

FAZ DİYAGRAMLARI

DERS NOTLARI



Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK

KTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Denge Dışı Reaksiyonlar ve Oluşan Yapılar (Martenzitik ve Beynitik Yapı)

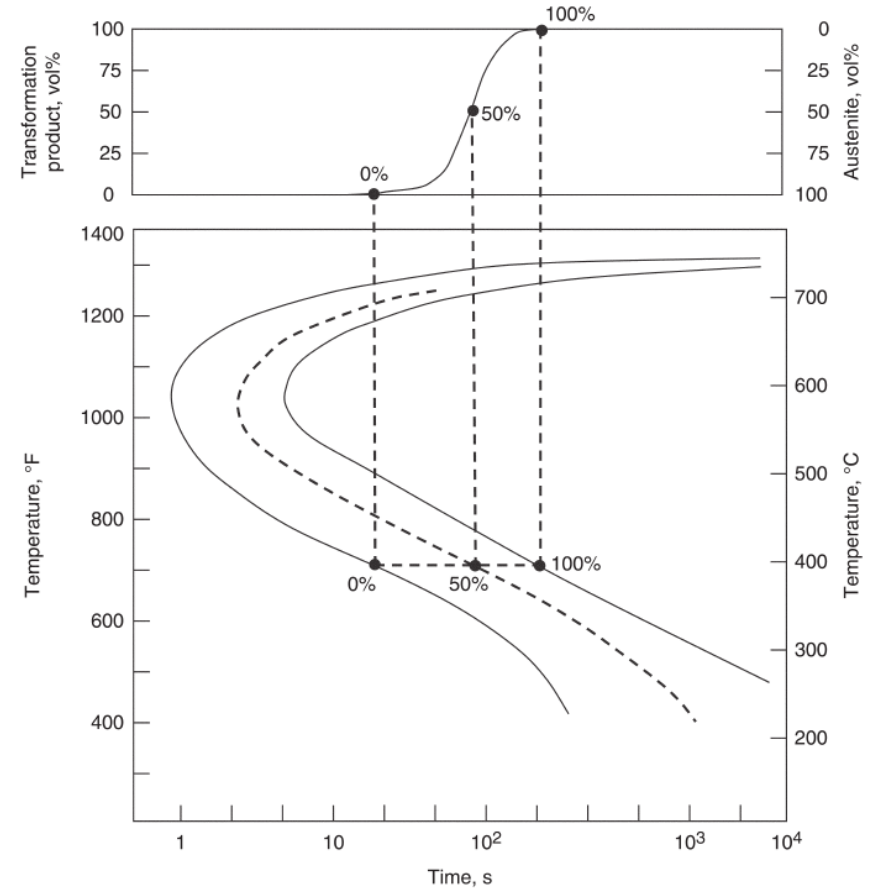
- Bu güne kadar işlenen konularda denge veya yarı denge durumunda gerçekleşebilen faz dönüşümleri incelenmiştir. Bu konu kapsamında işlenecek olan **martenzitik ve beynitik dönüşüm reaksiyonları ise denge dışı soğuma koşulları altında gerçekleşmektedir.** Her iki dönüşümün gerçekleşebilmesi için alaşım yüksek soğuma hızlarına çıkarılıp düşük sıcaklıklara çok hızlı bir şekilde soğutulması ile gerçekleşmektedir.
- **Demir-karbon faz diyagramında martenzitik ve beynitik dönüşüm alaşımın sertleşme mekanizmasında çok önemli bir yere sahiptir.**

Dengesiz Soğuma Koşulları

- Denge koşulları daha önceki derslerden de bilindiği üzere çok yavaş soğuma şartlarını ifade etmektedir. **Ancak endüstriyel çelik üretiminde proses koşullarından dolayı soğuma hızları denge koşullarına göre oldukça yüksektir.**
- **Soğuma hızın artması ile birlikte (örneğin, östenitleştirilmiş bir çeliğin soğuk su içerisine daldırılması) faz dönüşümlerinin belirlenmesinde kullanılan demir-karbon faz diyagramı kullanılmaz.** Bunun en önemli nedeni söz konusu diyagramın çok yavaş soğuma koşullarında oluşturulmasıdır.
- Bu nedenle yüksek soğuma hızlarında **TTT** (Time, Temperature, Transformation) adı verilen ve **faz dönüşümünün sıcaklığa ve zamana bağlı olarak değişimini gösteren** diyagramların kullanılması gerekmektedir.

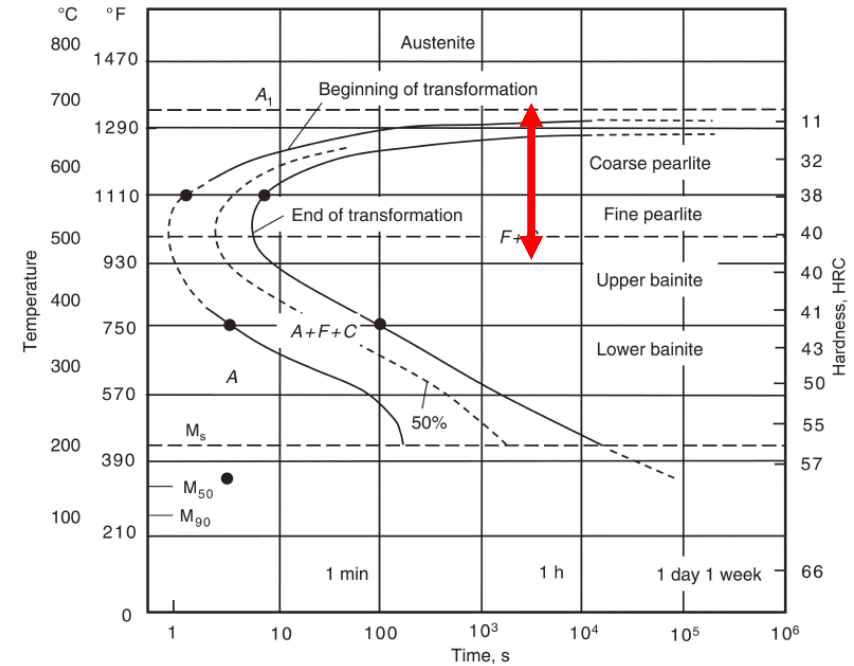
Dengesiz Soğuma Koşulları

- Yandaki şekilde yalın karbonlu **1080 (Ötektoid) çeliğine ait TTT diyagramı** görülmektedir.
- TTT diyagramları **sıcaklığın ve zamanın fonksiyonu** olarak alaşım içerisinde **aşırı soğuma koşullarında** bağlı olarak oluşacak **faz dönüşümlerinin belirlenmesinde** tercih edilmektedir.
- Örneğin tamamen östenitleştirilmiş ötektoid çelik **600 dereceye hızlı soğutulup 2-3 saniye kadar bekletildiğinde östenit fazının bir kısmı perlit** fazına dönüşecektir.
- Aynı sıcaklıkta yaklaşık **10 saniye** tutulduğunda yapının tamamı perlit fazına dönüşmektedir.



Dengesiz Soğuma Koşulları

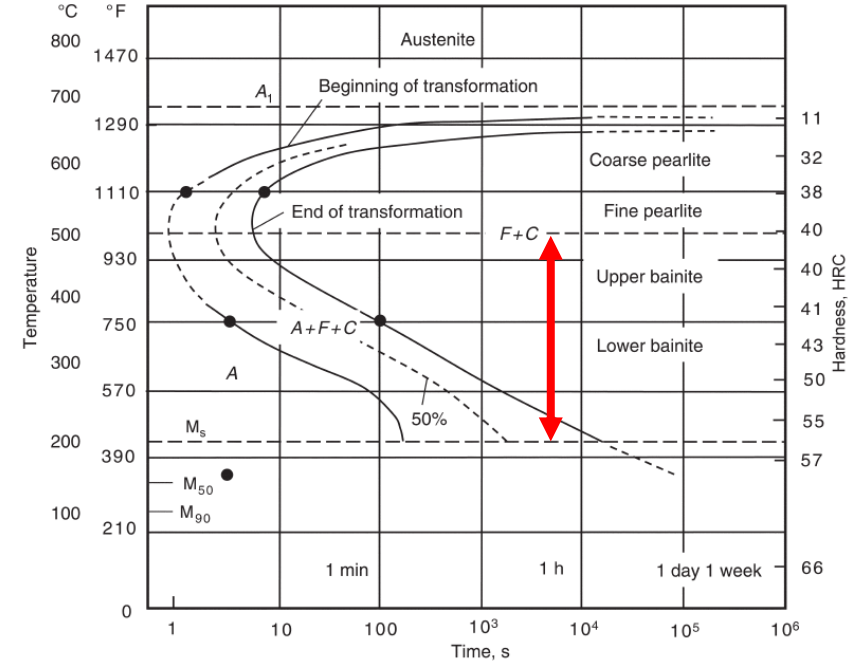
Endüstriyel olarak kullanılan tüm çeliklerde perlit yapısı oluşumu TTT diyagramında A1 çizgisinde başlayıp (725 derece) diyagramında burun olarak ifade edilen 540 dereceye kadar devam eder. Yüksek sıcaklıklarda difüzyon hızı daha yüksek olmasından dolayı perlit yapısı içerisinde bulunan lameller arası mesafe, düşük sıcaklıklara göre daha yüksektir. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda kaba perlit olarak ifade edilen yapı oluşurken düşük sıcaklıklarda ince perlit yapısı oluşmaktadır. Oluşan bu yapı çeliğin mukavemetini etkilemektedir. Perlit yapısı içerisindeki lameller arası mesafe azaldıkça çeliğin mukavemeti artmaktadır. Bunun en önemli sebebi dislokasyonların tane içerisindeki hareketine karşı koyan engel sayısının artmasıdır.



İzotermal faz dönüşüm diyagramı

Dengesiz Soğuma Koşulları

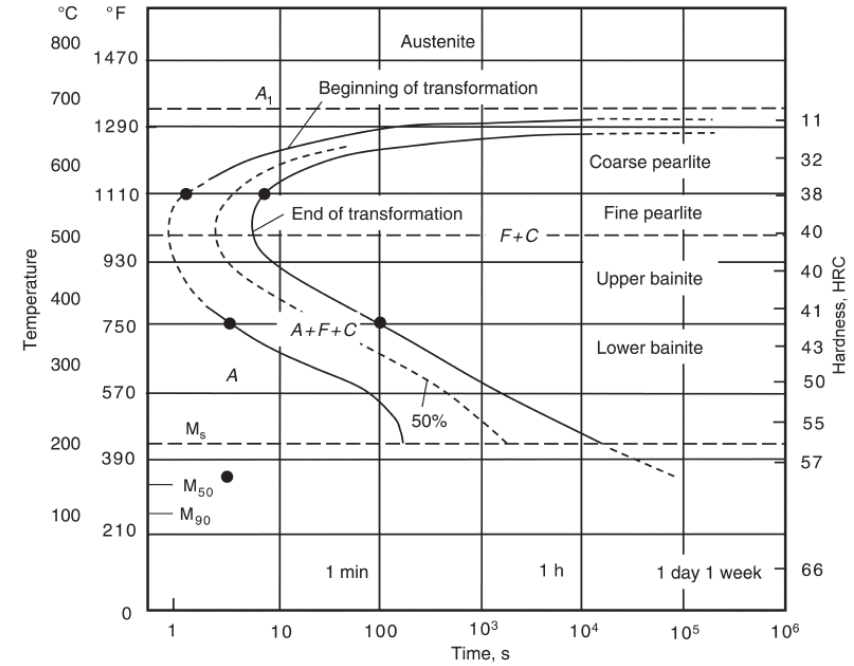
- Eğer ötektik bileşime sahip çelik (% 0,8 C, ağırlıkça) 400 dereceye hızlı soğutulup (quenching) **bu sıcaklıkta farklı sürelerde bekletildiğinde perlit yapısı yerine bu yapıya benzeyen, morfolojik olarak aralarında farklar bulunan ferrit ve sementit fazlarından oluşan beynit yapısı oluşmaktadır.**
- Diyagramdan da görüldüğü gibi **iki farklı beynit yapısı oluşmaktadır. Bunlardan birincisi yüksek sıcaklıklarda oluşan üst beynit yapısı, ikincisi ise düşük sıcaklıklarda oluşan alt beynit yapısıdır.**



İzotermal faz dönüşüm diyagramı

Dengesiz Soğuma Koşulları

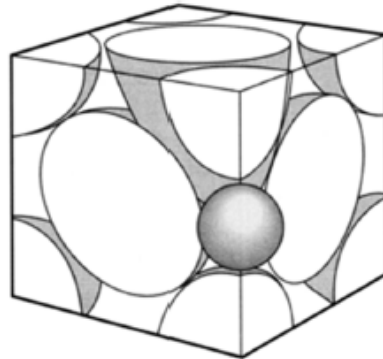
- Son olarak östenitleştirilmiş ötektoid çelik tuz banyosu içerisinde 150 dereceye kadar hızlı soğutulduğunda martenzit adı verilen farklı bir yapı oluşmaktadır. Oluşan bu yapı morfoloji olarak beynit ve perlit arasındadır.
- Bu faz, perlit fazında olduğu gibi ferrit ve sementit fazlarının tam anlamıyla bir karışımı değildir. martenzit fazı, karbon atomları ile aşırı doygun hale gelmiş ferrit fazından meydana gelmektedir.
- Yüksek soğuma hızından dolayı karbon atomları hacim merkezli kübik yapı içerisindeki yerlerine difüzyon süresinin yetersiz olmasından dolayı tam olarak yerleşemezler.



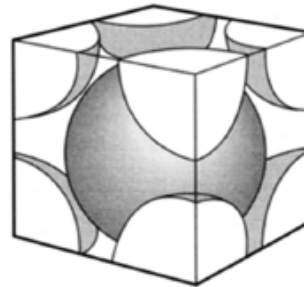
İzotermal faz dönüşüm diyagramı

Martenzitik Yapı

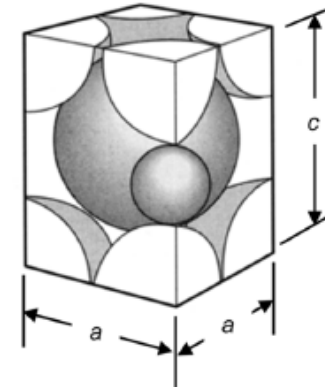
- Genel olarak, **martenzitik dönüşüm, soğutma veya ısıtma hızı yeterince yüksek ise, birçok metalik ve metalik olmayan malzemeler, mineraller ve bileşiklerde gerçekleşebilir.**
- En önemli örnek, daha yüksek paketlenme yoğunluğuna sahip östenit (yüz merkezli kübik veya YMK) fazının, hacim merkezli tatragonal (HMT) daha az yoğun paketlenmiş kristal yapılarına dönüştüğünde oluşan martenzitidir.
- Normal soğuma şartların yüzey merkezli kübik yapıya sahip olan östenit fazı hacim merkezli yapıya sahip ferrit fazına dönüşmektedir. Ancak soğuma hızının artması ve difüzyon mekanizmasının engellenmesiyle ferrit fazı oluşumu engellenir.



(a)



(b)



(c)

Martenzitik Yapı

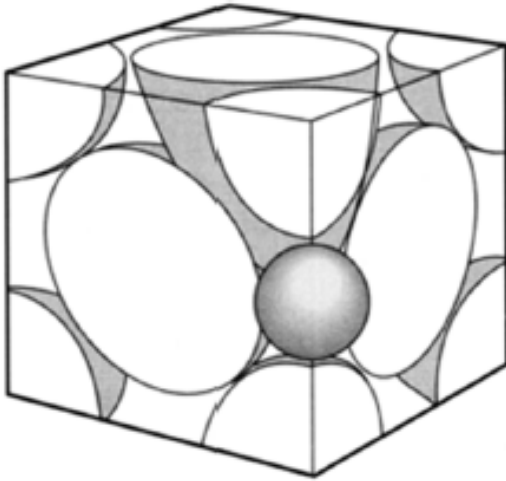
- Su verme işleminden sonra oluşan **martenzit mikroskop altında iğne veya diken biçiminde gözükür ve bazen saman demetini andıran bir görünüm sergiler.** Çeliklerin çoğunda martenzitik yapı belirsiz ve soluktur, bu nedenle kolayca ayırt edilemez. Yüksek karbonlu çeliklerde ise kalıntı ostenit arka fonu oluşturduğundan, martenzitin iğne veya diken biçimindeki yapısı daha belirgin bir görünüm kazanır.
- **Martenzitik dönüşüm yalnız soğuma sırasında meydana gelir.** Bu nedenle, söz konusu dönüşüm zamandan bağımsız olup, yalnız sıcaklığın azalmasına yani soğumaya bağlıdır. **Martenzitin en önemli özelliği, çok sert bir faz olmasıdır. Çeliklerde, sementitten sonra gelen en sert faz martenzittir. Yüksek sertlik değerleri, ancak yeterli oranda karbon içeren çeliklerde elde edilir.**



Çeliklerde oluşan tipik bir martenzitik yapının görünümü. İğne biçimindeki taneler martenzit fazını, beyaz bölgeler ise kalıntı osteniti göstermektedir.

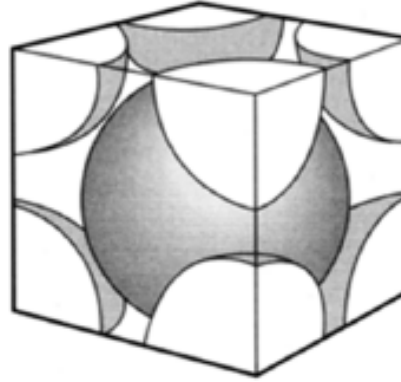
Martenzitik Yapı

- Hızlı soğuma neticesinde oluşan bu yapı yarı kararlı bir faz olup YMK kristal kafes yapısından daha az yoğun olan HMT kristal kafes yapısına sahiptir. Bunun sonucu olarak distorsiyona uğrayan kafes mukavemet ve sertlik artışını sağlar.



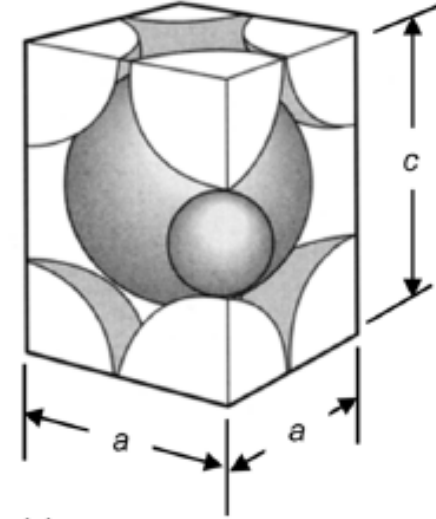
(a)

Östenit



(b)

Ferrit



(c)

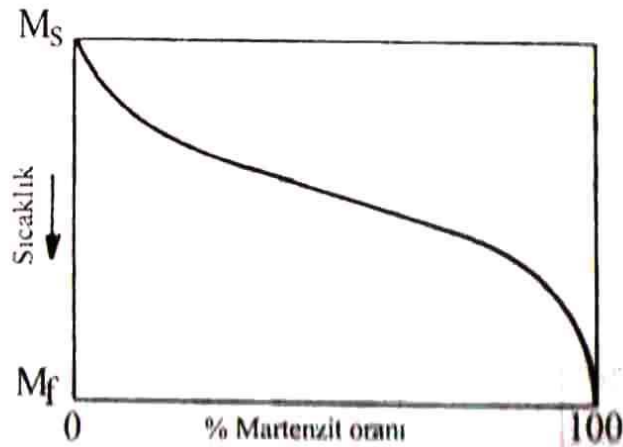
Martenzit

Martenzitik Yapı

- **Martenzit yüksek sertliğe sahiptir.**
- Martenzitin sertliğinin yüksek olmasının en büyük nedeni kafes yapısının aşırı ölçüde distorsiyona uğraması, yani çarpıtılmış olmasıdır.
- **Martenzitin atomsal dolgu faktörünün ostenitin atomsal dolgu faktöründen daha düşük olması nedeniyle, martenzitik dönüşüm sırasında çelikte bir miktar hacimsel büyüme meydana gelir.**
- Söz konusu hacimsel büyüme matris yapısını plastik deformasyona uğratabilecek büyüklükte yerel gerilmeler oluşturur. Bir başka deyişle, martenzitin oluşumu sırasında meydana gelen hacimsel büyüme çok yüksek düzeyde yerel gerilmeler oluşturarak çeliklerin matris yapısının aşırı ölçüde çarpılmasına veya plastik şekil değişimine uğramasına neden olur.
- **Kafes yapısının çarpılması da dislokasyon hareketini zorlaştırarak veya engelleyerek su verilen çeliklerin sertlik ve mukavemetini arttırır.**

Martenzitik Dönüşümün Önemli Özellikleri

- Martenzitik dönüşüm difüzyonsuz olup, dönüşüm sırasında malzemenin kimyasal bileşiminde herhangi bir değişim meydana gelmez. Bu dönüşüm sırasında ostenit fazı ikili kayma mekanizmasıyla aniden kafes yapısını değiştirir.
- Martenzitik dönüşüm yalnız soğuma sırasında meydana gelir. Bu nedenle söz konusu dönüşüm zamandan bağımsız olup, yalnız sıcaklığın azalmasına yani soğumaya bağlıdır. Bu tür dönüşüme atermal dönüşüm denir. Dönüşüm sırasında oluşan martenzitin oranı, azalan sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişmez. Dönüşümün başlangıç aşamasında az miktarda martenzit oluşur, sonradan martenzit oranı hızlı bir şekilde artar ve dönüşümün sonuna doğru bu oran tekrar azalır.



M_s : Martenzitik dönüşümün başlangıç sıcaklığı

M_f : Martenzitik dönüşümün bitiş sıcaklığı

Bir çelik parça M_s 'nin altındaki bir sıcaklıkta tutulursa martenzitik dönüşüm durur ve sıcaklık düşmedikçe dönüşüm devam etmez.

Martenzitik Dönüşümün Önemli Özellikleri

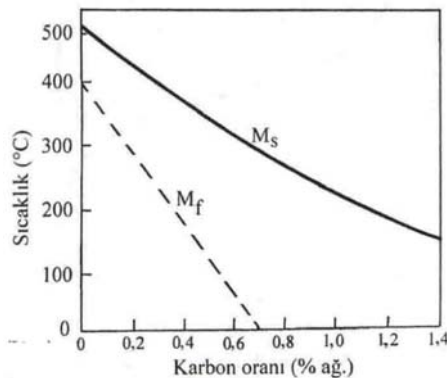
- Soğuma hızını değiştirmekle bir alaşımin M_s sıcaklığı değiştirilemediği gibi martenzitik dönüşümde engellenemez. Martenzitik dönüşüme ait sıcaklık aralığı alaşımin bir karaktersitiği olup, soğuma hızının artırılması ile değiştirilemez.
- M_s sıcaklığı yalnız alaşımin kimyasal bileşime bağlıdır. Çeliklerin M_s sıcaklığını belirlemek için bazı bağıntılar geliştirilmiştir.

Bütün alaşım elementlerinin ostenit içerisinde çözünmeleri durumunda;

$$M_s (^{\circ}\text{C}) = 561 - (474 \times \%C) - (33 \times \%Mn) - (17 \times \%Ni) - (17 \times \%Cr) - (21 \times \%Mo)$$

Yüksek ve orta alaşımlı çelikler için;

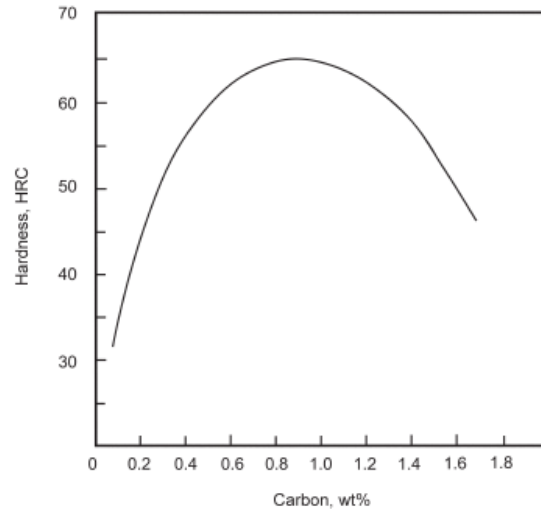
$$M_s (^{\circ}\text{C}) = 550 - (350 \times \%C) - (40 \times \%Mn) - (20 \times \%Cr) - (17 \times \%Ni) - (8 \times \%W) - (10 \times \%Mo) - (35 \times \%V)$$



M_f sıcaklığı tam olarak belirlenemediğinden kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

Martenzitik Dönüşümün Önemli Özellikleri

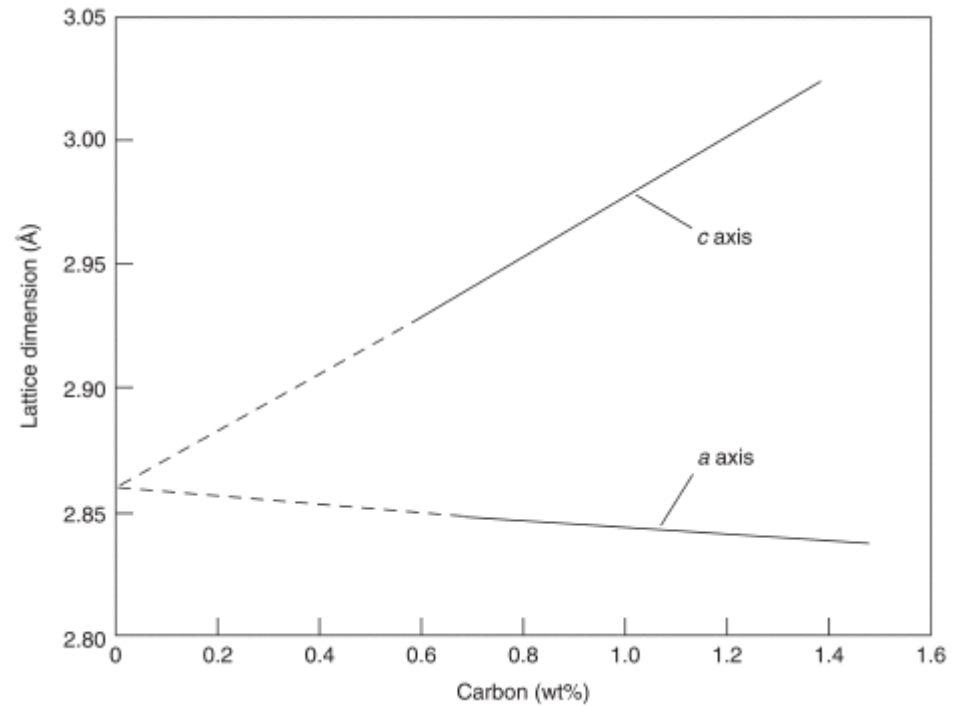
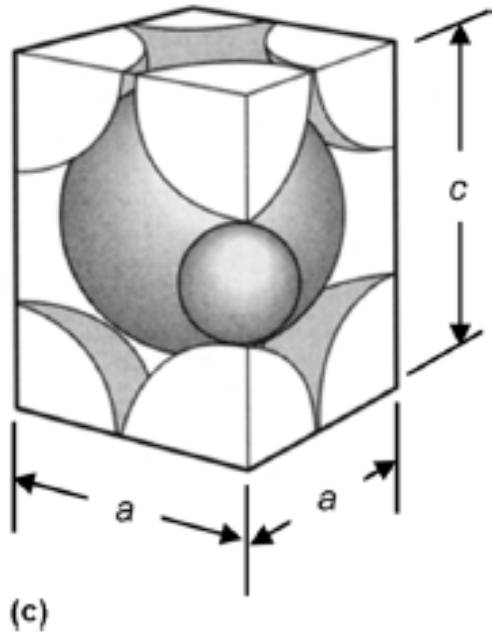
- Martenzit her ne kadar oda sıcaklığında veya buna yakın sıcaklıklarda ölçülemeyecek kadar uzun bir süre dönüşüme uğramadan kalabilirse de gerçekten **kararlı bir faz değildir**. Martenzit, kararsız ostenit ile ferrit ve sementit karışımından oluşan kararlı yapı arasında yer alan geçiş fazı olarak kabul edilir.
- **Martenzitin en önemli özelliği sert bir faz olmasıdır. Nitekim çeliklerde sementitten sonra gelen en sert faz martenzittir.** Yüksek sertlik değerleri ancak yeterli oranda karbon içeren çeliklerden elde edilir. Bir başka ifadeyle su verme işleminden sonra elde edilen sertlik değeri çeliğin karbon oranına bağlıdır.



Su verilen karbon çeliklerinde elde edilen en yüksek sertliğin karbon oranına göre değişimini gösteren eğri

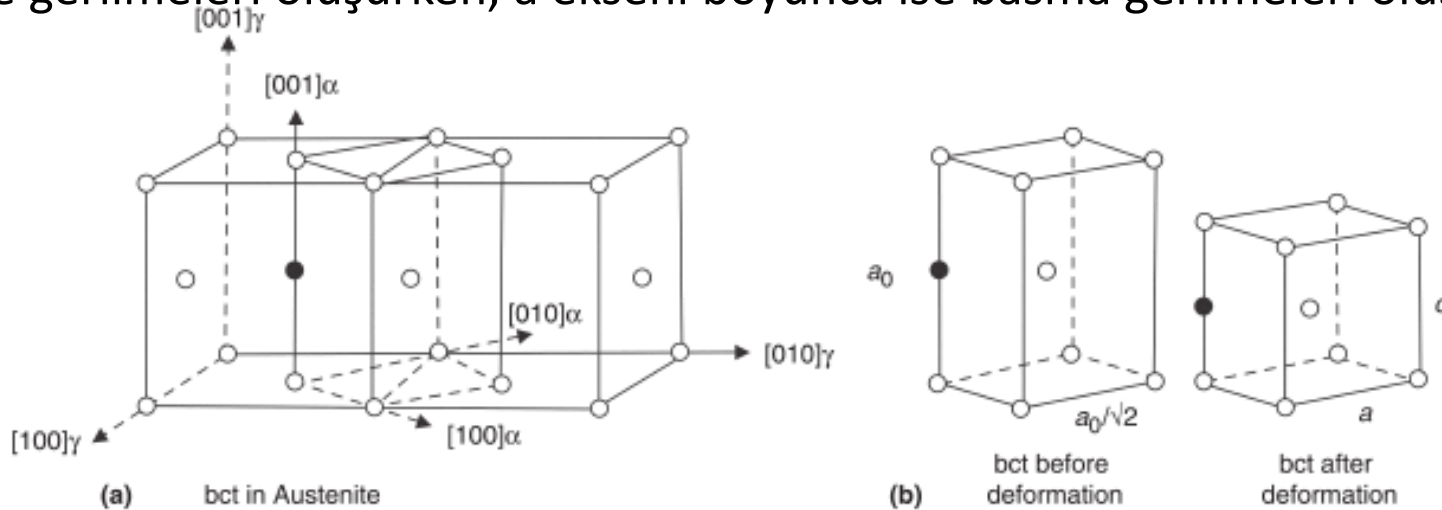
Martenzitik Dönüşümün Önemli Özellikleri

- Şekilden de görüldüğü gibi HMT yapıda kafes parametreleri olan a ile c arasındaki oran karbon oranının artması ile birlikte artmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi c ve a değerlerindeki artış ve azalış lineer olmakla birlikte c parametresindeki artış, a parametresindeki azalmadan daha yüksektir.



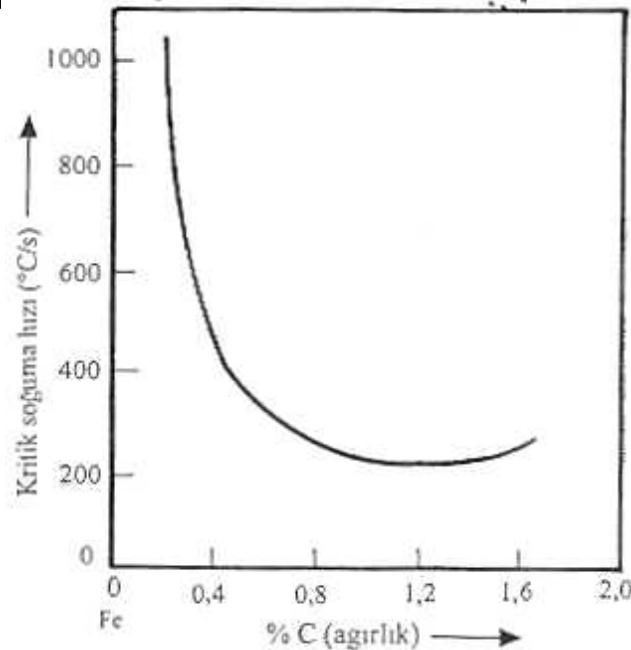
Martenzitik Dönüşümün Önemli Özellikleri

- Aşağıdaki şekil a'da östenit fazına ait iki YMK kristal yapılı iki birim hücre gösterilmiştir. Şekil a'da tanımlanan atomlar aynen şekil b'de yerleri değiştirilmeden gösterilmiştir.
- Bu aşamda, HMT kristal yapının boyutları, YMK kristal kafesine sahip östenit fazı ile aynıdır. Şekil b'nin sağ tarafında bulunan birim hücre; c ve a parametrelerine sahip martenzitik yapıya ait birim hücreyi göstermektedir. Buda, östenit yapıdan martenzitik yapının oluşması için kristal kafes yapısının deformasyona uğraması gerektiğini göstermektedir. Kristal kafesin deformasyonu sonucunda oluşan gerilme Bain gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Buna göre HMT kristal kafes yapısında c eksenini boyunca çekme gerilmeleri oluşurken, a eksenini boyunca ise basma gerilmeleri oluşur.



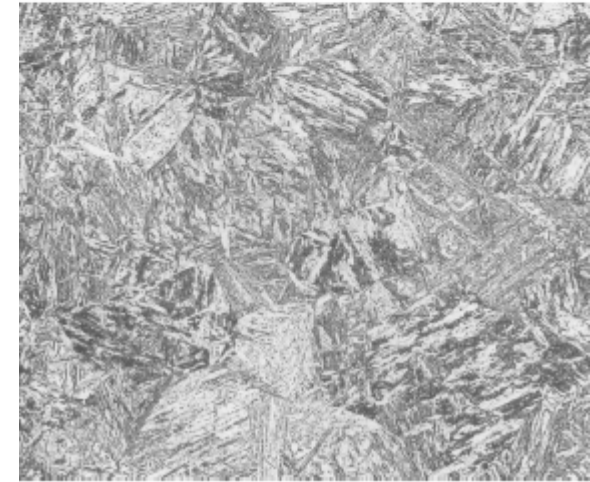
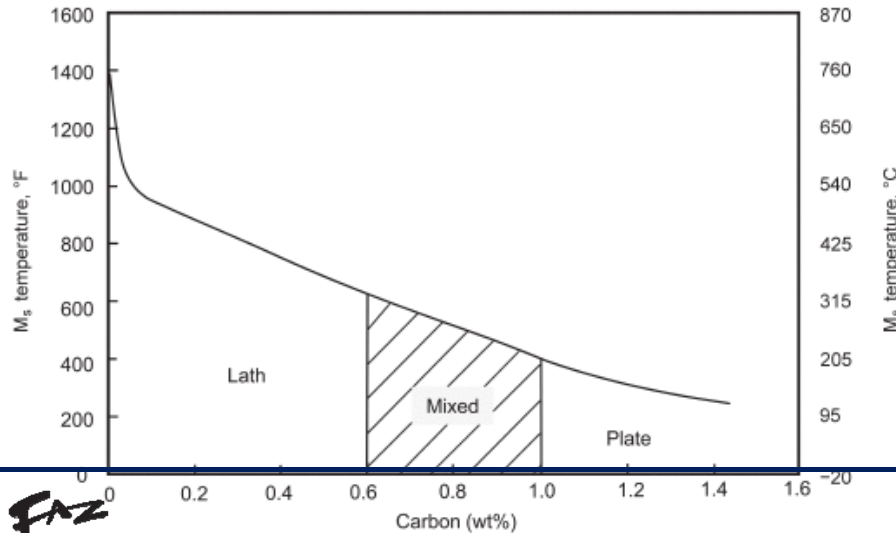
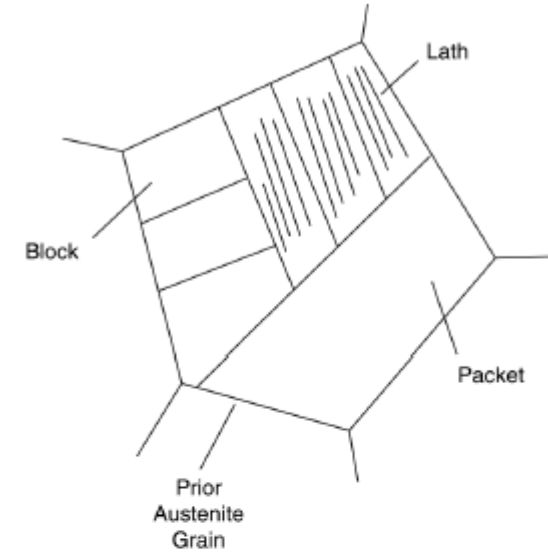
Kritik Soğuma Hızı

Sertleştirme işleminin temel amacı, tamamen martenzitik bir yapı elde etmektir. Bunun için de malzemenin tavlama işleminden sonra, kritik soğuma hızı adı verilen bir değerden daha yüksek hızlarda soğutulması gerekir. **Kritik soğuma hızı ise tamamen martenzitik bir yapı elde etmek için gerekli en düşük soğuma hızıdır.** Çelik için önemli bir kriter olan kritik soğuma kimyasal bileşim ve ostenitin tane büyüklüğüne bağlıdır.



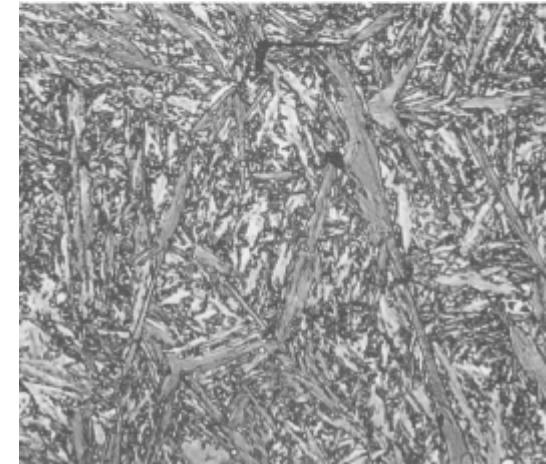
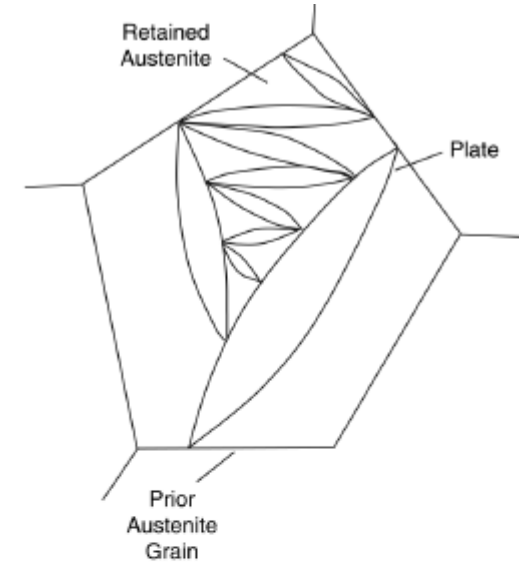
Martenzit Morfolojisi

- Çelik malzemelerde karbon oranına göre iki çeşit martenzit oluşumu görülmektedir.
- **Ağırlıkça %0,6 C'dan daha az karbon içeren alaşımlarda martenzitik yapı iğnemi formda oluşmaktadır.**
- Oluşan iğnemi martenzit taneleri bir birlerine paralel olarak sıralanmıştır.
- Bir birine paralel olarak sıralanan martenzitik taneler blok adı verilen daha büyük yapısal taneler ile bir birinden ayrılmaktadır.



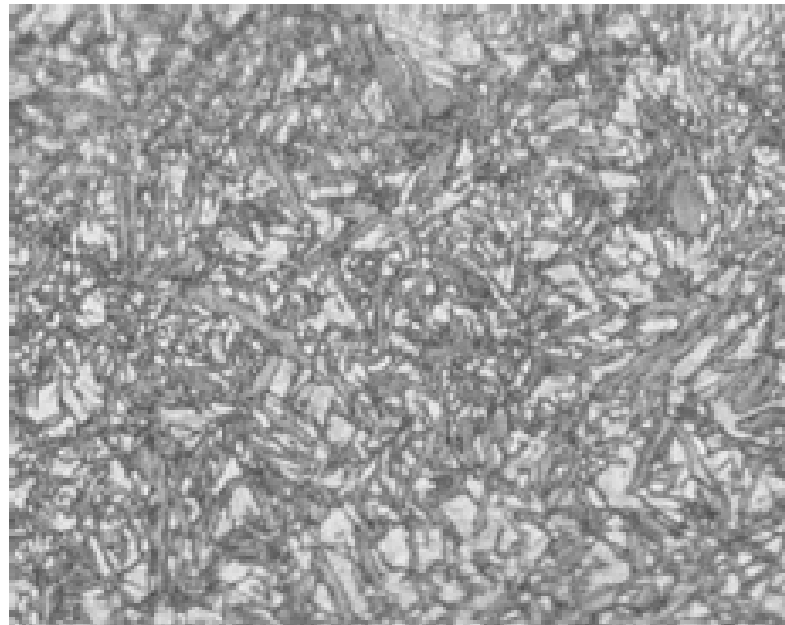
Martenzit Morfolojisi

- Düzlemsel martenzit olarak adlandırılan martenzitik yapı ise karbon oranı %0,6'dan daha yüksek olan alaşımlarda görülür.
- Karbon oranının artması ile birlikte östenit taneleri üzerinde büyüyen ve mercek görünümde veya iğnemi yapıya benzer bir yapı oluşmaktadır.
- Genellikle düzlemsel martenzit yapı, düzlemsel yapının merkezinde bulunan bir çizgi ile iğnemi martenzitten ayırt edilebilir.
- Karbon oranı atıkça, oluşan ikizlenmeler dislokasyonların yerini almaktadır. Bu nedenle yüksek karbonlu çelikler ikizlenmiş partenzitik yapıdan oluşmaktadır.
- Yapıda gerçekleşen bu dönüşüm YMK yapıdan HMT yapıya geçişteki hacim artışı ile ilişkilendirilmektedir.



Kalıntı Östenit

- Östenitleştirilmiş çelikte martenzitik dönüşüm M_s sıcaklığında başlayıp, M_f sıcaklığında son bulmaktadır. Ancak M_f sıcaklığının geçilmesi ile birlikte çoğu zaman yapıda bir miktar kalıntı östenit, martenzite dönüşmeden yapı içerisinde kalır.
- Bu durumda kalıntı östenit taneleri martenzit taneleri tarafından sarılmıştır.
- Bunun sonucu olarak bu fazın dönüşmesi sonucu oluşan ve gelişen martenzit yapısı östenit fazını tüm yönlerden basınç uygular. Bu basıncın etkisi altında kalan östenittin martenzit yapıya dönüşmesi giderek zorlaşır.

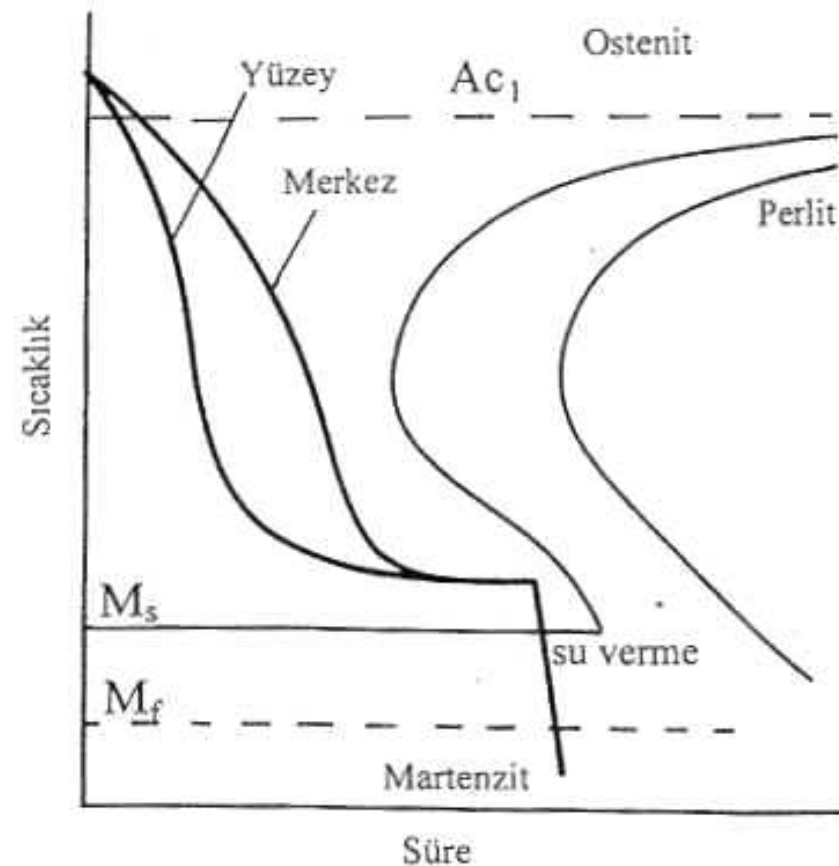


Kesikli Su Verme Yöntemleri

- Su verilen parçanın farklı kısımlarının soğuma hızları arasındaki farkı önlemek olanaksız olduğundan, parçanın bir bölümü genişlerken, diğer bölümü büzülür.
- Bunun sonunda, parçada çekme gerilmeleri oluşur. Söz konusu gerilmelerin belirli değerleri aşması durumunda parçada ciddi çarpılma veya çatlama meydana gelir ve sonuçta parça kullanılmaz hale gelir.
- Parçanın kütlesi attıkça, merkezi ile yüzeyinin soğuma hızları arasındaki fark büyür ve dolayısıyla su verme çatlamasının meydana gelme olasılığı artar. Bu nedenle bazı parçaların sertleştirilmesi için normal su verme yöntemi her zaman tavsiye edilmez ve bunun yerine alternatif yöntemler uygulamak gerekir.
- Bunun için, martemperleme ve ostemperleme olarak adlandırılan kesikli su verme yöntemleri geliştirilmiştir.

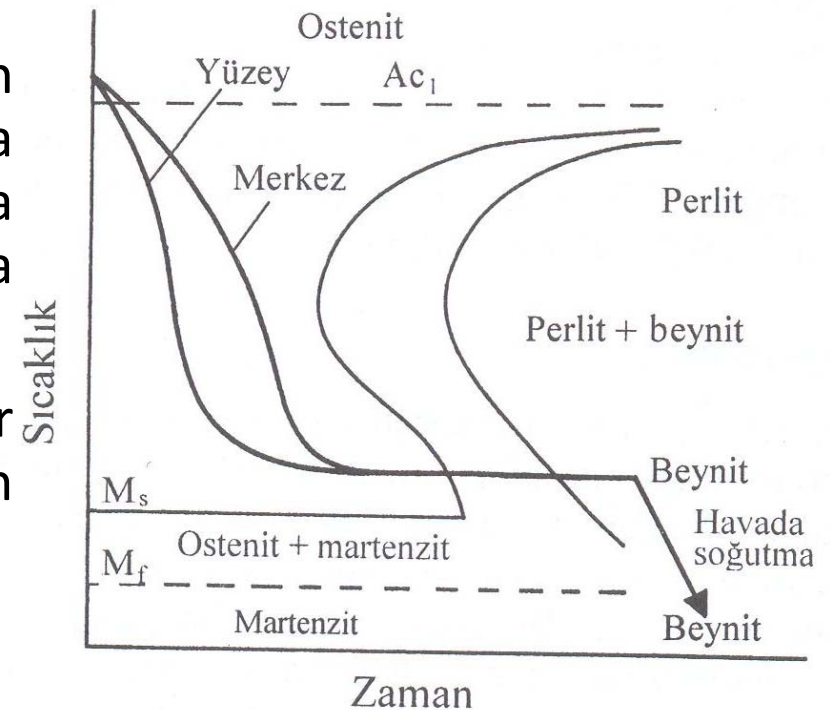
Martemperleme

- Sertleştirilecek parça ostenitleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra, martenzitik dönüşümün başlama sıcaklığının (M_s) hemen üzerindeki bir sıcaklıkta tutulan kurşun veya tuz banyosuna daldırılır.
- Yüzeyi ile merkezinin sıcaklıkları aynı oluncaya, yani bütün kesit boyunca aynı sıcaklık elde edilinceye kadar parça banyo içersinde tutulur.
- Daha sonra parçaya su verilerek tamamen martenzitik bir iç yapı elde edilir.
- Bu işlem sayesinde, soğuma ile oluşan büzülme olayı, ostenit-martenzit dönüşümü ile ortaya çıkan genleşme olayından ayrılarak, hem büyük parçalardaki su verme çatlaması önlenir, hemde parça sertleştirilir.



Östemperleme

- Sertleştirilecek parça ostenitleştirildikten sonra, martenzitik dönüşümün başlama sıcaklığının (M_s) üzerindeki sıcaklıkta tutulan kurşun veya tuz banyosuna daldırılır.
- Parça dönüşüm tamamlanıncaya kadar banyoda bekletilir ve sonradan banyodan alınarak havada soğutulur.



Östemperleme

Ostemperlemenin avantajları:

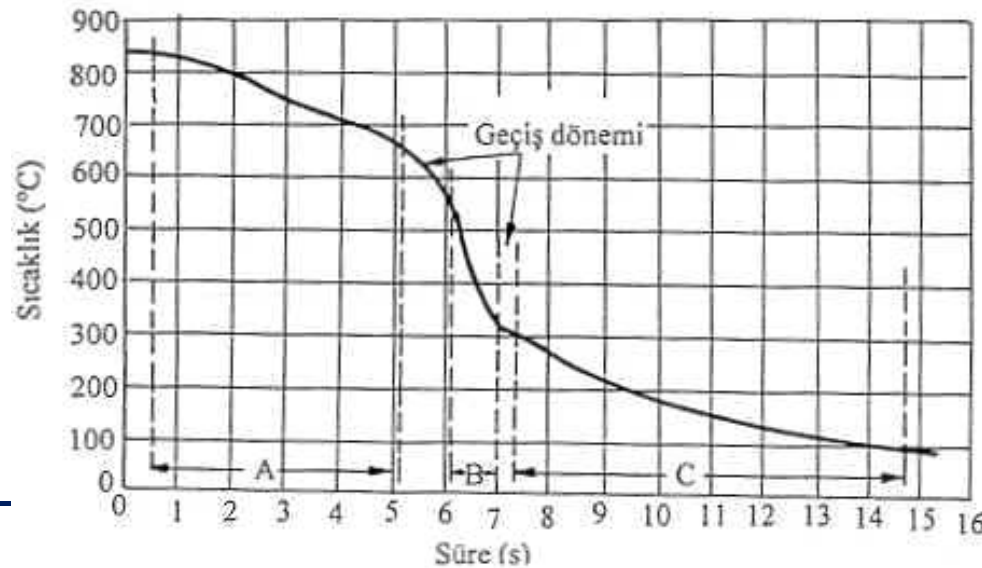
- Düşük çarpılma
- Yüksek süneklik
- Homojen ve tutarlı sertlik
- Tokluk ve daha fazla aşınma direnci
- Yüksek darbe ve yorulma mukavemeti
- Hidrojen kırılma direnci
- Yüksek tokluk
- Yüksek aşınma direnci
- Yorulma dayanımında artış
- Sertlik artışı
- Çekme ve akma mukavemetlerinde artış

Ostemperlemenin kısıtlamaları:

- Perlit dönüşümünün önlenebileceği parçalara uygulanır.
- Parça, perlit dönüşümünü engellemeye yetecek kadar hızlı soğutulmalıdır. İnce kesitli parçalar daha hızlı soğutulabilir.

Su Verme İşlemi Sırasında Isı Giderme Mekanizması

Su verilen çeliğin iç yapıları, sertlik ve mukavemetleri su verme işlemi sırasında elde edilen gerçek soğuma hızına bağlıdır. Gerçek soğuma hızının kritik soğuma hızından yüksek olması durumunda, yalnız martenzitik bir yapı elde edilir. Gerçek soğuma hızının, kritik soğuma hızından düşük olması durumunda ise tamamen martenzitten oluşan bir yapı elde edilemez ve bu nedenle parça tam olarak sertleştirilemez. Çünkü, oluşan martenzit dışı dönüşüm ürünleri malzemenin sertleşmesini engeller. Bu nedenle su verme sırasındaki ısı giderme mekanizmasının iyi anlaşılması gerekir.



Ilık suda su verilen silindirik bir parça için tipik bir soğuma eğrisi

Su Verme İşlemi Sırasında Isı Giderme Mekanizması

- **A devresi:** Buhar örtüsü veya buhar filmi devresi olarak adlandırılır. Başlangıçta malzemenin sıcaklığı çok yüksek olduğundan, su verme ortamı buharlaşarak malzemenin üzerinde ince bir buhar filmi oluşturur ve bu film bütün malzemeyi kaplar. Bu buhar filminin ısı geçirgenliği veya ısı iletimi iyi olmadığından bu devrede nispeten düşük soğuma hızı elde edilir.
- **B devresi:** Buhar taşınımı devresi olarak adlandırılır. Malzeme buhar filminin kararlı olmadığı bir sıcaklığa kadar soğuduğunda B devresi başlar. Su verme ortamı ile metal yüzeyi ıslanır ve ani kaynama meydana gelir. En hızlı soğuma bu devrede gerçekleşir.
- **C devresi:** Sıvı soğuma aşamasını gösterir. Malzeme yüzeyinin sıcaklığı su verme sıvısının kaynama noktasına kadar düşünce bu devre başlar. Bu devrede buhar oluşmaz ve soğuma işlemi ısı iletimi ve taşınımı ile gerçekleşir. Ancak, soğuma hızı bu devrede en düşük değerindedir.

Su Verme Ortamları

İdeal su verme ortamı, başlangıçtaki soğuma hızının yüksek, malzemedeki çarpılmanın önlenmesi bakımından da düşük sıcaklıklardaki soğuma hızının düşük olmasını sağlamalıdır. Ancak, bu durumu tam olarak sağlayacak nitelikte bir su verme ortamı yoktur. Su ve inorganik tuzların sulu çözeltileri gibi su verme sıvıları, başlangıç aşamasındaki (A ve B devreleri) soğuma hızlarının yüksek olmalarını sağlarlar. Ancak, bu soğuma hızları düşük sıcaklıklarda da devam ettiğinden, malzemedeki çarpılma veya çatlama meydana gelebilir. Geleneksel su verme yağları ile uzun bir A devresi ve düşük soğuma hızına sahip kısa bir B devresi elde edilir.

Sanayide kullanılan su verme ortamları, su verme şiddetlerine göre aşağıdaki gibi sıralanır.

- a) Tuzlu su
- b) Musluk suyu
- c) Erimiş veya sıvı tuzlar
- d) Yağ ve su karışımı
- e) Yağ
- f) Hava

Bazı ortamların soğuma hızları Tablodaki gibidir;

Su Verme Ortamları

Su Verme Ortamı	Soğuma hızı ölçüm sıcaklıkları (°C)					
	740		650		680-480	
	Banyo sıcaklıkları (°C)					
	24	52	24	52	24	52
	Soğuma hızı (°C/s)					
%10'luk tuzlu su	212	164	212	181	213	159
Musluk suyu	117	26	124	65	122	98
Gulf süper su verme yağı	44	47	94	100	75	76
Yavaş su verme yağı (%10 yağ-%90 su)	20	17	17	14	22	24
Durgun hava	3	-	2	-	2	-
Erimiş tuz	90		72		37	

Su Verme Sertleştirmesini Etkileyen Faktörler

Parçanın Yüzey Durumu:

- Tavlama işleminde kullanılan fırında bulunan oksijen ve nem nedeniyle çelik parça oksitlenirse, yüzeyinde **tufal adı verilen kalın bir demir oksit tabakası oluşur.**
- Bu oksit tabakası yalıtkan gibi davranarak, su verme işlemi sırasında çelik parçadan **su verme ortamına doğru olan ısı akımını geciktirir.** Böylece, bazı durumlarda gerçek soğuma hızı kritik soğuma hızının altına düşer ve martenzitik dönüşüm engellenir.
- Ayrıca parça **yüzeyinin bazı bölgelerindeki tufal tabakası, fırınla su verme ortamı arasında soyularak su verme sırasında parça yüzeyinin farklı bölgelerinin farklı hızlarda soğumasına da neden olabilir.** Bu nedenlerden dolayı, **tufal adı verilen oksit tabakası çelik parçaların sertleşmesini zorlaştırdığı gibi yüzey sertliğinin de değişmesine yol açabilir.**
- Endüstride tufal oluşumunu önlemek veya en aza indirmek için bazı önlemler alınır. Bu önlemlere ait yöntemler ısı işlem uygulanan parçanın büyüklüğüne, kullanılan fırının türüne ve ekonomik olanaklara bağlıdır. Söz konusu yöntemlerden bazıları aşağıda verilmektedir.

Su Verme Sertleştirmesini Etkileyen Faktörler

Bakır kaplama yöntemi: Tufal oluşumunu önlemek için parça bakır kaplanır ve bir kaç mikrometrelik kaplama kalınlığı bu iş için yeterli olur.

Koruyucu atmosfer yöntemi: Fırında, belli bir basınç altında çeliğe zarar vermeyen veya etki etmeyen hidrojen, ayırışmış amonyak, yanma artığı gazlar ve hidrokarbonlu yakıt gazları (metan ve propan) gibi asal gazlar verilir. Böylece, oksitlenme ve tufal oluşumu büyük ölçüde önlenir.

Sıvı tuz banyosu yöntemi: Isıl işlem uygulanacak parça, çeliğe göre nötr durumda olan sıvı tuz banyosuna iyice daldırılarak oksitlenme ve tufal oluşumu önlenir.

Dökme demir talaşı yöntemi: Parça, dökme demir talaşı bir kaba iyice gömülür. Fırına giren oksijen, çeliğe ulaşmadan önce dökme demirle reaksiyona girer ve böylece parçanın oksitlenmesi büyük ölçüde önlenir.

Büyüklik ve Kütle

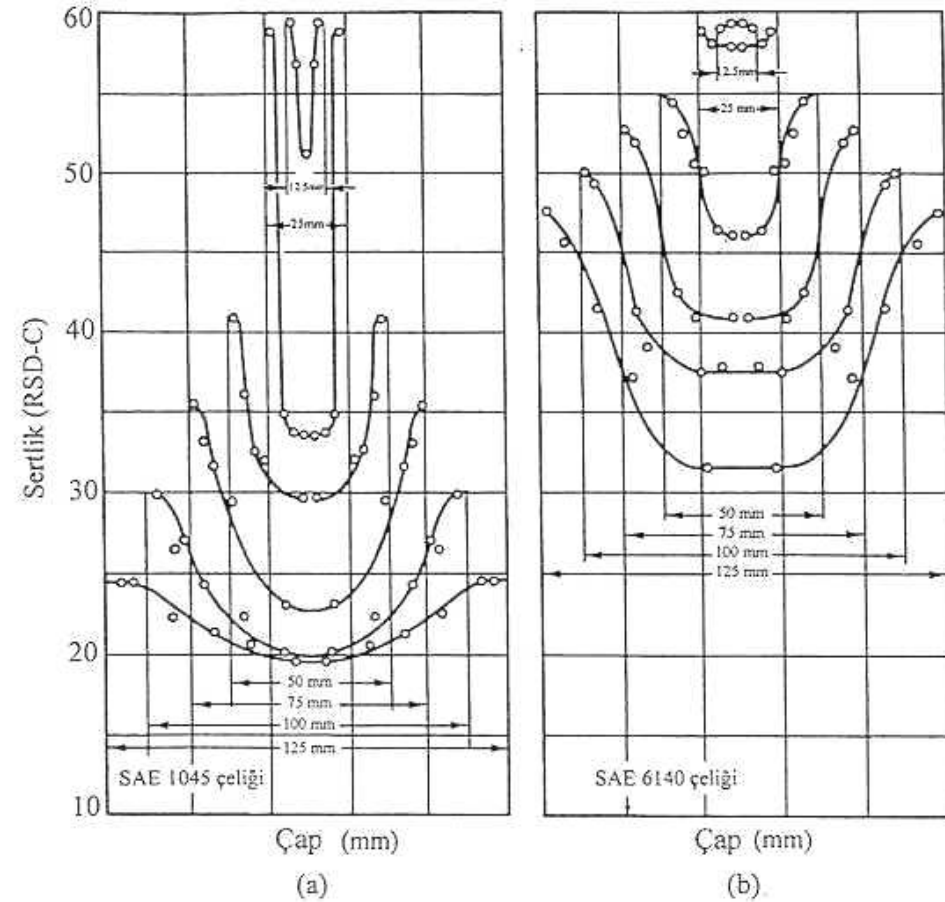
- Su verme sırasında, yalnız parçanın yüzeyi su verme ortamı ile temasta olduğundan parçanın yüzey alanının kütlesine oranı, gerçek soğuma hızını etkileyen önemli bir parametredir.
- Parçanın geometrik şekline bağlı olan bu oran, **küresel parçalar için en küçük değerdedir.**
- **İnce levhalar ve küçük çaplı tellerde yüzey alanının kütleyle oranı büyük olduğundan,** su verme sırasında bu parçaların soğuma hızı yüksek olur.
- **Parçanın soğuma hızı yüzey alanı/kütle oranı ile doğru orantılıdır. Yani bu oran arttıkça soğuma hızı artar, azaldıkça azalır.**
- Yüzeyler, su verme ortamı ile doğrudan temas halinde olmaları nedeniyle su verme sırasında parçanın en hızlı soğuyan kısmını oluştururlar. İç kısımlardaki ısı ise iletimle (kondüksiyon) uzaklaştırılır. Isı, parça gövdesinden geçerek yüzeye ulaşır ve buradan su verme ortamına iletilir. Bu nedenle iç kısımlardaki soğuma hızı, yüzeyin soğuma hızından daha düşük olur.

Su Verme Sertleştirmesini Etkileyen Faktörler

- Su verilen değişik çaplardaki çubukların eksenine dik kesitleri üzerinde meydana gelen sertlik değişimleri ölçülerek sertlik nüfuziyet veya sertlik profil eğrileri elde edilir.

Çünkü bu eğriler, su verilen çeliğin hangi derinliğe kadar sertleşebileceğini gösterir.

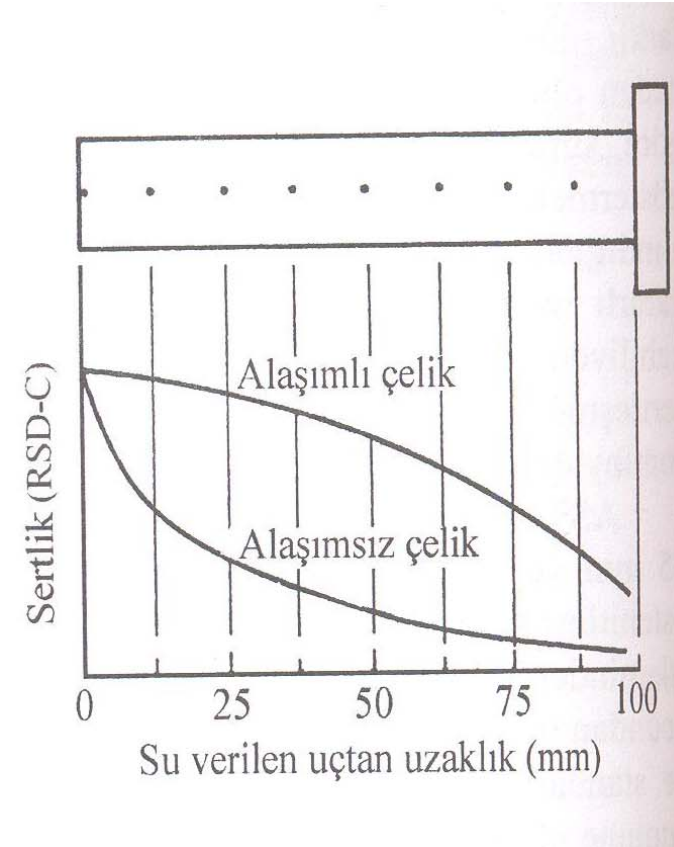
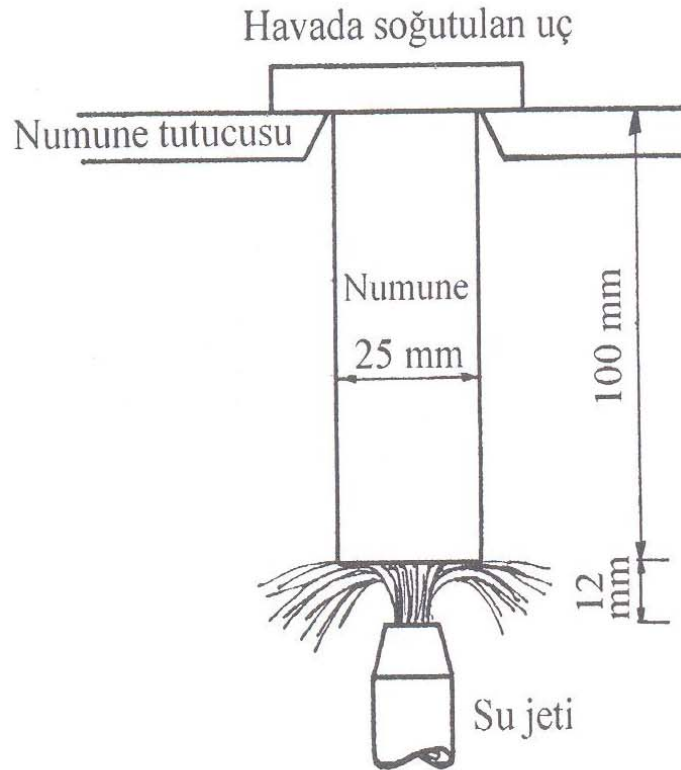
- **Bir malzemenin sertleşme kabiliyeti o malzemenin hangi derinliğe kadar sertleşebileceğini gösteren bir ölçüdür. Sertlik profilleri, su verilen parçaların yüzeylerinin merkezlerinden daha sert olduğunu göstermektedir.**



Suda su verilen değişik çaplardaki çelik örneklerine ait sertlik profilleri. (a) SAE 1045 çeliği (alaşımsız çelik), (b) SAE 6140 çeliği (alaşımlı çelik)

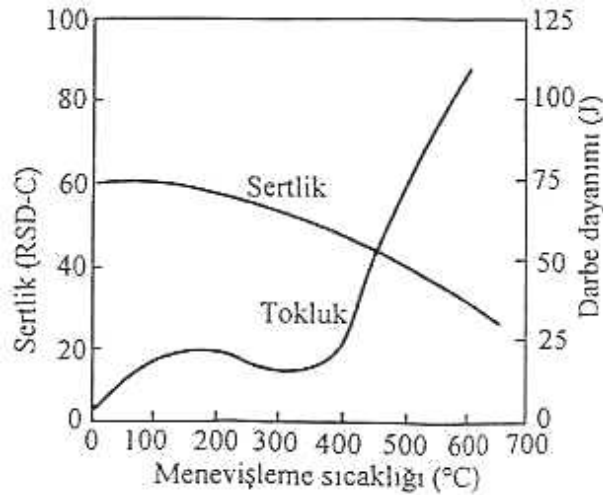
Su Verme Sertleştirmesini Etkileyen Faktörler

- Malzemelerin **sertleşme kabiliyetini belirlemek için en yaygın olarak uygulanan yöntem Jominy deneyidir**. Bu deneye uçtan su verme deneyi de denir.

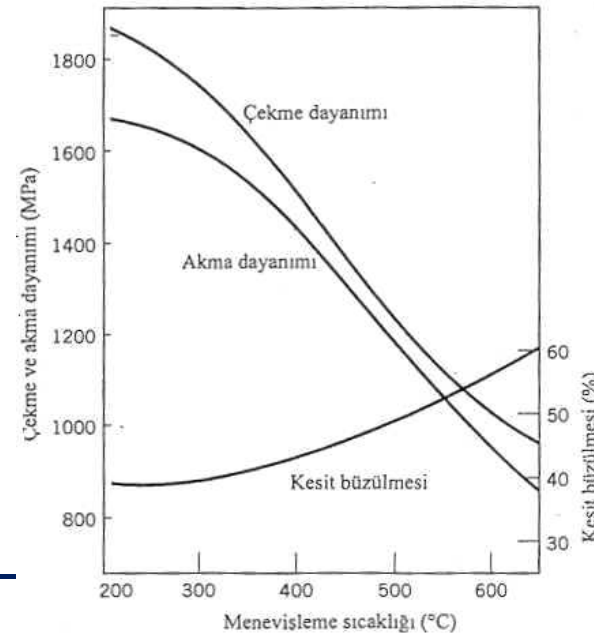


Menevişleme Isıl İşlemi

- Çeliklerde, su verme işlemi ile elde edilen martenzitik yapı gevrek olduğundan pek çok uygulama için elverişli değildir.
- Ayrıca mertanzit oluşumu çelik içerisinde iç gerilmelerin meydana gelmesine neden olur.
- Bu nedenlerden dolayı su verilen çelikler, hemen hemen her zaman A_{c1} çizgisinin altındaki sıcaklıklarda tavlama işlemine menevişleme denir.
- Menevişlemenin amacı; su verilen çelikteki kalıntı gerilmeleri gidermek ve çeliğin süneklik ve tokluğunu artırmaktır. Su verilen çelikler menevişlendiklerinde süneklikleri artar, buna karşılık sertlik ve mukavemetleri azalır.



AISI 4140 çeliğinin sertlik ve çentik darbe tokluğunun menevişleme sıcaklığına göre değişimi (menevişleme süresi : 1 saat)



Yağda su verilen AISI 4340 çeliğinin akma ve çekme dayanımları ile kopma büzülmesinin menevişleme sıcaklığına göre değişimi

Çeliklere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri

- Bazı uygulamalarda kullanılan çelik parçaların hem aşınma dirençlerinin, hem de darbe dayanımlarının yüksek olması istenir. Bunun için parçaların yüzeylerinin sert, iç veya merkez bölgelerinin nispeten yumuşak olması gerekir.
- Bu durumu sağlamak için parçalara yüzey sertleştirme işlemi uygulanır. Çelik parçaların yüzeyleri;
- **sermantasyon (karbürleme),**
- **nitrürasyon (nitrürleme),**
- **alevle ve endüksiyonla sertleştirme olmak üzere dört ana yöntemle sertleştirilir.**
- En uygun yöntem, parçanın kimyasal bileşimine ve boyutlarına göre seçilir.

Sementasyon (Karbürleme)

- Bir tür "termokimyasal işlem" olarak bilinen sementasyon (veya Karbürizasyon) en eski yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olup; **karbon içeriği düşük olan çelik malzeme yüzeyine katı, sıvı veya gaz ortam içerisinde karbon verilmesi (emdirilmesi) esasına dayanır.**
- Söz konusu çeliklerin sementasyonu, karbon verici bir ortamda ve Ac_3 çizgisinin üzerindeki bir sıcaklıkta uygun bir süre tutulurak gerçekleştirilir. Sement edilecek çelik parçalar ostenit bölgesinde 900 ile 950°C arasındaki bir sıcaklıkta, karbon verici bir ortamda yeterli bir süre tavlanylabilir.
- Katı ortam olarak odun kömürü ile baryum karbonat karışımı, sıvı ortam olarak erimiş siyanür banyosu ve gaz ortamı olarak da hidrojen ya da azotla karıştırılan karbonmonoksit, metan ve propan gibi gazlar kullanılabilir. Sement edilecek parçalar işlem süresince bu ortamda tutulur.

Sementasyon

- Sementasyon işlemi, genel olarak, **bileşiminde % 0,2'nin altında karbon bulunan alaşımsız veya düşük alaşımlı çeliklere uygulanır. Bu çelikler, “sementasyon çelikleri” olarak adlandırılmıştır.**
- Sementasyon çelikleri; dişliler, miller, piston pimleri, supaplar, zincir baklaları, zincir dişlileri, diskler, rulmanlı yataklar, bir kısım ölçü ve kontrol aletleri gibi parçaların imalinde kullanılırlar.

No	Standart No	DIN Normu	SAE-AISI	Kullanım Alanları
1	1.0301	C10	1010	-----
2	1.0401	Ck15	1015	-----
3	1.7131	16MnCr5	5115	Dişli çark, aktarma organları, pim,mil,burç vb...
4	1.7147	20MnCr5	5120	Aktarma organı parçaları, dişli çark, tabak ve konik dişli, kalın kesitli mil, pim, burç
5	1.6587	17CrNiMo6	-----	Çok fazla zorlanan aktarma organı parçaları, kalın kesitli çarklar, ayna ve mahruti dişliler
6	1.6523	21CrNiMo6	8620	Orta dayanımlı miller, dişliler, kamalı miller
7	1.7015	15Cr3	5015	Makara yatağı, makara, ölçü aletleri, piston, pim, diferansiyel parçası, dişli çark
8	1.7139	16MnCrS5	-----	Kükürt ilavesi dolayısıyla talaş kaldırılması iyileştirilmiş, dişli çark, aktarma organları,pim,mil,burç vb.
9	1.5752	14NiCr14	3310	Kam mili , dişli tekerleği, standart gerilimli kadran yatağı

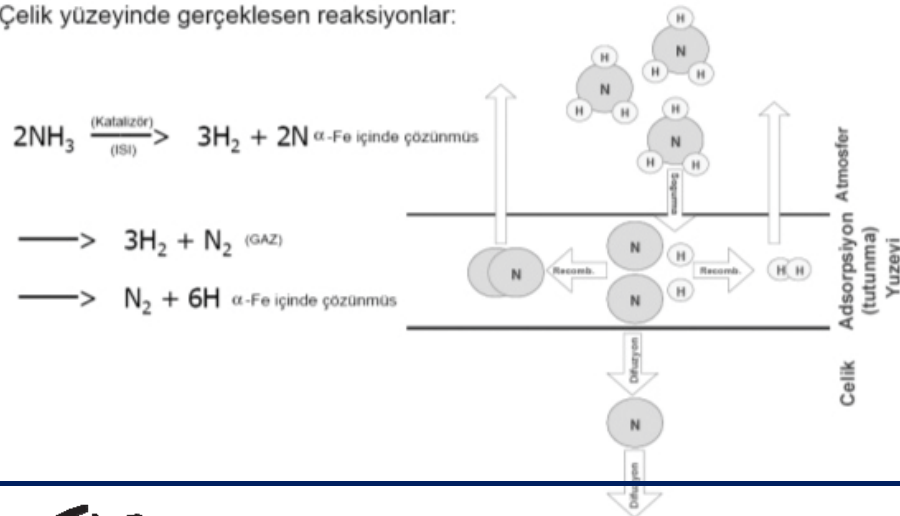
Nitrürleme (Nitrasyon)

- Nitrasyon bir yüzey işlem prosesidir. Azotun çelik yüzeyine difüzyonun sonucu malzemenin yüzeyinde aşınma direncinin yüksek olduğu sert bir tabaka oluşur. Her malzemenin bir nitrasyon kabiliyeti vardır. Nitrasyon bazı çeliklerde korozyon direnci ve yorulma dayanımını artırır. Bazı çeliklerde ise korozyon direncini düşürür.
- Düşük sıcaklık yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olan nitrasyon; çelik parça yüzeyine azot atomlarının ara yer atomu olarak gönderilmesi ile yüzeyde sert bir tabakanın oluşturulması esasına dayanır. Azot sağlayıcı ortam olarak tuz banyosu ve gaz atmosferi kullanılabilir.
- Nitrürleme işlemi 480-540 °C gibi düşük sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu sıcaklıklarda karbonlu çelikler ferritiktir. Nitrürleme işlemi Al, Cr, Mo, Ti ve V gibi nitrür oluşturan elementleri içeren çeliklere uygulanmaktadır. Nitrürleme işleminde, çelik yüzeyindeki atomik azot iç kısımlara doğru yayılır ve genellikle 5-15 µm boyutunda çok ince nitrür çökeltileri oluşturmak için reaksiyona girer

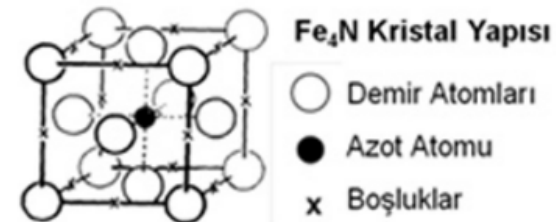
Nitrürleme (Nitrasyon)

- Demirde kısmen çözünen azot, **%6' ya kadar olan bileşimlerde** ferrit ile katı çözelti oluşturmakta ve **%6 azot bileşiminde Fe_4N kristal yapılı γ fazı oluşturmaktadır. %8' den daha fazla azot içeriğinde ise denge reaksiyon ürünü olan Fe_3N kristal yapılı ϵ fazı oluşmaktadır.** Nitrürlenmiş yüzeyler katmanlı bir yapıda olup en dış yüzey beyaz tabaka diye isimlendirilen γ fazından oluşmaktadır.
- Böyle bir yüzey tabakası çok sert ve gevrek olup kullanımda pullanma şeklinde aşındığından istenmemektedir.** Özel nitrürleme yöntemleri ile bu tabaka azaltılabilmekte veya daha az gevrek yapılabilmektedir. Daha sonraki bölge Fe_3N kristal yapılı ϵ fazının oluşumu ile sertleşmiş olan difüzyon bölgesidir.

Çelik yüzeyinde gerçekleşen reaksiyonlar:



FAZLAR	Bileşim	%Ağ (%At) N	Arayer atomları (100 Fe atomu arasında)	Kafes Yapısı
Ferrite (α)	Fe	0.10 (0.40)	-	HMK
Austenite (γ)	Fe	2.8 (11)	12.4	YMK
Martensite (α')	Fe	2.6 (10)	11.1	Y.M. Tetrag.
γ	Fe_4N	5.9 (20)	25	Kubik
ϵ	Fe_2N_{1-x}	4.5-11.0 (18-32)	22 - 49.3	Hegzagonal
ζ	Fe_3N	11.4 (33.3)	50	Ortorombik

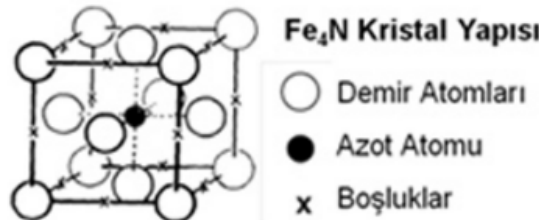


FAZ

Nitrürleme (Nitrasyon)

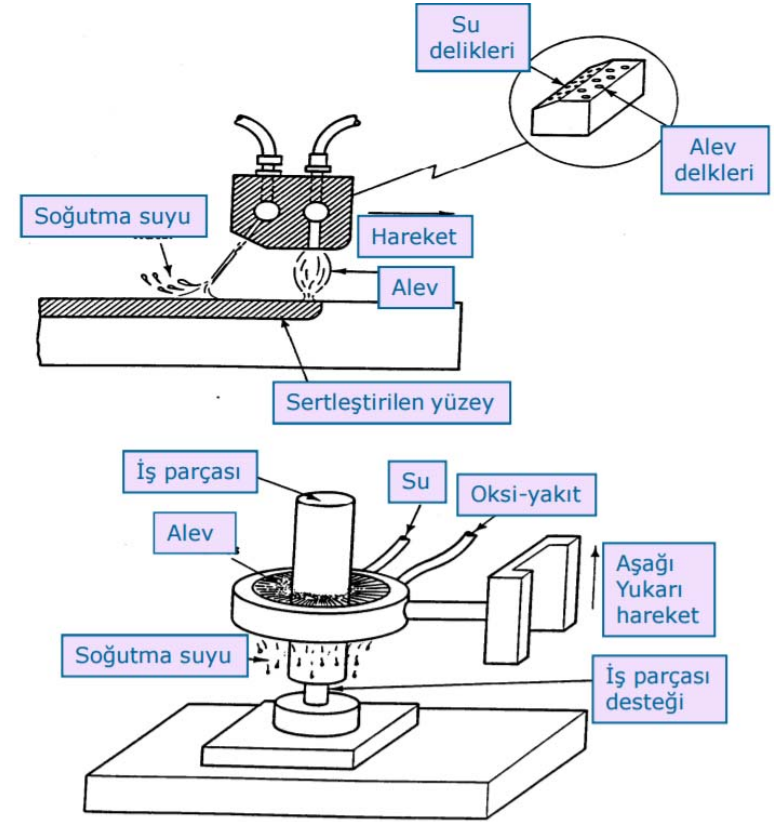
- Nitrasyon uygulamalarında yüzeyde oluşan **beyaz tabaka tipik olarak γ ve ϵ sembolleriyle gösterilen iki faz halinde oluşmaktadır.** Bu fazların oluşumunu sıcaklık ve ortam konsantrasyonu (K_n) etkilemektedir.
- Oluşan bu iki faz yüzeyde **aşınmaya ve korozyona dayanıklı bir yapı oluşturmaktadır.** Sıcaklık ve K_n kontrolü ile bu fazların oluşumu ve kalınlıkları kontrol edilebilmektedir.
- γ fazı ϵ fazının altında oluşmakta, γ fazı kübik kristal yapıda olmakta ve ϵ fazına göre kopmak yapıdadır. ϵ fazı ise Hegzagonal yapıda olup süngerimsi bir yapısı vardır. Uygulamadan uygulamaya bu fazların kalınlık ve oranları önemlidir.**

FAZLAR	Bileşim	%Ağ (%At) N	Arayer atomları (100 Fe atomu arasında)	Kafes Yapısı
Ferrite (α)	Fe	0.10 (0.40)	-	HMK
Austenite (γ)	Fe	2.8 (11)	12.4	YMK
Martensite (α')	Fe	2.6 (10)	11.1	Y.M. Tetrag.
γ'	Fe_4N	5.9 (20)	25	Kübik
ϵ	Fe_2N_{1-2}	4.5-11.0 (18-32)	22 - 49.3	Hegzagonal
ζ	Fe_3N	11.4 (33.3)	50	Ortorombik



Alev ile Yüzey Sertleştirme İşlemi

- Orta karbonlu çeliklere uygulanan bu yüzey sertleştirme işleminde, parçanın yüzeyi alevle hızla ısıtılıp ostenitlendikten sonra, su verilerek sertleştirilir.
- Su verme genellikle parçaya su püskürtülmesiyle sağlanır. Hızlı ısıtma, bir oksî-asetilen alevi vb ile sağlanır. Bu hızlı ısıtma esnasında yüzey tabakası ostenit sıcaklığına ısınırken, iç kısımların Ac1 sıcaklığının altında kalması gerekir.
- Bu yöntemle elde edilen sertleşme derinliği 3-6 mm arasındadır. 1.5 mm 'den daha ince derinlik elde etmek mümkün değildir. Sistem oldukça basit olup pek çok yerde gerçekleştirilebilir.



İndüksiyon İle Yüzey Sertleştirme

- İndüksiyonla sertleştirme işlemi, hızlı değişen manyetik bir alana yerleştirilen bir metal parçası içerisinde elektrik akımı oluşturma esasına dayanır.
- Bobinlerin içerisinden yüksek frekanslı alternatif akım geçirilerek, yüksek frekanslı bir manyetik alan elde edilir. Manyetik alan, metal parçası içinde eddy veya girdap akımları ile histerisiz akımları oluşturur.
- Oluşan yüksek frekanslı akımlar, metalin yüzeyinde hareket ederler. Buna kabuk etkisi denir.
- Metalin bu akımlara karşı gösterdiği direnç nedeniyle ısınma sağlanır ve böylece bir metal parçanın iç kısmı ısıtılmadan yüzeyi ısıtılabilir.
- Isıtmadan sonra parçaya su verilir.
- Sertleşme derinliği, frekansla ters orantılıdır. Herhangi bir frekansta, ısıtma süresi artırılarak sertleşme derinliği artırılabilir.
- Orta karbonlu çeliklerin sertleştirilmesinde uygulanır.**

