

오스테퍼링한 구상흑연주철의 용어 및 조직

김한군 · 빈정욱
부경대학교 신소재공학부

On the Terminology and Structure of ADI

H. G. Kim, J. U. Bin

Division of Material Science & Engineering, Pukyong National University, Busan 608-031, Korea

오스테퍼링한 구상흑연주철(ADI)의 제조공정 및 현미경조직은 식별하기 어려운 경우가 많이 있다. 이것은 어느 측면에서는 ADI의 반응을 잘 못 이해하고 있기 때문이며, 또 한편으로는 주철과 강의 금속 조직에 대한 확실한 개념이 부족하기 때문이다. 본 고에서는 AFS Transaction에 게재된 B. V. Kovacs의 "On the terminology and Structure of the ADI"의 내용을 번역 정리하여 이러한 문제들을 해결하는데 도움을 주고자 한다.

1. 개 요

오스테퍼링한 구상흑연주철은 상대적으로 하나의 새로운 공학재료, 즉 신소재이다. 따라서 일반적으로 사용되고 있는 용어와는 다소 상이한 면이 있다. 여기서 사용되는 개념들은 문헌에서 이미 인용되고 있으며, 또 한편으로는 여러 가지 다른 이름을 갖는 개념들도 있다. 이러한 사실은 오스테퍼링 공정에 대해서 이론적으로 아직도 규명되지 않은 점이 있기 때문이다. 여기서는 이러한 점에 대하여 일반적으로 잘못 이해하기 쉬운 점들을 명백히 하고자 하는데 그 목적이 있다. 또한 통일된 용어를 만들기 위한 준비과정으로서 의미를 부여할 수도 있다.

2. 본 론

2.1 오스테퍼링 열처리 사이클

그림 1은 오스테퍼링 열처리 사이클의 개요도이다. 주물을 840-950°C(도표에서 A-B) 온도 범위까지 가열하여 이 온도에서 전체 기지조직이 FCC(면심입방)

오스테나이트로 변태될 때까지 유지 시키는데 이때 그림의 B-C에서 탄소가 포화상태로 된다.

오스테나이트화 처리 후 퀴칭시키는데 오스테퍼링 온도인 230-400°C사이로 급격히 냉각시키고 그 온도에서 유지한다. 퀴칭이 정확히 이루어지면 주물전체는 오스테퍼링 반응(페라이트 핵생성) 시작(E)전에 목표로 하는 오스테퍼링 온도로 냉각시킨다. 주물은 전체 기지조직이 침상페라이트와 오스테나이트(F)로 변태 될 때 까지 오스테퍼링 온도에서 유지 시킨다.

대체로 이 단계에서 오스테퍼링이 완료되고 주물은 실온까지 냉각시켜야 한다고 생각하기 쉽다. 그러나 이것은 가장 잘못된 생각 중의 하나이다. 지점 E와 F사이의 기간 동안 탄소는 잔류 오스테나이트속으로 확산되어 오스테나이트 탄소함량이 1.2%와 1.6%사이의 농도까지 증가하게 된다. 이러한 높은 탄소함량으로 인해 오스테나이트가 준안정 상태로 된다.

오스테나이트는 실온에서 기지조직 내에 존재할 수 있지만 안정하지는 않다. 만약 주물을 실온이하로 냉각시키거나 기계가공과 같은 응력을 받으면 준안정

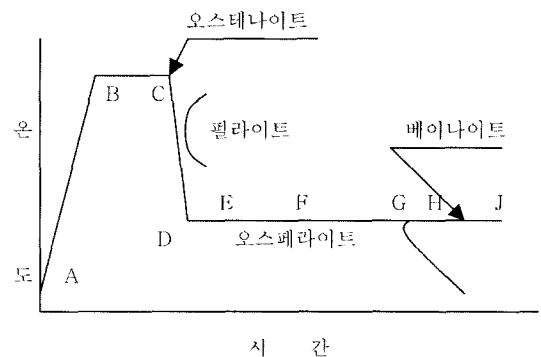


그림 1. 오스테퍼링 열처리 사이클의 개요도.

오스테나이트는 BCT(체심 정방) 마르텐사이트로 변태될 수 있다. 이 변태는 기계적 문제점들, 치수변화와 연성을 손상시키는 원인이 된다.

열처리과정 중의 F-G영역에서 페라이트 핵생성은 일어나지 않는다. 그러나 존재하는 페라이트 입자들이 계속적으로 성장하여 잔존 오스테나이트속으로 보다 많은 탄소들을 이동시켜서 오스테나이트의 탄소농도를 증가시킨다. 이 기간에서 주물의 화학적조성은 일반적으로 오스테나이트 탄소농도가 1.8%-2.2%까지 증가된다. 이 탄소 농도에서 오스테나이트는 ADI 등급 1과 2에서 열적으로 그리고 기계적으로 안정해진다.

오스템퍼링 온도를 낮춤에 따라(즉, 등급수를 증가시킴) 조직은 점차 미세해진다. 기지조직 내의 오스테나이트 판들의 폭은 탄소농도를 측정할 수 있는 광선의 직경보다 작아진다. 여기서 얻어지는 탄소측정은 하나의 근사치이다. 오스테나이트속의 탄소함량은 주물의 조성, 오스테나이트 온도, 페라이트/오스테나이트의 비율과 측정치로부터 추정한다. 이러한 근사치는 오차가 비교적 크다. 등급 3,4 및 5 ADI는 약간의 탄화물을 함유하는 경향이 있다. 이것은 오스테나이트 탄소함량의 근사값을 추정하는데 더욱 어렵게 만든다. 마이크로프로브 같은 기지조직 내의 탄소함량을 측정하는 측정장치는 총탄소함량을 측정하므로 오스테나이트속에 있는 탄소와 탄화물 속에 있는 탄소를 구별할 수 없다. 이는 등급 5 ADI의 안정한 오스테나이트 탄소용량은 등급1에서의 것 보다 높다고 가정된다.

주조품을 열처리 공정의 G점보다 장시간 유지시킬 때 오스테나이트는 탄소를 더 이상 함유하지 못하고 탄화물 핵의 생성이 시작된다. 결국 모든 오스테나이트는 페라이트로 변태되고 거의 모든 탄소는 지점 J에서 베이나이트, ε, 탄화물을 형성한다. 이때 주물은 베이나이트로 된다. 등급 1과 2 주물에서 최대탄소함량은 약 2.2%이다. 이때 최대치는 주물의 화학적조성에 따라 변한다. 만약 오스테나이트 탄소농도가 2.2%를 초과하면 베이나이트 변태는 보다 쉽게 일어난다. 저자는 오스테나이트의 탄소농도를 2.4%만큼 높은 경우도 측정한 경우가 있기는 하지만 이것은 특수한 경우로 간주된다. ADI 열처리 현미경조직을 그림 2에 나타낸다.

그림 2. 등급 1 ADI 열처리 현미경조직.

2.2 오스테나이트의 분류

열처리 사이클의 초기에 주물의 전체 기지조직은 오스테나이트화 된다. 이 오스테나이트는 주물의 화학적조성과 오스테나이트 온도에 따라 0.8-1.1%의 탄소농도를 갖는다. 용질 편석으로 인하여 주물에서 탄소분포가 불균일하다. 탄화물 형성 원소들은 셸링계 지역에서 편석되고 국부적으로 탄소용해도를 증가시킨다. 탄소와 탄화물 형성원소들이 이 들 영역에서 오스테나이트를 안정화 시킨다. 오스템퍼링 반응은 주물의 나머지 부분에서 이루어 지지만 셸링계 지역에서 주물은 많은 양의 오스테나이트를 포함하게 된다. 이 오스테나이트는 종종 “잔류 오스테나이트” “원래의 오스테나이트”, “저탄소 오스테나이트”, “셸링계(chicken wire) 오스테나이트”, “미변태 오스테나이트”, “백색에칭상”과 “감마폴”로 불리어진다. 이들 이름 중 어떤 한 것도 적절한 표현은 아니다. 이러한 오스테나이트를 그림 3에 나타낸다.

“잔류 오스테나이트(Retained Austenite)”라는 말도 적당한 표현이 아니다. 오스템퍼링된 조직에서 모든 오스테나이트는 오스테나이트화 처리기간 동안(지점 B와 C사이) 얻어진 원래의 오스테나이트 기지조직으로부터 생성된다. “원래의 오스테나이트(Original Austenite)”는 비교적 정확한 이름에 가깝지만 기술적 내용을 내포하는 데는 다소 부족한 감이 있다. “저탄소 오스테나이트(Low Carbon Austenite)” 또한 정확한 표현이라고 보기에는 부족하다. 그 이유는 오스테나이트화 시키는 동안 이 오스테나이트는 최고

그림 3. 미반응 준안정 오스테나이트를 가진 ADI 현미경 조직.

의 탄소함량을 함유하기 때문이다.

실지로 오스텝퍼링후에 최저의 값을 가진다. 이 오스테나이트는 오스텝퍼링 반응에 참여하지 않기 때문에 그의 탄소함량은 열처리 동안 변화하지 않는다. “셀경계(Cell Boundry)” 또는 “chicken wire” 오스테나이트는 위치와 모양을 묘사하고 있지만 기술적 내용은 나타내지 않고 있다. “백색에칭(White Etching)”상 역시 이 범주에서 벗어난다.

이 유형에 대한 오스테나이트의 정확한 명칭은 미반응 준안정 오스테나이트(Unreacted Metastable Austenite)가 적당하다. 이러한 명칭은 다음과 같은 내용을 나타내고 이것은 오스텝퍼링 반응에 관여하지 않아서 오스텝퍼링 공정동안 탄소 농도가 변화하지 않고 준안정하다는 것이다.

오스텝퍼링(지점 E와 F사이)동안 형성된 또 다른 형태의 오스테나이트가 있다. 이것은 반응 오스테나이트이다. 이것의 탄소 함량은 오스텝퍼링 반응 동안 현저히 증가한다. 이 오스테나이트의 일반적 탄소함량은 1.2%에서 1.6% 범위이다. 이러한 탄소함량을 가진 오스테나이트는 실온에서 준안정하다. 이것은 주물을 낮은 온도까지 냉각을 시키거나 기계가공(압연이나 소피닝) 같은 스트레스에 의해 마르텐사이트로 변태된다. 이러한 형태의 오스테나이트에 적합한 이름은 반응된 준안정 오스테나이트(Reacted Metastable Austenite)이다.

오스텝퍼링한 조직에서 오스테나이트의 세 번째 유형은 지점 F와 G사이에서 생성되고 그림2에 나타냈다. 이 기간 동안 오스테나이트 탄소 농도는 약 2%

까지 증가한다. 이 탄소 함량을 가진 오스테나이트는 열적으로 기계적으로 안정해진다. 이러한 유형의 적절한 이름은 반응된 안정 오스테나이트(Reacted Stable Austenite)이다. 이러한 형태의 오스테나이트가 일반적으로 필요하고 그 외 2가지 유형은 그렇지 못하다. 반응된 안정 오스테나이트와 반응된 준안정 오스테나이트를 육안으로 구별하기는 쉽지 않다. 단지 하나의 특별한 기술, 가열착색으로만 그 둘의 차이를 밝혀 낼 수 있다.

ADI에 있어 오스테나이트의 3가지 유형을 나타내는데 가장 적합한 표현법은 미반응 준안정 오스테나이트, 반응된 준안정 오스테나이트, 그리고 반응된 안정 오스테나이트이다. 여기서 단지 최후자가 ADI 처리에서 유용하게 사용되는 조직이다.

2.3 페라이트의 분류

ADI에서 사용되는 페라이트에는 3가지의 유형이 있다. 미세한 침상페라이트(Acicular Ferrite)(그림2), 조대한 초석페라이트(Pro-eutectoid Ferrite)(그림4)와 베이나이트 페라이트(Bainitic Ferrite)(그림5). 침상페라이트는 오스텝퍼링한 기지조직의 한 부분으로 ADI에서 필요로 하는 페라이트 형태이다. 이것은 다소 부적절한 표현이지만 일반적으로 베이나이트 페라이트라고 불린다.

초석페라이트는 낮은 오스테나이트화 온도에서 생기는 것이다. 오스테나이트화 온도가 낮을 때 오스테나이트, 페라이트와 흑연은 오스테나이트화 처리 동안 평형상태로 존재한다. 초석페라이트는 오스테나이트화 시간과 관계없이 기지조직 속에 존재한다. 그림4의 시편은 860°C에서 2시간동안 오스테나이트화 하고 수냉한 조직이다. 퀘칭시 오스테나이트는 마르텐사이트로 변태되지만 페라이트 형태는 오스테나이트화 동안 그대로 유지된다.

초석페라이트는 높은 규소농도영역 즉, 흑연모들들 근처에서 형성된다. 이것은 조대하고 낮은 기계적 특성을 가진다. 베이나이트 반응이 완료될 때(지점 J) 전체 기지조직은 미세한 베이나이트, 내부에 분산된 탄화물, ε을 갖는 페라이트이다. 비록 침상페라이트와 베이나이트 페라이트의 결정 구조들이 비슷하지만 형태들은 그렇지 않다. 기지조직은 베이나이트 하지만 오스테나이트 하지는 않다. 베이나이트 페라이트는

베이나이트”와 “하부베이나이트”라고 부르기도 한다. 그밖에 어떤 사람들은 하나의 타협 점을 위한 체면을 세우는 방법을 찾았다.

이러한 사실은, 우리가 주철을 그 속에 흑연입자들이 산포된 하나의 특수강이라고 간주 함으로써 비롯된 것이다. ADI 공정을 이해한다는 것은 우리가 강과 주철의 금속조직상의 차이점을 이해한다는 것을 의미한다. 비록 그 둘 사이에 유사한 점들이 있다 할지라도 강에 대한 금속조직학적인 개념을 주철에 그대로 억지로 적용할 수는 없다는 것이다.

그림 4. 흑연 모듈 주위의 초석 페라이트.

그림 5. 베이나이트 조직의 개략 도해.

오스테퍼링된 조직의 부분은 아니지만 ADI에서 존재하지 않는다.

ADI에서 바람직스러운 3가지 유형의 페라이트 이름은 침상페라이트, 초석페라이트와 베이나이트 페라이트이다.

2.4 ADI 현미경 조직

오스테퍼링 시킨 구상흑연 주철조직은 여러 가지 이름들로 불린다. ADI의 기지조직을 처음 발견 되었을 때 강에서와 같이 베이나이트로 생각되었었다. 그래서 베이나이트로 불려졌다. 수년이 지난후 X-ray 결정 구조학으로 인해 베이나이트가 아니라고 증명이 되었었다. 이때 까지 문헌들은 “베이나이트” 구상흑연주철 논문들로 넘쳐났고 그 이름이 널리 퍼졌었다. 이들 논문들의 저자 몇몇은 아직까지 그 ADI 조직이 베이나이트가 아니라는 사실을 인지하지 못하고 있고 다른 사람들은 그 발견을 무시하였다. 이러한 이름을 변경하는 것은 어떤 사람들에게는 그들의 연구결과가 모두 틀렸다는 것을 인정하는 것일 수도 있기 때문이다. 그래서, 이러한 명칭을 변경하는 것을 다소 원망하는 분위기가 내재되어 있어 여전히 “상부

주철과 강의 주요한 차이점은 다음과 같다:

1. 강 시편의 탄소함량은 어떠한 열처리와는 상관 없이 일정하게 남아있다(강력한 침탄을 통해 표면탄소함량이 증가되는 것을 제외하고). 오스테나이트화 온도를 변화시켜도 강속의 기지조직의 탄소함량은 변화되지 않는다. 오스테나이트화 온도에서 실온까지의 냉각 속도로 인해 기지조직은 변할지라도 탄소함량은 변화가 없다. 강속의 탄소함량은 일정하게 남아 있다.

흑연입자들의 존재 때문에 주철의 기지조직 탄소함량은 오스테나이트화 온도에 의해 약 0.7-1.7%사이로 변한다. 오스테나이트화 온도에서 실온까지 냉각 속도로 인해 주철 기지조직 함량은 실질적으로 0 - 1.7%까지 변할 수 있다. 주철에서의 탄소함량은 계속적으로 변한다.

2. 강은 한 개의 상 형태로 응고되고 그 용질분포는 상대적으로 균등하다. 이와는 달리 주철은 뚜렷한 용질편석을 일으키는 공정과정을 통해서 응고하며, 다양한 국부적인 탄소용해도를 갖고, 다양한 탄소카이네틱(증가된 탄소확산성)을 갖는 다는 것이다.

3. 규소는 강에서는 유해한 요소로 간주되지만 주철에서는 필수적 요소이다. 규소는 베이나이트 카바이드 형성을 지연시키는데 이는 오스페라이트 ADI 조직을 만드는데 필요하다. 단조 강 같은 전형적인 강에서는 이러한 조직은 되지 않고 형성될 수도 없다.

강을 주철과 같은 유사한 화학적 조성을 가진 합금으로 만들 수도 있고 주철의 것과 유사한 조직을 갖게 오스테퍼링할 수도 있을 것이다. 그러나 단지 유사할 뿐이다. 오스테나이트/페라이트 기지조직은 탄소가 부족하다. 만약 철이 오스테퍼링을 정확히 하여

오스테나이트가 안정되었을지라도 좋은 기계적 특성을 위해 필수적인 안정 오스테나이트 체적이 주철에 의한 것보다 30-50%밖에 되지 않는다. 간단히 말하면 강에서는 좋은 오스테나이트/페라이트 ADI형 조직을 얻기에는 탄소가 불충분하다.

정확한 ADI조직은 침상페라이트와 안정한 고탄소 오스테나이트로 만들어진다. 조직은 펄라이트, 베이 나이트 카바이드와 마르텐사이트로 들어 있어야 한다. 이와 같은 조직을 얻기 위해 기술적으로 정확한 표현의 이름은 오스페라이트로 그 조직은 오스테나이트와 페라이트로 구성되어 있다는 것을 의미한다. 하나의 적합한 이름을 찾기 위해 상당한 시간이 경과한 후 1992년 오스페라이트가 ADI 조직을 위한 ASTM(A644-92)표준 명칭으로 되었다.

비록 본 고에서는 오스텝퍼링된 구상흑연주철을 다루고 있지만 그 용어는 오스텝퍼링된 가단주철(AMI)과 오스텝퍼링된 회주철(AGI)에까지 확대해서 사용할 수 있을 것이다.

2.5 ADI에서의 펄라이트

ADI에 있어 펄라이트는 유해한 것이다. 이는 강도 특성과 연성에 해를 끼친다. ADI의 펄라이트 조성은 보통 구상흑연주철에서의 것과 비슷하다. 그러나 그 위치는 ADI에 있어 완전히 다르다. 보통 구상흑연주철에서는 펄라이트가 흑연모듈로부터 떨어진 셸경계 지역에 형성되는 반면 ADI에서는 셸경계 면에서는 보기 힘들고 모듈 근처에 형성된다. 그 이유는 보통 구상흑연주철에서 펄라이트 증진 혹은 안정화 원소들이 셸경계 영역에서 편석되기 때문이다.

한편 규소는 역으로 흑연 모듈 근처에서 편석된다. 규소는 오스테나이트에서 탄소용해도를 낮추어 기지 조직으로부터 흑연모듈쪽으로 탄소확산을 촉진시킨다. 이는 불스아이(bull's-eye) 페라이트의 생성을 촉진시킨다.

탄소는 ADI 열처리 동안 하나의 강력한 경화제이다. 규소편석은 탄소용해도, 즉 모듈 주위에 경화능을 낮춘다. ADI에서 펄라이트가 형성되면 모듈들 근처에 형성 될 것이다.

2.6 ADI에서의 마르텐사이트

구상흑연주철에서는 주요한 용질편석이 일어난다.

이 편석은 그 기지조직내 일정치 않은 탄소용해도에 기인한 것이다. 탄소는 마르텐사이트가 시작되는 온도, Ms에 영향을 미치고 기지조직내 여러 가지 마르텐사이트 변태의 원인이 된다. 이러한 이유로 인해 국부 마르텐사이트변태는 등급 5 ADI에서는 일상적으로 존재하는 것이다.

ADI에서 마르텐사이트는 강의 것과는 다소 다르다. 주철 마르텐사이트에서 탄소농도는 1.6%만큼 높을 수 있으나 보통 탄소강에서는 최고치가 0.8%에 불과하다. ADI 기지조직에 마르텐사이트가 형성될 때 그것의 퀴칭경도는 강에서의 것보다 높고 기계가공이 매우 어려워 거의 불가능하다. 여기서 존재하는 마르텐사이트는 순식간에 공구를 마모시킨다. 이들 부분들은 단지 연삭으로만 가공이 가능하다.

오스텝퍼링한 기지조직속에는 2가지 종류의 마르텐사이트가 있다. 만약 마르텐사이트가 퀴칭후 바로 형성되었다면 높은 국부 Ms온도 때문에 이 마르텐사이트는 오스텝퍼링 공정동안 템퍼링 되고 경도는 낮아진다. 다른 한편으로는 준안정 오스테나이트로부터 형성되었다면 기계가공시의 스트레스나 실온이하로의 냉각으로 인해 이 마르텐사이트는 매우 높은 경도를 가질 것이다. 그림 7은 이와 같은 마르텐사이트를 나타낸다.

3. 결 론

1. ADI에 대한 통일된 용어가 필요하다.
2. 오스텝퍼링한 현미경조직을 위한 ASTM 표준 명칭은 오스페라이트이다.
3. ADI에서 오스테나이트를 3가지 형태로 표시하

그림 6. 불충분한 퀴칭속도로 인해 모듈주위에 형성된 펄라이트.

된 안정 오스테나이트만이 ADI에서는 필요하다.

4. 오스페라이트 기지조직에 3가지 형태의 페라이트가 있다. 이러한 이룸들은 a) 침상페라이트 b) 초석페라이트와 c) 베이나이트 페라이트. 단지 침상페라이트만이 ADI에서 바람직스러운 조직이다.

5. ADI에서 펄라이트는 모듈 근처에 형성되나 보통 구상흑연주철에서는 모듈에서 떨어져 쉘경계 지역에서 형성된다. 펄라이트는 ADI특성상 존재하면 오히려 유해하다.

6. ADI에서 2가지 유형의 마르텐사이트가 있을 수 있다. 그것은 a)오스템퍼링 열처리공정 후 형성되어진 미템퍼링된 마르텐사이트 b) 오스템퍼링 공정중에 펌퍼링된 마르텐사이트이다. 마르텐사이트는 ADI에서 아주 유해한 조직이다.

그림 7. 준안정 오스테나이트가 소성가공으로 마르텐사이트로 유기변태된 조직.

면 a) 미반응 준안정 오스테나이트 b) 반응 준안정 오스테나이트 c) 반응 안정 오스테나이트. 단지 반응