

기술자료

회주철 용해시 합금 원소의 적절한 첨가

권해욱[†] · 서갑성*

영남대학교 신소재공학부

*대한특수금속주식회사

Proper Addition of Alloying Element during Melting of Gray Cast Iron

Hae-Wook Kwon[†] and Gap-Seong Seo*

School of Mat. Sci. & Eng., Yeungnam Univ., Gyeongsan, 712-749, Korea

*Daehan Special Metal Co., Ltd. 1434, Songgok-Ri, Dasan-Myun Koryung-Gun, Kyung-Buk, Korea

1. 합금 원소 인자 도표

오래전부터, Fig. 1에서 보이는 바와 같은 합금 원소 인자 도표(chart)를 기준으로 주철의 인장 강도를 요구되는 양만큼 증가시키는데 필요한 양을 결정하였다. 이 도표에서, 종축은 합금 원소의 함량(wt%)이고, 횡축은 합금 원소를 첨가하여 주철에서 얻을 수 있는 강화 효과이다. 이 도표로부터, 주철에 주어진 양의 합금 원소를 첨가하였을 때 바나듐이 강도를 가장 크게 증가시키고 니켈이 가장 작게 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

이 도표에서 망간, 크롬 및 바나듐 함량이 증가함에 따라, 실선에서 점선으로 바뀌는 것이 눈에 띈 것이다. 이것은 0.60%까지의 망간은 일반적으로 강화 효과를 나타내지 않는다는 것을 뜻한다. 망간은 먼저 황화망간(MnS)으로 황과 결합하여, 취성이 큰 황화철(FeS)이 형성하는 것을 방지하기 때문이

다. 황의 함량이 0.10%인 경우에, 황화철이 형성하는 것을 방지하기 위하여 약 0.60%의 망간이 필요하다. 따라서, 망간 함량이 0.60%를 초과하는 경우에만 주철의 강도를 높인데 망간이 기여할 수 있을 것이다.

크롬의 경우에, 0.50%를 초과하는 경우 얇은, 주철의 화학 조성과 관련된 주물의 단면 크기에 따라서, 회주철에 과도한 철을 야기시킬 수 있다. 두꺼운 단면의 주물에서, 크롬은 탄화물을 형성하는 경향이 작을 것이고, 따라서, 점선 부분을 포함하는, 전체 크롬 선을 따라서 강화제로 작용할 것이다. 보통, 크롬 함량 0.50%까지는 30.5 mm 직경의 시험 봉재 주조품에서 탄화물 형성 문제는 없을 것이다.

바나듐의 경우에도 같은 현상이 존재한다. 만약에 바나듐이 주철 중에 고용되어 있고 응고가 일어나는 동안 탄화물을 형성하지 않으면, 회주철을 현저하게 강화시킬 것이다. 직경 30.5 mm의 시험 봉재 주조품에, 주철 중 0.30%까지의 바나듐은 탄화물 문제를 야기시키지 않는다. 그 양을 초과하면, 주철 중에 바나듐이 고용된 경우에, 바나듐 선의 점선 부분과 일치하여 강화 효과가 있을 것이다. 그러나, 어떤 경우에도 주조품 내에 탄화물이 바람직하지 않으면 두께 76.2 mm 이하의 회주철 주물 내의 바나듐 함량은 0.5%를 초과하지 않아야 한다.

비록 몰리브덴은, 탄화물을 형성시키는 문제를 야기시키는 것으로는 도표에 나타나지 않지만, 특히 탄소 당량이 4.0%보다 작은 주철 용탕을 주입하여 얻은 얇은 단면의 회주철 중에서, 심하지 않은 탄화물 형성제이다. 크롬과 바나듐이 존재할 때에, 몰리브덴은 이 원소들과 협력하여 복잡한 탄화물을 형성할 수 있다. 따라서, 주철에 첨가하는 각 원소의 양은 주철의 탄소 당량과 주물의 단면 크기에 따라서 세심하게 조절하여야 한다.

합금 원소를 첨가하기 위하여 탄화물 형성 원소를 회주철에 첨가할 때에는 언제나 그 원소들의 탄화물이 형성하는 경향을

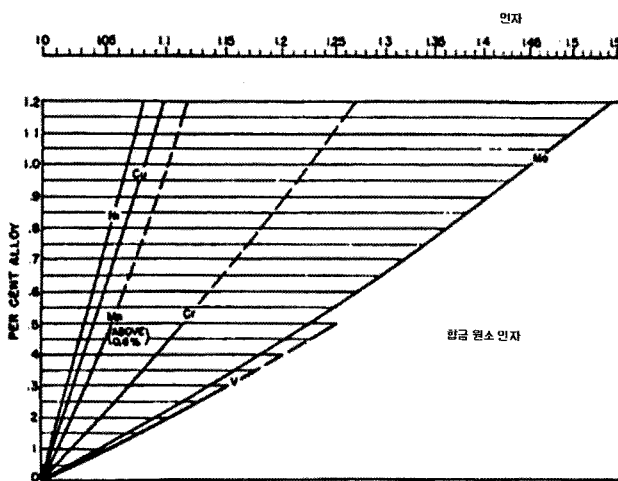


Fig. 1. 합금 원소 인자 도표

[†]E-mail : hwkwon@ynu.ac.kr

최소화하기 위하여 주철 용탕을 점중제로 적당하게 점중 처리하여야 한다. 더욱이, 크롬, 바나듐 및 몰리브덴을 단독으로 또는 동시에 회주철에 첨가할 때에는, 어느 정도의 니켈 또는 구리를 첨가하는 것이 바람직하다. 니켈과 구리는 탄화물 형성에 반대로 작용하는 경향이 있으며, 동시에, 회주철 주물의 강도와 인성에 기여한다.

회주철의 등급을 올리기 위하여 Fig. 1에서 보이는 바와 같은 합금 원소 인자 도표를 사용하는 예를 보여 주기 위하여 ASTM 등급 30의 주철을 등급 40으로 올리는데 필요한 합금 원소의 양에 대하여 논의해 보자. 이것은 206 MPa(30,000 psi)인 회주철의 인장 강도를 275 MPa(40,000 psi)로 올리는 것을 뜻한다. 합금 원소 인자는 원하는 강도를 기본 주철의 강도로 나누어 결정한다. 다시 말하면, 이 예에서는 275 MPa(40,000 psi)를 206 MPa(30,000 psi)로 나눈다. 그러면 합금 원소 인자는 1.33이고 기본 주철의 강도를 33% 올려야 한다는 것을 뜻한다.

기본 주철의 강도를 33% 올리는데 필요한 합금 원소의 양을 결정하기 위하여, 빈 종이를 합금 원소 인자 축(횡축)을 따라서 놓고 1.0과 1.33사이의 거리를 표시한다. 서로 다른 백분율 수준에서 합금 원소 백분율 축(종축)으로부터 여러 합금 원소 선까지의 거리를 측정하여, 강도를 증가시키는데 기여하는 각 합금 원소의 합금 원소 인자를 결정할 수 있다. 예를 들면, 종축으로부터 몰리브덴 선까지의 거리를 측정하면 0.70~0.75%Mo 범위에서 1.33일 것이다. 이것은 기본 주철에 약 0.73%의 몰리브덴을 첨가하면 주철의 강도는 206 MPa(30,000 psi)에서 275 MPa(40,000 psi)로 증가시킬 것이라는 것을 뜻한다. 그러나, 몰리브덴은 비싸고, 합금 원소를 조합으로 첨가하는 것이 주철의 등급을 향상시키는데 더 경제적인 것이다. 더욱이, 다른 합금 원소로 인하여 나타나는 다른 성질이 바람직할 것이다. 또 다른 가능한 방법은 0.25%의 몰리브덴을 첨가하는 것이다. 이것은 합금 원소 인자에 0.115 단위만큼 기여하여, 1.115가 된다. 편상 흑연의 크기를 미세화하고 결정립 크기가 더 작은 주철을 얻기 위해서는, 0.15%의 바나듐을 첨가하는 것이 더 좋을 수 있다. 이것은 합금 원소 인자를 1.20만큼 증가시킨다. 0.35%의 크롬을 첨가하면, 주물의 기지 조직 내의 펄라이트 층간 간격이 더 미세해질 것이고 주조품의 내마모성은 더 개선될 것이다. 0.35%의 크롬을 첨가하면 합금 원소 인자를 1.30으로 증가시킬 것이다. 몰리브덴, 바나듐 및 크롬의 탄화물이 형성하는 경향에 대응하기 위하여, 0.30%의 구리나 0.35%의 니켈을 첨가하는 것이 바람직할 것이다. 이와 같이 첨가하면 합금 원소 인자를 1.33보다 약간 더 높게 증가시키고 12.7 mm와 25.4 mm 사이의 단면 두께에서 275 MPa(40,000)의 최소 인장 강도를 가지는 회주철 주물을 얻을 수 있을 것이다.

단면이 더 두꺼운 회주철 주물에 대해서는, 몰리브덴과 크롬만을 사용하는 것이 더 좋을 것이다. 이와 같은 단면을 가지는 기본 주철의 인장 강도가 206 MPa(30,000 psi)이면, 0.50%의 몰리브덴과 0.40%의 크롬을 첨가하면 1.33의 합금 원소 인자를 달성할 수 있고 최종 인장 강도는 최소 275 MPa(40,000 psi)가 될 것이다.

2. 합금 원소의 대체와 각 원소의 첨가 효과

2.1. 합금 원소의 대체

한 합금 원소를 다른 것으로 대체하는 것은 오래된 일이다. 여러 가지 이유로 나타난 단점과 관련이 있거나 경제성 때문에 합금원소를 대체한다. 합금 원소를 대체하기 위해서는, 관련이 있는 여러 가지 합금 원소의 기능을 아는 것이 중요하다. 다시 말하면, “왜 그와 같은 합금 원소를 회주철에 첨가하는가?”를 알아야 한다.

아마 주조 기술자에게 과거 오랫동안 활용 가능성의 면에서 가장 문제를 야기시킨 금속은 니켈, 몰리브덴, 크롬 및 구리일 것이다. 그러나, 이와 같은 원소들의 공급 부족 현상이 잘 나타나지 않는 것은 다행이다. 비록 동일한 정도는 아니라 하더라도, 강도와 경도를 증가시키는 것과 같은 어떤 성질에 대하여, 그 원소들이 비슷하게 성능을 발휘하는 것도 다행이다. 따라서, 한 합금 원소를 다른 합금 원소로 대체하는데 있어서, 각 합금 원소로부터 얻을 수 있는 잇점을 다시 검토해 볼 필요가 있다.

2.2. 니켈 첨가의 효과

오랫동안, 니켈은 주철에서 중요한 합금 원소로 사용되었다. 회주철에 작은 양(0.40~0.60%)을 단독으로 첨가하였을 때에는, 규소와 매우 동일한 방법으로 철을 감소시키는 흑연화제로 작용한다. 그러나, 니켈의 흑연화 능력은 규소의 1/3정도 밖에 안된다. 철을 감소시키는 특성 때문에, 니켈은 주철의 기계 가공성을 주어진 경도 수준에서 기대되는 것 이상으로 개선시킨다.

0.60~1.5% 범위의 양을 첨가하였을 때에는, 니켈은 기지 내의 고용 효과 때문에 회주철의 강도와 경도를 증가시킨다. 대부분의 경우에, 니켈 첨가량을 증가시키면, 주물을 주형 내에서 서냉되게 하였다 하더라도, 주물의 기지 중의 펄라이트의 양이 증가한다. 주철의 기지에 미치는 이와 같은 효과와 더불어, 니켈은 결정립을 미세화하고 편상 흑연의 크기를 감소시킨다.

비록 니켈은 단독으로 쓰였을 때 회주철에 이롭기는 하지만, 대부분의 경우 몰리브덴, 크롬, 바나듐 및 구리와 같은 다른 원소와 함께 첨가한다. 그리하면 매우 다양한 물리적 및 기계적 성질을 가지는 합금 주철을 얻을 수 있다. 주철에 여러 가지 합금 원소를 동시에 첨가하였을 때에, 그 합금 원소들은 특별한 성질을 얻는데 합금 원소의 함량을 더 감소시킬 수 있을 정도로 서로 보완한다.

2.3. 구리 첨가의 효과

Table 1에서 보이는 바와 같이 구리는 니켈과 비슷하게 작용한다. 이 두 가지 원소는 대체로 비슷한 정도로 회주철의 강도를 증가시킬뿐만 아니라 철을 형성시키는 경향이 약하거나, 그 반대이다. 이 사실은 회주철에서 니켈의 대체 원소로 고려할 수 있다는 것을 의미한다. 어느 정도까지는 그렇다. 그러나, 구리의 회주철 내의 고용도는 제한되고 따라서 1.50%를 초과하여 첨가하지 않아야 한다. 1.50%까지의 구리는 회주철에 1 대 1로 니켈을 성공적으로 대체할 수 있다는 것이 경험적으로

Table 1. 회주철 중 합금 원소

합금 원소	최대 사용량%	사용량 1%당강도증가율, %	철 형성경향	비고
니켈	3.00	10	약하거나 무시할 수 있음	
구리	1.50	10	약하거나 무시할 수 있음	
망간	*	10	약함	
크롬	0.50	20	강함	
몰리브덴	1.00	40	온건함	
바나듐	0.35	45	매우강함	

증명되었다. 또 한 가지 고려하여야 할 점은 구리가 니켈보다 약간 더 강력한 펄라이트 안정화제이기 때문에 페라이트 기지를 얻기 위하여 구리가 합금 원소로 첨가된 주철 주물을 어닐링하기가 더 어렵다는 것이다.

구리와 니켈 두 가지 원소의 이로운 특성 때문에, 많은 주물 공장에서는 회주철 주물의 강도와 경도를 향상시키기 위하여 니켈과 구리를 함께 사용한다. 가장 흔히 선택하는 구리에 대한 니켈의 비율은 70-30이다 - 예를 들면, 0.7%Ni+0.30%Cu.

2.4. 망간의 효과

Table 1에 나열된 세 번째 원소는 망간이다. 황의 탄화물 안정화 효과를 없애고, 회주철 주물에 취성을 증가시키는 효과가 있는 황화철의 형성을 방지하기 위하여 주철에 의도적으로 망간을 첨가한다. 황화망간의 형태로 황과 결합하는데 필요한 양 이상으로 존재하지 않으면 보통 회주철 내의 합금 원소로 간주되지 않는다.

실제로, 0.05~0.12% 범위의 황이 있는 보통의 회주철에는, 0.65% 미만의 망간은 회주철 주물의 강도 및 경도에 영향을 미치지 않는다. 이 양 이상의, 망간은 니켈과 구리와 대략 동일한 정도로 강도와 경도에 기여할 것이다. 그러나, 망간으로, 탄화물 형성제로 간주하지 않는, 니켈과 구리를 대체할 때에는, 0.65% 이상의 양의 망간은 탄화물을 형성하는 경향이 있다는 것을 고려하여야 한다. 사실, 망간을 황과 완전히 결합하는데 필요한 양 이상으로 첨가할 때에는, 망간과 함께, 소량의 니켈과 구리를 첨가하는 것은 두께 25.0 mm 이하의 회주철 주물 내에 탄화물이 형성하는 것을 방지하는데 도움이 된다.

더욱이, 레이드에 망간을 첨가하면 망간은 얇은 두께(9.2 mm 두께)의 탄소 당량이 높은(4.0%CE 이상) 회주철 주물에서 기포 결합을 야기시키는데 기여하는 것으로 보고되었다. 이것은 수소와 망간의 친화력이 크기 때문이라고 제안되었다. 명백히, 망간을 레이드에 첨가하였을 때에는, 용탕에 수소 함량을 증가시키고, 자주 수소는 주물이 응고하기 전에 방출되지 않는 경향이 있다. 이와 같은 이유로, 주철에 망간을 합금 원소로 첨가하려고 한다면, 적어도 출탕하기 10분 전에 노에 첨가하는 것이 좋다. 그러나, 주물의 기지에 마르텐사이트가 형성할 가능성 때문에 1.5% 이상의 망간을 회주철에 첨가하는 일은 드물다.

2.5. 크롬 첨가의 효과

대부분의 다른 합금 원소보다 값이 싼, 크롬은, 회주철의 강도를 증가시키는 효과가 니켈이나 구리의 두 배로 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그러나, Table 1로부터 크롬의 철을 형성시키는 경향이 크다는 것을 주목할 것. 따라서, 만약 크롬을 회주철 주물의 강도를 향상시키기 위하여 사용한다면, 철이 형성하는 경향을 완화시키지 않으면 기계 가공 문제가 발생할 수 있다. 망간 함량이 높은 경우와 마찬가지로, 구리와 니켈 두 가지 원소 모두 크롬이 탄화물을 형성하는 경향에 반대로 작용하기 때문에 크롬과 함께 작은 양의 구리 또는 니켈을 첨가하여 철이 형성하는 경향을 완화시킬 수 있을 것이다.

또 다른 완화하는 방법은 기본 용탕에 과잉의 규소를 첨가하는 것이다. 과잉으로 첨가된 규소는, 크롬에 기인하는, 철 형성을 최소화하는데 도움이 될 것이다. 그러나, 너무 많은 양의 규소가 존재하면, 규소는 기지 조직 내에 페라이트가 형성하는 것을 촉진하기 때문에, 강도, 경도 및 내마모성의 증가와 같은, 크롬에 의하여 얻을 수 있는 잇점을 잃을 것이다. 이와 같은 점에서, 니켈과 구리를 사용하는 것이 규소보다 더 좋다.

회주철에 첨가하기 위하여 활용할 수 있는 여러 가지 크롬 합금은 Table 2에서 보이는 바와 같다. 아마 가장 많이 사용하는 크롬 첨가제는 Table 2에서 보이는 바와 같은 합금 중 첫 번째 합금 일 것이다. 두 번째와 세 번째 합금에 비하여 이 재료의 크롬 함량이 더 낮기 때문에 주철 전체에 더 쉽게 크롬을 균일하게 분포시킬 수 있다.

세 번째 합금은, 망간 때문에, 용탕 내에 빠르고 쉽게 녹아서, 온도 손실을 최소화하도록 설계 되었다. 합금을 작은 레이드의 용탕에 첨가한다면, 특히 용탕 온도가 1260°C보다 낮으면, 이 합금을 첨가하는 경우 그 효과가 클 것이다.

합금 4는, 규소의 함량이 높기 때문에, 첫 번째와 두 번째 합금보다 용점이 더 낮고 따라서, 합금의 크기와 용탕 온도에 관한, 주어진 조건 하에서 어느 것보다도 더 쉽게 녹을 것이다.

레이들 중 용탕에 크롬 합금을 첨가할 때에, 좋은 크기는 8~100 mesh이다. 이 크기는 합금의 응고 속도를 증가시키고 레이드 중 용탕 전체에 크롬을 더 균일하게 분포시키는데 도움이 된다. 자주, 주철에 첨가된 탄화물 형성 원소의 경우에, 주조품의 특정한 부분에 그런 원소의 함량이 너무 많으면 그 부분의 주물의 응고가 일어나는 동안 탄화물 형성을 야기시킬 수 있다. 합금을 빠르게 녹게하고 용탕에 고르게 분산되게 하면 응고가 일어나는 동안 탄화물의 형성을 최소화한다.

탄화물 형성 원소를 사용할 때에는 용탕을 적당하게 집중 처리 하는 것이 또한 중요하다. 집중 처리용 75% 페로실리콘

Table 2. 회주철에 사용되는 크롬 합금 (wt%)

합금	크롬	규소	탄소	망간	철
1	50-55	3-6	6-8	-	bal.
2	65-70	3 max.	5-6	-	bal.
3	60	1.5 max.	7 max	5	bal.
4	35-37	39-41	0.10 max	-	bal.

에 비하여, 이와 같은 목적으로 개발되어 특허 등록된 특별한 접종제가 크롬을 합금 원소로 첨가한 회주철 주물에서 철 형성을 방지하는데 더 효과적이며 경제적이다.

2.6. 몰리브덴 첨가의 효과

몰리브덴은 회주철의 기계적 성질을 개선하기 위한 한 가지의 가장 융통성 있는 원소이다. 몰리브덴은 모든 것에 기여하며, 원하는 결과를 달성하기 위하여 보통 그리 많은 양이 필요하지는 않다. Table 1로부터, 비록 다소 더 많은 양을 첨가하여 좋은 결과를 얻었지만, 회주철에의 최대 첨가량은 1.00%라는 것을 알 수 있다. 몰리브덴은 주석이나 바나듐보다 인장 강도에 미치는 영향에 있어서 그 잠재력은 더 작다. 철 형성의 관점에서, 몰리브덴은, 앞에서 논의한 바와 같이, 온건한 탄화물 형성제일 뿐이다. 그러나, 몰리브덴의 양이 증가함에 따라, 그리고 몰리브덴을 첨가할 주물의 탄소 당량과 단면의 크기가 감소함에 따라, 철이 형성하는 경향은 증가한다.

몰리브덴은 회주철에 첨가하는 원소 중에서 비싼 합금 원소이다. 따라서, 필요한 양 이상으로는 사용하지 않아야 한다. 가능한 경우에는 언젠가, 크롬, 구리 및/또는 니켈과 같은, 가격이 더 싼 합금 원소로 보충하여야 한다. 흔히, 주석과 바나듐 같은 더 비싼 합금 원소를, 더 작은 양의 몰리브덴과 함께, 작은 양 사용할 수 있다. 이와 같은 목적으로 사용하는 바나듐에 대해서는 나중에 논의할 것이다. 몰리브덴은 다음과 같은 특성을 개선하기 위하여 회주철에 첨가할 때 좋다:

1. 경도 증가가 최소인 조건에서의 인장강도.
2. 상온뿐만 아니라 0°C 이하의 온도에서의 인성 및 충격 강도.
3. 고온 강도 및 크립 저항
4. 주물의 두꺼운 단면 전체에 걸친 균일성.
5. 단면의 두께가 변화하는 회주철 주물에서의 단면 민감도. 다시 말하면, 몰리브덴은 단 면 민감도를 감소시킨다.
6. 열처리할 때 회주철의 경화능
7. 회주철 주물의 마모 저항

몰리브덴을 회주철 중의 합금 원소로 사용한 오랜 기간동안, 다른 합금 원소를 대체 원소로 사용할 필요성이 대두된, 공급이 부족했던 때가 있었다. 몰리브덴과 다른 합금 원소의 회주철의 특성에 기여하는 것을 인식함으로써 필요할 때에 대체 합금 원소를 더 쉽게 찾을 수 있다.

2.7. 주석 첨가의 효과

비록 합금 원소로 Table 1에는 나타나 있지 않았다하더라도, 주석은 회주철 주물의 물리적 및 기계적 성질을 개선시키는 효과적인 원소이다. 니켈 및 구리와 마찬가지로, 주석은 탄화물 형성 원소는 아니다. 따라서 만족스러운 기계 가공성과 더불어 좋은 기계적 성질이 중요한 요구 조건인 여러 가지 단면 크기의 회주철 및 구상흑연주철 주물에 대하여 다양하게 주석을 사용하였다.

주석이 구리 및 니켈이 그런 것처럼 크롬, 바나듐 및 망간의 탄화물 형성 경향을 방지하는데 도움이 되지 않는다. 그러

나, 펄라이트의 형성을 촉진하고 따라서 강도를 증가시키기 위하여 회주철에 첨가하는 모든 일반적인 합금 원소중에서, 원하는 결과를 달성하기 위해서는 주석이 가장 효과적이다. 보통, 두께 50.0 mm 이하의 단면의 주철 주물에서, 100% 펄라이트의 기지 조직을 얻기 위하여는 주석을 0.10%만 첨가해도 충분하다. 더 두꺼운 단면의 주물에서, 또는 규소 함량이 약 2.75%를 초과하는 주철 주물에서, 완전히 펄라이트 기지 조직을 얻기 위해서는 주석이 약간 더 필요할 뿐이다.

주석을 사용하는데 있어서는, 용탕의 화학 조성을 잘 조절하는 것이 중요하다. 다음과 같은 두 가지 이유로 주물 내에 완전히 펄라이트 기지 조직을 달성하는데 필요한 최소의 양으로 주석의 첨가량을 제한하여야 한다.

1. 경제성 - 주석은 비교적 비싼 금속이다. 따라서, 필요한 양 이상으로 첨가하지 않아야 한다.
2. 주물 취성 - 주물 내의 완전히 펄라이트 기지를 달성하기 위하여 필요한 양 이상으로 첨가하는 것은 피하여야 한다.

이와 같은 이유로, 레이드에 첨가하기 전에 용탕 중 잔류 주석의 양을 아는 것은 중요하다. 그리고, 사양을 만족시키는데 필요한 양의 주석만을 첨가하여야 한다. 회수 고철을 용해하는 동안의 주석의 회수율은 100%에 가까울 정도로 높다.

적당하게, 그리고 세심한 주의를 기울여서, 첨가하였을 때, 다른 합금 원소를 보완하거나 대체하기 위하여 주석을 사용할 수 있다. 회주철이나 구상흑연주철에 다른 합금 원소를 첨가하는 경우와 마찬가지로, 주석을 사용할 때 적합하게 접종 처리하는 것이 좋다. 주철 중에서 펄라이트를 형성하는 경향의 측면에서, 0.1%의 주석은 0.25~0.30%의 크롬 및 약 0.80%의 니켈 또는 구리와 동등하다.

2.8. 바나듐 첨가의 효과

주석은 예외로 하고, 바나듐은 다른 어떤 합금 원소보다 단위 첨가량당 더 큰 범위로 회주철 주물의 강도를 증가시킨다. 이것은 Table 1 및 Fig. 1에서 보이는 바와 같다.

제 1차 세계대전 이전부터 바나듐을 회주철 내의 합금 원소로 사용하였다. 원래, 4.0~4.4% 범위의 탄소 당량을 가지는 회주철 주물에서 작은 양(0.05~0.25%)으로 이롭게 사용하였다.

주조 기술자들이 합금 원소가 적거나 없는 고 강도 주물을 생산하기 위하여 회주철 주물의 탄소 당량을 감소시키에 따라, 바나듐은 강력한 탄화물 형성 경향 때문에 널리 쓰이지 않게 되었다. 이와 같은 경향은 회주철 주물의 탄소 당량과 주물의 단면 두께가 감소함에 따라 증가한다.

니켈 및 구리와 같이 탄화물을 형성하지 않는 원소를 회주철 주물의 철 형성 경향을 조절하기 위하여 탄화물 형성 원소와 함께 첨가하는 것이 중요하다는 것을 그때에는 인식하지 못하였다. 회주철 주물에서 핵생성을 증가시키고 과냉을 방지하기 위한 접종 처리의 중요성도 완전히 이해하지 못하였다. 1930년대의 연구 활동으로 인하여 합금 원소는 확실히 서로를 보완하고, 적합하게 사용하면 필요할 때에 서로서로 이롭게 대체할 수 있다는 것을 인식하게 되었다.

많은 경우에, 회주철에서 크롬 및 몰리브덴의 부분적 또는

완전한 대체 원소로 바나듐을 사용할 수 있다. 크롬과 바나듐은 강력한 탄화물 형성제이다. 이 원소들을, 회주철의 마모 저항을 개선하기 위하여, 동시에 또는 단독으로 첨가할 수 있다. 또한, 특히 고온에서, 이 원소들의 강력한 펄라이트 안정화 효과 때문에, 이 두 원소 모두를 이와 같은 목적으로 사용할 수 있다. 보통 바나듐은 이와 같은 응용 분야에 대하여 크롬의 약 두 배의 효과가 있다. 주어진 탄소 당량의 회주철 주물의 인장 강도와 경도를 증가시키기 위하여, 0.20%의 바나듐으로 약 0.50%의 크롬을 대체할 수 있다.

몰리브덴을 바나듐으로 부분적으로 또는 완전히 대체하기 위하여, 다음과 같은, 회주철 내의 바나듐의 탄화물 형성 경향에 영향을 미치는 인자를 고려하여야 한다:

1. 탄소 당량
2. 주물 단면의 두께
3. 응고 속도
4. 집중 처리
5. 다른 합금 원소
6. 첨가한 바나듐의 고용 속도 및 분산

앞에서 언급한 바와 같이 주어진 단면 크기의 주물에서, 회주철의 탄소 당량이 낮을수록, 바나듐의 칠 형성 경향이 더 클 것이다. 이것은 많은 탄화물 형성 원소에 대하여 사실이다. 이와 같은 이유로, 두께 25.0 mm까지의 주물에 바나듐을 사용할 때에 회주철의 탄소 당량을 4.0~4.4% 범위로 유지하는 것이 바람직하다. 이 탄소 당량 범위에 대하여 추천되는 규소 함량은 다음과 같다:

1. 주물 두께 6.4~9.5 mm, 최종 규소 2.50~2.60%
2. 두께가 9.5 mm를 초과하나 19.0 mm 미만의 주물, 최종

규소 2.40~2.50%

3. 주물 두께 19.0~25.0 mm, 최종 규소 2.30~2.40%

주물의 단면 두께가 회주철 중 바나듐의 탄화물 형성 경향에 영향을 미친다. 주어진 탄소 당량의 주철에 대하여, 주물의 두께가 증가함에 따라, 칠의 문제없이 더 많은 양의 바나듐을 사용할 수 있다. 그러나, 보통 바나듐의 최대 사용량은 0.5%를 넘지는 않을 것이다. 더욱이, 주물의 단면 크기가 증가함에 따라, 탄소 당량이 4.0% 이하인 회주철 주물에서 바나듐을 이롭게 사용할 수 있다.

바나듐은 합금 원소로 첨가한 회주철 주물 내에 탄화물 형성을 최소화하는데 응고 속도가 매우 중요하다. 특히 두께 25.0 mm 이하의 주물에서, 응고 속도가 느린 것이 필수적이다. 단면 두께가 25.0 mm 이하인 바나듐을 첨가한 회주철 주물에서, 1468~1538°C 범위의 온도에서 주입하면 탄화물이 형성하는 것을 방지하기 위하여 적절하게 집중 처리한 주철 용탕에서 응고 속도는 보통 충분히 느려질 것이다.

3. 결 언

회주철에서 탄화물 형성 원소는 바나듐, 크롬, 황화망간을 형성하는데 필요한 양보다 많은 양의 망간 그리고, 더 작은 범위로, 몰리브덴이다. 니켈과 구리는 탄화물 형성제가 아니며 탄화물 형성 원소에 의하여 촉진된 칠을 완화시키는데 도움이 된다. 이와 같은 이유로, 전자의 원소들을 보통 후자의 원소들과 함께 첨가한다. 회주철에서 바나듐과 함께 니켈이나 구리를 사용하는데 있어서는, 보통 어느 것이든 0.50~0.8% 범위가 주어진 주물에 칠 형성을 최소화하는데 충분하다.