

論文

Fe-30 Ni-0.24 C 합금에서 역변태 오스테나이트의 기계적 성질에 미치는 이전가공도 및 역변태 Cycle수의 영향

김학신 · 이규복* · 홍순국**

*전북대학교 공과대학 재료공학과

**금성사 생산기술연구소

Effect of Prior Deformation and Cyclic Transformation on the Mechanical Properties in Fe-30 Ni-0.24 C Alloy

H. S. Kim*, K. B. Lee*, S. K. Hong. **

*Department of Materials Engineering, Chonbuk National University

**Gold Star Co., Production Engineering Research Lab.

ABSTRACT

In this study, the ausformed martensite cooled to -196°C with various deformation degrees in Fe-30%Ni-0.24% C alloy was transformed to reversed austenite at 500°C by cyclic reverse martensitic transformation. The effects of prior deformation and the number of cyclic reverse transformation on the microstructure and the mechanical properties of reversed austenite were investigated.

Experimental results showed that the strength of reversed austenite was higher than that of original austenite. This is due to higher dislocation density and grain refining. The reversed austenite formed from ausformed martensite was highly strengthened by prior deformation. This strengthening effect of reversed austenite is attributed to higher dislocation density than grain refining. The yield strength of reversed austenite below 30% prior deformation, but above 30% prior deformation the strength of reversed austenite is lower than that of deformed austenite. This is due to partly disappearance of strain hardening effect at higher deformation degree by reverse transformation. The strength of reversed austenite is increased with the number of cyclic transformation. Especially, it is principally strengthened by the first cyclic transformation and shows higher increase in yield strength than that of ultimate tensile strength.

1. 서론

적당한 연성과 인성을 가지며 동시에 높은 강도를 갖는 재료가 요구되어짐에 따라 이에 따른 새로운 재료개발과 새로운 열처리방법에 대한 연구가 계속되어 오고

있다.

철강재료의 새로운 강화열처리방법으로서 마르텐사이트를 역변태 시켜 생성된 역변태 오스테나이트는 역변태처리를 실시하지 않은 original austenite보다 현저하게 강도가 증가한다는 Wassermann의 연구¹⁾ 이후 마르

텐사이트변태에 의한 강도향상법 이외에 높은 강도와 동시에 연성을 얻기 위한 열처리방법으로 역변태에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 역변태 열처리에 의한 강도증가는 역변태 오스테나이트의 안정화에 기인하며 이 안정화는 역변태시 도입된 다량의 격자결함과 조직의 미세화에 의한다는 연구²⁾ 이후 Krauss와 Cohen³⁾은 Fe-Ni 합금에 있어서 역변태 오스테나이트의 강도에 미치는 역변태 cycle 수의 영향 및 역변태 오스테나이트의 조직과 강도와의 관계를 연구한 바 있다. 그리고 Koppenal 및 Kanjiono 등⁴⁾은 Fe-Ni 합금을 가공열처리 (thermomechanical treatment) 방법에 의한 역변태 오스테나이트의 강화현상 및 강도증가에 대한 규명을 시도하여, 즉 마르포밍처리+역변태처리를 조합시키므로써 더욱 현저하게 역변태 오스테나이트의 강도를 개선하였다. 그러나 가공열처리방법중의 하나인 오스포밍처리+역변태처리에 의한 역변태 오스테나이트의 강화현상에 대한 연구는 지금까지 거의 시도되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 Fe-30 Ni-0.24C 합금을 이용하여 역변태처리시 생성된 역변태 오스테나이트의 이전가공도와 역변태 cycle 수에 따른 광학현미경조직, 경도, 강도, 연성등 기계적성질의 변화를 조사하여 역변태 오스테나이트의 강화현상을 밝히고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 합금은 진공고주파 유도로를 이용하여 전해철과 전해니켈을 용락시킨 다음 가탄체로서 적당량의 탄소분말을 첨가하여 완전히 용해시키고 Fe-Si를 첨가하여 1차 탈산시킨 다음, 2차로 Ca-Si로 탈산시킨 후 90×110×260 mm의 금형에서 20 kg 잉곳트로 주조하였다.

본 연구에 사용된 합금의 화학조성 및 Ms점을 Table 1에 나타낸다.

Table 1. Chemical composition of alloy used (Wt %)

C	Ni	Si	Mn	P	S	Ti	Fe	Ms(°C)
0.24	30.41	0.011	Tr	0.003	0.0017	0.015	Bal	-110

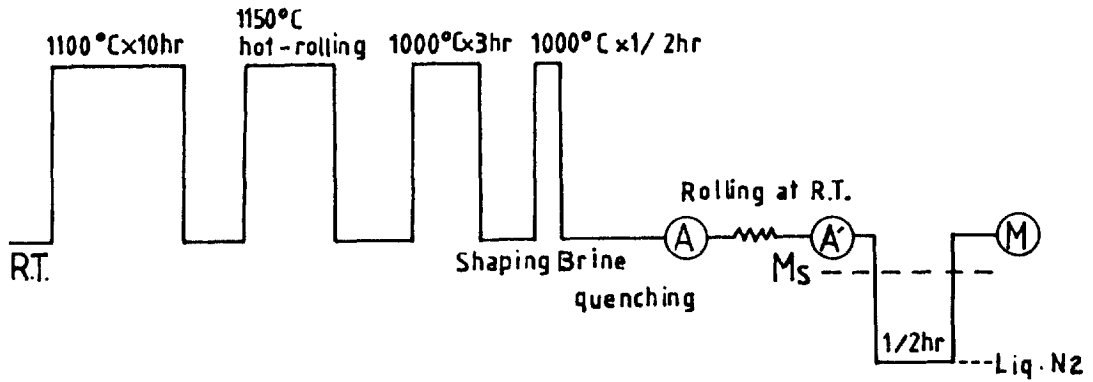
합금중 성분의 편식에 대한 영향을 제거하기 위하여 Ar가스분위기의 머플로에서 1100°C×10 hr. 동안 균질화 처리후에 가공도별 시편의 두께를 조절하기 위하여

1150°C로 가열한 후 열간압연하였다. 이후 응력제거를 위해서 Ar가스분위기의 머플로에서 1000°C×3 hr. 동안 소둔하였다. 열간압연된 시료는 표면산화층 및 탈탄층을 제거한 뒤 냉간가공에 의해서 모든 시편의 최종두께가 1.0 mm가 되도록 시편의 처음두께를 조절하여 제작하였다. 이와 같은 과정을 거친 시편을 Ar가스분위기의 머플로에서 1000°C×1/2 hr. 동안 유지한 후 상온염수에 급냉시키는 용체화처리에 의하여 균일한 original austenite 조직을 얻었다. 이들 오스테나이트시료는 상온에서 각종 가공도(0~75%)로 압연하여 deformed austenite 조직을 얻었다. 이 deformed austenite 시편을 액체질소중에 1/2 hr. 동안 Sub-zero시켜, 즉 오스포밍처리에 의하여 각종 가공도별 오스포드 마르텐사이트 조직을 얻었으며 오스포밍처리과정을 Fig.1에 나타내었다. 또한 염욕로를 이용하여 48°C/sec로 급속가열하여 Af직상의 500°C에 유지된 혼합염욕(CaCl₂+NaCl+ZnCl₂+LiCl) 중에 3분간 침지한 후 즉시 수냉시켜 역변태 오스테나이트조직을 얻었다. 이러한 과정의 열처리를 1 cycle 역변태처리라고 하며 본 실험에서는 Fig.2에 나타낸 바와 같이 1 cycle 처리에 의해 얻은 역변태 오스테나이트를 액체질소중에 심냉처리하여 얻은 마르텐사이트조직 시편을 Af직상의 온도에서 Δcycle까지 반복 역변태처리를 실시하였다. 역변태처리온도는 DTA시험 결과, As점은 345°C, Af점은 475°C였으므로 Af직상인 500°C로 결정하였다. 또한 가공도에 따른 deformed austenite, 오스포드 마르텐사이트 특히 역변태 오스테나이트의 가공도와 역변태 cycle 수에 따른 현미경 조직 관찰 및 경도를 측정하였고, 인장시험은 ASTM-E 8형의 Sub-size로 가공된 인장시편을 Instron인장시험기 (Model No.1128)에서 Cross-head Speed 2 mm/min로 실시하여 항복강도, 인장강도 및 연신율의 변화를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 광학현미경조직도

Photo.1은 여러가지 조직들의 광학현미경사진을 나타낸다. Photo.1(A)는 original austenite의 조직으로서 결정입도 70~80 μm의 균일한 polygonal austenite 조직이며 냉간가공이 전혀 없으므로 어떠한 결함이나 가공조직에서 나타나는 슬립선은 관찰되지 않으며 약간 帶



A : Original austenite
 A' : Deformed austenite
 M : Ausformed martensite

Fig.1. Schematic process of the homogenization, hot rolling, solution treatment and ausforming treatment.

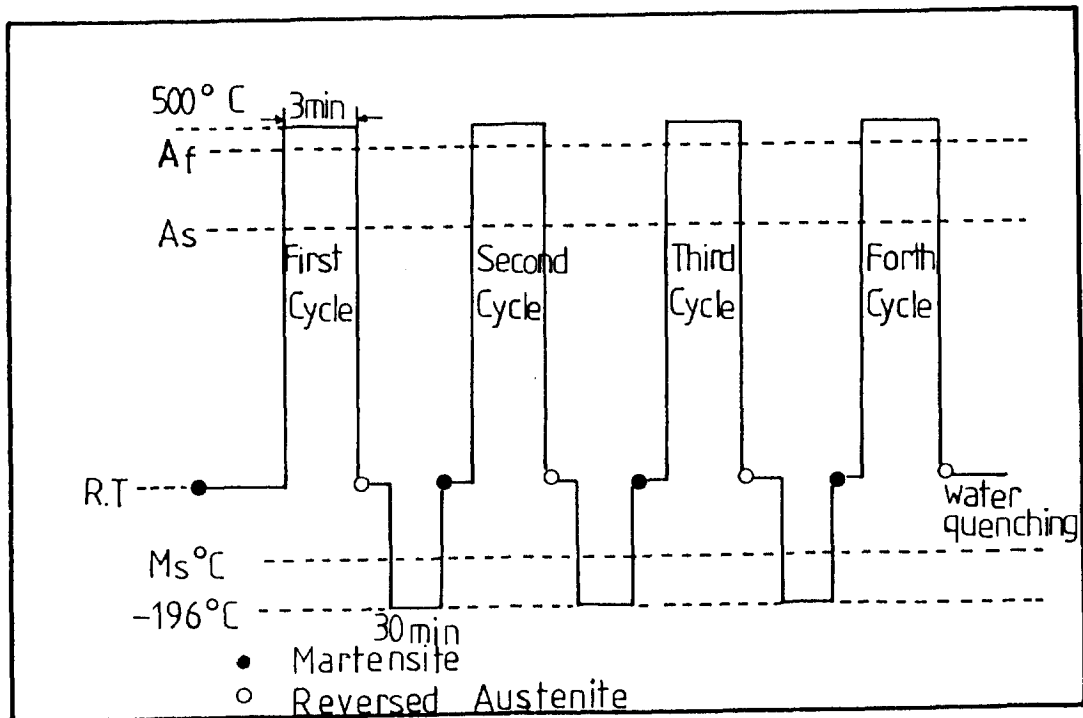


Fig.2. Schematic illustration of cyclic reverse martensitic transformation treatment.

4/Fe-30 Ni-0.24C 합금에서 역변태 오스테나이트의 기계적 성질에 미치는 이전가공도 및 역변태 Cycle 수의 영향

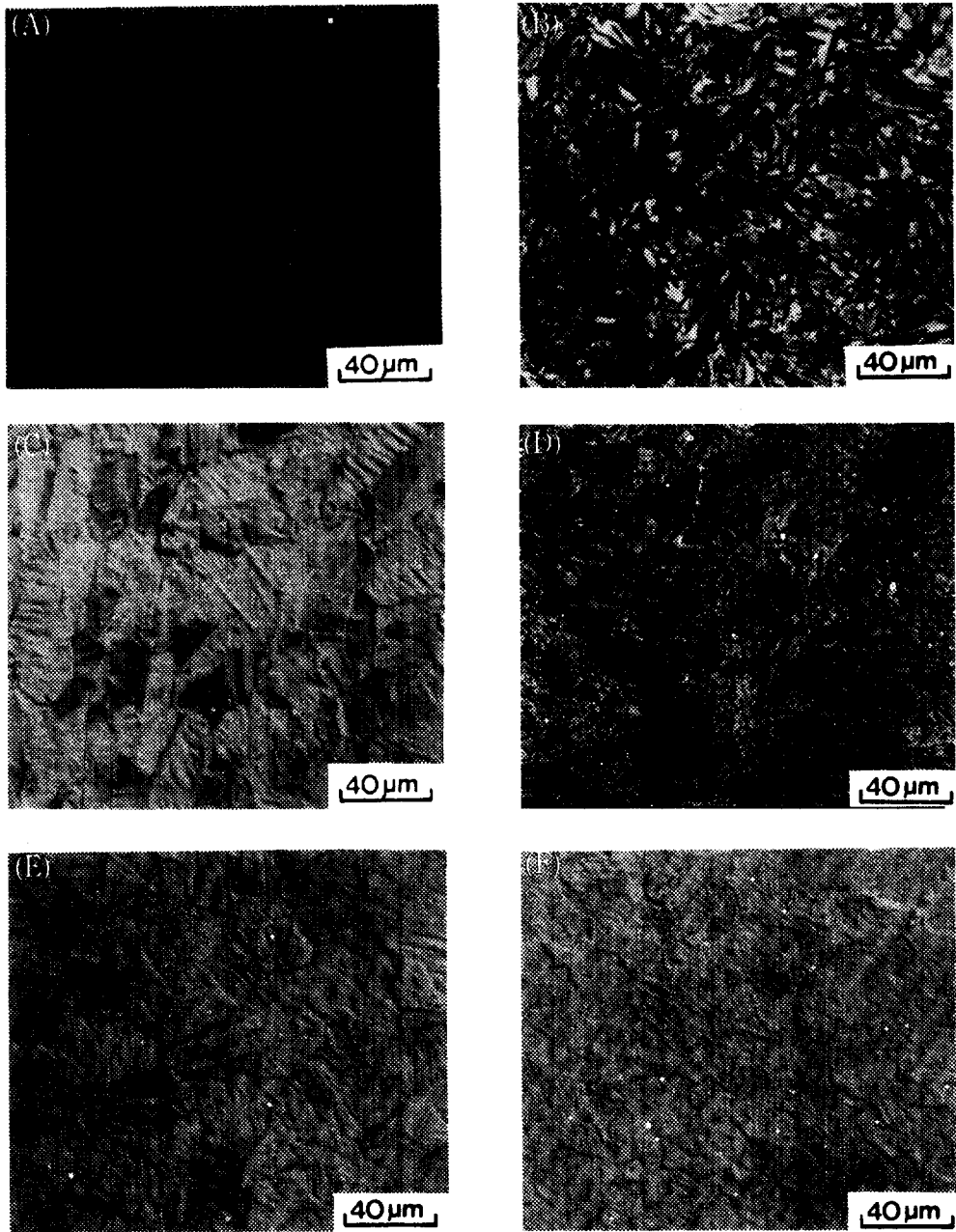


Photo 1. Micrographs of various structures in Fe-30Ni-0.24C alloy. A) Original austenite B) Virgin martensite C) 30% Deformed austenite D) 75% Ausformed martensite E) 1 cycle, 0% Reversed austenite F) 1 cycle, 30% Reversed austenite

狀의 변태쌍정이 존재한다. Photo.1(B)는 virgin martensite조직으로서 뚜렷한 mid-rib을 갖는 전형적인 plate martensite조직이며 이들 plate는 서로 불규칙한 방향으로 생성되어 있다. Photo.1(C)는 가공도 30%의 deformed austenite 조직으로서 결정립이 가공방향으로 연신되어 있으며 슬립선, 변형쌍정등을 관찰할 수 있다. Photo.1(D)는 가공도 75%의 ausformed martensite조직으로서 martensite plate는 현저하게 미세화됨과 동시에 mid-rib의 발견은 어렵고 결정립이 심하게 왜곡되어 있으며 가공방향으로 연신되어 있음을 관찰할 수 있다. Photo.1(E)는 1 사이클, 0%가공도의 역변태 오스테나이트조직으로서 입내에 마르텐사이트의 흔적(ghost image)이 뚜렷하게 나타나고 결정립계가 왜곡되어 있는 점이 original austenite조직과 상이한 점이다. Photo.1(F)는 1 사이클, 30% 가공도의 역변태 오스테나이트조직으로서 결정입계의 왜곡이 더욱 심하고 오스테나이트의 결정립이 더욱 미세화되었는데 이것은 30%가공으로 인하여 미세한 마르텐사이트가 생성되었고 또한 역변태처리시 일어난 martensitic deformation에 기인하는 것으로 생각된다.

3.2. 역변태 오스테나이트의 경도변화

Fig.3은 이전가공도 및 역변태 사이클수에 대한 역변태 오스테나이트의 경도변화를 나타낸 것이다. 0, 1 및 3 사이클 역변태처리시 역변태 오스테나이트의 경도는 모두 가공도 15%까지는 가공경화에 의하여 현저하게 상승하나 가공도 15%이상에서는 가공도의 증가에 따라 전위밀도가 포화치에 도달되므로서 경도의 증가는 비교적 완만하다. 오스폼드 마르텐사이트를 1 사이클 역변태 처리한 역변태 오스테나이트의 경도가 0 사이클, 즉 original austenite 및 deformed austenite보다 현저하게 큰 이유는 첫째로 역변태처리시 오스폼드 마르텐사이트 내의 대부분의 전위가 역변태 오스테나이트 중에 도입되었기 때문이며, 둘째로 역변태처리시에 결정립의 미세화가 일어나기 때문이다. 그리고 1 사이클 이상에서 사이클수의 증가에 따라 경도가 미소하게 증가하는 것은 1 사이클에서 대부분의 전위가 이미 역변태 오스테나이트에 도입되었기 때문에 사이클수의 증가에 따라 오스테나이트 중에 도입되는 전위밀도는 크게 낮아지고 동시에 역변태 오스테나이트의 결정립이 사이클수의 증가와 더불어 미세화되기는 하지만 이 조직미세화에 의한

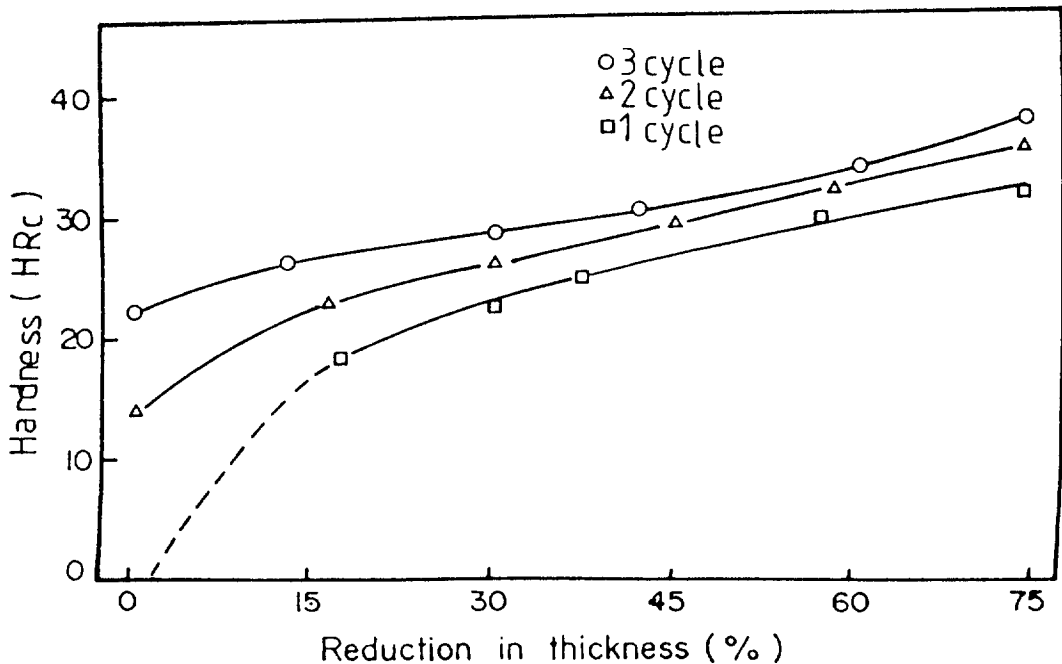


Fig.3. Hardness variations of reversed austenite with prior deformation degree and cyclic transformation number.

역변태 오스테나이트의 안정화현상에 의하여 다음 싸이클에서 역변태할 수 있는 마르텐사이트 변태량의 감소로 인한 연화가 상쇄되기 때문이라고 생각된다.

3.3. 역변태 오스테나이트의 강도와 연성

Fig. 4는 이전가공도 및 역변태싸이클수에 대한 역변태 오스테나이트의 항복강도변화를 나타낸 것이다. 0 싸이클, 즉 deformed austenite의 항복강도는 가공도와 더불어 증가하고, 특히 가공도 30%이하에서 급격히 상승하여 가공경화현상이 현저하지만 가공도 45%이상에서는 비교적 완만하게 증가하고 있다. 이것은 가공도

45%이상에서는 가공에 의한 전위밀도가 포화치에 이르고 있음을 설명하여 주는 것이다. 1~4 싸이클 역변태처리시 역변태 오스테나이트의 항복강도는 가공도에 따라 증가한다. 그러나 가공도 30%이하에서 deformed austenite(0 싸이클)의 항복강도는 1 싸이클 역변태 오스테나이트보다 현저히 낮지만 가공도 30% 이상에서는 오히려 높다. 이러한 현상은 낮은 가공도에서는 original austenite와 deformed austenite 내에 존재하는 고밀도의 tangled dislocation과 jogged dislocation이 역변태처리시 그대로 모두 역변태 오스테나이트에 계승^{3,5)}되기 때문이며 가공도 30%이상에서는 이전가공에 의한 가공

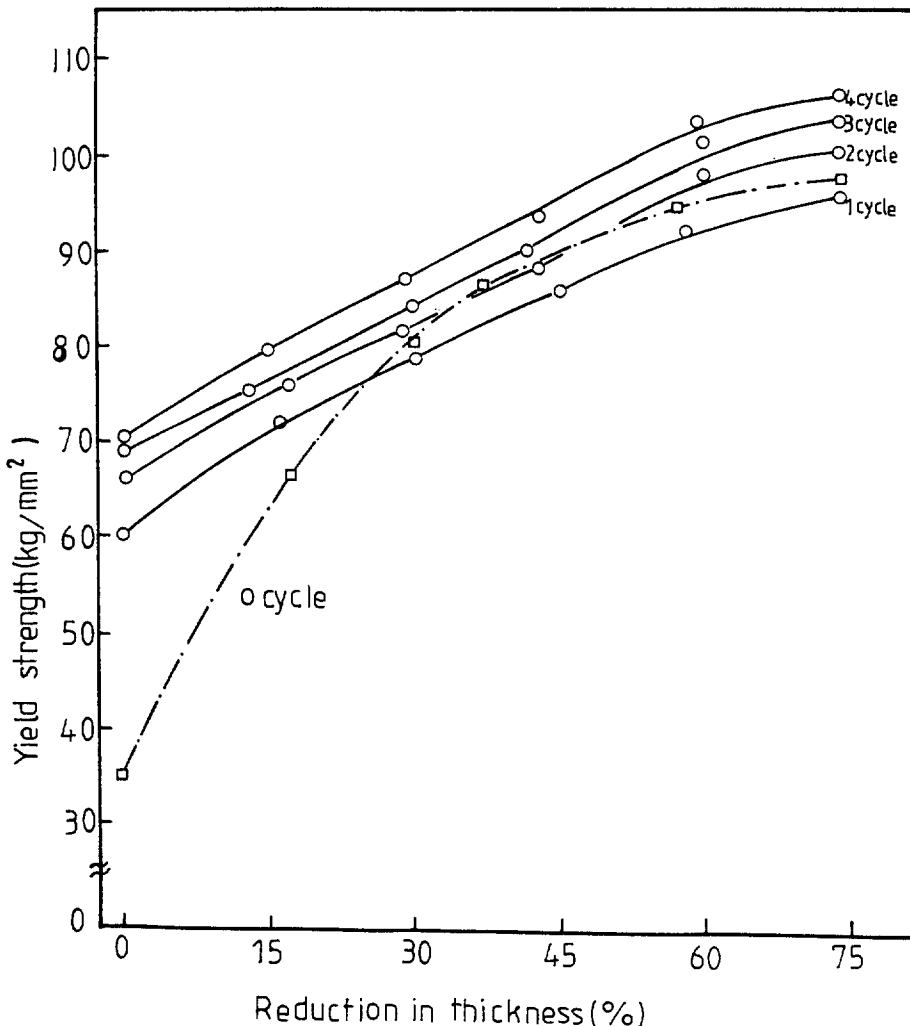


Fig. 4. Yield strength variations of reversed austenite with prior deformation degrees and cyclic transformation number.

경화의 영향이 역변태처리시 전부 잔류하지 못하고 일부가 소멸되기 때문이라고 생각된다.

역변태 오스테나이트의 강화기구는 마르텐사이트조직 내에 존재하는 고밀도의 전위가 역변태처리시 역변태 오스테나이트에 도입되므로서 전위밀도증가에 의한 가공경화와 역변태 오스테나이트의 결정립미세화에 의한다고 알려져 있다⁶⁾. Fig.4에서 1~2 역변태 사이클에서 강화현상이 일층 크게 나타나고 있는 것은 original austenite와 deformed austenite 내에 존재하는 대부분의 전위가 역변태 오스테나이트에 도입되고 역변태처리시 일어나는 결정립의 미세화현상에 기인한 것이다. 그러나 3 사이클 이상에서 항복강도가 미소하게 증가하는 것은 1~2 사이클 역변태에서 전위가 포화치에 도달한 후 역변태 사이클 수의 증가에 따라 역변태 오스테나이트에 도입되는 전위밀도의 증가가 극히 작기 때문이다. Kanjiono와 Koppenaar⁴⁾은 1 사이클 역변태에서 4 사이

클 역변태까지 항복강도증가에 상당하는 최종 전위밀도의 변화는 약 $4 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 에서 $8 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 정도로 약 2 배 밖에 증가되지 않는다고 보고한 바 있다.

Fig.5는 이전가공도 및 역변태 사이클수에 대한 역변태 오스테나이트의 인장강도의 변화를 나타낸 것이다. 인장강도의 경우도 Fig.4의 항복강도의 변화와 거의 유사하게 변화하고 있다. 즉 가공도 약 30% 이하에서 1 사이클 역변태 오스테나이트의 인장강도는 가공에 의한 전위 및 격자결합등이 역변태처리시 그대로 계승되어 크게 강화되었으나 가공도 약 30% 이상에서는 deformed austenite(0 사이클)의 인장강도는 전위 및 격자결합등이 역변태처리시 많이 소멸되어 1 사이클 역변태 오스테나이트보다 크다. Fig.4와 Fig.5로부터 1 사이클 역변태처리시 역변태에 의한 강화는 인장강도보다 항복강도에 2 배정도 크게 기여하고 있음을 알 수 있다.

Fig.6은 이전가공도 및 역변태 사이클수에 대한 역변

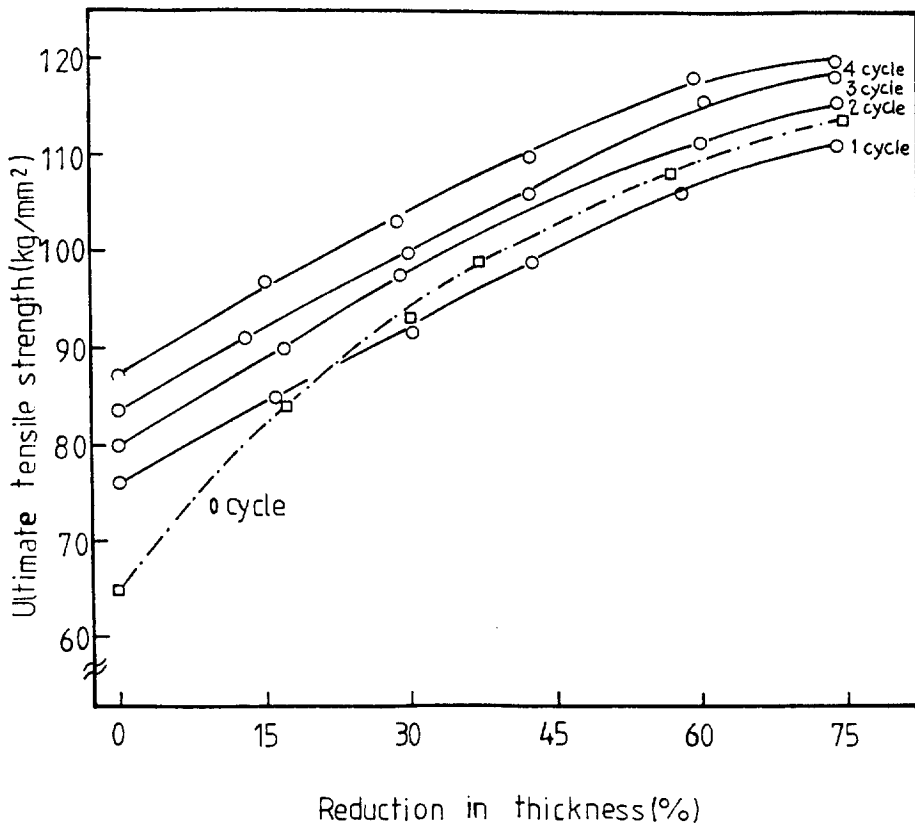


Fig. 5. Ultimate tensile strength variations of reversed austenite with cyclic transformation number

태 오스테나이트의 연성변화를 나타낸 것이다. deformed austenite는 가공도 15%에서 Fig.4의 강도상승과는 반대로 가공도증가에 따른 가공경화현상에 의하여 연성이 급격히 감소하였다. original austenite는 1 사이클 역변태처리시 연성이 급격히 감소하지만 그후 역변태 사이클수의 증가에 따라 약간 감소한다. original austenite가 1 사이클 역변태처리시 연성이 급격히 감소하는 것은 역변태 오스테나이트의 전위밀도가 잔류 오스테나이트보다 훨씬 크기 때문이라고 생각된다. 그리고 1,3 사이클 역변태처리시 연성이 가공도증가에 따라 거의 변화가 없는 것은, 오스폼드 마르텐사이트 중에는 많은 잔류 오스테나이트가 존재하는데 이것은 강도에는 크게 영향을 미치지 않고 연성을 증가시키는 연성기지의 역할을 하며, 전위의 이동성⁷⁾, 연성 파괴를 지배하는 void의 생성 및 성장⁸⁾, 가공도증가에 따른 쌍정의 소멸⁹⁾ 등의 복합적인 영향이 작용하기 때문이라고 생각된다.

4. 결론

Fe-30 Ni-0.24 C 합금에 있어서 여러가지 가공도의 오스폼드 마르텐사이트를 Af점 직상에서 반복역변태시켜 역변태 오스테나이트의 기계적 성질에 미치는 이전

가공도와 역변태사이클수의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 역변태 오스테나이트의 강도는 original austenite의 강도보다 높다. 이것은 역변태 오스테나이트내에 생성된 고밀도의 전위와 결정립미세화에 기인한 것이다.
2. 오스폼드 마르텐사이트로부터 생성된 역변태 오스테나이트는 역변태 이전에 수행된 변형에 의하여 크게 강화되었는데, original austenite로부터 생성된 역변태 오스테나이트에 비교하여 결정립 미세화보다는 전위밀도증가에 의한 강화가 우세하다.
3. 가공도 약 30%이하에서 역변태 오스테나이트의 항복강도는 deformed austenite보다 높지만 그 이상에서는 역변태 오스테나이트의 항복강도가 deformed austenite보다 낮다. 따라서 높은 가공도에서는 역변태에 의하여 가공경화의 효과가 일부 소멸된다.
4. 역변태 사이클수의 증가에 따라 역변태 오스테나이트는 강화되었으며 주된 효과는 1 사이클 역변태처리시에 일어났고 특히 역변태에 의하여 인장강도보다 항복강도의 증가가 현저하다.

5. 참고문헌

1. G.Wasserman : Arch Eisenhutten, Vol.6 (1982),

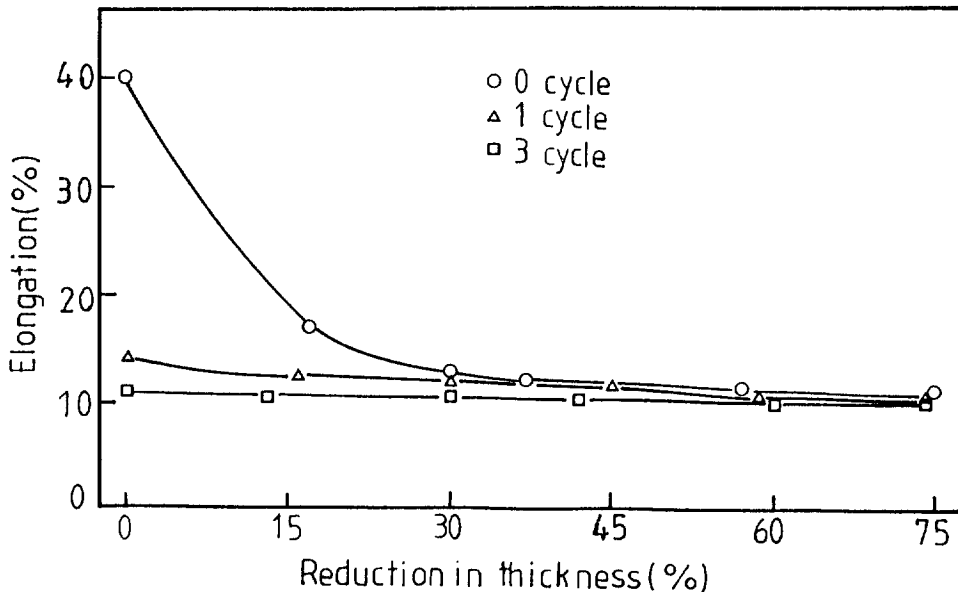


Fig. 6. Elongation variations of reversed austenite with cyclic transformation number.

- 347.
2. Y.M. Golovchiner, Y.D. Tyapkin : Problems of Metallography and the physics of Metals, Fourth Symp., Moscow (1955), 141.
3. G.Krauss and M.Cohen : Met. Trans., Soc. AIME. Vol. 224 (1962), 1212.
4. T.J. Koppenaar and Kanjiono : Met. Trans., Vol.5 (1974), 739.
5. G.Krauss : Acta Met. Vol.11 (1963), 499.
6. T.J. Koppenaar and E.Gold : Met. Trans., Vol.3 (1972), 2965.
7. I.Tamura and H.Yoshimura : Jpn. Inst. Met., Vol.41 (1965), 206.
8. Tomota, Tanabe and Kuroki : Jpn. Inst. Met., Vol.41 (1965), 563.
9. O.Johari and G.Thomas : Trans, ASM. Vol.58 (1965), 563.