

ÇELİĞİN ISIL İŞLEMLERİ

Isıl İşlem

- **Isıl işlem;** bir malzemenin özelliklerini ve/veya içyapısını değiştirmek amacıyla, o malzemeye belli bir sıcaklık-zaman programı dahilinde uygulanan bir ısıtma ve soğutma işlemleri sırasındır.
- Diğer bir deyişle; içyapı ve özellikler bakımından belirli bir durumu elde etmek üzere, malzemenin solidüs (katılaşma) sıcaklığının altında uygun sıra ve süre ile ısıtılıp soğutulmasına *ısıl işlem* denir.
- İşlem sırasında, ortamın etkisiyle (örneğin karbonlamada ve nitrürleme işleminde olduğu gibi) çeliğin kimyasal bileşimi değişir.

Isıl İşlem Uygulama Amaçları

- 1. Talaşlı işlenebilme özelliğinin iyileştirilmesi örn. yumuşatma tavlaması, tane irileştirme diğer bir deyişle kaba tane tavlaması.
- 2. Dayanımın arttırılması veya azaltılması örn. yumuşatma tavlaması, normalleştirme tavlaması, sertleştirme.
- 3. Soğuk şekil vermenin etkisini yok etme örn. yeniden kristalleştirme tavlaması, normalleştirme tavlaması.
- 4. Mikrosegregasyon'un giderilmesi örn. homojenleştirme tavlaması.
- 5. Tane büyüklüğünün değiştirilmesi örn. tane irileştirme tavlaması, normalleştirme tavlaması, yeniden kristalleştirme tavlaması.
- 6. İç gerilmelerin azaltılması örn. gerilme giderme tavlaması.
- 7. Belirli bir içyapının elde edilmesi örn. normalleştirme tavlaması, yumuşatma tavlaması, sertleştirme.

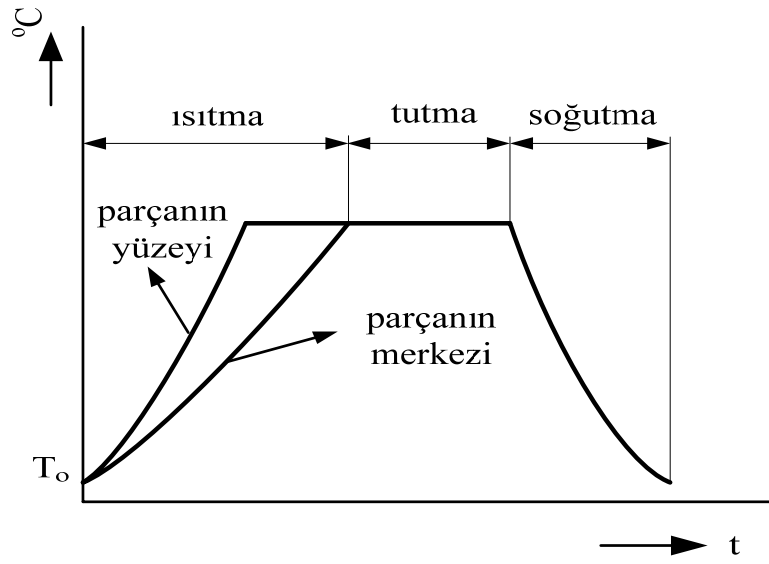
Isıl İşlem

Isıl işlem, tavlama ve sertleştirme olmak üzere 2 grupta incelenebilir.

- **Tavlama:** Tavlama ile içyapı kararlı denge durumuna ulaşır.
 - I.Tür Tavlama: Belirli özelliklerin eldesi için uygulanır. Az da olsa içyapı değişikliklerine neden olabilir.
 - II.Tür Tavlama: Belirli bir içyapı eldesi amaçlanır.
- **Sertleştirme:** Yarı kararlı bir içyapı elde edilir. Östenit, çeliğin bileşimine bağlı olarak bir minimum hızın altına inilmeyecek şekilde soğutulularak, yarı kararlı içyapı oluşur.
 - Dönüşüm sertleştirme (çekirdeğe kadar sertleştirme)
 - Yüzey sertleştirme
 - Çökelme sertleşmesi

Fırında Tutma Süresi

- Isıl işlem, parçanın belli bir sıcaklığa ısıtılması ve o sıcaklıkta belli bir süre tutulması ve daha sonra soğutulması işlemi olarak özetlenebilir.
 - Parçanın fırında tutma süresi $t_T = 20 + \frac{s}{2}$ eşitliği ile hesaplanabilir.
- Eşitlikte, t_T : Tutma süresi (dakika)
s: iş parçası levha ise et kalınlığı, boru ise çap



Parçanın istenilen sıcaklığa getirilmesi temas ya da radyasyon yoluyla (yani bir dış kaynaktan taşıma yoluyla) olur. Veya ısı doğrudan elektrik akımı geçirerek ya da indüksiyon yoluyla direkt olarak parça üzerinde oluşturulur. Alaşım elementi yüzdesi arttıkça, ısı iletimi zorlaşır. Parçanın soğuma hızı; parça kalınlığı ve malzemenin ısı iletimi katsayısı ile orantılıdır

Isıtma Süresi

- **Problem:** Çapı 200 mm olan bir çubuğun ısıtma işleminde, fırında tutma süresini hesaplayınız.

$$t_T = 20 + \frac{200}{2} = 120 \text{ dak} = 2 \text{ h}$$

Tavlamalar

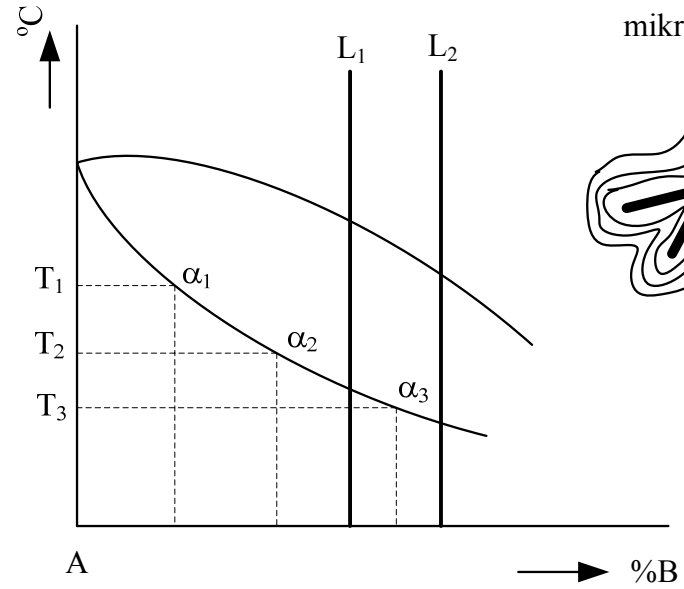
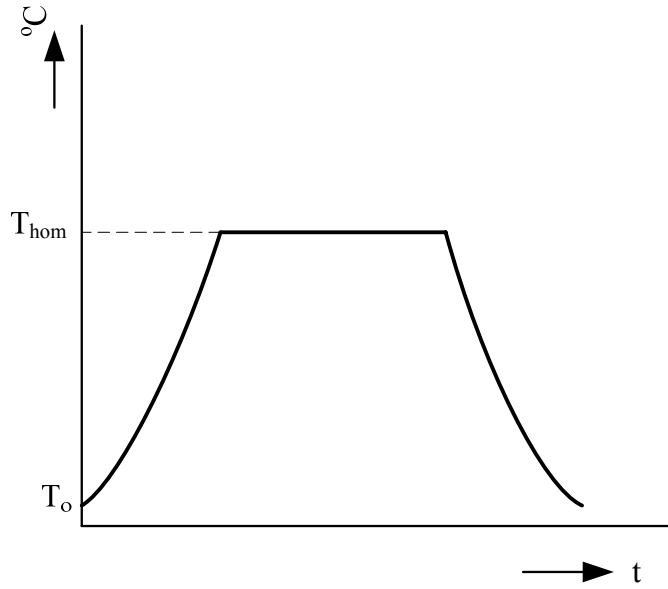
1.Tür Tavlamalar

1.Tür Tavlamlar

1.1. Difüzyon (Yayınma) Tavlaması (Homojenizasyon , Homojenleştirme Tavlaması)

- Birincil kristalleşme sonucunda oluşan kimyasal bileşim farklılıklarını (mikrosegregasyonu) gidermek için yaklaşık 1100⁰-1300⁰ arasında 6-12 h veya 50 h süre ile uygulanır.
- *Böylelikle ikincil kristalleşmede (örneğin sıcak şekillendirmede) ortaya çıkacak bantlı içyapının oluşması önlenir.*
- Genellikle haddeleme öncesinde tav çukurlarında ingotlara uygulanan ısı işlemidir. Malzeme içerisinde bulunan gevrekleştirici katışkıların bazıları çözünebilir ve tane sınırlarından tane içine yayılır. Oksitler, karbürler, nitrürler vb . gibi katışkılar ise çözünemez ve küresel bir şekil alırlar. Isıl işlem sürecunda , yassı mamullerin yarı mamulü olan ingotların şekillendirilmesi iyileştirilmiş olur .
- *Sıcaklığın yüksek ve işlem süresinin uzun olması nedeniyle, pahalı bir işlemdir.*
- *İşlem sonunda genellikle tane büyümesi meydana geldiğinden gerektiğinde uygulanan bir yöntemdir.*

Mikrosegregasyon



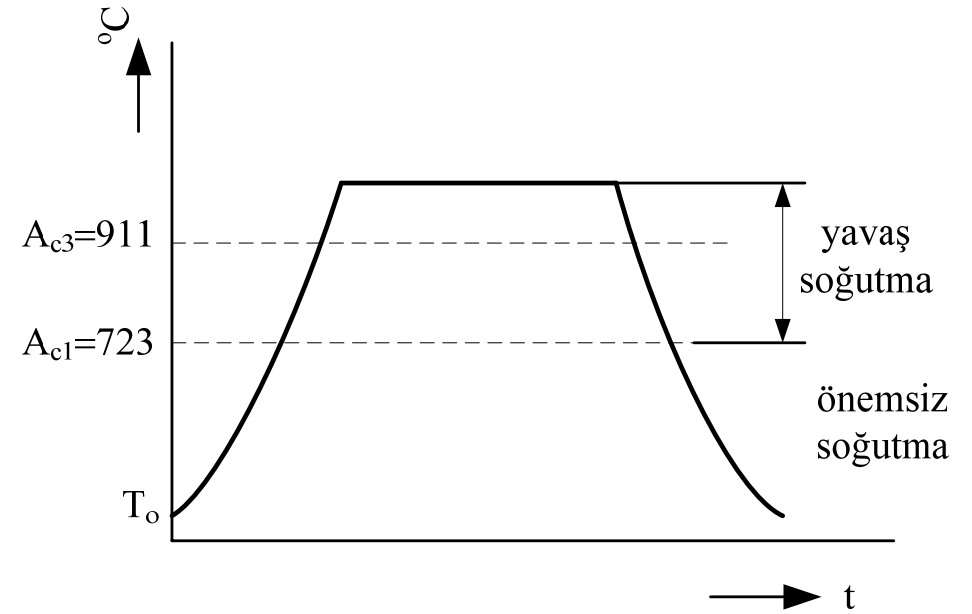
İki bileşenli alaşımın denge diyagramı
ve mikrosegregasyon

Mikrosegregasyon

- *L1 alaşımı ergiyik halden soğutulurken, T_1 sıcaklığında, bileşimleri α_1 olan ilk katı çözeltili kristalleri oluşur. T_2 sıcaklığında ise, yalnız o andaki değil, daha önce ayrışan katı çözeltilerin tümünün bileşimi α_2 olmalıdır. Bunun için, α_1 belirli miktar B 'yi bileşimine almak zorundadır.*
- *Ancak, hızlı soğuma nedeniyle bu kütle transferi, denge durumunun gerektirdiğinden genellikle daha azdır. Yani ilk ayrışan α_1 katı çözeltileri, α_2 α_2 bileşimine ulaşamazlar.*
- *T_2 sıcaklığında oluşan α_2 katı çözeltili kristalleri, α_1 çekirdeklerinin çevresine tabakalar halinde yerleşirler. Böylece tüm katı çözeltilinin ortalama bileşimi α_1 civarında olur.*
- *T_3 sıcaklığında ise benzer olarak, ortalama bileşim α_3 ise, kaldıraç bağıntısına göre, geriye α_3 ergiyiğinin kalması gerekir. Bu nedenle de ergiyik katılaşmaya devam edebilir ve katılaşma sıcaklığının altındaki sıcaklıklara düşebilir. Dolayısıyla tanelere bir T_4 sıcaklığında, α_4 katı çözeltili tabakası eklenir .*
- *Mikrosegregasyon, katılaşma aralığı büyüdükçe, soğuma hızı arttıkça ve alaşımı oluşturan elementlerin yayınma katsayıları küçüldükçe daha fazla ortaya çıkar.*
- *Yoğunluk farkından dolayı olan bileşim farklılığı makrosegregasyon, kimyasal bileşim farklılığı ise mikrosegregasyon olarak isimlendirilir.*

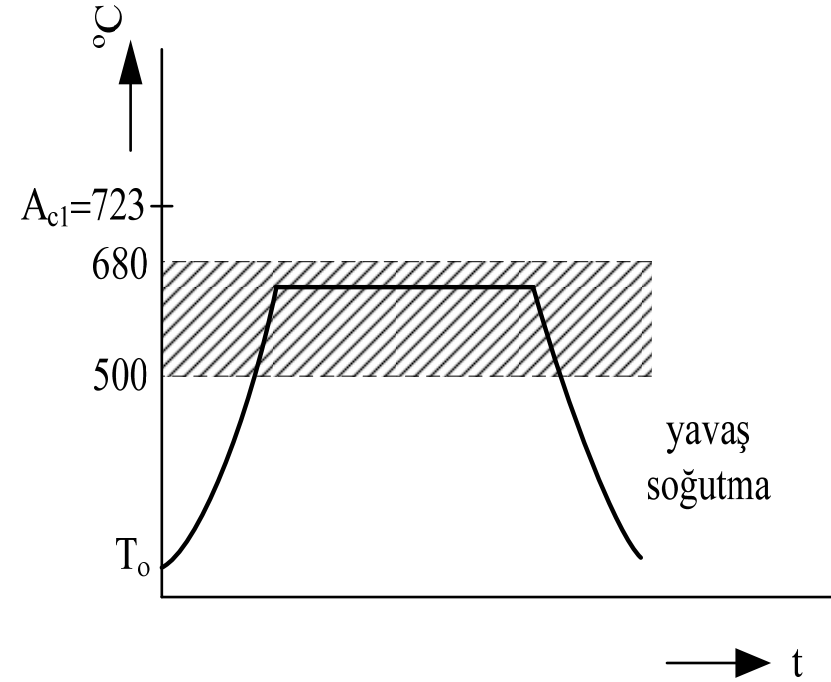
1.2. Tane İrileştirme Tavlaması (İri Tane Tavlaması, Kaba Tane Tavlaması)

- Düşük karbonlu çeliklerde ($\%C < \%0,2$), talaşlı işleme kabiliyetini iyileştirmek amacıyla uygulanır.
- Tav sıcaklığı $950-1100^{\circ}\text{C}$ arasında seçilir, tav süresi ise yaklaşık 3-5 h'dir.
- Tanelerin irileşmesi ile kısa, kırılğan talaş elde edilir.
- *Tavlama sonucunda gevrek ve kaba taneli bir içyapı elde edilerek, talaşın sürekliliği engellenir. Bu durumda malzeme takım üzerine sıvanmaz ve özellikle kısa talaş elde edildiğinden, otomat tezgahlarda malzeme işlenebilir.*
- *Yüksek sıcaklıkta yapılan bu tavlama sonucunda, malzemenin tokluk değeri düştüğünden, seyrek tavlama yapılır.*



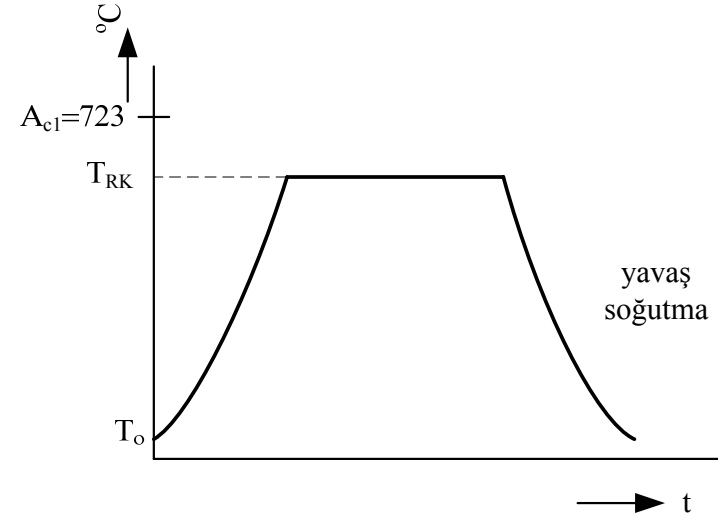
1.3. Gerilme Giderme Tavlaması

- Üniform olmayan ısıtma-soğutma işlemleri (döküm, kaynak, sertleştirme), üniform olmayan şekil değişimi (eğme, soğuk şekillendirme), talaşlı işleme (frezeleme, planyalama, tornalama vb) ve dönüşüm olayları sırasında parça içinde oluşan gerilmelerin giderilmesi amacıyla uygulanır.
- İşlem sıcaklığı malzemenin kimyasal bileşimine göre, alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerde 500-680°C arasındadır.
- Tav süresi ise 0,5-1 h arasındadır.
- İşlemin başarılı sonuç verebilmesi için, soğuma işleminin yavaş yapılması gerekir. Aksi takdirde soğuma farkı nedeniyle, malzeme içinde tekrar iç gerilmeler oluşabilir.



1.4. Yeniden Kristalleştirme Tavlaması (Rekristalizasyon Tavlaması)

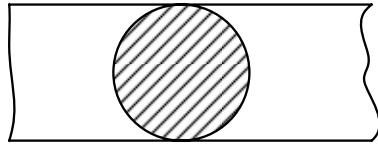
- Soğuk şekil verme sonucunda pekleşen malzemenin özelliklerini (örneğin yüksek dayanım, düşük süneklik ve tokluk gibi) başlangıç durumuna getirmek amacıyla yapılır.
- Tavlama sıcaklığı 600-700°C'dir.
- Yaklaşık 1 h'lik sürede gerçekleşir.
- Bu tavlamanın uygulanabilmesi için malzemenin en az %10 oranında soğuk şekillendirilmiş olması gerekir.
- *Böylece metalik malzemenin, katı halde bozulmadan yeniden kristalleşmesi sağlanır ve soğuk şekillendirme sonucunda oluşan pekleşme, sertleşme giderilerek malzemeye daha sonraki soğuk şekillendirme işlemleri için gerekli olan süneklik kazandırılır.*



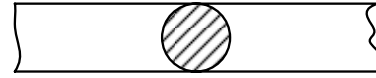
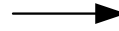
1.4. Yeniden Kristalleştirme Tavlaması (Rekristalizasyon) Tavlaması

- Teknik saflıktaki metallerde rekristalizasyon sıcaklığı;

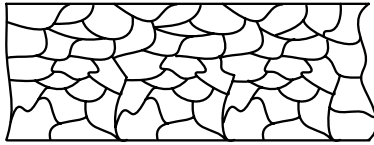
$$T_{RK} = T_{YK} \cong 0,4T_e \quad (K)$$



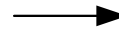
Şekil vermeden önce
parça kesiti



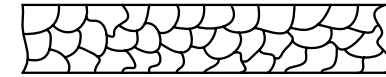
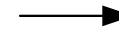
Şekil verdikten sonra
parça kesiti



Soğuk şekil vermeden
önce içyapı



Soğuk şekil verdikten
sonra içyapı



Tavlamadan sonraki
içyapı

1.4. Yeniden Kristalleştirme Tavlaması (Rekristalizasyon) Tavlaması

Soğuk şekil verdikten sonra içyapı

İç gerilme yüksek

Taneler uzamış

Yapıda homojenlik yok

Dislokasyon yoğunluğu yüksek

Tavlamadan sonraki içyapı

İç gerilme azalmış

Taneler küçük ve eş eksenli

Yapıda homojenlik var

Dislokasyon yoğunluğu azalmış

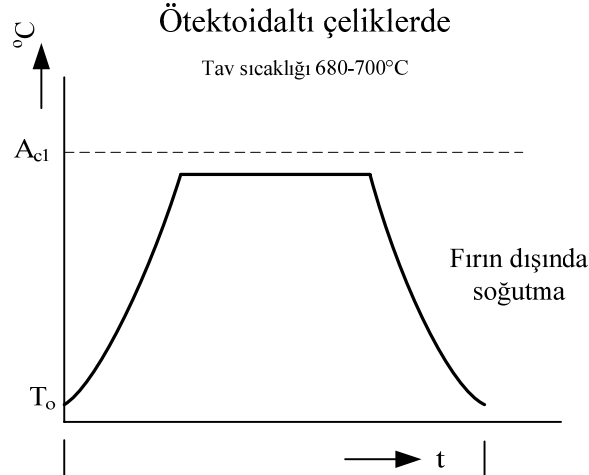
- Tavlama sonrasında oluşan tane boyutu, malzemeye uygulanan soğuk şekil değiştirme oranına bağlıdır.
- Soğuk şekil değiştirme oranı fazla ise ince taneli, az ise iri taneli içyapı oluşur.
- Tane büyüklüğünü, tav sıcaklığı da etkiler; rekristalizasyon sıcaklığı yüksek tutulursa kaba taneler oluşur.
- Yeniden kristalleşmede tav süresi, tavlama sıcaklığı ve şekil değiştirme oranına uygun olarak seçilir.
- Tavlama sonucunda, malzemenin dislokasyon yoğunluğu azaldığından, malzeme başlangıç sünekliğine kavuşur.
- Yüksek alaşımlı çelikler gibi dönüşüm göstermeyen çeliklerde tane boyutu küçültme işlemi rekristalizasyon tavlaması ile yapılır

2.Tür Tavlamalar

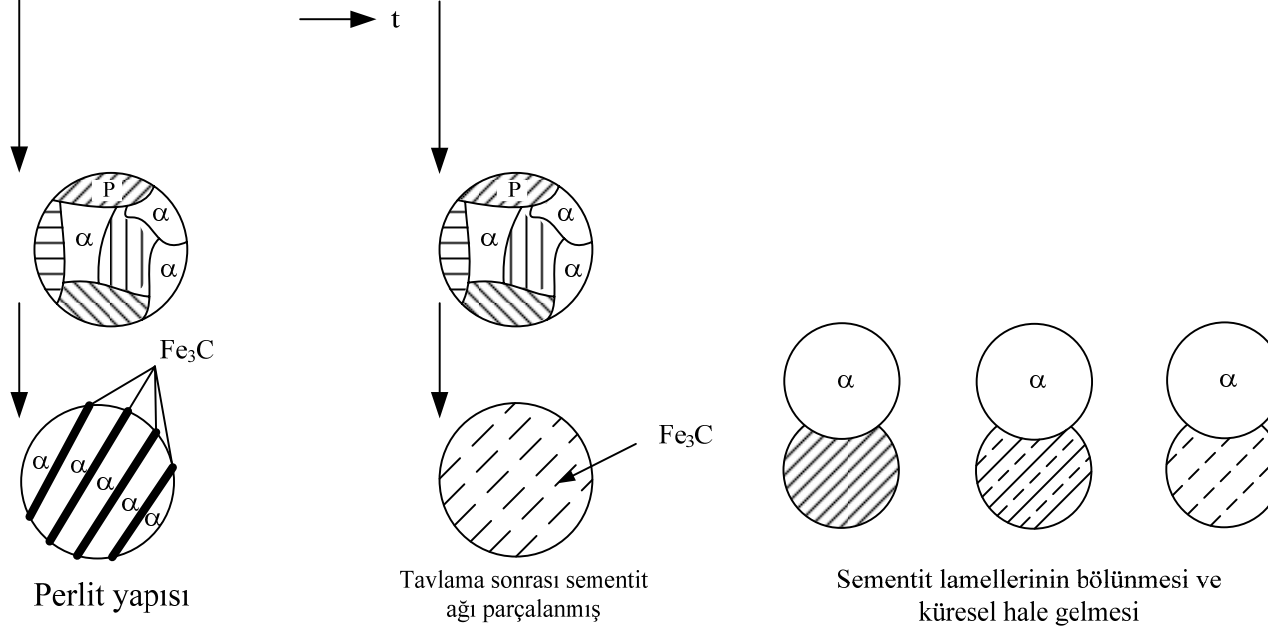
2.1. Yumuşatma Tavlaması (Yumuşak Tavlama, Küreleştirme Tavlaması)

- $\%C \geq \%0.4$ olan çeliklerde talaşlı işlemeyi, $\%C < \%0.4$ olan çeliklerde soğuk şekillendirmeyi kolaylaştırmak amacıyla uygulanır.
- Tavlama sıcaklığı çeliğin ötektoidaltı ya da ötektoidüstü olmasına göre değişir.
- Tavlama süresi ise 5 h'den az olmamalıdır. Bazen 100 h olabilir.
- Yumuşatma tavlaması; *ötektoidaltı çeliklerde sert perlit tanelerindeki sementit lamellerini parçalamak, ötektoidüstü çeliklerde ise hem perlit tanelerindeki sementit lamellerini hem de tane sınırlarındaki 2.sementit ağını parçalamak amacı ile uygulanır.*

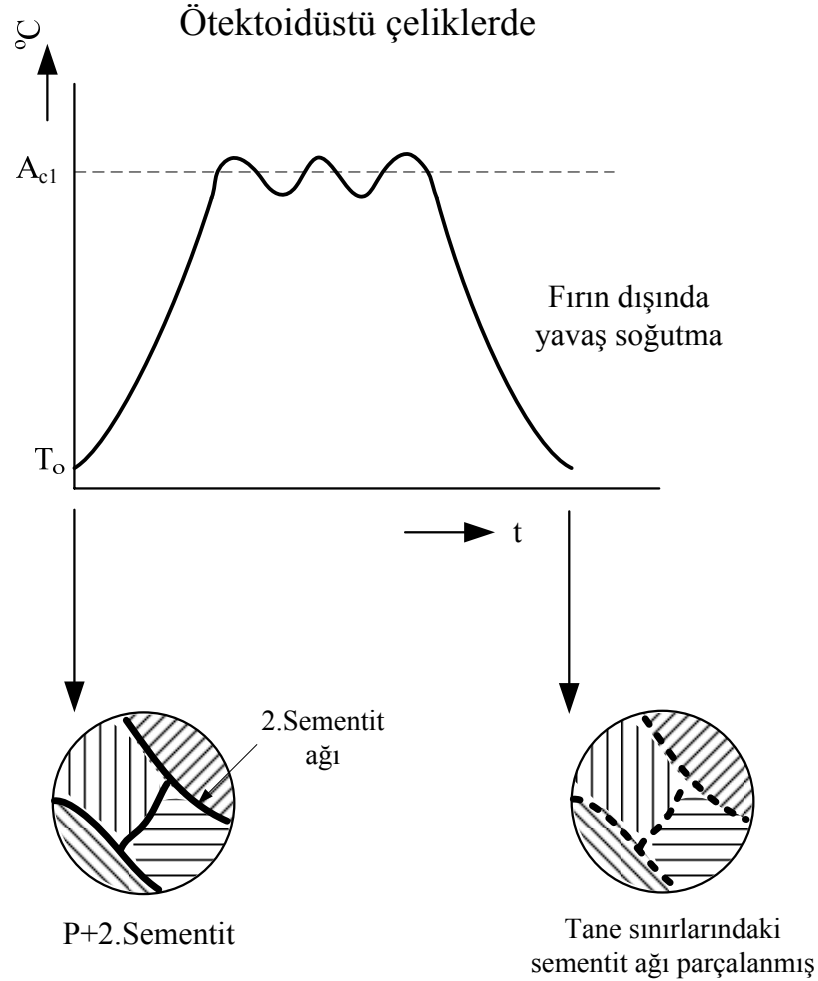
2.1. Yumuşatma Tavlaması (Yumuşak Tavlama, Küreleştirme Tavlaması)



ötektoidaltı çeliklerde; sert perlit tanelerindeki sementit lamellerini parçalamak amacı ile uygulanır.



2.1. Yumuşatma Tavlaması (Yumuşak Tavlama, Küreleştirme Tavlaması)



•**ötektoidüstü çeliklerde;** hem perlit tanelerindeki sementit lamellerini hem de tane sınırlarındaki 2.sementit ağını parçalamak amacı ile uygulanır.

2.2. Normalleştirme Tavlaması (Normalizasyon) Tavlaması

Normalleştirme tavlaması sonunda , küçük ve eş eksenli tanelerden oluşan perlitik-ferritik içyapı elde edilir.

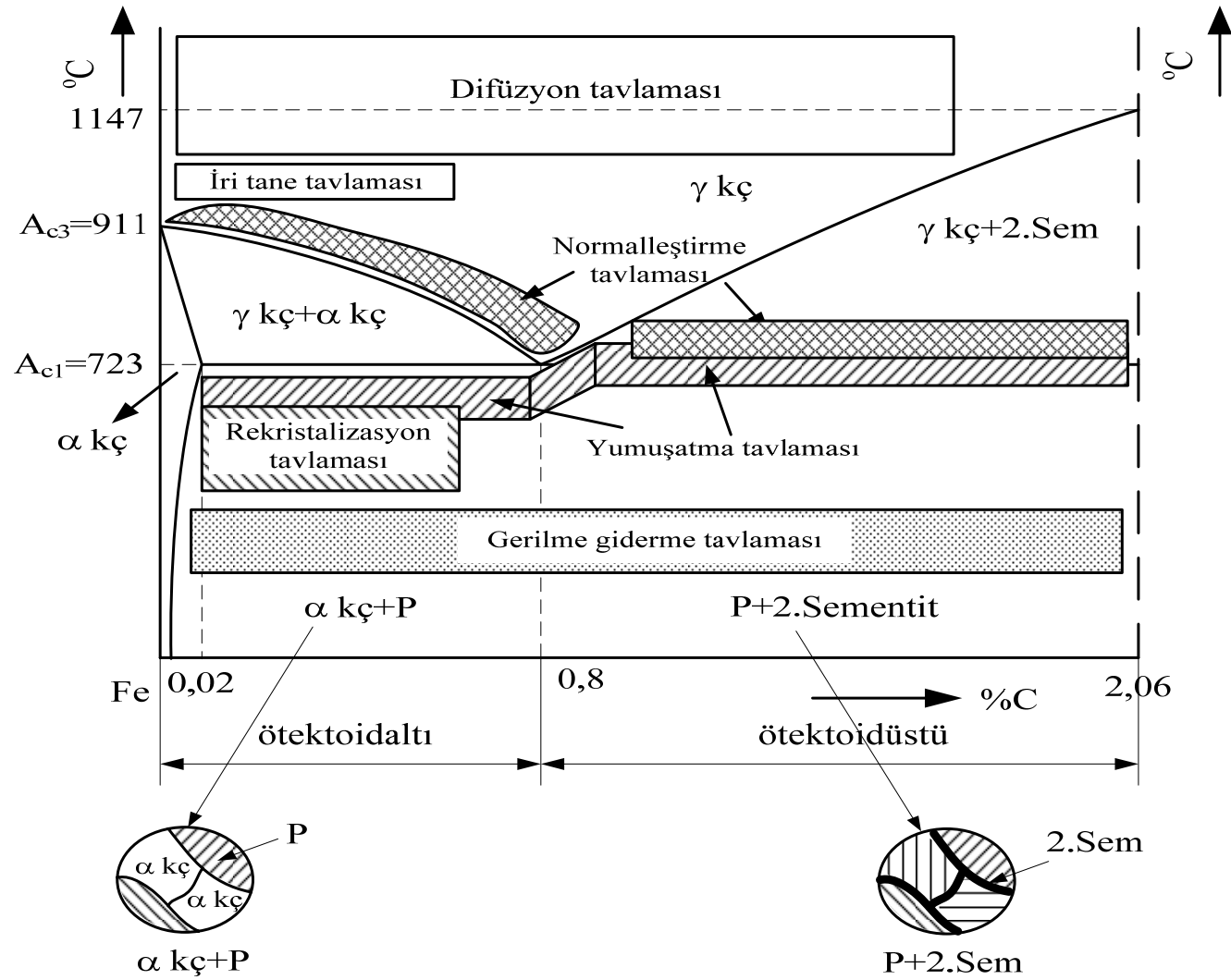
Normalleştirme Tavlaması şu amaçlarla yapılır:

- Soğuk şekil verme sonrasında uzamış taneleri başlangıç yapısına döndürmek,
- Döküm içyapısı olan Widmanstatten yapısını iyileştirmek,
Widmanstatten yapısında yumuşak ferrit levhaları ile sert perlit kolonileri birbiri içine girdiğinden malzeme olduğundan daha çok perlit içeriyormuş gibi davranır. Diğer bir deyişle, malzeme aynı kimyasal bileşimde ve içinde perlit odacıkları bulunan ferritik içyapıya sahip çelikten daha sert ve gevrek.
- Sıcak haddeleme sonucunda oluşan bantlı içyapının giderilmesi ,
- Kaynaklı parçalarda, (tane büyüklüğü farklı olan hadde yapısı ve döküm içyapısının bir arada olduğu durumlarda)
- Difüzyon tavlaması sonucunda irileşmiş tanelerin inceltilmesi,

Tavlama işlemi sonucunda, malzemenin mekanik özelliklerinde, özellikle de toklukta artış sağlanır.

Tav süresi, et kalınlığına göre 30-60 dak arasındadır.

Basınçlı kaplara mutlaka bu tavlama işlemi uygulanmalıdır.



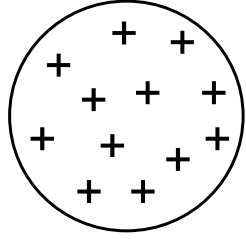
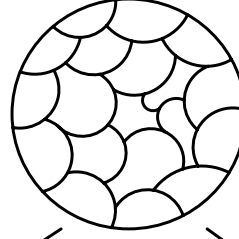
Şekil. Fe-C diyagramının çelik bölümü

Sertleştirme

Sertleştirme

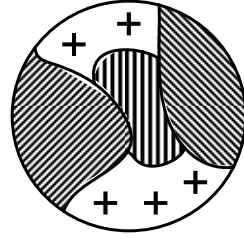
- **Sertleştirme** ile metastabil (yarı kararlı) bir içyapı elde edilir.
- Östenit, çeliğin bileşimine bağlı olarak, minimum bir hızın altına inilmeyecek şekilde soğutulur ve yarı kararlı tetragonal hacim merkezli martenzit yapısı oluşur.
- Diğer bir deyişle, çeliklerin mümkün olan en yüksek sertlik ve aşınma dayanımına sahip olması istendiğinde sertleştirme işlemi yapılır.
- Sertleştirme sonucunda soğuk şekil değiştirme kabiliyeti azalır, süneklik düşer. Bu işlem daha çok dönüşüm sertleşmesinde geçerlidir.

γ kç: östenit



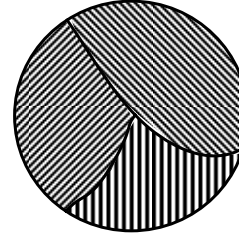
Martenzit
(tetragonal
hacim merkezli)

suda soğutma



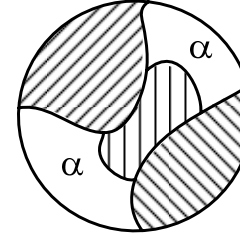
Martenzit+
sıkı lamelli perlit

yağda soğutma
(200°-250°C)



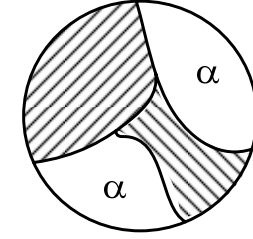
Sıkı lamelli
perlit

ergimiş Pb'de
soğutma



Az ferrit+perlit

havada soğutma



Ferrit+perlit

fırında soğutma

Östenitin soğuma hızına bağlı olarak yaptığı dönüşümler

Sertleştirme

Sertleştirme işlemi içinde alt gruplara ayrılır:

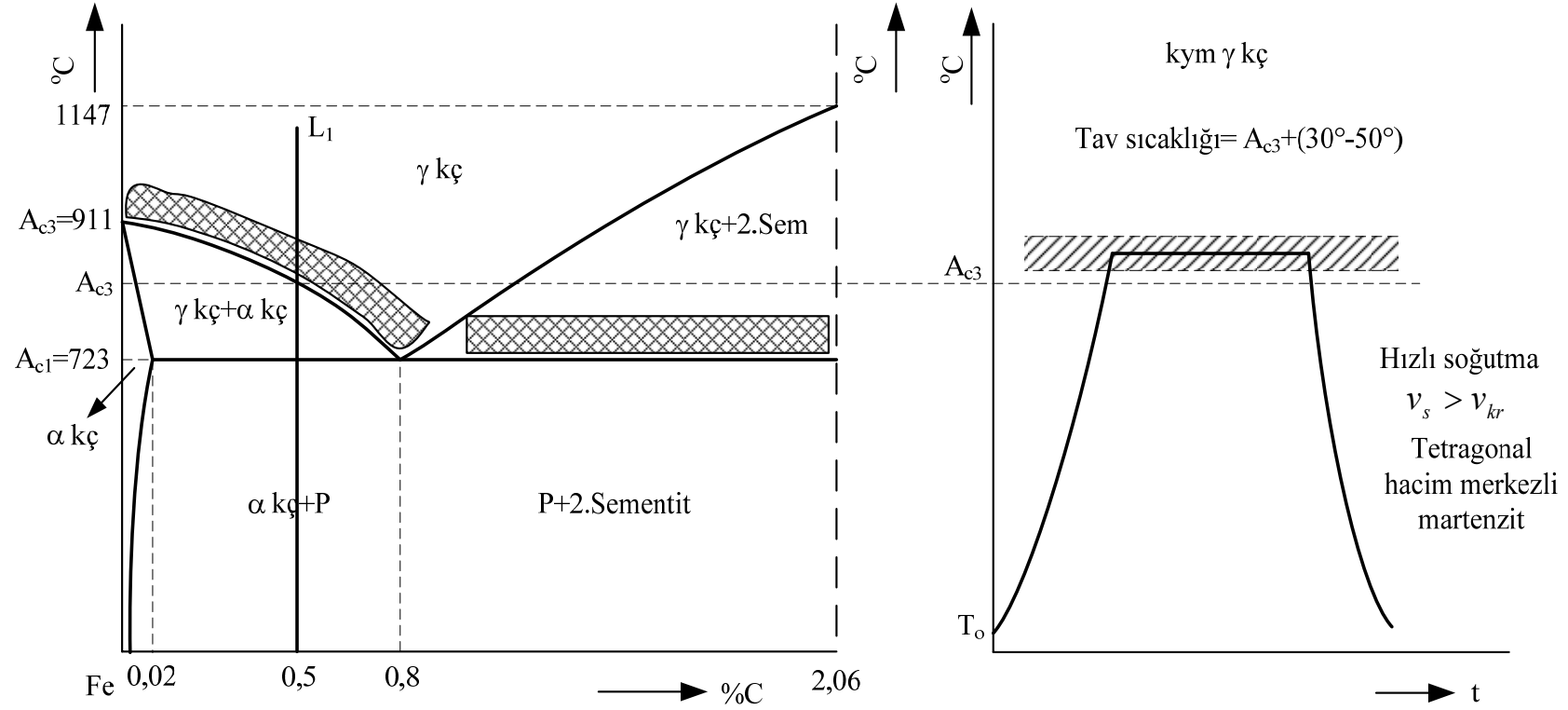
- Dönüşüm sertleşmesi (ekirdeğe kadar sertleştirme)
- Yüzey Sertleştirmesi
- Çökelme sertleşmesi

1. Dönüşüm Sertleşmesi (Çekirdeğe kadar sertleştirme)

Çelik malzemeye dönüşüm sertleşmesi uygulanabilmesi için;

- %C > %0.2 olması gerekir.
- Ötektoidaltı çeliklerde $T_{tavlama} = A_{c_3} + (30^\circ - 50^\circ C)$
- Ötektoidüstü çeliklerde $T_{tavlama} = A_{c1} + (30^\circ - 50^\circ C)$
- Soğuma hızı $v_s > v_{kritik}$

1. Dönüşüm Sertleşmesi (Çekirdeğe Kadar Sertleştirme)



Ötektoidaltı ve Ötektoidüstü Çeliklerde

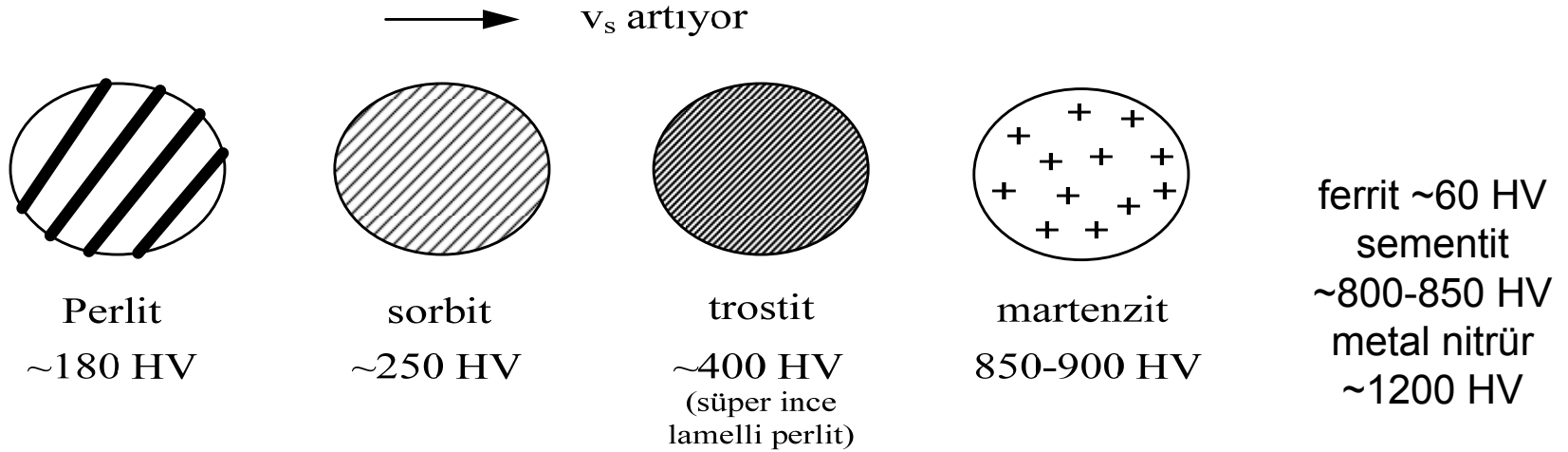
Aşırı Soğumuş Östenit Dönüşümleri

- Hızlı soğuma sonucu elde edilen içyapı, büyük ölçüde dönüşüm sıcaklığına, yani karbonun ve diğer alaşım elementlerinin yayınmasına bağlıdır.
- Aşırı soğumuş östenit, üç temel sıcaklık kademesinde dönüşüme uğrar:

Aşırı Soğumuş Östenit Dönüşümleri

1. Perlit Kademesinde Dönüşüm

- Soğuma hızı arttıkça karbon ve diğer alaşım elementlerinin yayınma süresi azalır.
- Sementit lamellerinin genişliği azalarak, ince veya çok ince lamelli perlitik bir içyapı meydana gelir.
- Lameller arası mesafe ne kadar kısa ise, içyapıda karbon dağılımı o kadar homojendir. Bu nedenle de sertlik ve dayanım değerleri artar.



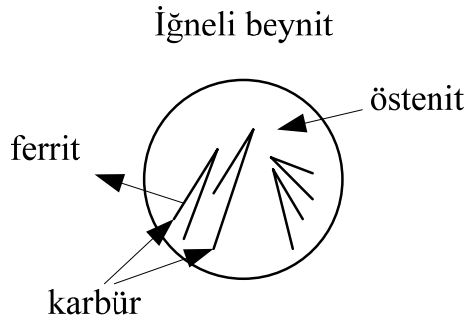
Aşırı Soğumuş Östenit Dönüşümleri

2. Beynit Kademesinde Dönüşüm

- Fe atomu yayınamaz, C atomu yayınması ise güçleşir.

Beynit, elektron mikroskobunda iki şekilde görülebilir.

- İğneli beynit: Ferrit içerisine gömülmüş karbon parçacıkları olarak tanımlanır. Sürekli soğuma veya sabit sıcaklıkta (izotermik) dönüşüm ile elde edilir.
- Taneli beynit: Sürekli soğuma ile elde edilir.
Soğuma hızına bağlı olarak iğneli beynit, kaba ve ince taneli beynit olarak ikiye ayrılır.
- İnce taneli beynit, Ms'nin hemen üzerindeki sıcaklıklarda oluşur.



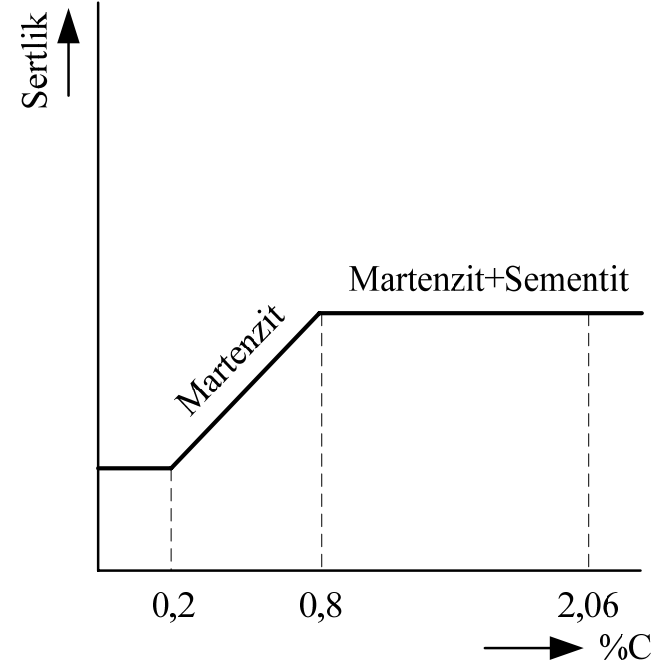
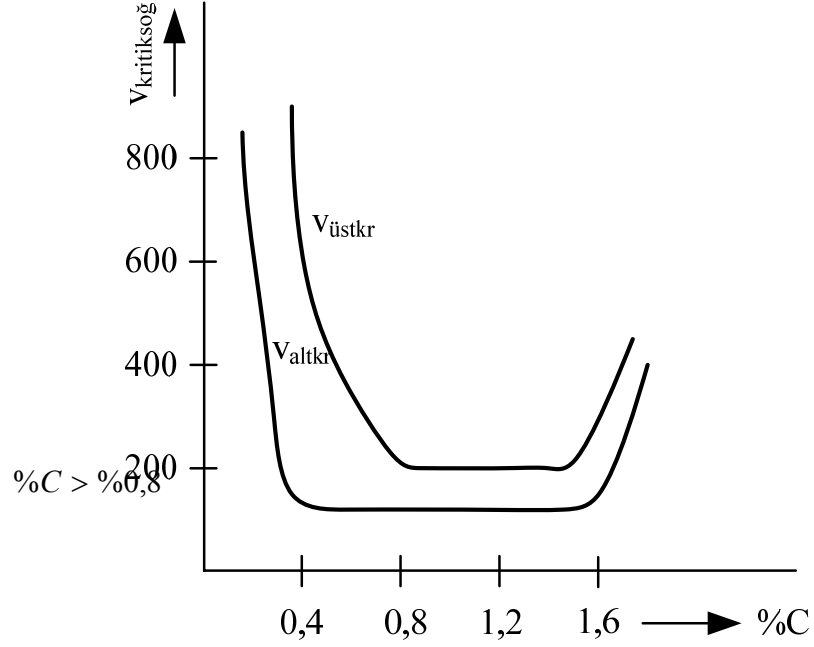
- Beynitik içyapı, alaşımlı çeliklerin karakteristik içyapısıdır.
- Alaşımsız çeliklerde beynitik yapı elde edilmek isteniyorsa sabit sıcaklık dönüşümü gerekir.

Aşırı Soğumuş Östenit Dönüşümleri

3. Martenzit Kademesinde Dönüşüm

- C ve Fe atomu yayınamaz. Bu nedenle de karbür oluşamaz.
- Karbon (C), martenzit kafesi içerisinde zorunlu olarak çözünmüş durumdadır.
- Martenzit, sıvı azot gibi çok yüksek soğuma hızı sağlayan soğuma ortamlarında saf demir içinde dahi oluşturulabilir.
- Ancak martenzitin sertliği, kafes içerisinde zorla çözünmüş olarak bulunan, karbon miktarına bağlı olarak değişir.

3. Martenzit kademesinde dönüşüm

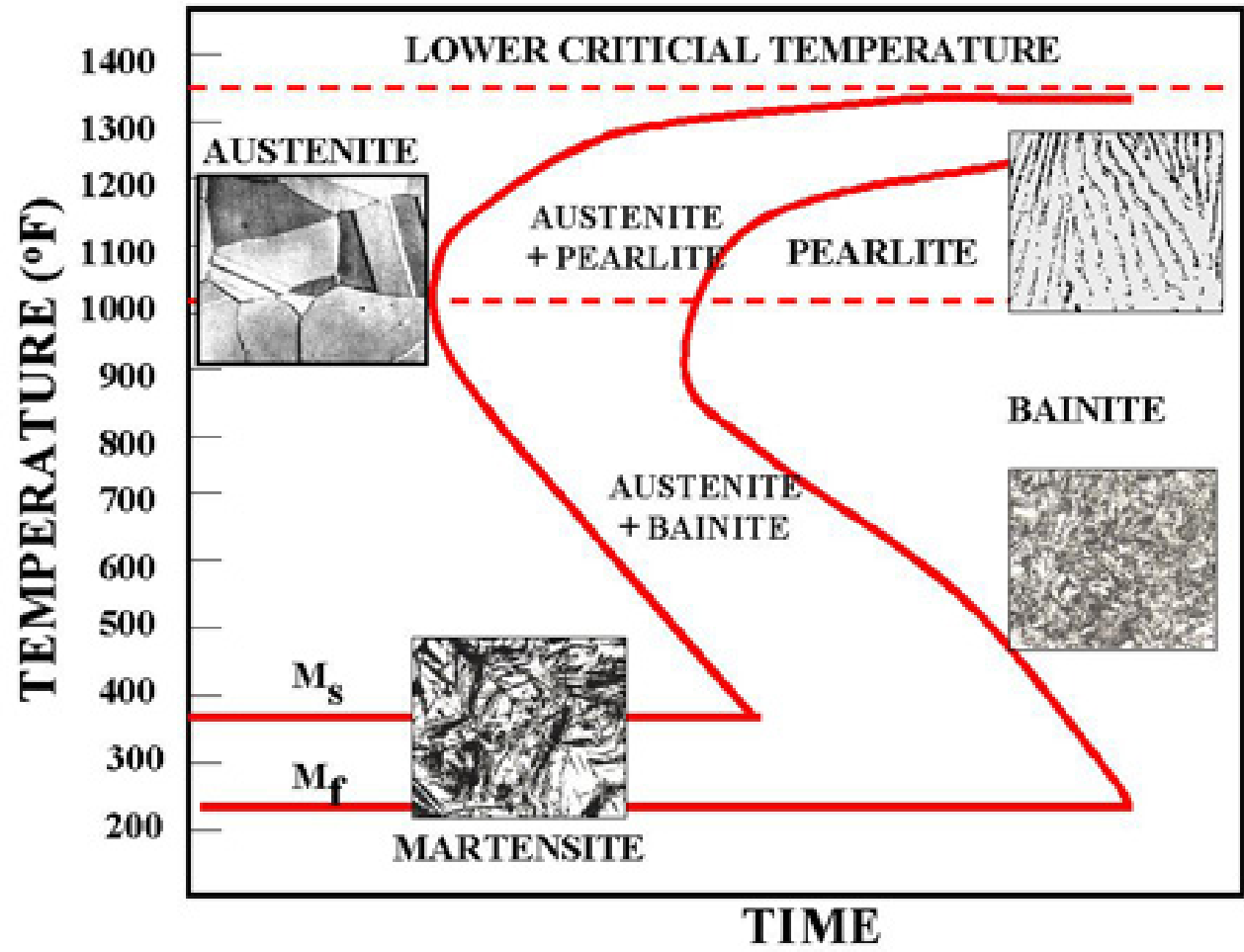


%C > 0.8 olan çeliklerde dönüşüm sertleşmesi sonucunda, martenzitin yanı sıra sementit de oluştuğundan, sertlik ve aşınma dayanımı daha yüksektir

$M_s = f(C, Mn, diğer\ alaşım\ elementleri)$
(Martenzit oluşumu başlangıç sıcaklığı)
 $M_f = f(C, Mn, diğer\ alaşım\ elementleri)$
(Martenzit oluşumu bitiş sıcaklığı)

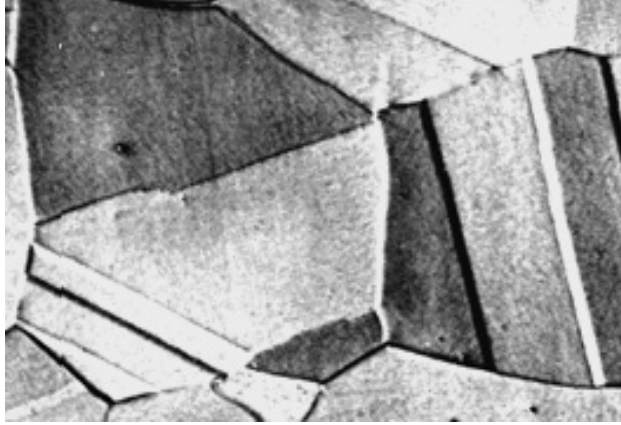
Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (Z-S-D) Diyagramları (Time-Temperature-Transformation (T-T-T) Diagrams)

- *Zaman-Sıcaklık Dönüşüm Diyagramları; çeliğe su verme işlemlerinde kullanılan diyagramlardır.*
- *Çelik üreticileri, ürettikleri her çelik için bu diyagramları kataloglarında verirler. Çeliğin sertleştirilmesinde istenilen içyapının elde edilebilmesi için, soğuma zamanı çok önemlidir. Bu nedenle de sertleştirme işlemi için sadece Fe-C denge diyagramı yeterli olmadığından, ZSD diyagramına ihtiyaç duyulur.*
- Z-S-D diyagramları, östenit dönüşümü sırasında görülen ve öncelikle dönüşüm ürünü (örneğin perlit, sorbit, trostit, beynit, martenzit gibi) özelliklerinin belirlenmesindeki olayları inceler. Bu incelemede denge durumundaki olaylar dikkate alınır.
- Kısaca Z-S-D diyagramları, dönüşüm olaylarını zamana ve sıcaklığa bağlı olarak gösterirler. Olaylar bazen çok uzun süreceğinden, zaman eksenini logaritmik bölümlüdür.



TTT Diyagramı

Östenitin Farklı soğuma Hızlarındaki Mikro Yapıları



Östenit



Perlit



Martenzit



Beynit

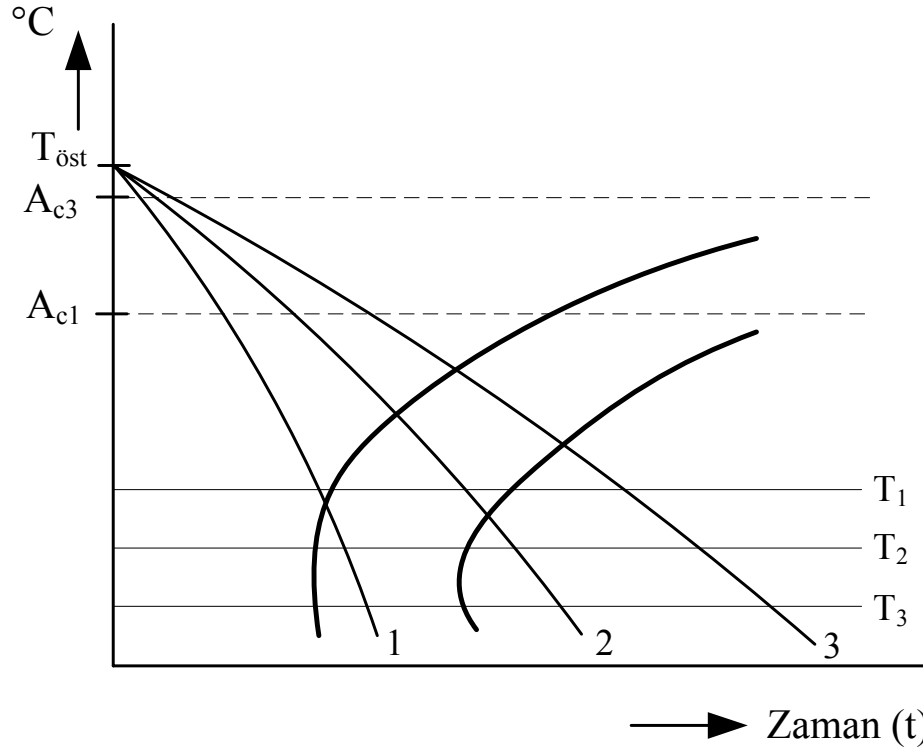
Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (Z-S-D) Diyagramları (Time-Temperature-Transformation (T-T-T) Diagrams)

Zaman –Sıcaklık –Dönüşüm Diyagramları;

- Sürekli Soğuma İçin Z-S-D Diyagramları
- Sabit Sıcaklık (İzotermik) Z-S-D Diyagramları

olarak 2 grupta incelenebilir.

1. Sürekli Soğuma İçin Z-S-D Diyagramları



$T_{öst}$: Östenitleme sıcaklığı $A_{c3}+(30^{\circ}-50^{\circ}C)$

1, 2, 3: Östenitleme sıcaklığından sürekli soğuma eğrileri

T_1, T_2, T_3 : Sabit sıcaklık

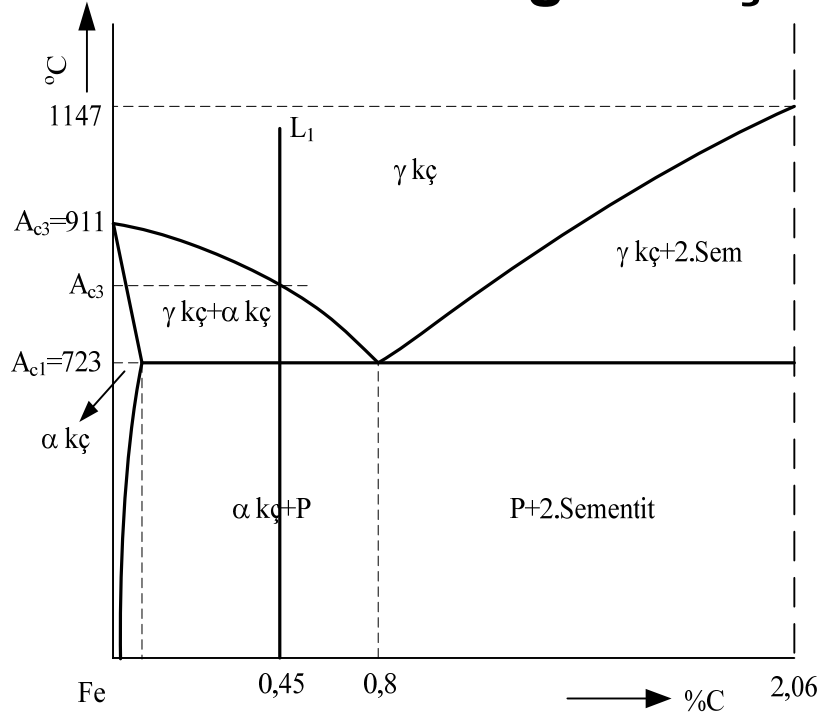
Östenitleme sıcaklığından başlayarak, sadece çizilen soğuma eğrileri doğrultusunda okunabilen diyagramlardır.

Diyagramlardan dönüşüm davranışları dışında, şu bilgiler de elde edilebilir.

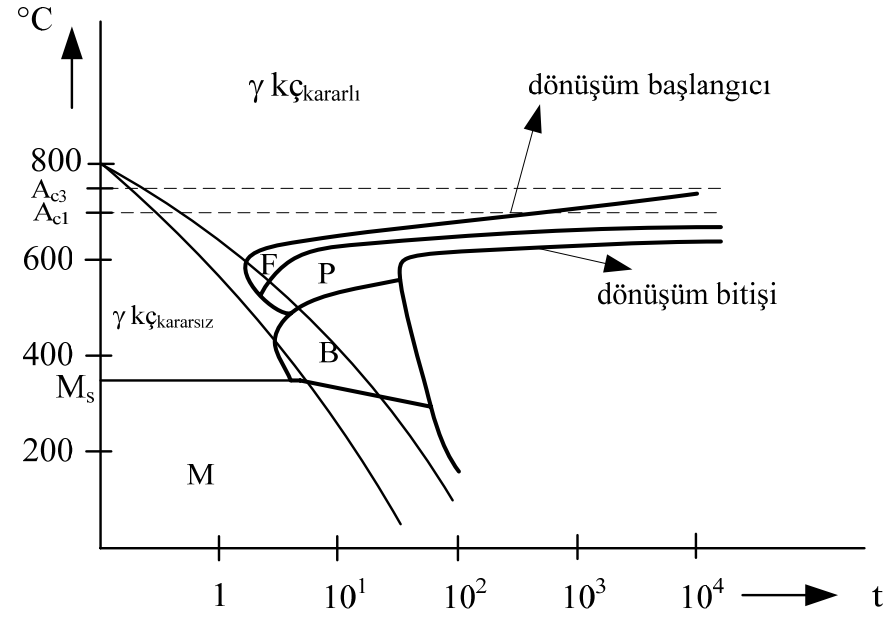
- Değişik dönüşüm alanlarında oluşan içyapı bileşenlerinin miktarı (soğuma eğrisiyle alan alt sınırının kesim noktasında % olarak).

- Elde edilen içyapının sertliği (soğuma eğrisi sonunda HV ya da HRC olarak).

1. Sürekli Soğuma İçin Z-S-D Diyagramları



Şekil: Fe-C denge diyagramının çelik kısmı



Şekil: %0,45 C'li çeliğin sürekli soğuma ZSD diyagramı

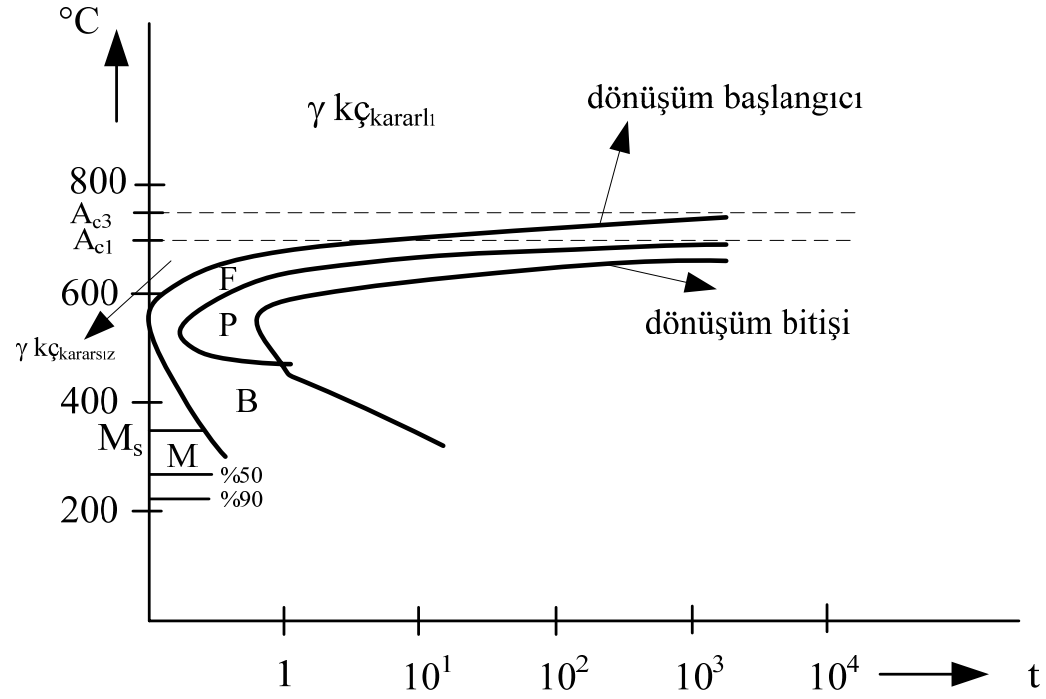
- Ortaya çıkan içyapılar çoğunlukla metalografik olarak incelenir.
- Dönüşüm sıcaklıkları ise dilatometrik olarak saptanır. Örneğin, perlit ve beynit oluşumuna ait başlama ve bitiş noktaları birleştirildiğinde, östenitin farklı koşullardaki dönüşüm davranışı diyagram haline getirilmiş olur.

Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (Z-S-D) Diyagramları (Time-Temperature-Transformation (T-T-T) Diagrams)

2. Sabit Sıcaklık (İzotermik) Z-S-D Diyagramları

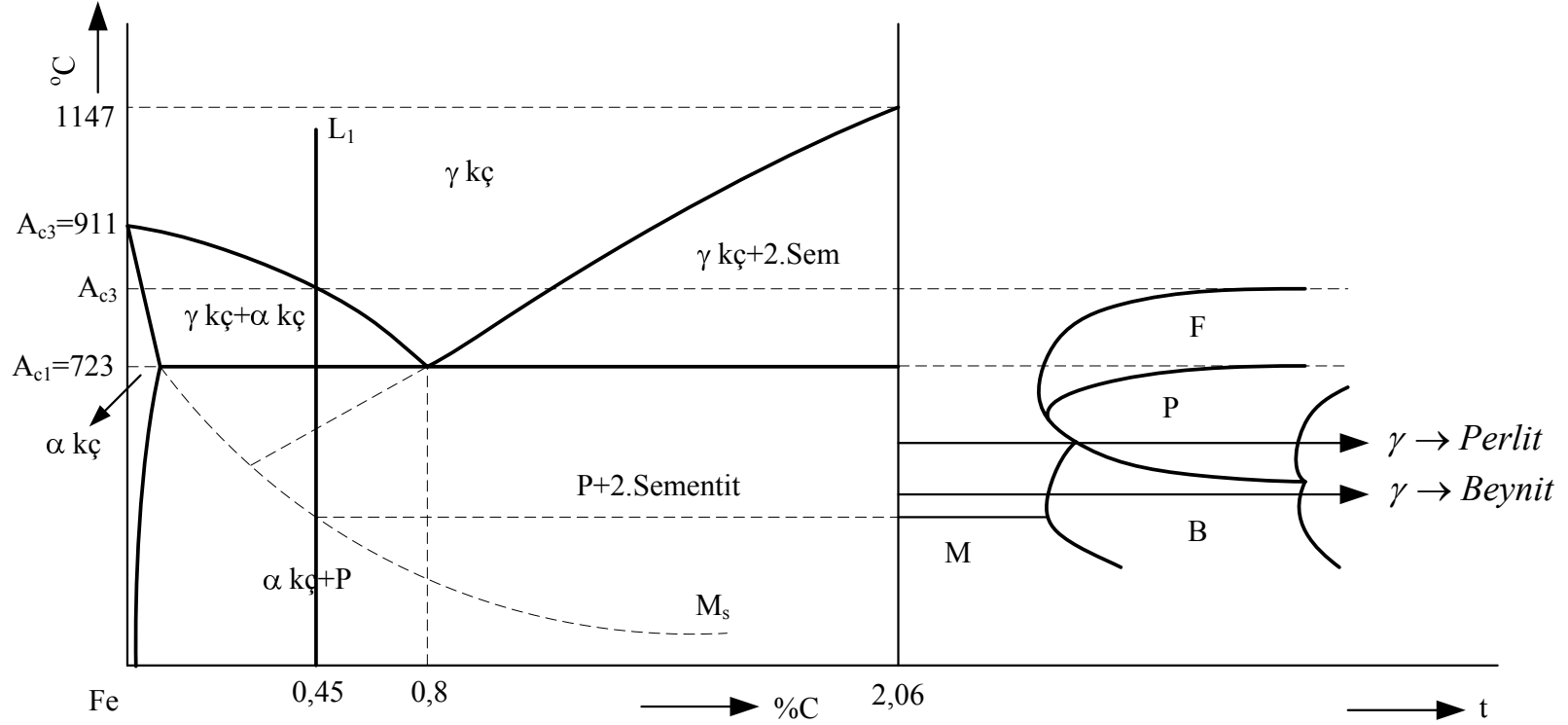
- Östenit bölgesine ısıtılan parça seçilen bir sıcaklığa hızla soğutularak, burada dönüşüm tamamlanıncaya kadar tutulur. Sürekli soğuma diyagramında olduğu gibi, belirli bir bekleme süresinden sonra östenit dönüşümü başlar.
- Aşırı soğumanın küçük olması halinde dönüşüm eğilimi azdır ve uzun bekleme süresi gerekir. Büyük aşırı soğumada ise, dönüşüm eğilimi kuvvetle artar. Ancak dönüşüm sıcaklığı düştükçe, C atomlarının hareketliliği engellendiğinden bekleme süresi tekrar uzar. Bu iki ters etkinin yarattığı burun oluşumu, sürekli soğumadan daha belirgindir.
- İzotermik diyagram sadece dönüşümün türüne bağlı olarak zaman eksenine paralel doğrular yönünde (izoterm yönünde) okunabilir. Yani sürekli soğumanın tersine sabit sıcaklık dönüşüm, sıcaklığa bağlı olarak, perlit ya da beynit alanında oluşabilir.
- Çeliğin türü ne olursa olsun, sabit sıcaklık dönüşümü ile %100 beynit yapısı elde edilir.

2. Sabit Sıcaklık (İzotermik) Z-S-D Diyagramları



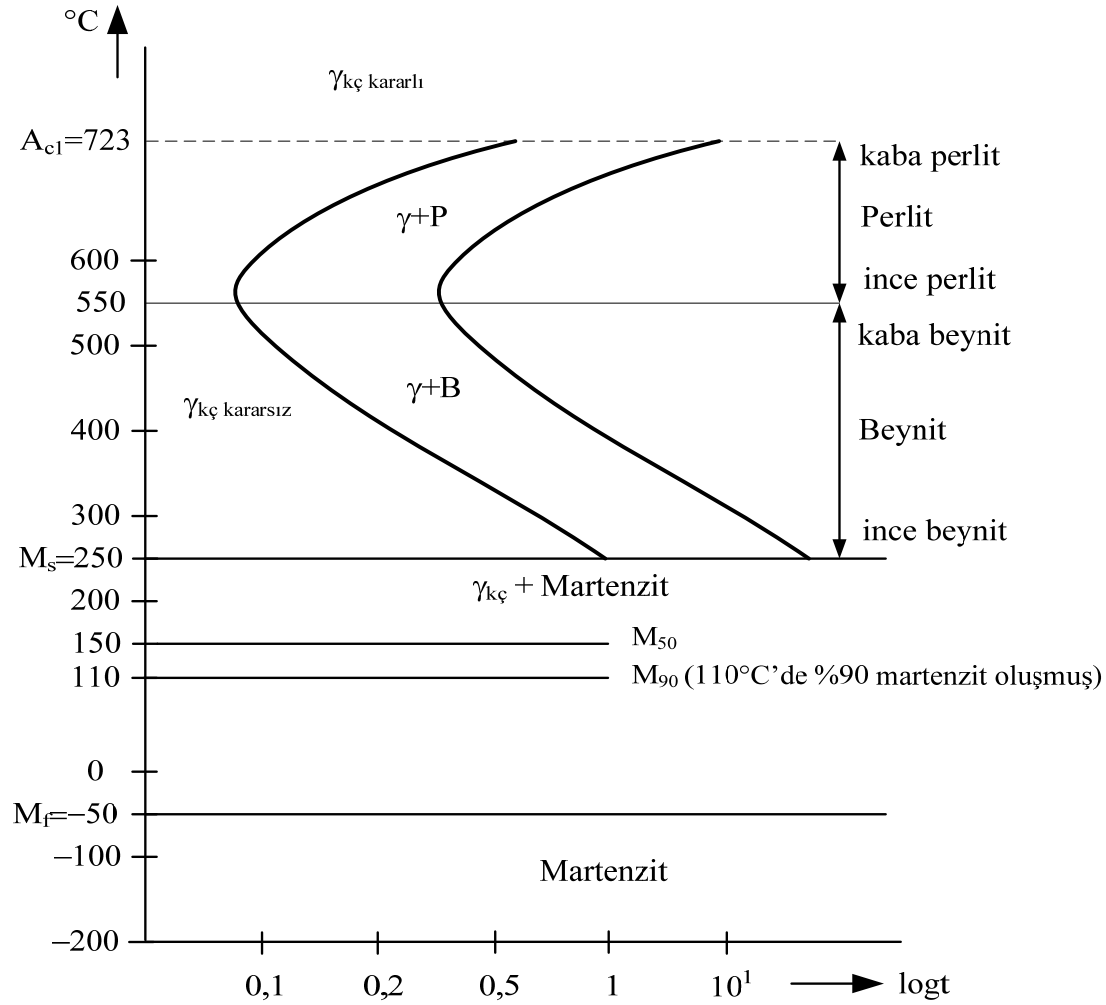
Şekil: %0,45 C'li çeliğin sabit sıcaklık ZSD diyagramı

2. Sabit Sıcaklık (İzotermik) Z-S-D Diyagramları



Şekil: Fe-C denge diyagramı ile ZSD diyagramının karşılaştırılması

2. Sabit Sıcaklık (İzotermik) Z-S-D Diyagramları



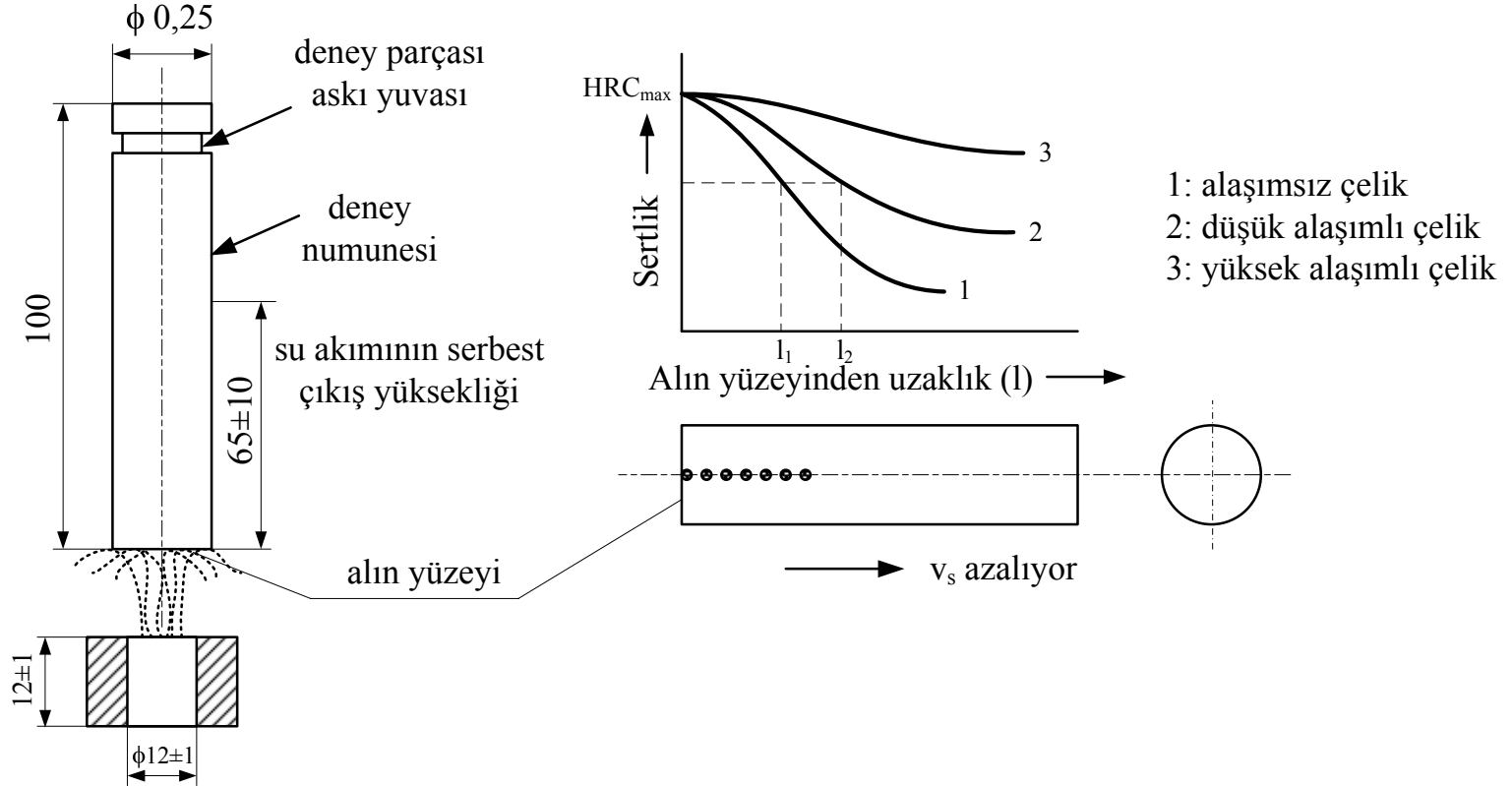
Şekil: Ötektoid (Perlitik) çeliğin (%0,8 C'li) izotermik ZSD diyagramı

- *Sertleştirme işlemi sonunda; yapı tümüyle martenzite dönüşmez ve artık östenit kalırsa malzeme tekrar ısıtıp hızla soğutularak tümüyle martenzit yapı elde edilir.*
- $M_s = f(C, Mn, \text{diğer alaşım elementleri})$
- $M_f = f(C, Mn, \text{diğer alaşım elementleri})$
- Soğuma hızı : $v_{soğ} = \frac{\text{Fırın çıkış sıcaklığı} - M_s}{\text{Zaman}}$

Çeliğın Sertleşme Davranışı

- Sertlik: Çelik içindeki C yüzdesine bağılı olarak sertlik değeri
- Sertleşme Derinliğı (sertleşme kabiliyeti): Sertleşme derinliğı, sertliğıın öngörülen bir değeri aştığı sınır tabakası kalınlığı olarak tanımlanır. Alaşım elementi cinsi ve miktarıyla belirlenir.
- Çeliğın sertleşme davranışı DIN 50191'de verilen Jominy (Alından Su Verme)Deneyi ile saptanır.

Jominy (Alından Su Verme) Deneyi (DIN 50191) (Alın Sertleştirme Deneyi) (Çelik Ucunu Sertleştirme Deneyi)



- Sertleştirme sonucunda %0,8 C'li çeliğin (ötektoid çelik) sertliği yaklaşık 67 HRC'dir.
- **Çeliğin sertleşme derinliği**, genellikle %50 martenzit içeren, yani böyle bir içyapının sertliğine sahip olan noktanın, alın yüzeyinden uzaklığıdır.
- Alaşımsız çeliklerin kritik soğuma hızının yüksek olması nedeniyle, sertleşme derinliği azdır. Yani elde edilebilen martenzitik tabakanın kalınlığı yaklaşık 5 mm'dir. Bu nedenle, bu tür çeliklere *sığ sertleşme çelikleri* adı verilir.
- Alaşımlı çeliklerde ise, elde edilebilen martenzitik tabakanın kalınlığı yaklaşık 12 mm'dir.

Su Verme Ortamları

Su verme ortamı, parçanın kritik soğuma hızını aşacak şekilde olmalıdır ki östenitin tümü martenzite dönüşebilsin (dönüşüm sertleşmesi için).

Su verme işlemini şu faktörler etkiler:

- Çelik içerisindeki C ve alaşım elementi oranları (kimyasal bileşim)
- Su verme ortamının soğutma kabiliyeti
- Parça malzemesinin ısı iletim kabiliyeti (alaşım elementi miktarı ile azalır)
- Parçanın boyutu ve şekli
- Parçanın yüzey durumu (tufal: oksit tabakası olup olmadığı)
- Parçanın su verme ortamında kalma süresi
- İdeal su verme ortamı, malzemedan perlit kademesinde mümkün olduğu kadar çok, martenzit kademesinde ise çatlama tehlikesini azaltmak için mümkün olduğu kadar az ısı çekmektir.
- Su verme ortamları:
- Su
 - Buzlu su
 - %5-10 NaCl içeren su
 - %5-10 NaOH içeren su
 - Oda sıcaklığında su
- Yağ (200-250°C)
- Tuz banyosu (tuz ergimiş halde)
- Ergimiş metal banyosu

Su Verme Ortamları

Su verme ortamı olarak su seçildiğinde:

- Östenitleme sıcaklığındaki parça su içerisine daldırıldığında, parça yüzeyinde oluşan buhar filminin yalıtımı etkisiyle soğuma başlangıçta yavaştır. Sıcaklık 600°C'nin altına indiğinde, atom hareketliliğinin yardımıyla buhar filmi yırtılır, buhar kabarcıklar halinde yükselmeye başlar. Soğuma hızı 400°-500°C civarında en yüksek değerine ulaşır. Bu nedenle su içerisine %5-10 NaCl veya NaOH ilave edilerek, buhar filminin oluşum noktası daha üst sıcaklıklara çekilir ve film oluşumu engellenir. Aynı zamanda bu soğutma ortamında, parçanın sertleşme derinliği artarken çatlama tehlikesi azalır.

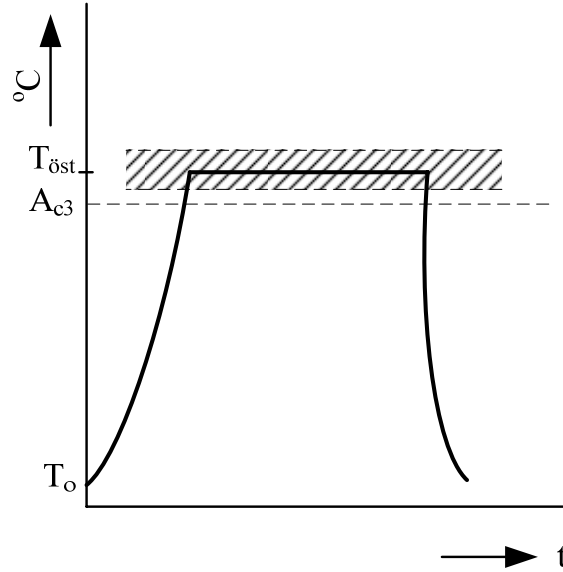
Soğutma ortamı yağ olduğunda:

- Soğutma gücü suya göre üç kat daha azdır. Yağ seçerken kolay temizlenmesine (su bazlı olmasına), tutuşmamasına ve ucuz olmasına dikkat edilmelidir.
- Alaşımli çeliklere yağ içinde su verilir ve beynitik yapı elde edilir.

Su Verme Çeşitleri

1. Doğrudan (Basit) Su Verme

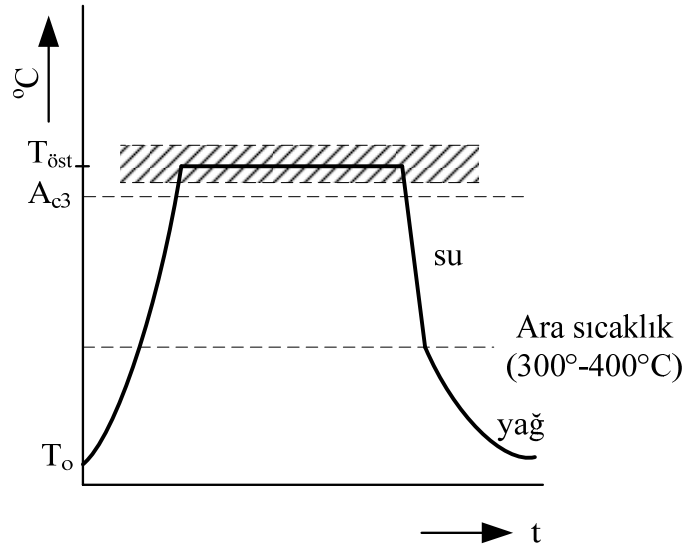
- Su veya yağ gibi tek bir ortamda sürekli soğutma işlemidir.
- Sertleşme derinliği az olan alaşımsız çeliklerde, özellikle suda yüksek hızda soğutma sonucu, karmaşık şekilli parçaların iç ve dış kısımları arasında doğabilecek sıcaklık farkı nedeniyle, çarpılma ve çatlama meydana gelebilir.



Su Verme Çeşitleri

2. Kesikli Su Verme

- Östenitten 300°-400°C'ye kadar (ara sıcaklığa) suda hızlı soğutulur. Sonra iç ve dış kısımdaki sıcaklık farkının dengelenebilmesi için yağda soğutmaya devam edilir.
- Ara sıcaklığın seçimi ve yakalanması deneyim gerektirdiğinden, seyrek uygulanan bir yöntemdir.
- Su verme işlemi sonunda parçanın çatlama tehlikesi, doğrudan su vermeye kıyasla daha azdır.



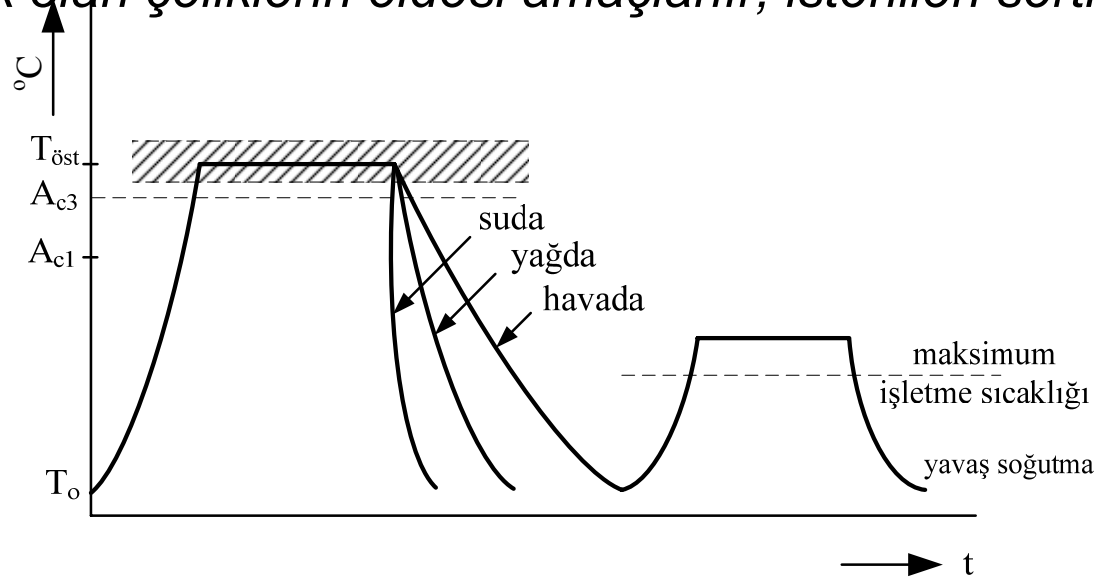
Su Verme Gerilmeleri

- Su verme işlemi sonucunda, parça içerisinde oluşan gerilmeleri gidermek için 100°-200°C sıcaklıklarda temperleme işlemi uygulanır.
- Bu işlem sonucunda, aşırı kafes gerilmeleri ve çatlama riski azaltılabilir, ama sertlikte düşme meydana gelmez.
- Su verme gerilmeleri öncelikle düşük soğuma hızları uygulanarak ve temperleme (ısı dengeleme) ile azaltılabilir.

Toklaştırma Yöntemleri

1. Islah Etme

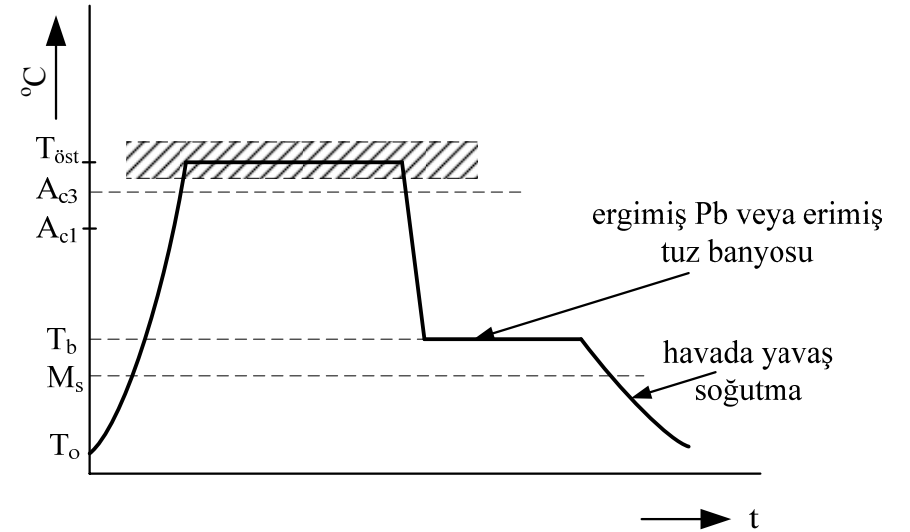
- Islah çeliklerinde %0,20-%0,65 oranında karbon bulunur (alaşimsız ıslah çelikleri).
- *Islah etme işlemi ile; mekanik dayanımı (çekme, akma dayanımları) yüksek olan çeliklerin eldesi amaçlanır; istenilen sertlik elde edilir.*



Toklaştırma Yöntemleri

2. Östemperleme (Beynitleme)

- %100 beynit yapısı elde etmek amacıyla yapılır.
- Östenitleme sıcaklığına ısıtılan parça, (beynitleme) sıcaklığındaki ergimiş Pb ya da tuz banyosuna daldırılır ve kararsız östenitin tamamının izotermik olarak beynite dönüşmesi tamamlanıncaya kadar bekletilir. Daha sonra istenen hızda havada soğutulur. Bekleme sırasında ısıl gerilmeler giderilir.
- Östemperleme, çatlak oluşumuna duyarlı karmaşık şekilli parçaların toklaştırılmasında büyük önem kazanır.
- Yöntem daha çok, talaşsız şekillendirme kalıplarının imalatında kullanılan takım çeliklerinin sertleştirilmesi için uygundur.
- Elde edilen içyapının sertliği, martenzite göre daha düşüktür. Bu nedenle parçanın çentik darbe dayanımı daha iyidir.
- Yay üretimi için idealdir.



Toklaştırma Yöntemleri

3. Patentleme-Perlitlenme

Patentleme işlemi;

östemperlemeye benzer biçimde ancak, sıcaklığı patentleme kademesinde olan bir banyo yardımıyla gerçekleştirilir.

Patentleme sonucunda:

- Soğuk şekil değiştirme kabiliyeti çok iyi olan sorbitik, trostitik içyapı elde edilir
- Perlitlenme işlemi; östenitik sıcaklığa ısıtılan parça perlitlenme sıcaklığındaki banyoya kadar soğutulur ve banyoda iç yapı tamamen perlit oluncaya kadar bekletilir, banyodan çıkarılarak soğutulur.

