다. 분석 시 비접촉식 모드를 이용하였으며, NCHR silicon 캔틸레버를 사용하여 분석 하였으며, 표면의 굴곡이 상대 적으로 심한 시편에 대비하여 스캔 속도를 비교적 느린 0.2Hz로 설정하여 실시하였다.

[0037] 하기 표 1은 제조된 합금 시편들의 조성 및 기계적 특성을 나타낸다.

표 1

번호	조성	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_p (%)
시편1	Fe ₉₀ Nb ₁₀	1097	1837	4
시편2	(Fe _{0.9} Nb _{0.1}) ₉₅ B ₅	1375.5	1724.9	12.5
시편3	(Fe _{0.9} Nb _{0.1}) _{92.5} B _{7.5}	1460.1	1858.1	10.6
시편4	(Fe _{0.9} Nb _{0.1}) ₉₀ B ₁₀	1663.4	2112.6	20.8
시편5	(Fe _{0.9} Nb _{0.1}) _{87.5} B _{12.5}	1824.87	2273.2	5.58
시편6	(Fe _{0.9} Nb _{0.1}) ₈₅ B ₁₅	2044.34	2598.3	2.43
σ_y (MPa) : 시편 변형이 시작될 때의 응력 σ_{max} (MPa) : 시편 파괴가 일어난 시점의 응력 ϵ_p (%) : 변형의 정도				

[0039] 도 3은 시편들 2 내지 6의 상온에서의 압축응력하의 응력-변형 커브이다.

[0040] 도 3, 및 표 1을 참조하면, B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 5 및 7.5의 원자수로 함유된 합금들(시편 2 및 3)은 B가 첨가되지 않은 합금(시편 1)의 항복강도(σ_y (MPa))에 비해 우수한 항복강도를 나타내면서도, 소성구간(ϵ_p (%))이 증가하여 연성 또한 향상됨을 알 수 있다.

[0041] 또한, B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 10 및 12.5의 원자수로 함유된 합금들(시편 4 및 5)은 B가 첨가되지 않은 합금(시편 1)의 강도(σ_y (MPa), σ_{max} (MPa))에 비해 우수한 강도를 나타내면서도, 소성구간(ϵ_p (%))이 증가하여 연성 또한 향상됨을 알 수 있다. 특히, 시편 4 및 5의 경우 항복강도와 극한 강도가 기존의 합금에 비해 훨씬 우수해졌으며 연성 또한 증가되었음을 알 수 있다.

[0042] 한편, B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 15의 원자수로 함유된 합금(시편 6)은 B가 첨가되지 않은 합금(시편 1)의 강도(σ_y (MPa), σ_{max} (MPa))에 비해 우수한 강도를 나타냈지만, 소성구간(ϵ_p (%))이 짧아져 연성이 저하되었음을 알 수 있다.

[0043] 결론적으로, (Fe_{0.9}Nb_{0.1})_{100-x}B_x(5≤x≤12.5)의 조성을 갖는 시편들 2 내지 5는 B를 함유하지 않는 시편 1 또는 B를 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 15의 원자수로 함유하는 시편 6에 비해 강도의 향상과 더불어서 연성의 증가를 얻을 수 있다.

[0044] 도 4는 시편 1의 SEM사진이고, 도 5는 시편 2의 SEM사진이고, 도 6은 시편 3의 SEM사진이고, 도 7은 시편 4의

SEM사진이고, 도 8은 시편 5의 SEM사진이며, 또한 도 9는 시편 6의 SEM사진이다. 또한, 도 10은 시편 2 내지 6의 X선 회절그래프이다.

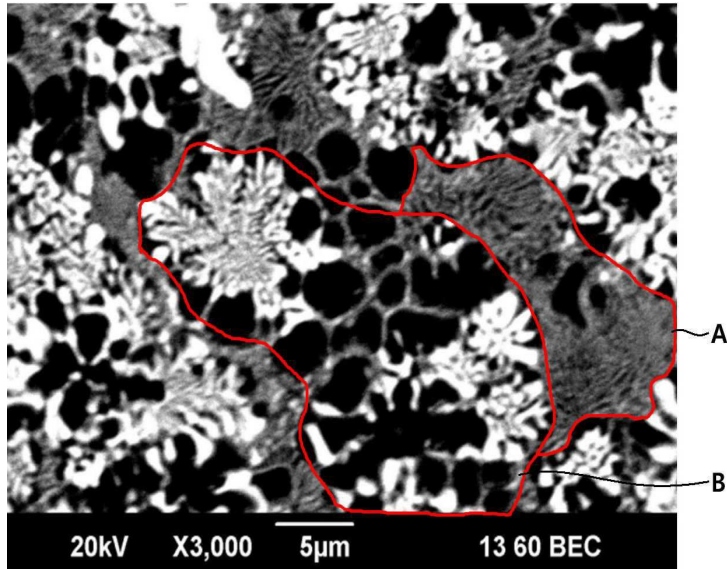
- [0045] 도 4, 도 5, 및 도 10을 참조하면, 시편2 경우 시편 1과 비교하여, B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 5의 원자수로 첨가됨에 따라 새로운 상을 포함한 새로운 콜로니(도 5의 B)를 형성함을 알 수 있다. 상기 새로 형성된 콜로니(도 5의 B)는 NbFeB상을 포함하는 것을 알 수 있다(도 10 참조).
- [0046] 도 6을 참조하면, 시편3 경우 B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 7.5의 원자수로 첨가됨에 따라 시편 2에서 나타났던 것과 유사한 NbFeB상을 포함하는 콜로니(도 6의 B)이 형성됨을 알 수 있다. 또한, 시편 3에서는 이와 더불어, 구상의 초정상을 둘러싸고 한쌍의 수지상들이 라멜라구조로 배치된 유사 구형의 콜로니(도 6의 C)가 형성되기 시작한다.
- [0047] 도 7 및 도 8을 참조하면, 시편 4에서는 B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 10의 원자수로 첨가됨에 따라 시편 3에서 나타났던 것과 유사한 유사 구형의 콜로니(도 7의 C)가 지배적으로 형성된다. 또한, B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 12.5의 원자수로 첨가된 시편 5에서도 상기 유사 구형의 콜로니(도 8의 C)가 지배적으로 형성된다.
- [0048] 한편, 도 9 및 도 10을 참조하면, 시편 6의 경우 B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 15의 원자수로 첨가됨에 따라 유사 구형의 콜로니가 줄어들고 새로운 콜로니(도 9의 D)가 형성된다.
- [0049] 상기 새로운 콜로니(도 9의 D)에 포함된 상은 Fe_{23}B_6 상 및 Fe_2B 상임을 알 수 있다(도 10 참조). 표 1을 참조하면, 상기 Fe_{23}B_6 상 및 Fe_2B 상이 형성된 이후 재료의 연성이 급격히 감소되었음을 알 수 있다. 이는 Fe_{23}B_6 상 및 Fe_2B 상이 재료의 연성을 감소시키는 상임을 알 수 있다.
- [0050] 도 11a는 일부 변형된 시편 2의 측면을 촬영한 SEM 사진이고, 도 11b는 일부 변형된 시편 4의 측면을 촬영한 SEM 사진이다.
- [0051] 도 11a를 참조하면, 시편 2의 경우 새로운 콜로니가 형성됨을 알 수 있다. 이는 B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 5의 원자수로 함유함에 따라 콜로니의 크기가 10~14 μm 인 것을 알 수 있다. 또한, 콜로니들 사이의 계면을 따라 전단 밴드가 형성됨을 알 수 있다.
- [0052] 도 11b를 참조하면, 시편 4의 미세한 콜로니가 형성됨을 알 수 있다. 이는 B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 10의 원자수로 함유함에 따라 콜로니의 크기가 6.5~10 μm 인 것을 알 수 있다. 또한, 콜로니들 사이의 계면을 따라 전단 밴드가 형성됨을 알 수 있다.
- [0053] 도 12a는 시편 2의 AFM 사진과 그래프이고, 도 12b는 시편 4의 AFM 사진과 그래프이다.
- [0054] 도 12a를 참조하면, 시편 2의 전단 밴드의 간격은 10.3~17.3 μm 로 상기 시편 2(B의 원자수가 5일 때) 콜로니의 크기와 비슷한 길이의 전단 밴드가 형성되었음을 알 수 있다.
- [0055] 도 12b를 참조하면, 시편 4의 전단 밴드 간격은 6.7~7.6 μm 로 상기 시편 4(B의 원자수가 10일 때)의 콜로니의 크기와 비슷한 길이의 전단 밴드가 형성되었음을 알 수 있다.
- [0056] 특히, B의 원자수가 7.5 내지 12.5일 때 구형 콜로니를 형성함에 따라 더욱 미세한 전단 밴드를 형성함을 예측할 수 있다.
- [0057] 도 13a는 시편 2의 TEM 명시야(bright-field) 사진이고, 도 13b는 시편 4의 TEM 명시야(bright-field) 사진이다.
- [0058] 도 13a를 참조하면, B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 5일 경우(시편 2) 움푹 파인 곳(dimple)이 패턴처럼 나타나 조대한 콜로니가 형성됨을 알 수 있다. 또한 도 13b를 참조하면, B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 10일 경우(시편 4)에도 상기 움푹 파인 패턴이 나타나고 더욱 미세한 콜로니가 형성됨을 알 수 있다.
- [0059] 정리하면, B가 Fe와 Nb의 합계 원자수를 100으로 할 때 5 내지 12.5의 원자수로 함유했을 때 새로운 콜로니가 형성됨에 따라 콜로니의 경계를 짧아진 전단 밴드가 외력의 전파를 차단함으로써 Fe-Nb의 강도와 연성이 우수해졌음을 알 수 있다. 한편, 상기 원자수가 7.5 내지 12.5일 경우, 유사 구형의 콜로니를 형성하여 더 미세한 전단밴드를 형성하여 재료의 강도 뿐만 아니라 연성이 더욱 우수해졌음을 알 수 있다.

[0060]

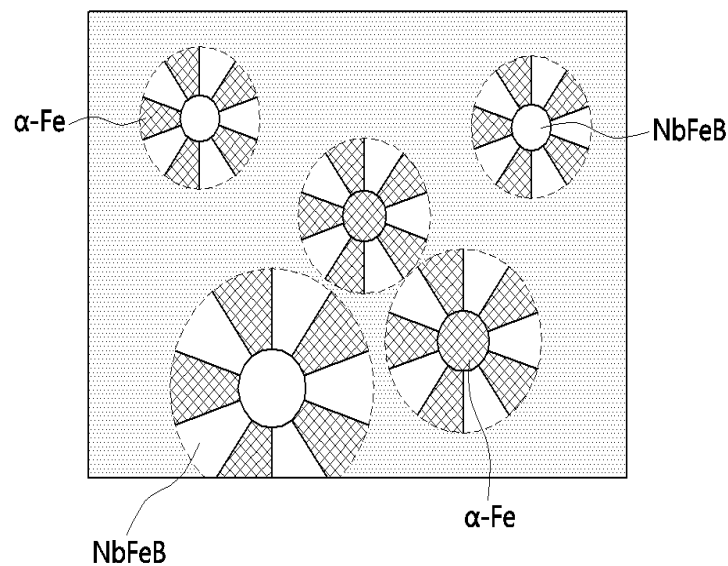
이상, 본 발명을 바람직한 실시예를 들어 상세하게 설명하였으나, 본 발명은 상기 실시예에 한정되지 않고, 본 발명의 기술적 사상 및 범위 내에서 당 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의하여 여러 가지 변형 및 변경이 가능하다.

도면

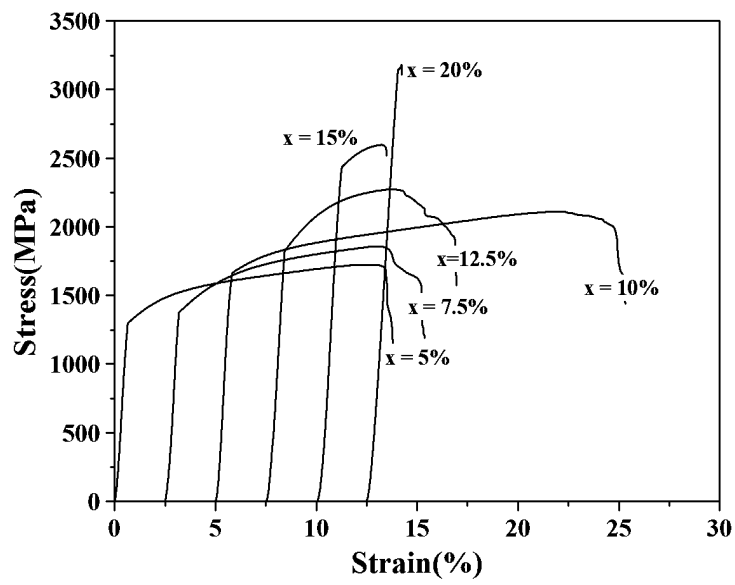
도면1



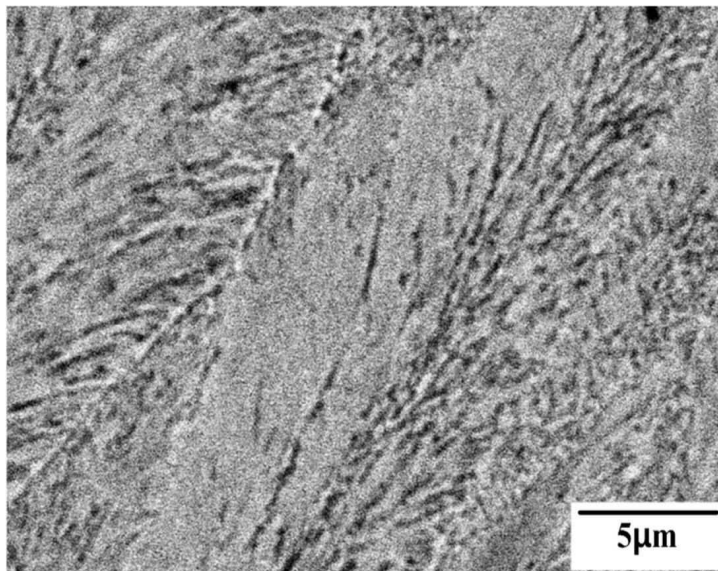
도면2



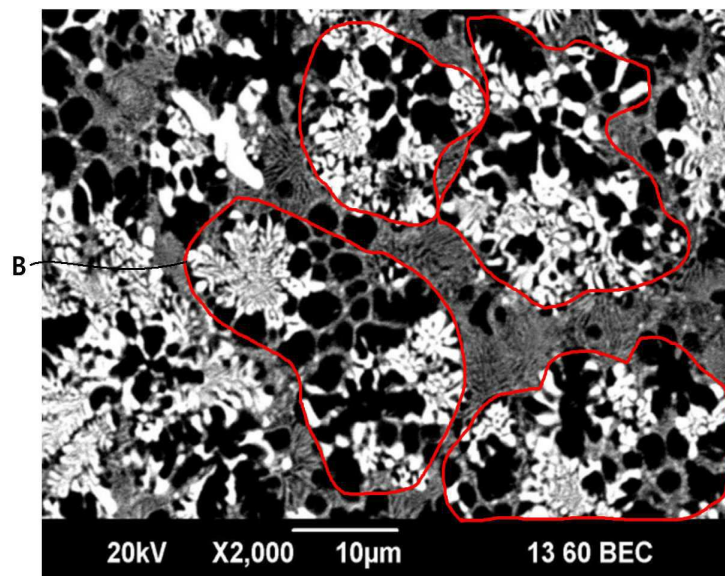
도면3



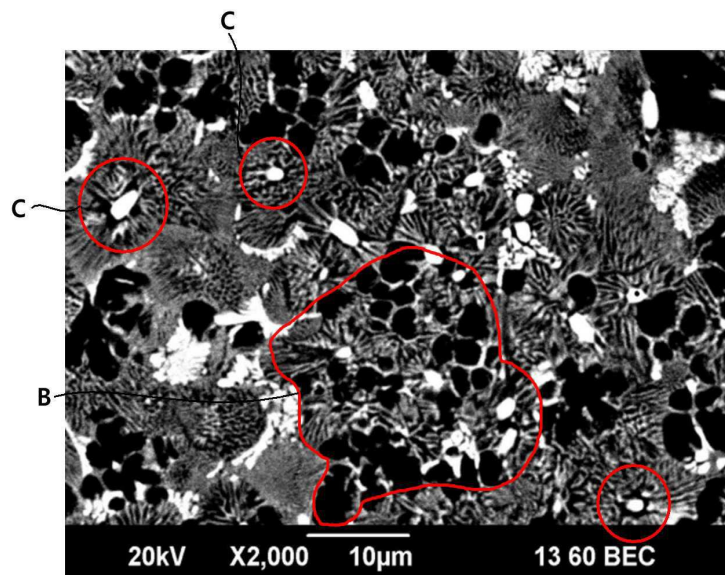
도면4



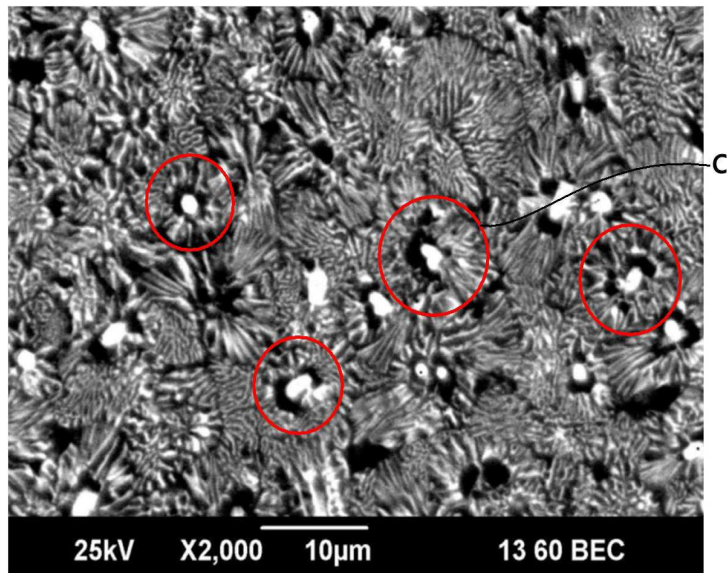
도면5



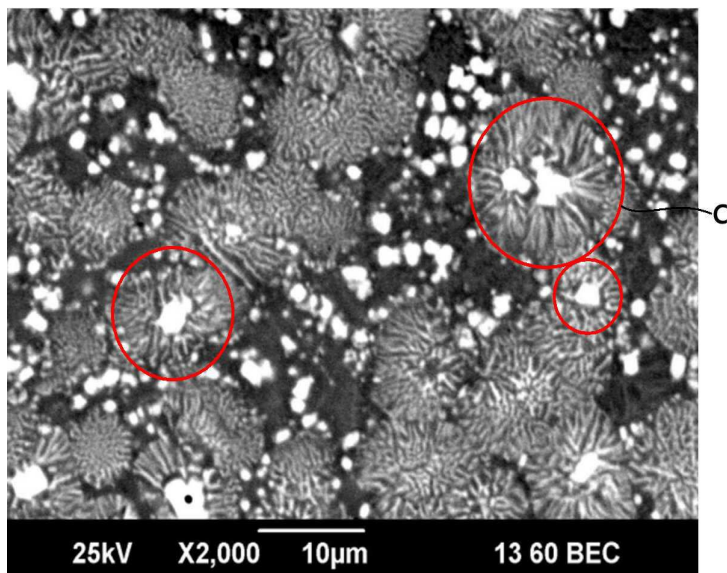
도면6



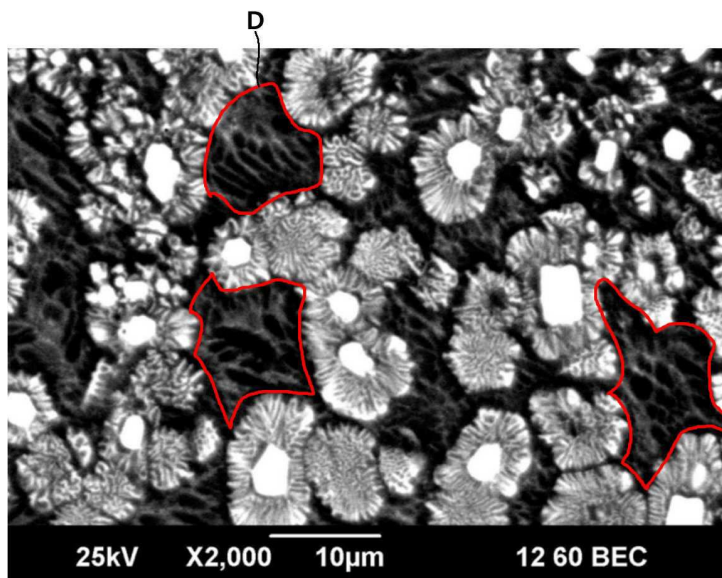
도면7



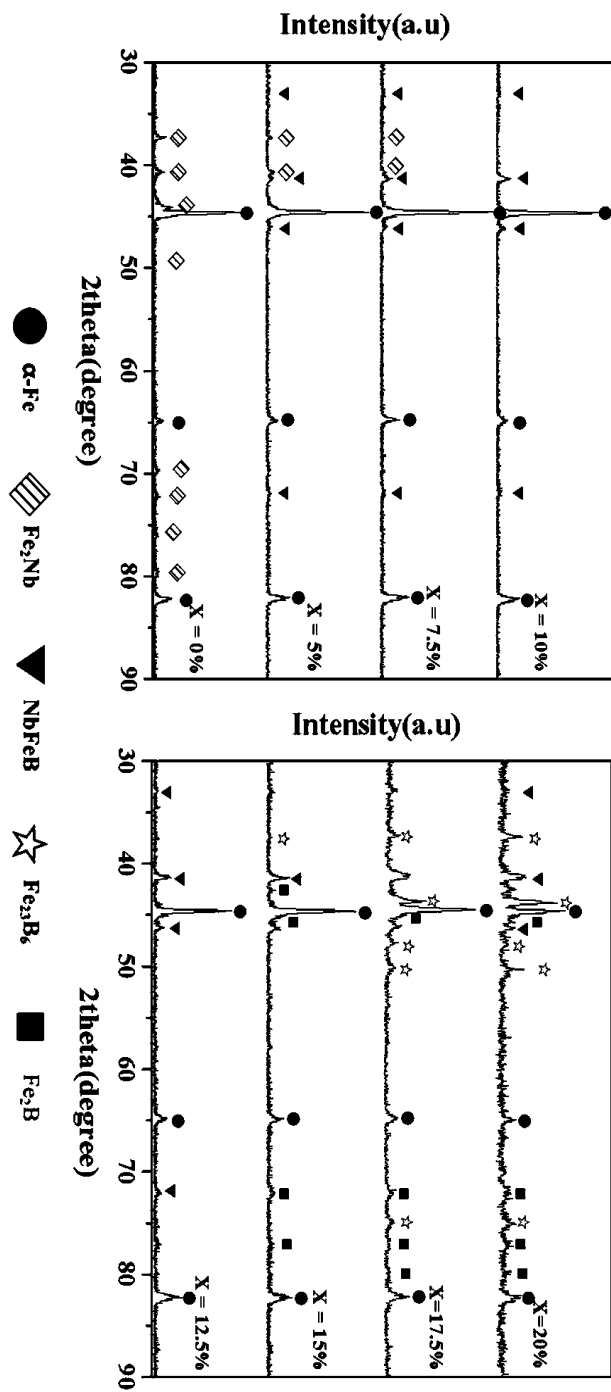
도면8



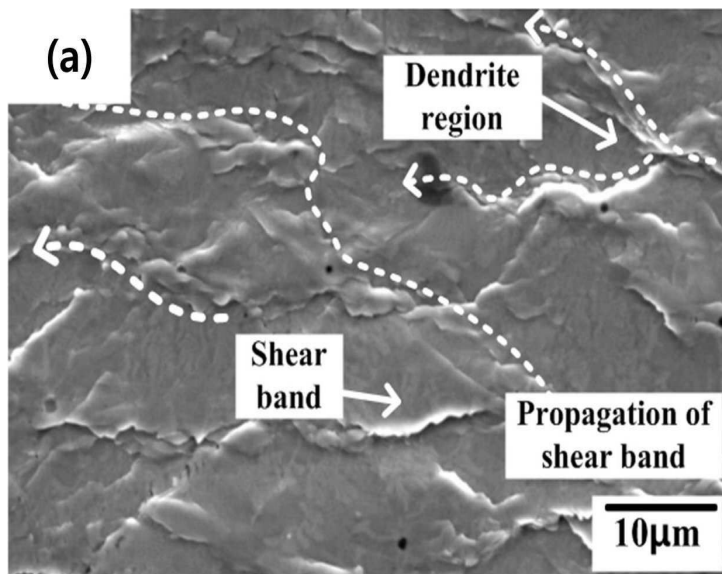
도면9



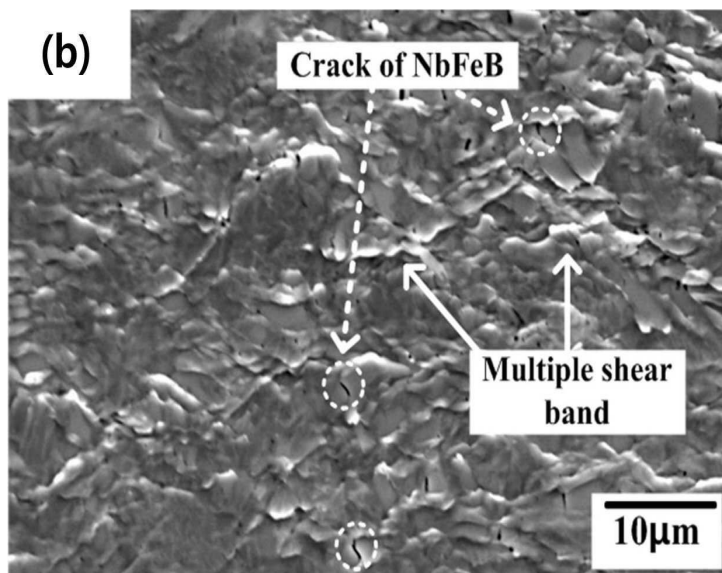
도면10



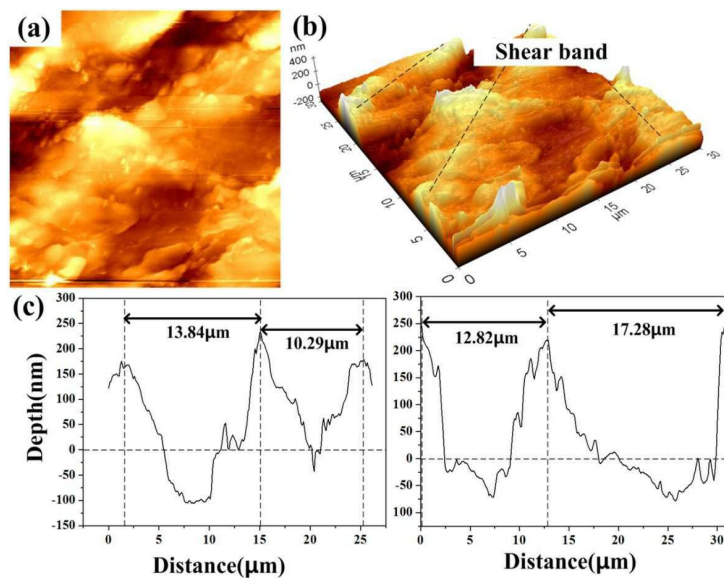
도면11a



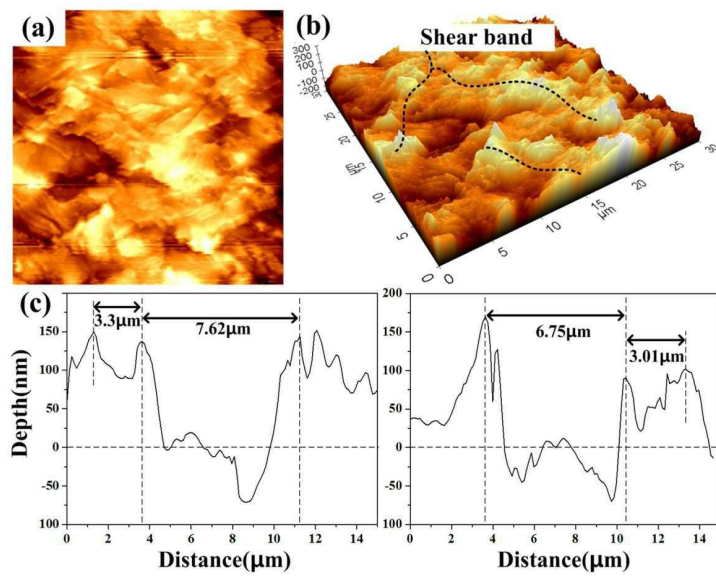
도면11b



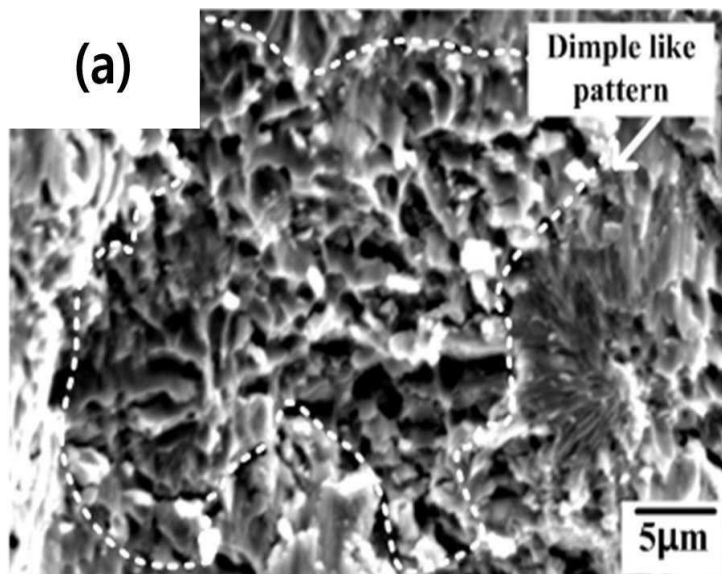
도면12a



도면12b



도면13a



도면13b

