

ÇELİKLERDE ISIL İŞLEMLER

7. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

7.1 Giriş

Genel anlamda ısıtma işlemi, metal veya alaşımlara istenilen özellikleri kazandırmak amacıyla katı halde uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanır. Isıtma işleminin Türk Standartlarındaki (TS 1112) tanımı ise; katı haldeki metal veya alaşımlara belirli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, yerine göre birbiri peşine zamanlanarak uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri olarak verilmektedir.

Çeliklere uygulanan bütün temel ısıtma işlemleri, ostenit fazının dönüşümü ile ilgilidir. Dönüşüm ürünlerinin türü, bileşimi ve metalografik yapısı çeliğin fiziksel ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Başka bir deyişle; bir çeliğin fiziksel ve mekanik özellikleri içerdiği dönüşüm ürünlerinin cinsine, miktarına ve metalografik yapısına bağlıdır.

7.2. ÖSTENİTLEŞTİRME

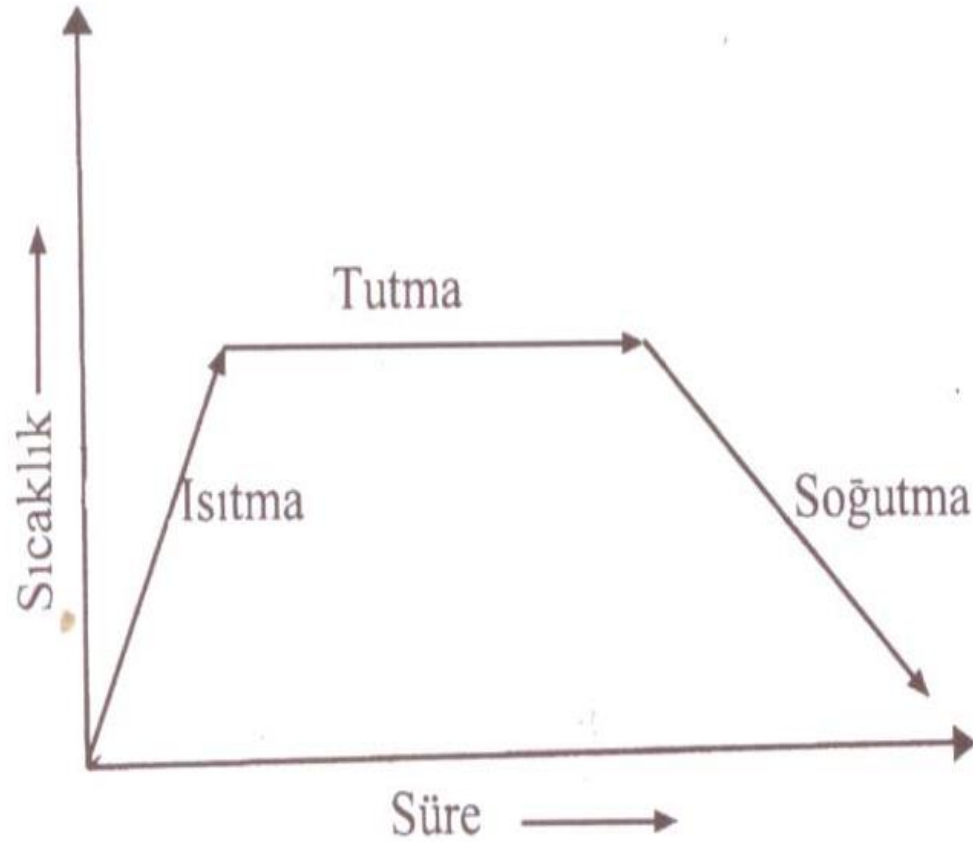
Çeliğin ısıtılmasına ostenitleştirme (ostenitizasyon) ile başlanır. Ostenitleştirme için çelik malzeme, alt kritik sıcaklık çizgisinin (A_{c1}) üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Çoğu durumlarda, çeliğin belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılmasında seçilen ısıtma hızı, ısıtılma işlemi çevrimindeki diğer faktörlere göre daha az önem taşır. Ancak, çarpılmanın önlenmesi için soğuk şekil değişimine tabi tutulmuş, yani aşırı ölçüde iç gerilme içeren malzemelerin, gerilmesiz malzemelere göre daha yavaş ısıtılması gerekir. Ayrıca, kesit değişikliği gösteren parçaların ısıtılması sırasında ince ve kalın kesitlerdeki ısınma veya sıcaklık artış hızları arasındaki farklar da dikkate alınmalıdır. Sıcaklık etkisiyle parçada meydana gelebilecek çarpılmayı en aza indirmek için, ince kısımların kalın kısımlara göre daha yavaş ısıtılması gerekir. Isıtılma işlemi sırasında hasar riskini azaltmak amacıyla çelikler genelde yavaş ısıtılırlar.

7.3 YUMUŞATMA

Yumuşatma tavlama ise sertliği azaltmak, talaş kaldırmayı kolaylaştırmak veya döküm ve dövme parçalarındaki iç gerilmeleri gidermek amacıyla, ötektoid altı çelikleri Ac_3 , ötektoid üstü çelikleri ise Ac_1 çizgilerinin üzerindeki belirli sıcaklıklara kadar ısıtıp, iç yapılarını ostenite dönüştürdükten sonra fırın içerisinde tutarak çok yavaş soğutma işlemidir. Tavlama işlemi, bazı çeliklerde tane küçültmek ve çeliklerin elektrik ve manyetik özelliklerini iyileştirmek amaçları için de uygulanır. Ostenitleştirmeden sonraki soğutma işlemi çok yavaş olduğundan, yumuşatma tavlama için demir-sementit ($Fe-Fe_3C$) denge diyagramı kullanılabilir.

%0,2 C içeren iri taneli ötektoid altı bir çelik parçanın tanelerinin tavlama işlemi ile nasıl incelendiğini inceleyelim. Tavlama işlemi sırasında söz konusu çeliğin iç yapısında meydana gelen değişimler Şekil 7.2'de gösterilmiştir. İşlemin değişik aşamalarında çelik parçada oluşan iç yapılar aşağıda verilmektedir.

tutulması ve sonradan yavaş soğutulması işlemine tavlama denir. Tavlama işlemi Şekil 7.1'de şematik olarak gösterilmiştir.

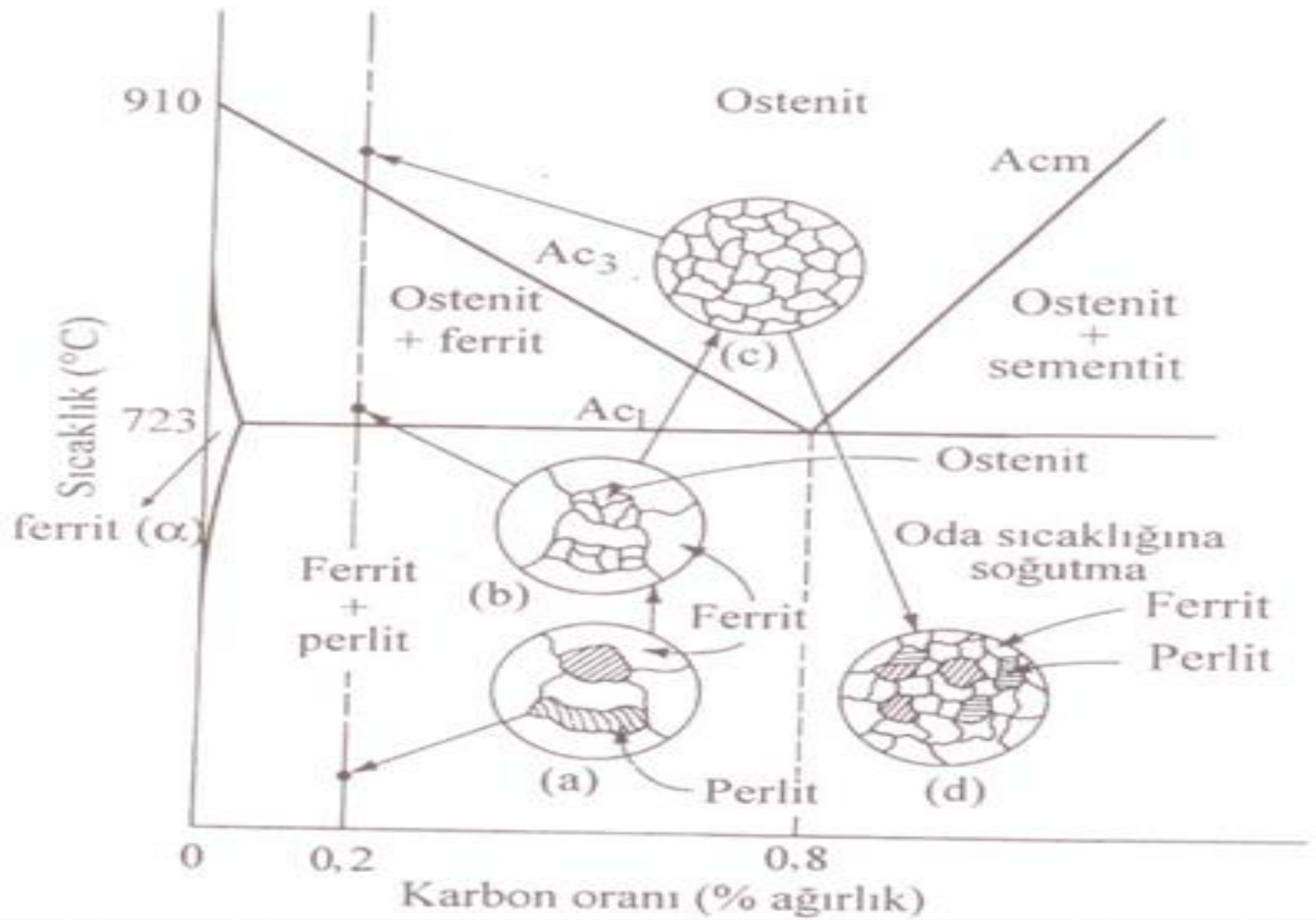


Şekil 7.1 Tavlama işleminin şematik gösterimi

- a) İlk veya orijinal yapı iri ferrit ve perlit tanelerinden oluşmaktadır.
- b) Ac_1 çizgisinin hemen üzerindeki bir sıcaklıkta perlit ince taneli ostenite dönüşürken, ferrit yapıda aynen kalır.
- c) Ac_3 çizgisinin üzerindeki sıcaklıkta yapı tamamen ince taneli ostenite dönüşür.
- d) Parça oda sıcaklığına soğutulduğunda, ince ferrit taneleri ile küçük perlit bölgelerini içeren bir iç yapı oluşur.

%0,2 C içeren iri taneli çelik parçanın Ac_1 sıcaklığına kadar ısıtılması sırasında iç yapıda herhangi bir değişme olmaz. Ac_1 sıcaklığında ise perlit bölgeleri ötektoid reaksiyon sonucunda ince taneli ostenite dönüşür. Ancak, ferrit taneleri değişmeden yapıda aynen kalır. Çelik bu sıcaklıktan (Ac_1) soğutulursa tane boyutunda herhangi bir değişme olmaz. Ac_1 ile Ac_3 sıcaklıkları arasında ısıtmaya devam edildiğinde, iri ferrit taneleri ince ostenit tanelerine dönüşür. Ac_3 sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ise, çeliğin iç yapısı tamamen ince taneli ostenite dönüşür. Bundan sonra bu çelik fırında soğutulduğunda, ötektoid dışı ince ferrit taneleri ile kaba lamelli perlit bölgelerinden

oluşan bir iç yapı elde edilir. Buradan; ötektoid altı çeliklerin yumuşatma tavına tabi tutulabilmeleri için Ac_3 çizgisinin üzerindeki uygun sıcaklıklarda tavlamlarının gerekli olduğu sonucu orataya çıkmaktadır.

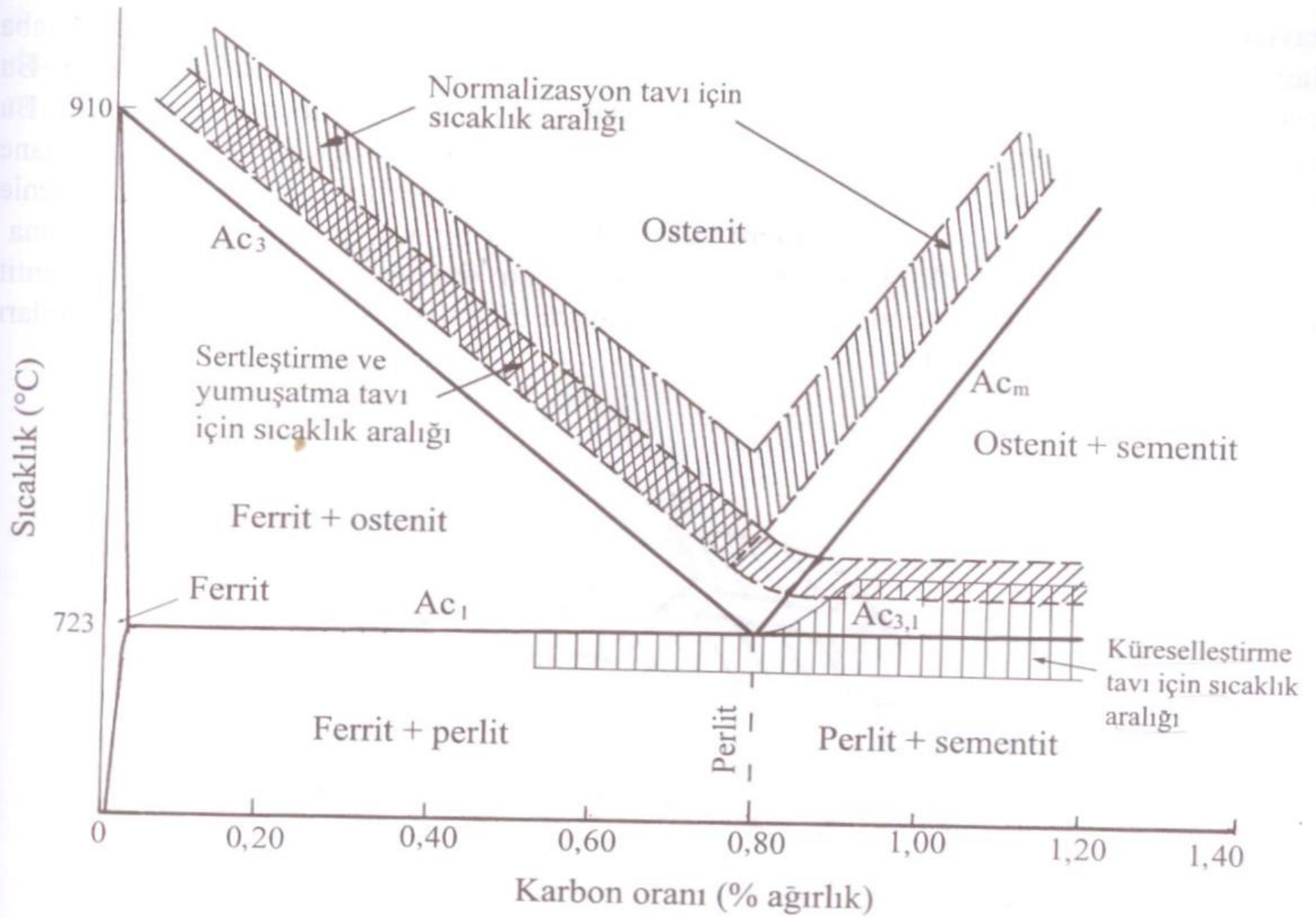


%0,2 C içeren çeliğin iç yapısında tavlama işlemi sırasında meydana gelen değişimlerin şematik gösterimi

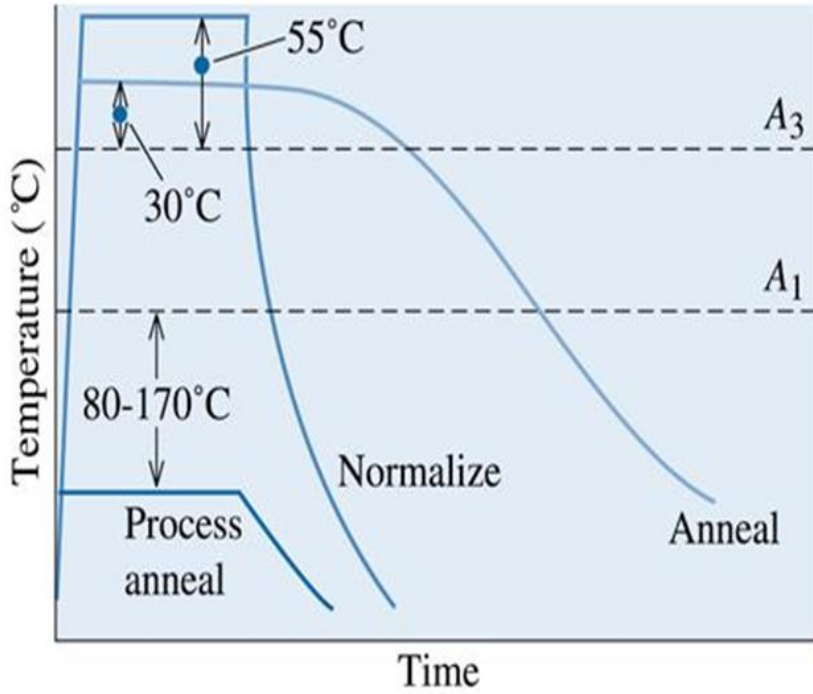
Ötektoid üstü çelikler $Ac_{3,1}$ çizgisinin yaklaşık 50 °C üzerindeki sıcaklıklarda ostenitleştirme işlemine tabi tutulurlar. Bu sıcaklıklarda tutulan çelikler, ostenit (γ) ve sementit (Fe_3C) fazlarını içerir. Bu sıcaklıklardan çeliklere su verildiğinde sementit parçacıkları yapıda aynen kalır. Yapıdaki sementit fazı sertliği azaltmadığı gibi, çeliklerin aşınma dirençlerini de artırır. Bu nedenle ötektoid üstü çeliklerin tamamen ostenitleştirilmesine gerek yoktur.

Mn ve Ni gibi alaşım elementleri Ac_1 sıcaklığını düşürdükleri gibi, denge diyagramının ötektoid noktasını da sola, yani düşük karbon oranına doğru kaydırırlar. Bu alaşım elementleri, ötektoid altı çeliklerin ostenitleştirme sıcaklığını da düşürürler. Bazı alaşım elementleri ise Ac_1 sıcaklığını yükseltir. Genelde, alaşım elementleri ostenitin oluşum hızını azaltırlar.

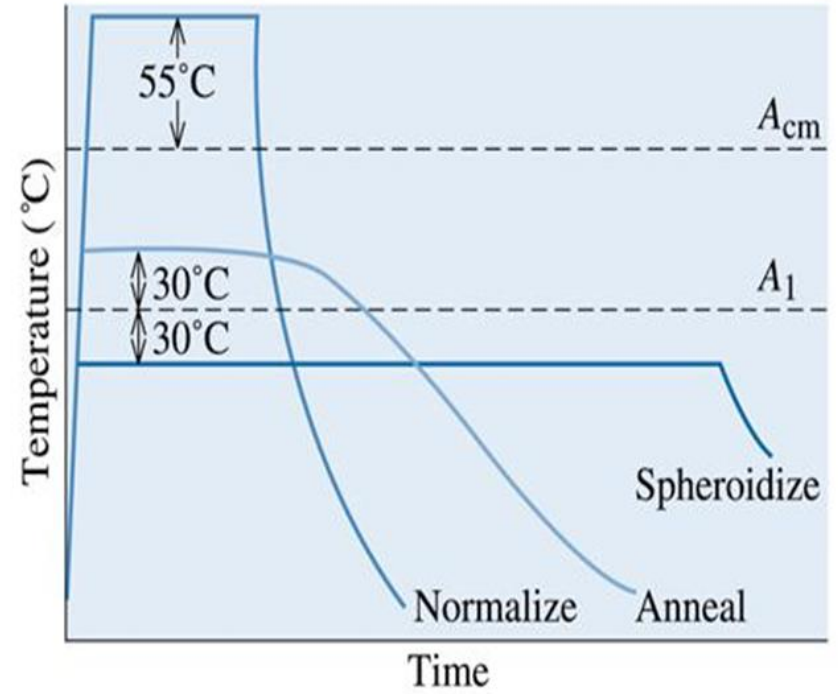
Ötektoid altı çeliklerin sağlıklı biçimde ısıtılma işlemine tabi tutulabilmeleri için, önce homojen bir ostenitik yapıya sahip olmaları gerekir. Bunun için, ostenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılan çelik malzemelerin her 25 mm'si için 1 saatlik bir süre o sıcaklıkta tavlama tavsiye edilir. Çelikler için tavlama sıcaklık aralıkları Şekil 7.3'deki diyagram üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 7.3 Alaşımsız çeliklere uygulanan yumuşatma, normalizasyon, küreselleştirme ve sertleştirme işlemleri için tavlama sıcaklık aralıkları



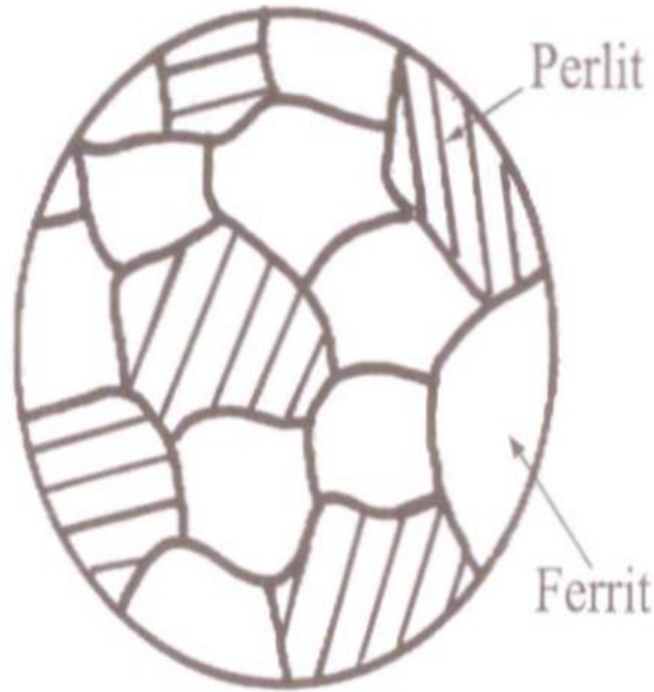
(a) Hypoeutectoid



(b) Hypereutectoid

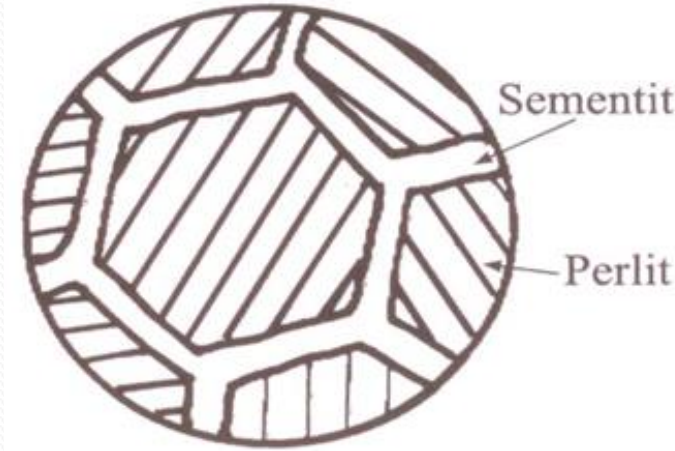
Şekil7.Şematik ısı işlemler (a) ötektoid altı çelikler ve (b) ötektoid üstü çelikler için.

Ötektoid altı çeliklerin yumuşatılması için tavlama işlemi, A_{c3} çizgisinin en az 10°C üzerindeki sıcaklıklarda yapılır. Yumuşatma tavına tabi tutulan ötektoid altı çelikler ötektoid dışı ferrit ile kaba lamelli perlitten oluşan bir yapı sergilerler. Bu çeliklere ait tipik bir iç yapının şematik resmi Şekil 7.4'de görülmektedir.



Şekil 7.4 Yumuşatma tavına tabi tutulan ötektoid altı çeliklerde oluşan tipik bir iç yapının şematik resmi

Ötektoid üstü çelikler ise $Ac_{3,1}$ çizgisinin en az $10^{\circ}C$ üzerindeki bir sıcaklıkta tavlanylrlar. Yumuşatma tavına tabi tutulan ötektoid üstü çeliklerin iç yapıları, kaba lamelli perlit alanları ile bunları çevreleyen ötektoid dışı sementit fazından oluşur. Bu çeliklere ait tipik bir iç yapının şematik resmi de Şekil 7.5’de görülmektedir. Bu yapıdaki perliti çevreleyen sementit ağı sert ve gevrektr. İç yapıda kalın ve sert tane sınırlarının bulunması, çeliklerin talaşlı yöntemle işlenmelerini zorlaştırır. Bu nedenle yumuşatma tavı, ötektoid üstü çeliklere son ısııl işlem olarak uygulanmaz. Yumuşatma tavına tabi tutulan çeliklerin iç yapılarında bulunan ferrit-perlit veya perlit-sementit oranları metalografik yöntemle belirlendikten sonra bu çeliklerin yüzde karbon oranları yaklaşık olarak bulunabilir.



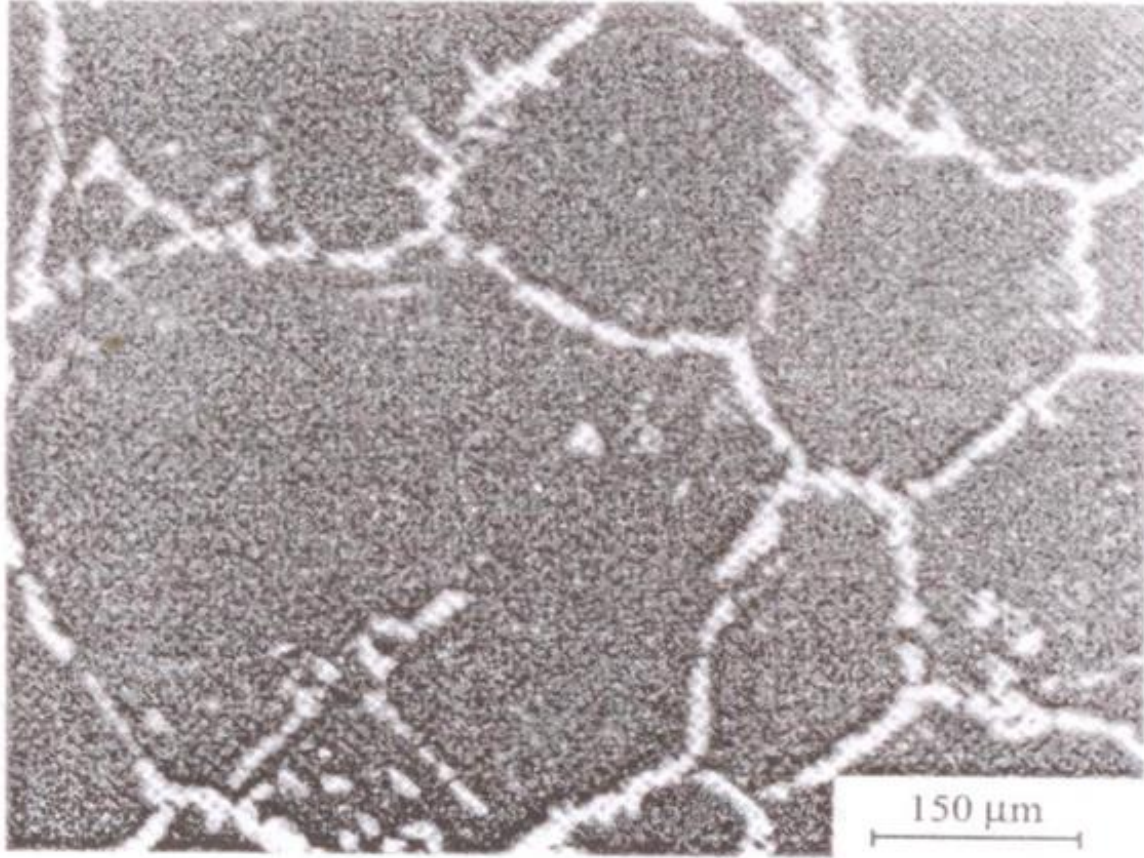
Şekil 7.5 Yumuşatma işlemine tabi tutulan ötektoid üstü çeliklerde oluşan iç yapının şematik resmi

7.3 Normalizasyon (Normalleştirme) Tavı

Normalizasyon tavı genelde tane küçültmek, homojen bir iç yapı elde etmek ve çoğunlukla mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla ötektoid altı çelikleri Ac_3 ve ötektoid üstü çelikleri Ac_m dönüşüm sıcaklıklarının yaklaşık olarak 40-50 °C üstündeki sıcaklıklara kadar ısıtıp, tavladıktan sonra fırın dışında sakın havada soğutma işlemidir. Normalizasyon tavının belli başlı amaçları; **a)** tane küçültmek, **b)** homojen bir iç yapı elde etmek, **c)** ötektoid üstü çeliklerde tane sınırlarında bulunan karbür ağını dağıtmak, **d)** çeliklerin işlenme özelliklerini iyileştirmek, **e)** mekanik özellikleri iyileştirmek ve **f)** yumuşatma tavına tabi tutulmuş çeliklerin sertlik ve mukavemetlerini artırmak şeklinde sıralanabilir. Bu nedenlerle normalizasyon tavı, çeliklere uygulanan son ısıl işlem olabilir.

Normalizasyon tavı için soğutma işleminin fırın dışında ve sakın havada yapılması nedeniyle soğuma hızında meydana gelen artış, hem ostenitin dönüşümünü, hem de en son elde edilen iç yapıyı bir kaç yönden etkiler. Havada soğutma dengesiz soğuma olduğundan, normalize edilmiş çeliğin iç yapısında bulunan ötektoid dışı sementit ve perlit oranlarını hesaplamak için demir-sementit denge diyagramı kullanılamaz. Havada soğutma sırasında ötektoid dışı fazların oluşumu için yeterli zaman olmadığından, normalize edilen ötektoid altı çelikler yumuşatma tavına tabi tutulan çeliklere göre daha

düşük oranda ötektoid dışı ferrit, ötektoid üstü çelikler ise daha düşük oranda ötektoid dışı sementit içerirler. %0,5 oranında karbon içeren çeliğin normalize edilmiş durumdaki iç yapısı Şekil 7.6'da görülmektedir. Bu yapıda bulunan ötektoid dışı ferrit, perlit alanlarını çevrelemektedir.

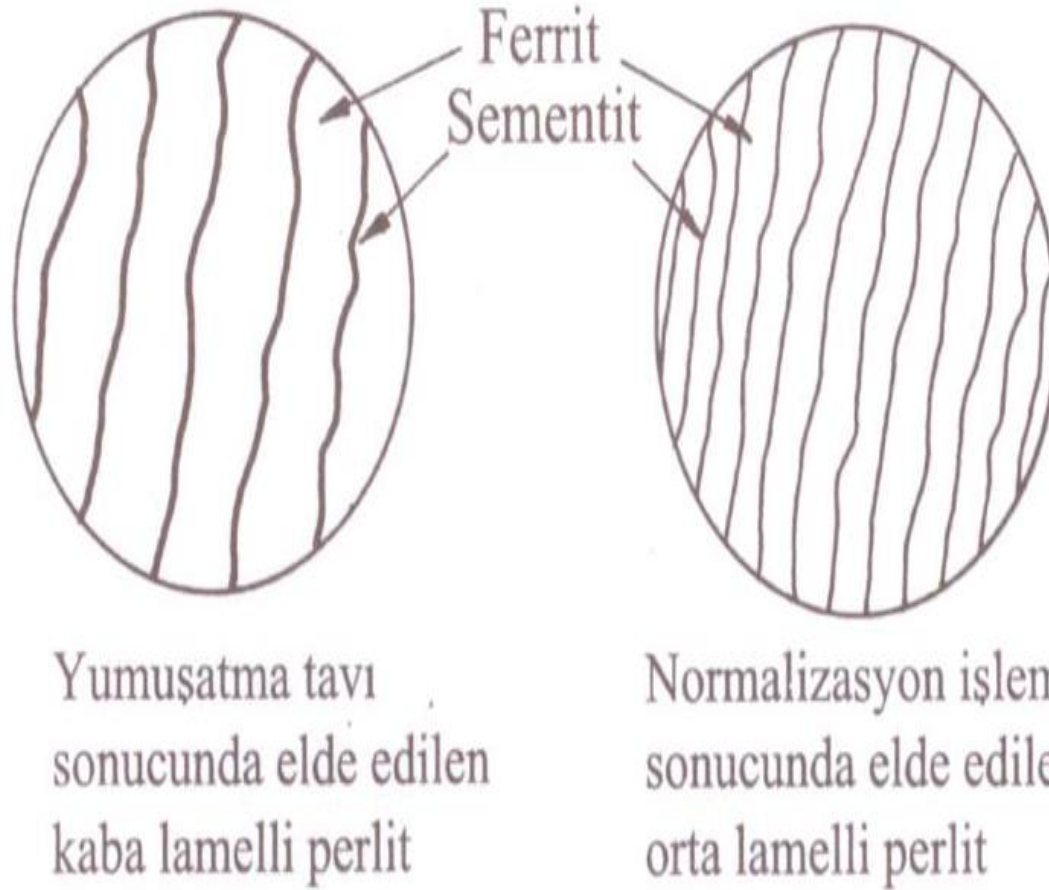


Şekil 7.6 % 0,5 C içeren çeliğin normalize edilmiş durumdaki iç yapısı

Havada soğutma işlemi, ötektoid altı çeliklerde ötektoid noktayı sola, yani düşük karbon oranına doğru, ötektoid üstü çeliklerde ise sağa, yani yüksek karbon oranına doğru kaydırır. Örneğin; karbon oranı %0,5 olan alaşımsız çelik yumuşatma işleminden sonra yaklaşık %62 oranında perlit ve %38 oranında ötektoid dışı ferrit içerir. Aynı çelik normalize edildiğinde; ancak %10 dolayında ötektoid dışı ferrit içerdiği görülür. Normalizasyon işleminden sonra beyaz görünümlü ötektoid dışı ferrit, koyu renkli perlit bölgelerini çevreleyen bir ağ oluşturur.

Yumuşatma tavına tabi tutulan ötektoid üstü çeliklerin yapısında oluşan sementit ağının, bu çeliklerin mukavemetini düşürdüğü bilinmektedir. Normalizasyon tavi, ötektoid üstü çeliklerdeki sementit ağının parçalanmasını ve bazı durumlarda da büyük ölçüde giderilmesini sağlar. Bu nedenle, normalize edilen çeliklerin mukavemetinde artış görülür.

Normalizasyon tavında, parçanın havada soğutulması nedeniyle nispeten yüksek soğuma hızı elde edilir. Genelde, soğuma hızı arttıkça ostenitin dönüşüm sıcaklığı düşer ve daha ince perlit elde edilir. Dolayısıyla, normalize edilen çelikte yumuşatma tavi görmüş çeliğe göre daha ince ve yüksek oranda perlit oluşur. Yumuşatma tavi ve normalizasyon işlemleri sonucunda elde edilen perlitik yapılar arasındaki fark, Şekil 7.7'de görülmektedir.



Şekil 7.7 Yumuşatma tavi ve normalizasyon işlemleri sonucunda elde edilen perlitik yapılar arasındaki farkın şematik gösterimi

Ferrit çok yumuşak, sementit ise çok sert bir fazdır. Normalize edilen çeliğin yapısında bulunan sementit katmanlarının birbirine yakın veya sık olarak dizilmeleri nedeniyle çeliğin sertliği artar. Yumuşatma tavlama ile elde edilen kaba perlitin sertliği 10 RSD-C civarında iken, normalize edilen perlitin sertliği yaklaşık 20 RSD-C değerine ulaşır. Yukarıda belirtildiği gibi, dengesiz soğuma sayılan hızlı soğuma ötektoid noktayı, ötektoid altı çeliklerde düşük karbon oranına doğru (sola), ötektoid üstü çeliklerde ise yüksek karbon oranına doğru (sağa) kaydırır. Normalize edilen çelikler, yumuşatma tavlama gören çeliklerden daha ince ve daha yüksek oranda perlitik yapı içerirler. Bu nedenle, normalize edilen çeliklerin sertlik ve mukavemeti, yumuşatma tavlama tabii tutulan çeliklerin söz konusu değerlerinden önemli ölçüde yüksek olur. Tablo 7.1'de bazı çeliklerin yumuşatma tavlama tabii tutulmuş ve normalize edilmiş durumlardaki mekanik özellikleri verilmektedir.

7.4 Küreselleştirme Tavı

Küreselleştirme tavı, çelikleri Ac_1 sıcaklık çizgisi civarında uzun süre tuttuktan ve bu bölgede salınımlı olarak tavladıktan sonra, yavaş soğutma ile karbürlerin küresel şekle dönüştürülmesi işlemidir. Bu işlem, ostenitleştirmeden sonra kontrollü soğutma ile de yapılabilir. Yumuşatma tavı işleminde belirtildiği gibi, tavllanmış durumdaki ötektoid üstü çelikler iç yapılarında sert ve gevrek sementit tanelerinin bulunması nedeniyle işlenmeye elverişli değildir. Bu tür çeliklerin işlenmesini kolaylaştırmak ve sünekliğini artırmak amacıyla da küreselleştirme tavı uygulanır. Küreselleştirme tavı aşağıdaki yöntemlerden biri ile gerçekleştirilir.

a) Çelik malzeme Ac_1 çizgisinin hemen altındaki bir sıcaklıkta (örneğin 700°C) uzun süre (15-25 saat) tavllanır.

b) Çelik malzeme, düşük kritik sıcaklık çizgisinin (Ac_1) hemen altında ve üstündeki sıcaklıklar arasında ısıtılıp soğutulur, yani salınımlı olarak tavllanır.

c) Malzeme, A_{c1} kritik sıcaklık çizgisinin üzerindeki bir sıcaklıkta tavlandıktan sonra ya fırında çok yavaş soğutulur, ya da A_{c1} çizgisinin hemen altındaki bir sıcaklıkta uzunca bir süre tutulur.

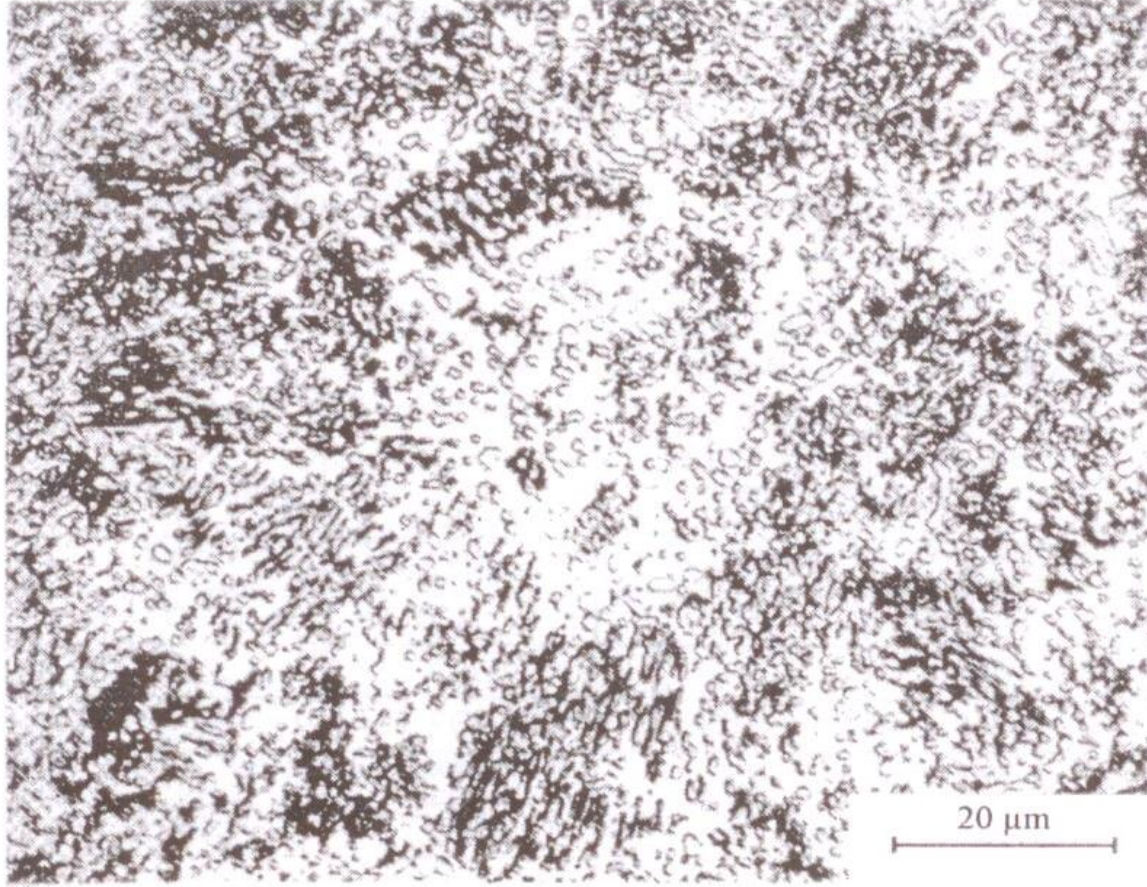
Tablo 7.1 Çeliklerin yumuşatma tavına tabi tutulmuş ve normalize edilmiş durumlardaki mekanik özellikleri

İşlem	Karbon oranı (%)	Akma mukavemeti (N/mm^2)	Çekme mukavemeti (N/mm^2)	Kopma uzaması (%)	Sertlik (BSD)
Yumuşatma tavlama	0,01	124	283	47	90
	0,20	148	407	37	115
	0,40	303	517	30	145
	0,60	338	667	23	190
	0,80	359	793	15	220
	1,00	359	745	22	195
	1,20	352	703	24	200
	1,40	345	683	19	215
Normalizasyon tavlama	0,01	179	310	45	90
	0,20	310	441	35	120
	0,40	352	586	27	165
	0,60	414	752	19	220
	0,80	483	924	13	260
	1,00	690	1048	7	295
	1,20	690	1055	3	315
	1,40	662	1021	1	300

Küreselleştirme tavlama için sıcaklık aralığı Şekil 7.3'de görülmektedir. Yüksek sıcaklıktaki tavlama işlemi, çeliğin içerisindeki perlitik yapı ile sementit ağının parçalanarak dağılmasına neden olur. Küreselleştirme tavlama sonucunda, ferritik bir matris ile bunun içerisinde dağılmış durumda bulunan küre biçimindeki karbürlerden oluşan bir iç yapı elde edilir. Söz konusu yapı Şekil 7.8'de görülmektedir. Küreselleştirme tavlama sonunda çeliğin sertliği azalır, buna karşılık sünekliği artar. Bu işlem sonunda, ötektoid üstü çelikler işlenmeye elverişli hale gelir.

Küreselleştirme tavlama, daha çok yüksek karbonlu çeliklere uygulanır. Düşük karbonlu çelikler nadiren küreselleştirme tavlama tabii tutulurlar. Çünkü; bu tür çelikler küreselleştirme tavlama sonunda çok yumuşarlar ve bu aşırı yumuşama talaşlı işlem sırasında bazı zorluklar doğurur. Orta karbonlu çelikler ise yeterli ölçüde süneklik kazanmaları için plastik şekil verme işleminden önce, bazen küreselleştirme tavlama tabii tutulurlar. Küreselleştirme tavlama sırasında tavlama süresinin iyi ayarlanması gerekir. Eğer çelik, gereğinden daha uzun süre tavlanişsa sementit parçacıkları birleşerek uzama gösterirler ve bu durum çeliğin işleme kabiliyetini olumsuz etkiler.

Yumuşatma, küreselleştirme ve normalizasyon işlemleri çelikleri işlenmeye elverişli hale getirmek amacıyla uygulanır. Ancak, uygulanacak ısıl işlem çeliğin karbon oranına göre seçilir.



Şekil 7.8 Küreselleştirme tavına tabi tutulmuş ötektoid üstü bir karbon çeliğinin iç yapısının görünümü

7.5 Gerilme Giderme Tavı ve Ara Tavı

Gerilme giderme tavı; döküm, kaynak ve soğuk şekil verme işlemlerinden kaynaklanan iç gerilmeleri azaltmak amacıyla, metalik malzemeleri dönüşüm sıcaklıklarının altındaki uygun bir sıcaklığa kadar ısıtma ve sonra yavaş soğutma işlemidir. Bu işlem, bazen dönüşüm sıcaklığı veya kritik sıcaklık altı tavı olarak da adlandırılır. Çelik malzemeler 540°C ile 630°C sıcaklıkları arasında gerilme giderme tavına tabi tutulurlar.

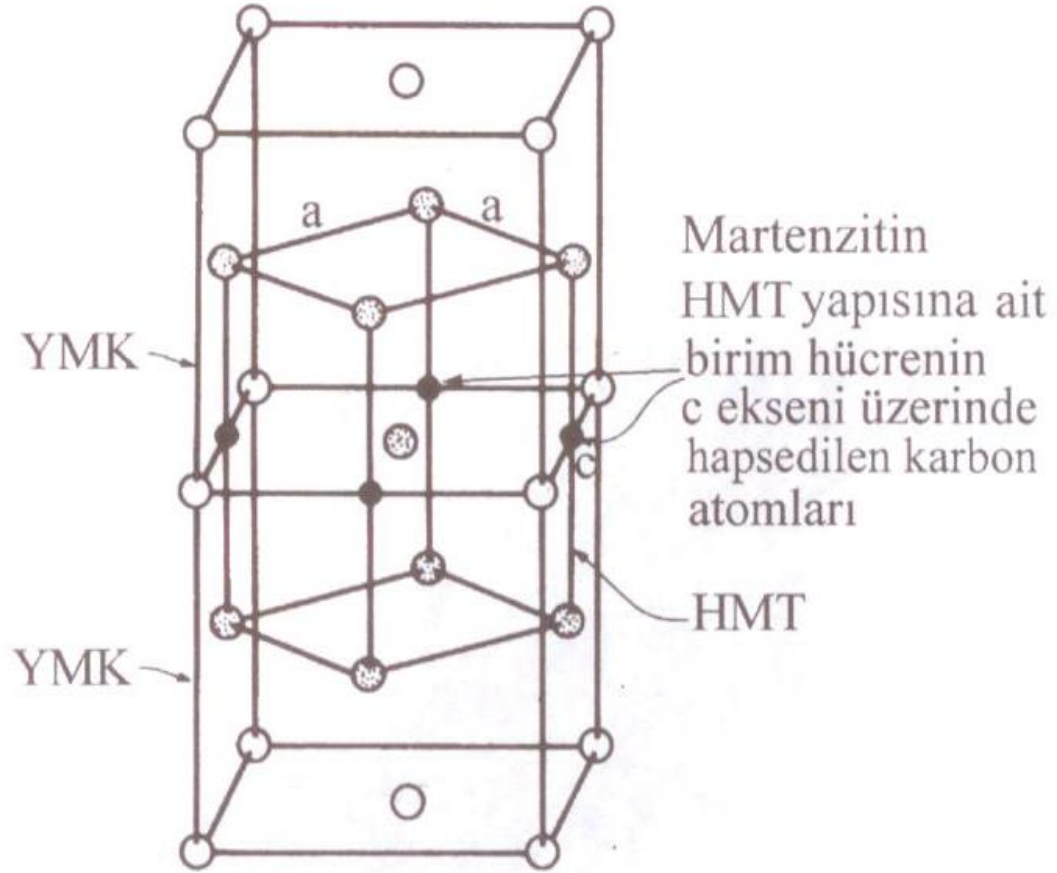
Ara tavı ise; gerilme giderme tavına çok benzeyen bir işlem olup, ötektoid altı çeliklerden sac ve tel yapımında soğuk şekillendirmeye devam edebilmek için çelik malzemelerin A_{c1} dönüşüm sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklığa ($550-680^{\circ}\text{C}$) kadar ısıtılıp, yeniden kristalleşme sağlandıktan sonra yavaş soğutulması işlemidir.

7.6 Su Verme Sertleştirmesi

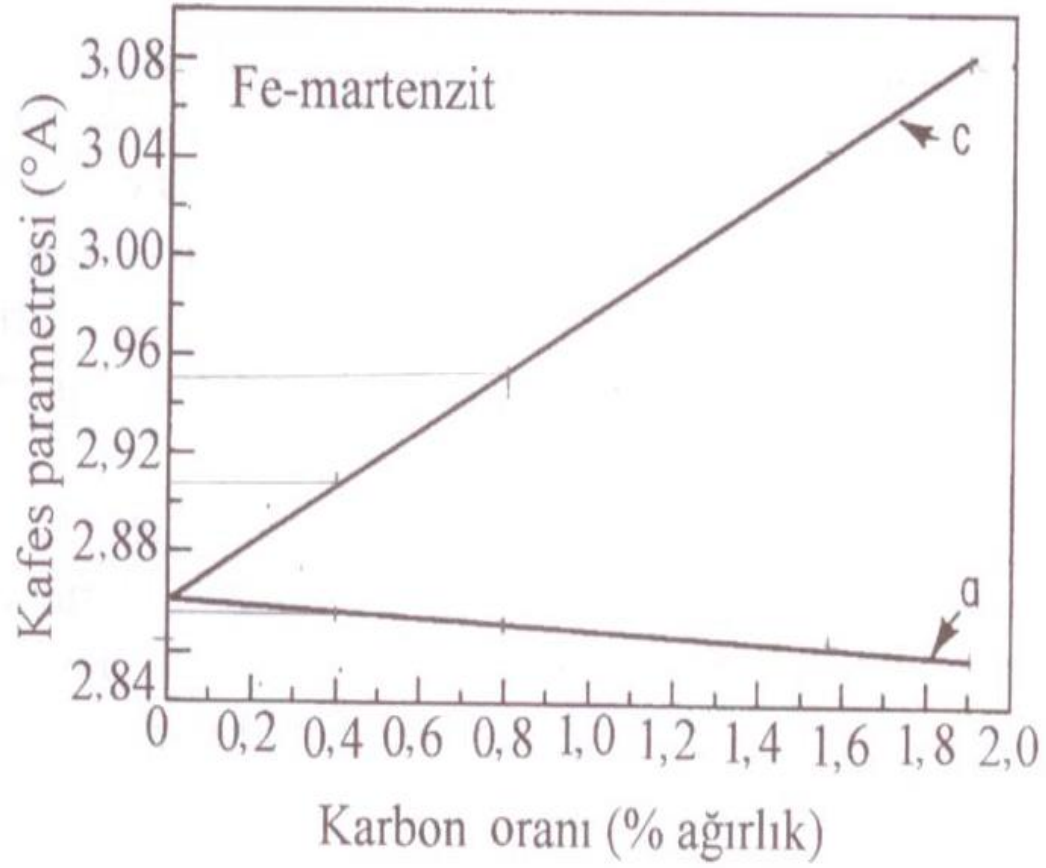
Tavlama işleminden sonra, çelikler yavaş ya da orta seviyedeki bir hızla soğutulduklarında, ostenit içerisinde çözünmüş durumda bulunan karbon atomları difüzyon ile ostenit yapıdan ayrılırlar. Bundan hemen sonra, demir atomları konumlarını biraz değiştirerek yeni bir hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapısı oluştururlar. Söz konusu ostenit (γ) - ferrit (α) dönüşümü, zamana bağlı bir çekirdekleşme ve büyüme olayı şeklinde meydana gelir. Soğuma hızı arttırıldığında, karbon atomları difüzyon ile katı çözeltiden ayrılmak için yeterli zaman bulamazlar. Demir atomları bir miktar hareket etseler bile, karbon atomlarının çözelti içerisinde hapsedilmeleri nedeniyle

kafes yapısı HMK yapıya dönüşemez ve farklı bir yapı oluşur. Hızlı soğuma sonucunda oluşan bu yapıya "martenzit" adı verilir. Martenzit; karbon ile aşırı doymuş, hacim merkezli tetragonal (HMT) yapıya sahip bir katı çözeltidir. HMT yapıya sahip martenzitin birim hücresinin oluşumu Şekil 7.9'da görülmektedir. Martenzitin birim hücresinin iki kenarının uzunluğu birbirine eşit olup, üçüncü kenarı veya yüksekliği, hapsedilen karbon atomlarının etkisiyle çok az bir miktar uzamıştır. Birim hücrenin c uzunluğunun a uzunluğuna oranı (c/a) artan karbon oranıyla artarak, en fazla 1,08 değerine kadar ulaşır. Alaşımsız çeliklerde martenzitin kafes parametrelerinin karbon oranına göre değişimi Şekil 7.10'da görülmektedir.

Martenzitin sertliğinin yüksek olmasının en önemli 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 çelik malzemelerde bir miktar hacimsel büyüme meydana gelir. Söz konusu hacimsel büyüme, matris yapısını plastik deformasyona uğratabilecek büyüklükte yerel gerilmeler oluşturur. Başka bir 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 hareketinin engellenmesine neden olduğundan, su verilen çeliklerin sertlik ve mukavemeti artar.



Şekil 7.9 Martenzitik dönüşüm sırasında, ostenitin YMK yapılı birim hücrelerinden martenzitin HMT yapılı birim hücresinin oluşumu



$$\frac{c}{a} = \frac{3.08}{2.845} = 1.082$$

Şekil 7.10 Alaşımsız çeliklerde, martenzitin kafes parametrelerinin (a ve c) karbon oranına göre değişimi

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. Şekil 7.11'de çelik malzemelerde oluşan tipik bir martenzitik yapı görülmektedir.



Şekil 7.11 Çeliklerde oluşan tipik bir martenzitik yapının görünümü. İğne biçimindeki taneler martenzit fazını beyaz bölgeler ise osteniti göstermektedir.

7.6.1 Martenzitik Dönüşümün Önemli Özellikleri

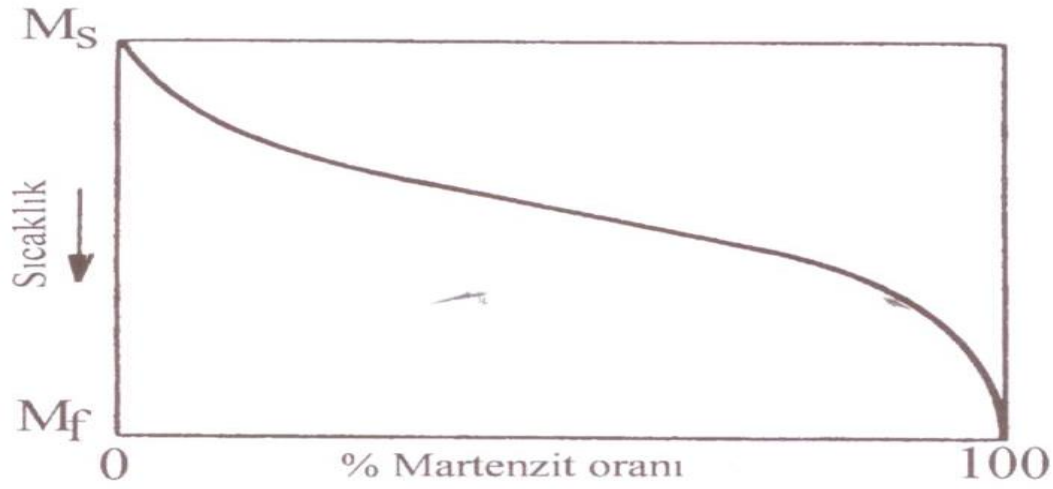
Martenzitik dönüşümün önemli özellikleri aşağıda verilmiştir.

a) Martenzitik dönüşüm difüzyonsuz olup, dönüşüm sırasında malzemenin kimyasal bileşiminde herhangi bir değişme olmaz. Bu dönüşüm sırasında, ostenit fazı ikili kayma mekanizmasıyla aniden kafes yapısını değiştirir.

b) Martenzitik dönüşüm yalnız soğuma sırasında meydana gelir ve soğuma engellenirse dönüşüm durur. Bu nedenle, söz konusu dönüşüm zamandan bağımsız olup, yalnız sıcaklığın azalmasına yani soğumaya bağlıdır. Bu tür dönüşüme “atermal dönüşüm” denilir. 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. Martenzitik dönüşümün başlangıç sıcaklığı M_s , bitiş sıcaklığı ise M_f harfleri ile gösterilir. Bir çelik parça, M_s 'nin ^{üstündeki} altındaki bir sıcaklıkta tutulursa martenzitik dönüşüm durur ve sıcaklık düşmedikçe dönüşüm devam etmez. Şekil 7.12'deki eğri, M_s ve M_f çizgileri arasında oluşan martenzitin yüzde oranının sıcaklığa göre değişimini göstermektedir.

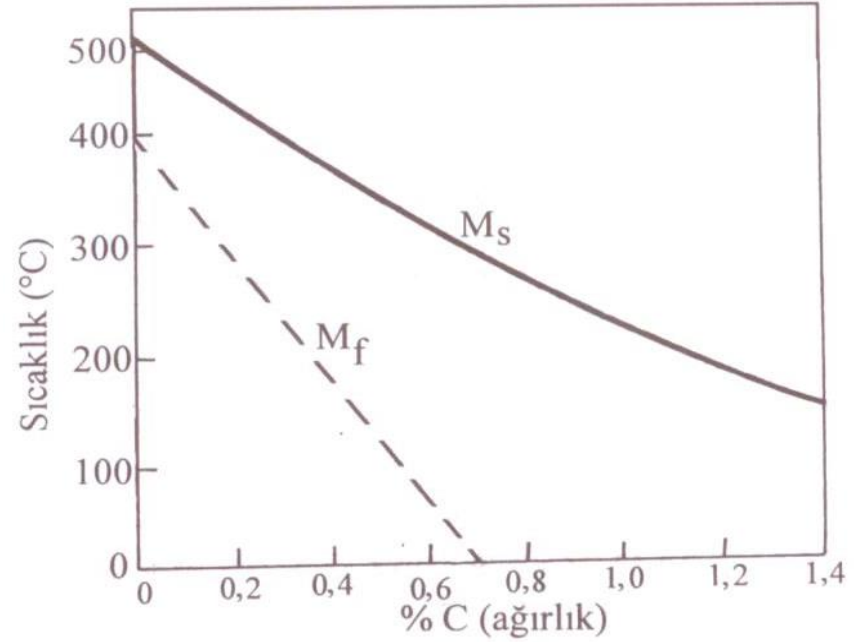
c) Soğuma hızını değiştirmekle, bir alaşımın ne M_s sıcaklığı değiştirilebilir ne de martenzitik dönüşümü engellenebilir. Başka bir deyişle; soğuma hızını değiştirmekle bir alaşımın M_s sıcaklığı değiştirilemediği gibi, martenzitik dönüşümü de engellenemez. Martenzitik dönüşüme ait sıcaklık aralığı alaşımın bir karakteristiği olup, soğuma hızının artırılması ile değiştirilemez. M_s sıcaklığı yalnız alaşımın kimyasal bileşimine bağlıdır. Çeliklerin M_s sıcaklığını hesaplamak için bazı bağıntılar geliştirilmiştir. Bütün alaşım elementlerinin ostenit içerisinde çözünmeleri durumunda geçerli olan bağıntı; $M_s (^{\circ}C) = 561 - (474 \times \%C) - (33 \times \%Mn) - (17 \times \%Ni) - (17 \times \%Cr) - (21 \times \%Mo)$, yüksek ve orta alaşımlı çelikler için kullanılan bağıntı ise $M_s (^{\circ}C) = 550 - (350 \times \%C) - (40 \times \%Mn) - (20 \times \%Cr) - (10 \times \%Mo) - (17 \times \%Ni) - (8 \times \%W) - (35 \times \%V)$ şeklinde yazılabilir. Karbon oranının M_s ve M_f sıcaklıklarına etkisi Şekil 7.13'de görülmektedir. M_f sıcaklığı genelde net olarak belirlenemediğinden kesikli çizgi biçiminde gösterilir.

M_{start}



M_{finish}

Şekil 7.12 Martenzit yüzde oranının sıcaklığa göre değişimi



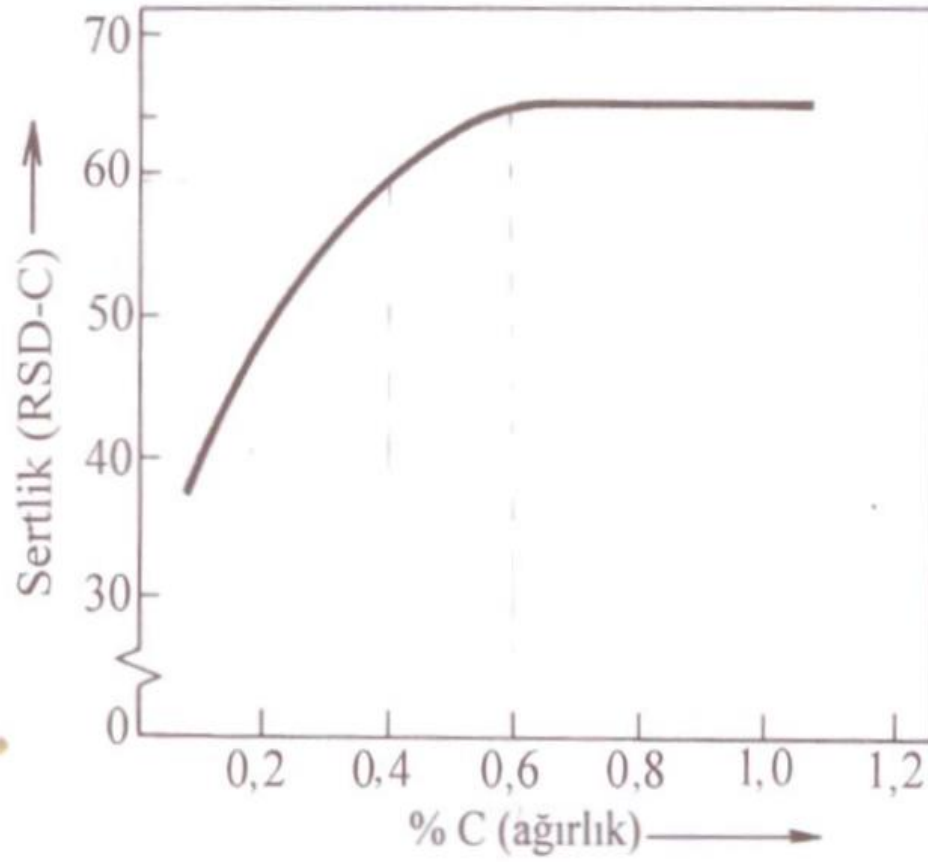
Şekil 7.13 Çeliklerde karbon oranının M_s ve M_f sıcaklıklarına etkisi

Teorik olarak ostenit tamamen martenzite dönüşemez, yani ostenit – martenzit dönüşümü hiç bir zaman tamamlanamaz ve çelik içerisinde düşük sıcaklıklarda bile çok düşük oranda da olsa kalıntı ostenit bulunur. Martenzit iğneleriyle çakışan düşük oranlardaki kalıntı ostenitin metalografik yöntemle belirlenmesi oldukça zordur. Bunun için, X-ışını ya da elektron difraksiyonu yöntemi uygulamak gerekir. Ancak, martenzitik dönüşümün tamamlanma sıcaklığını gösteren M_f çizgisi olabildiğince metalografik gözlemlerle belirlenir.

d) Martenzit, her ne kadar oda sıcaklığında veya buna yakın sıcaklıklarda ölçülemeyecek kadar uzun bir süre dönüşüme uğramadan kalabilirse de gerçekten kararlı bir faz değildir. Martenzitik yapı, kararsız ostenit fazı ile ferrit ve sementit karışımından oluşan kararlı yapı arasında bir geçiş fazı olarak kabul edilebilir.

e) Martenzitin en önemli özelliği, çok sert bir faz olmasıdır. Nitekim, çeliklerde sementitten sonra gelen en sert faz martenzittir. Yüksek sertlik değerleri, ancak yeterli oranda karbon içeren çeliklerde elde edilir. Başka bir deyişle; su verme işleminden sonra elde edilen sertlik değeri çeliklerin karbon oranına bağlıdır. Çeliklerde su verme işleminden sonra elde edilen en yüksek sertliğin karbon oranına göre değişimi Şekil 7.14'de görülmektedir.

Yukarıdaki diyagramdan görüldüğü gibi; su verilen çeliklerde elde edilen martenzitin sertliği başlangıçta artan karbon oranı ile hızlı bir şekilde artarak %0,4 C oranında yaklaşık 60 RSD-C değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra ise söz konusu eğrinin eğimi ya da sertliğin artış hızı gittikçe azalarak, %0,8 C oranında yaklaşık 65 RSD-C değerinde bir sertlik elde edilmektedir. Sertliğin artış hızındaki azalma, yüksek karbonlu çeliklerde kalıntı ostenit oluşma eğiliminin artmasından kaynaklanmaktadır. Martenzitin sertliğinin yüksek olması, martenzitik dönüşüm sırasında malzemenin kafes yapısında meydana gelen aşırı çarpılmadan kaynaklandığı bilinmektedir. Çünkü, martenzit katı çözeltisi çözebileceği orandan çok daha yüksek oranda karbon içermektedir. Bu aşırı doymuşluk durumu da kafes yapısının aşırı ölçüde çarpılmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak; su verilen veya martenzitik durumdaki alaşımsız bir çelikten elde edilebilecek en yüksek sertliğin, yalnız çeliğin karbon oranına bağlı olduğu söylenebilir.



Şekil 7.14 Su verilen karbon çeliklerinde elde edilen en yüksek sertliğin karbon oranına göre değişimi

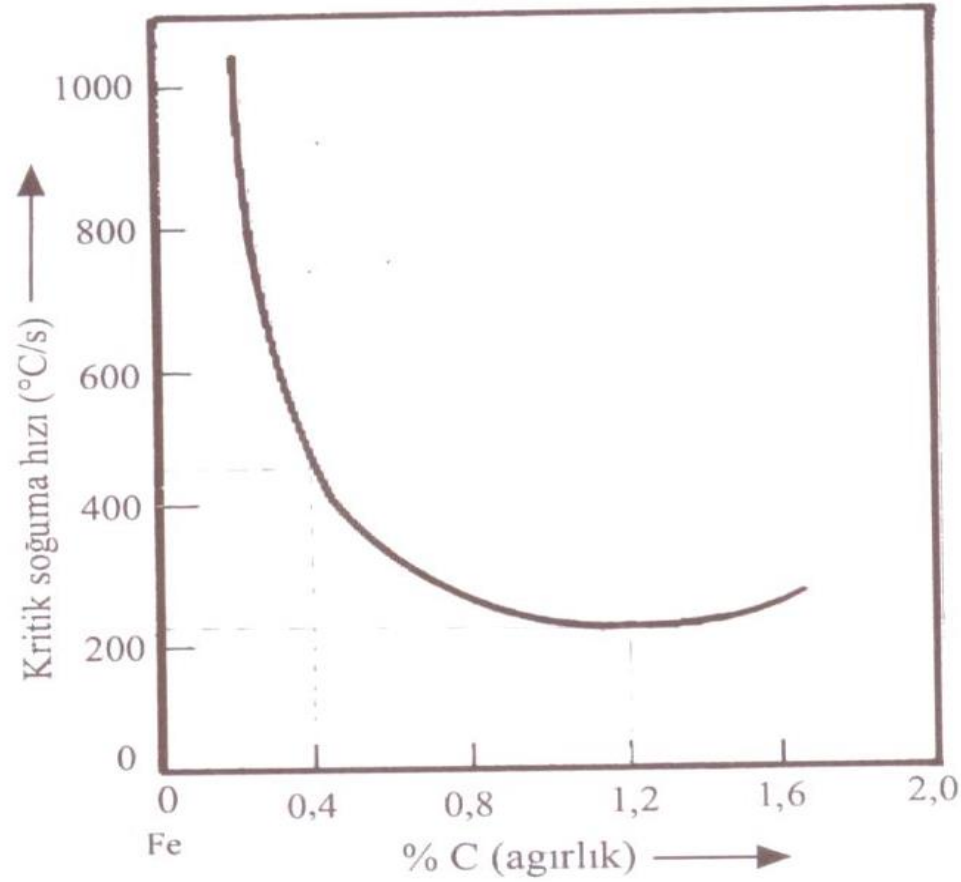
Martenzitik dönüşüm yalnız çeliklere has bir özellik değildir. Fe-Ni, Cu-Zn, Cu-Al ve Cu-Al-Zn gibi pek çok alaşım sisteminde de martenzitik dönüşüm meydana gelebilir.

7.6.2 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 oluşturmak için gerekli en düşük soğuma hızıdır. Çelikler için önemli bir kriter olan kritik soğuma hızı, kimyasal bileşim (karbon ve alaşım elementi oranı) ve ostenitin tane büyüklüğüne bağlıdır. Çeliklerde kritik soğuma hızının karbon oranı ile değişimini gösteren eğri Şekil 7.15'de verilmiştir.

Bu diyagramdan, düşük karbonlu çeliklerin kritik soğuma hızlarının çok yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, karbon oranı arttıkça kritik soğuma hızı hızlı bir şekilde azalmaktadır. Yaklaşık % 1,2 C oranında en düşük değerine ulaşan kritik soğuma hızı, yaklaşık % 1,4 C oranından sonra az da olsa bir artış göstermektedir.

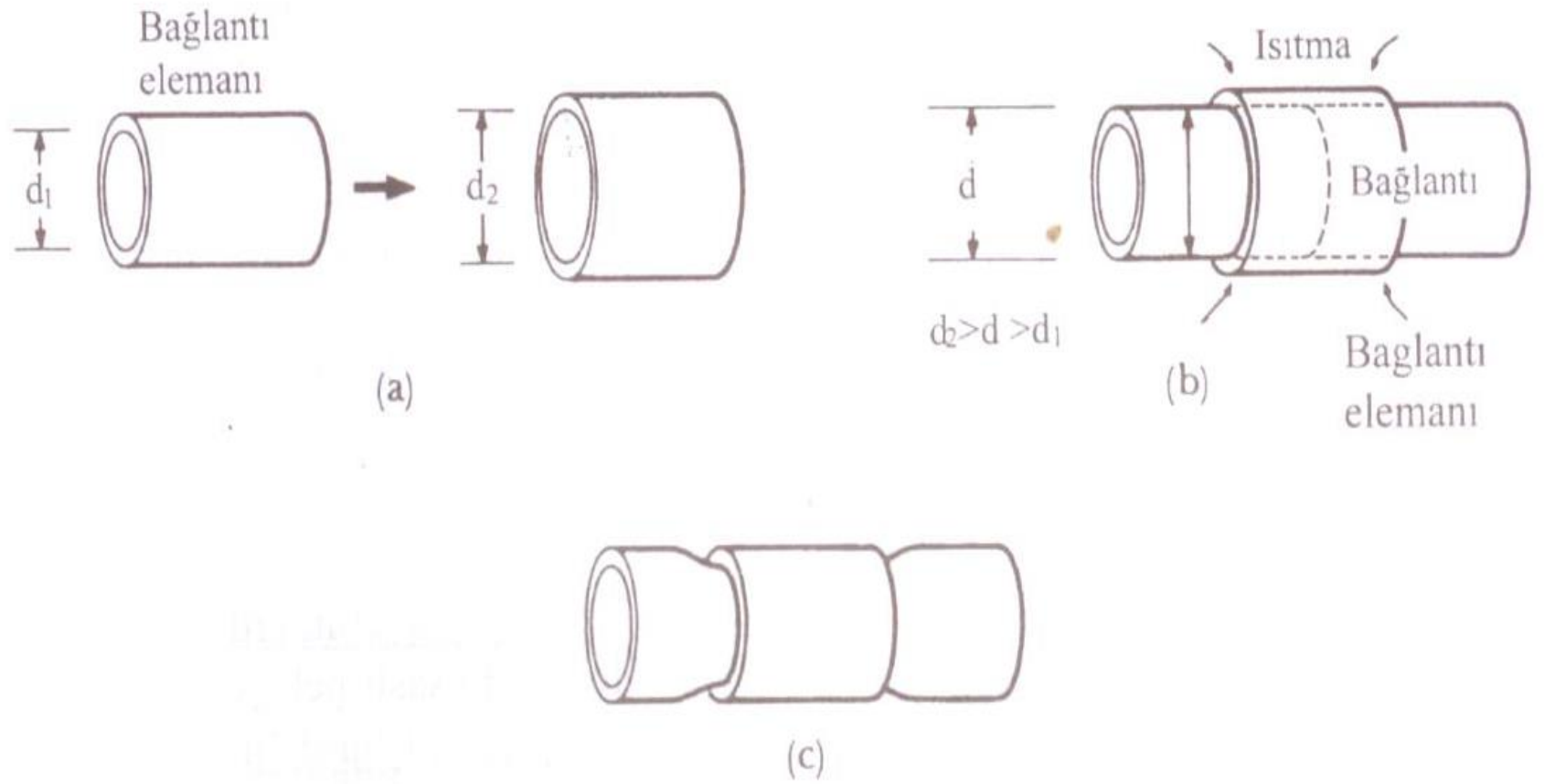
gösterilebilir, Şekil 7.16. Çapı genişletilen bağlantı elemanı borulara geçirildikten sonra ısıtılırsa ilk şekline geri dönmeye çalışır, yani çapı azalır. Bağlantı elemanında meydana gelen daralma nedeniyle birleştirilmek istenilen borular arasında kuvvetli bir bağlantı sağlanır.



Şekil 7.15 Çeliklerde kritik soğuma hızının karbon oranına göre değişimi

7.6.3 Hafızalı Martenzitik Alaşımlar

Martenzitik dönüşüme uğrayan alaşımların belirgin özelliklerden biri de bellek ya da hafızaya sahip olmalarıdır. NiTi50 alaşımı ile bakır esaslı pek çok alaşıma uygun termomekanik işlem uygulamak suretiyle martenzitik yapı oluşturulabilir. Hafızalı parça elde etmek için söz konusu alaşımlar martenzitik dönüşümden sonra ön şekil verme işlemine tabi tutulurlar. ²⁾ Daha sonra bu alaşımlar plastik şekil verme yöntemlerinden biriyle yeniden şekillendirilir. ³⁾ Ancak, ikinci kez şekillendirilen alaşımlar ısıtıldıklarında ilk veya orijinal şekillerine geri dönerler. Bu durum, söz konusu alaşımların ilk şekillerini hatırlaması olarak değerlendirilir ve bu nedenle bu alaşımlara hafızalı alaşımlar denir. Borularda kullanılan bağlantı elemanlarının davranışı, söz konusu martenzitik alaşımlarda meydana gelen bellek etkisinin ticari uygulaması olarak



Şekil 7.16 Boru bağlantısında hafızalı alaşım kullanımı; (a) hafızalı alaşımdan üretilen genişletilmiş bağlantı elemanı, (b) genişletilen bağlantı elemanının boruya geçirilmesi ve (c) ısıtılan elemanın orijinal çapına geri dönmeye çalışması yani daralması sonucunda bağlantının sağlanması

7.7 İzotermal Dönüşüm Diyagramları (ZSD veya TTT Diyagramları) zaman sıcaklık time temperature

İzotermal dönüşüm, sabit sıcaklıkta meydana gelen faz dönüşümü anlamına gelir. Demir-karbon denge diyagramı, denge dışı koşullar için geçerli olmadığından hızlı soğutulan çeliklerin incelenmesinde pek kullanılamaz. Ostenitin gerek dönüşüm sıcaklığının, gerekse dönüşüm süresinin oluşan dönüşüm ürünlerini ve sonuçta çeliğin özelliklerini büyük ölçüde etkilediği bilinmektedir. Eskiden beri bilinen bu gerçek, ancak 1930 yılında E.S. Davenport ve E.C. Bain tarafından yayınlanan bir araştırma makalesi sonucunda bilimsel bir esasa dayandırılmıştır. Ostenit, A_{c1} kritik sıcaklık çizgisinin altındaki sıcaklıklarda kararlı değildir. Ancak, ostenitin A_{c1} çizgisinin altındaki herhangi bir sıcaklıkta ne zaman dönüşmeye başlayacağını, dönüşümün ne kadar süre sonunda tamamlanacağını ve sonuçta hangi dönüşüm ürünlerinin oluşacağını bilmek gerekir.

İzotermal dönüşüm diyagramlarını anlamak için bu eğrilerin nasıl belirlendiğine bakmakta yarar vardır. Bunun en kolay yolu, iç yapısında ötektoid dışı fazlar bulunmayan ötektoid bileşimdeki ($\% 0,8 \text{ C}$) çeliğin izotermal dönüşümünün incelenmesiyle işe başlamaktır. İzotermal dönüşüm diyagramını belirlemek için uygulanan deneysel işlemler, aşağıda sırası ile verilmektedir.

a) Örnek hazırlama işlemi: Otektoid bileşime sahip çelik malzemeden alınan örnekler talaşlı işlemle hazırlanır.

b) Örnekler bir fırın içerisinde veya tuz banyosunda yaklaşık 775°C sıcaklıkta yeterli bir süre tutularak iç yapının tamamen ostenite dönüştürülmesi sağlanır. Buna ostenitleştirme işlemi denir.

c) Ostenitleştirme işleminden sonra örnekler, A_{c1} sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta (örneğin; 700°C) tutulan ergimiş tuz veya yağ banyosuna daldırılır.

d) Bu banyoda belirli süreler (örneğin; 5, 10, 20, 40, 80, 100 s) tutulan örnekler soğuk suda veya tuzlu suda su verilir.

e) Su verilen örneklerin hem sertliği ölçülür, hem de iç yapıları metalografik yöntemlerle incelenir.

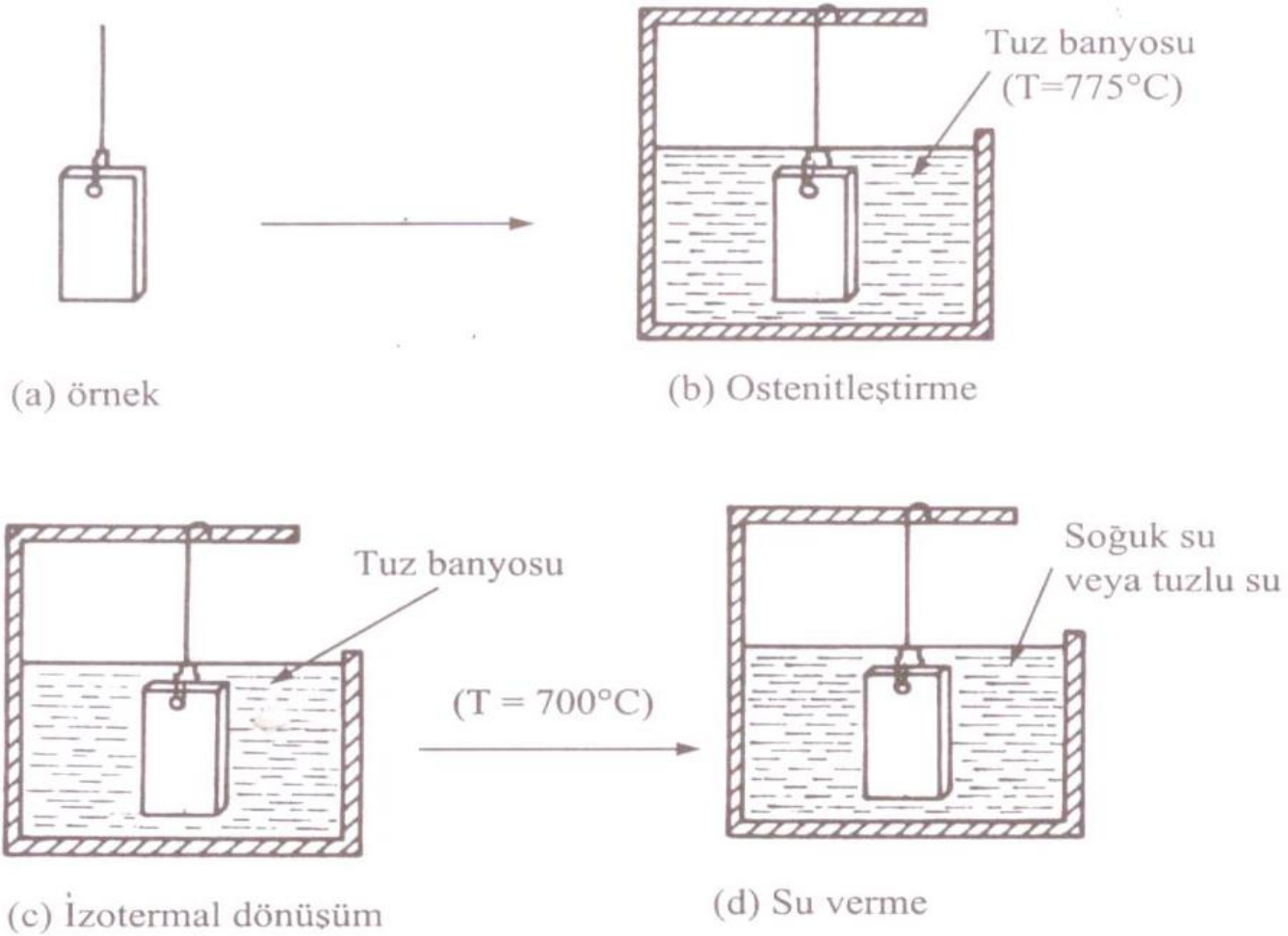
f) Yukarıdaki işlemler A_{c1} çizgisinin altındaki farklı dönüşüm sıcaklıklarında tekrarlanarak izotermal dönüşüm diyagramına ait eğrilerin belirlenmesi için yeterli sayıda veri elde edilir.

Söz konusu işlemlerin şematik gösterimi Şekil 7.17'de verilmiştir. Eğer örneklere, banyo içerisinde izotermal dönüşüm için gerekli süreden daha kısa bir süre sonunda su verilirse, tamamen martenzitik bir yapı elde edilir ve bu durum su verme sertleştirmesi anlamına gelir.

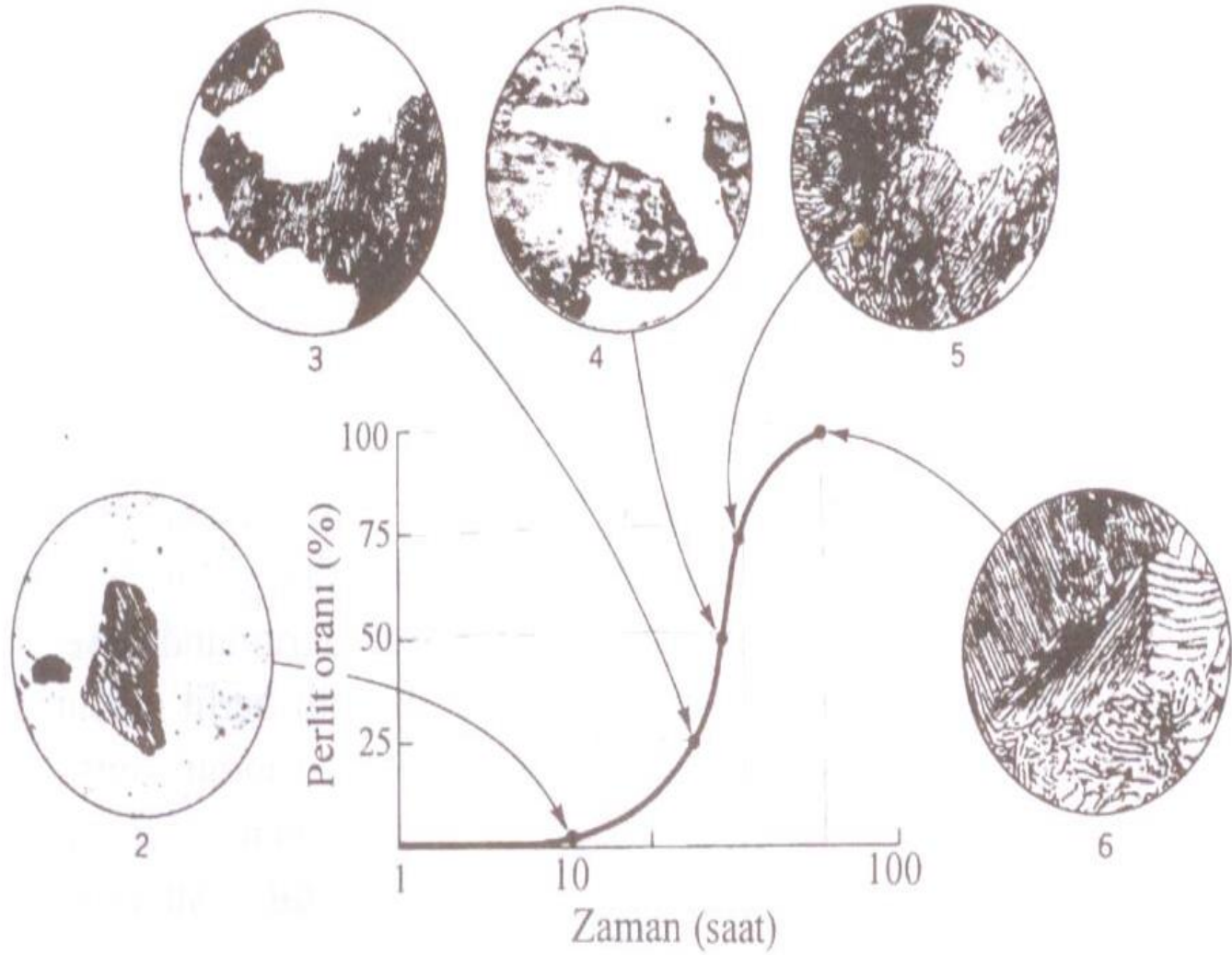
700°C sıcaklıkta yapılan deneyde, dönüşüm başlamadan önce örneğe su verildiğinde tamamen veya %100 martenzitik bir iç yapı elde edilir. Aynı sıcaklıktaki dönüşümün başlangıç aşamasında örneğe su verilmesi durumunda ise, martenzitik matris içerisinde küçük alanlar halinde yer alan kaba lamelli perlit oluşur. Bu yapının sertliği, doğrudan su verme ile elde edilen martenzitik yapının sertliğinden daha düşüktür. Dönüşüm süresi ilerledikçe, oluşan perlitin oranı artar ve dönüşümün sonunda kaba lamellerden oluşan perlitik bir iç yapı elde edilir. Su verme işleminden sonra söz konusu perlitik yapı değişmez.

Şekil 7.18'de % 0,80 C içeren ötektoid bileşimdeki çeliğin 700°C sıcaklıktaki ostenit-perlit dönüşümü için tipik bir izotermal dönüşüm eğrisi ile bu dönüşüm sırasında oluşan yapıların görünümü verilmiştir. Bu şekildeki eğriden; ostenitin perlite dönüşüm hızının doğrusal olmayıp, zamanla değiştiği görülmektedir. Nitekim, başlangıçta çok

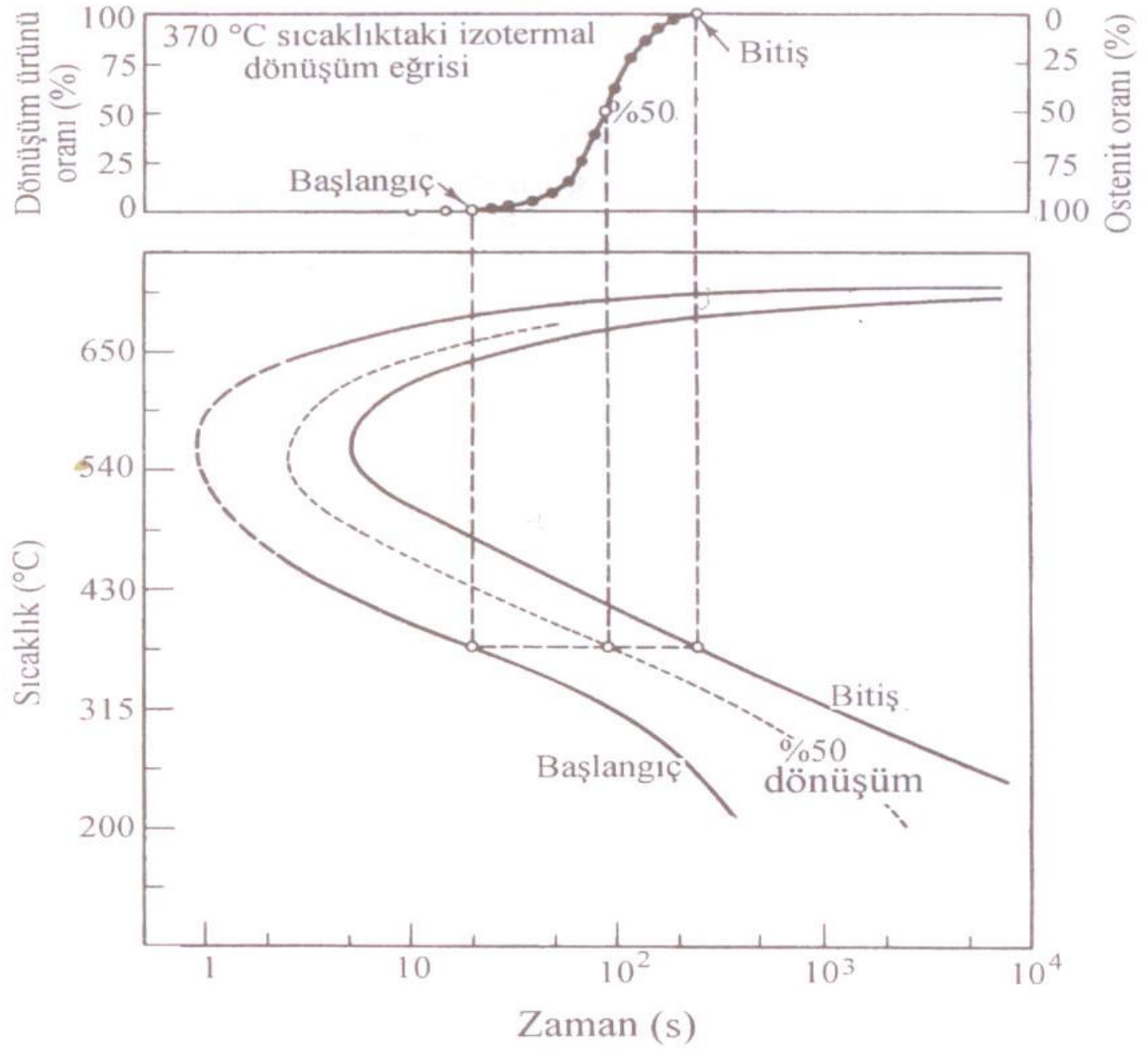
düşük olan dönüşüm hızı, belirli bir süre sonunda aniden yükselmekte ve dönüşümün sonuna doğru tekrar azalmaktadır. İzotermal dönüşüm diyagramının çıkarılmasını gösteren diyagram Şekil 7.19'da verilmiştir.



Şekil 7.17 İzotermal dönüşüm diyagramının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışma aşamaları



Şekil 7.18 %0,80 C içeren ötektoid çelikte 700°C sıcaklıkta meydana gelen ostenit-perlit dönüşümüne ait izotermal dönüşüm eğrisi ile dönüşümün değişik aşamalarında oluşan yapıların görünümü



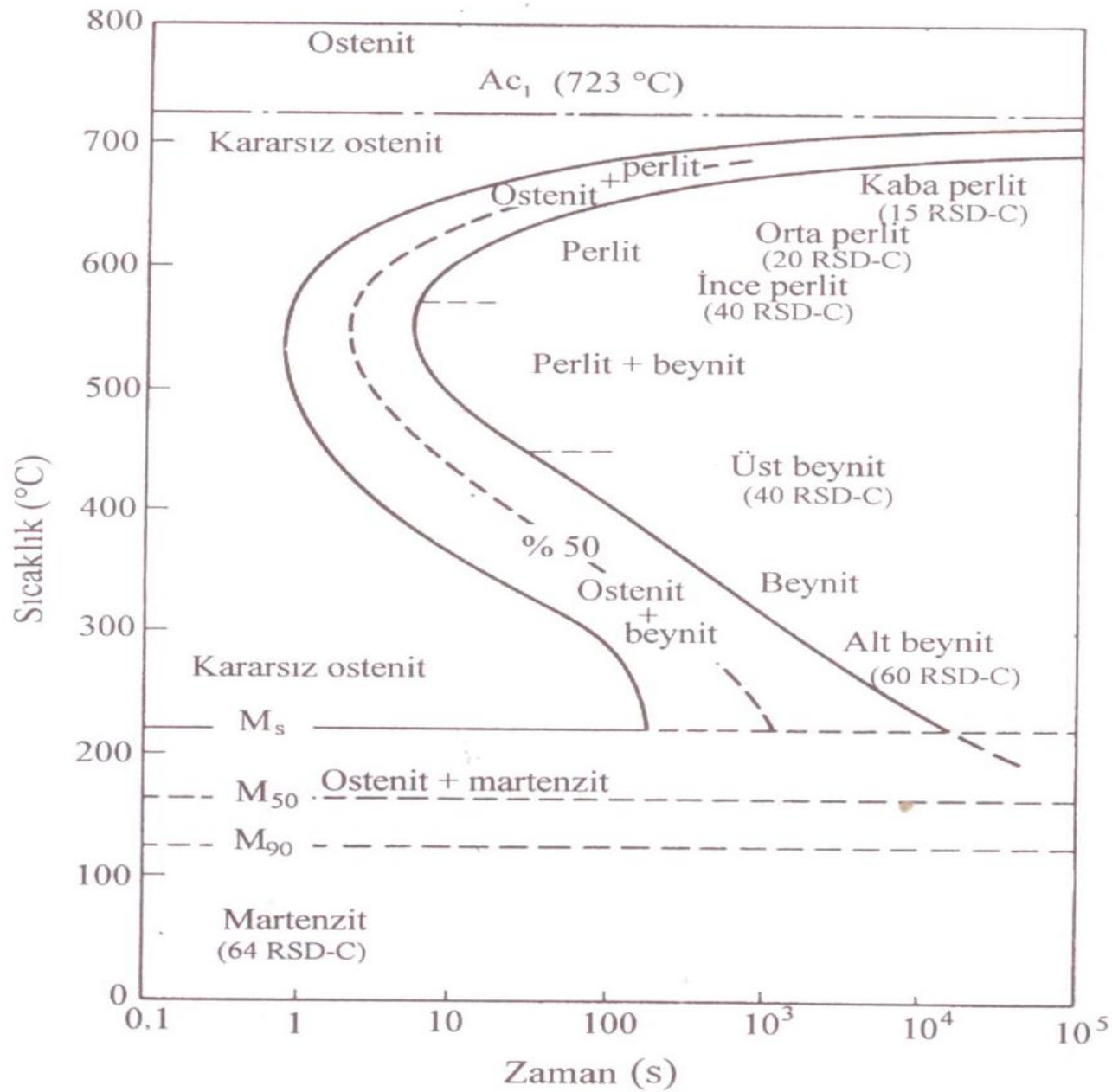
Şekil 7.19 Ötektoid bileşimdeki (%0,8C) çeliğin izotermal dönüşüm diyagramının çıkarılışı

Bu deneyler sonucunda, 700°C sıcaklıktaki izotermal dönüşüm için iki önemli veri elde edilir. Bunlardan biri dönüşümün başlama noktası, diğeri ise dönüşümün tamamlanma veya bitiş noktasıdır. A_{c1} kritik sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda aynı deneyler yapılarak, elde edilen noktalar birleştirilirse dönüşümün başlama ve bitişini gösteren zaman-sıcaklık dönüşüm (ZSD veya TTT) eğrileri elde edilir. Ayrıca, değişik sıcaklıklarda %50'lik dönüşüm oranları için gerekli zamanlar belirlenerek ZSD diyagramının başlama ve bitiş eğrileri arasında yer alan %50'lik izotermal dönüşüm eğrisi de çizilebilir. Ötektoid bileşimdeki çeliğin ZSD diyagramı ve dönüşüm ürünleri Şekil 7.20'de görülmektedir.

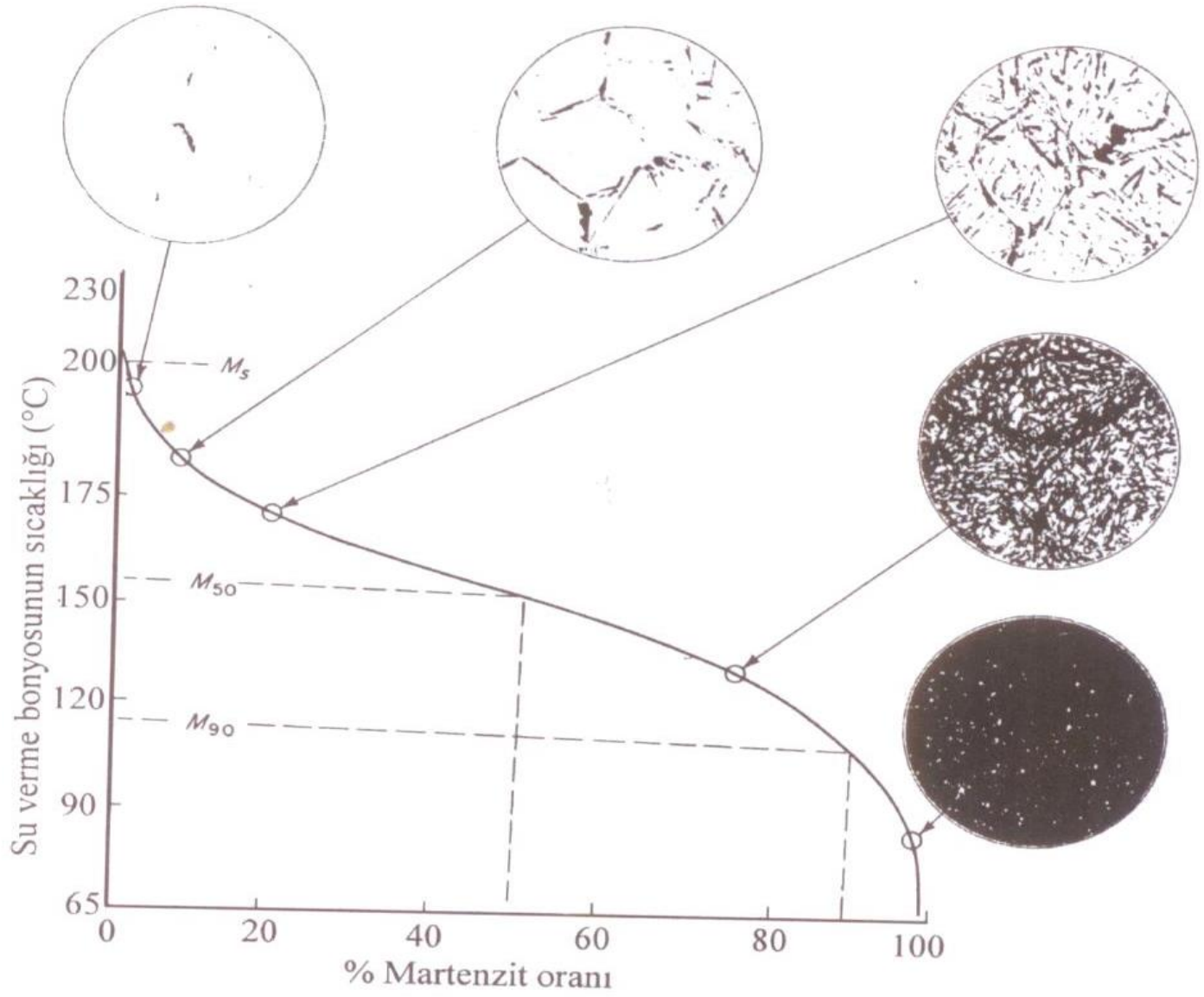
M_s sıcaklığı yatay bir çizgi olarak gösterilir. Bazı diyagramlarda, martenzit oluşumu doğrudan metalografik yöntemlerle belirlenir. Bazı durumlarda ise martenzitik dönüşümün başlama sıcaklıkları ampirik formüller yardımı ile hesaplanır. Martenzit oluşumu ya da martenzitik dönüşümün aşamalarını metalografik yöntemle incelemek için, çelik malzemedan alınan örnek ostenitleştirildikten sonra M_s çizgisinin altındaki bir sıcaklığa (örneğin 180°C) kadar aniden soğutulur. Bu hızlı soğuma sonucunda, ostenitin yaklaşık %20'si martenzite dönüşür. Eğer bu örnek tekrar M_s ile A_{c1} çizgileri arasındaki bir sıcaklığa (örneğin 425°C) kadar ısıtılırsa oluşan martenzit kararır, ostenit ise değişmeden kalır. Bu örneğe yeniden su verildiğinde, %20 oranında kara martenzit

ile %80 oranında taze veya beyaz martenzit içeren bir iç yapı elde edilir. Böylece, 180°C sıcaklıkta çelik içerisinde oluşan martenzit oranı metalografik yöntemle belirlenebilir. Yukarıda açıklanan ısıtıl işlem yöntemiyle belirlenen ostenit-martenzit dönüşümünü gösteren tipik bir örnek Şekil 7.21'de verilmiştir.

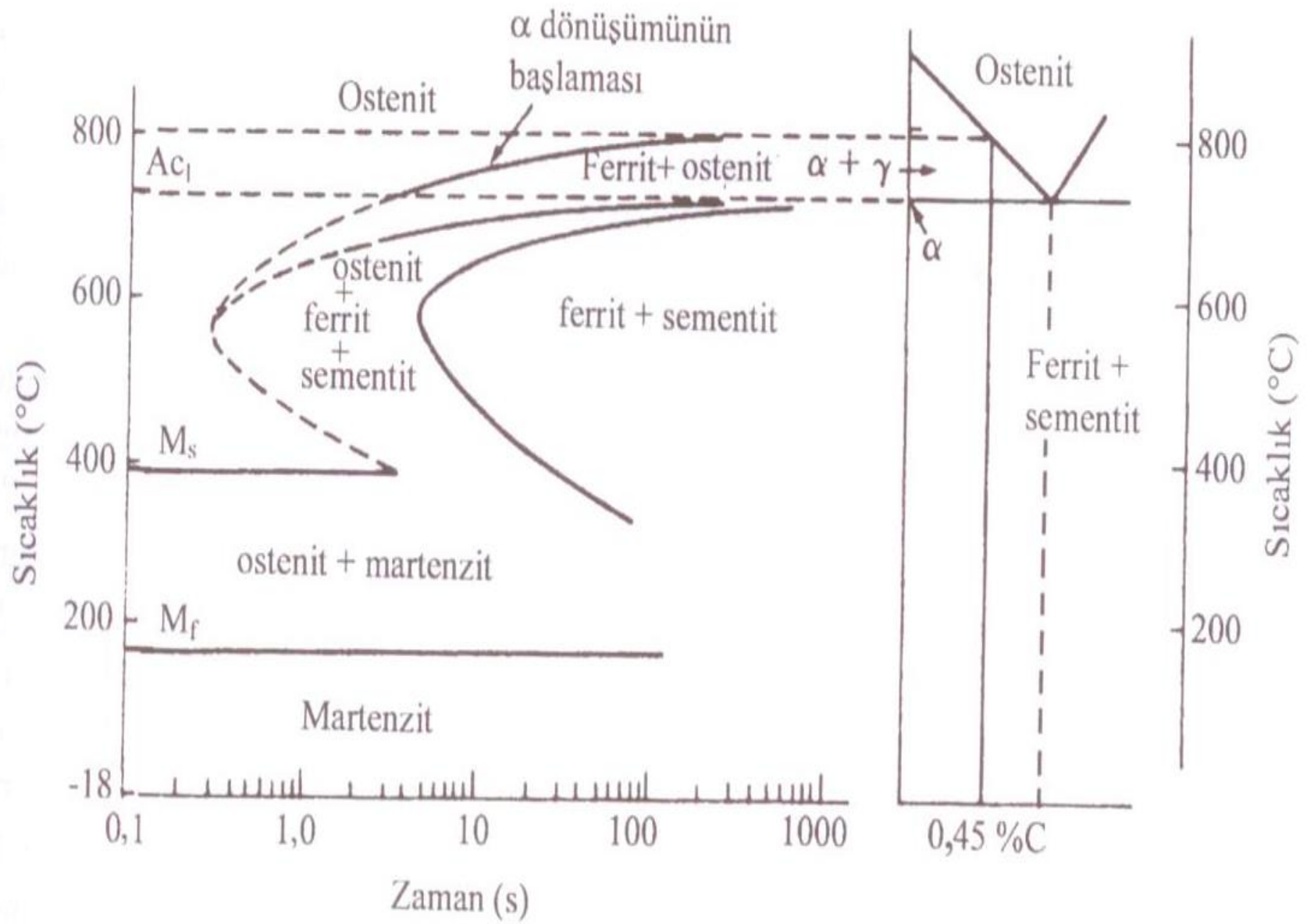
Ötektoid dışı çeliklerin ZSD diyagramları ötektoid bileşimdeki çeliğin söz konusu diyagramından oldukça farklıdır. Bu durum gerek ötektoid altı, gerekse ötektoid üstü çeliklerin ZSD diyagramlarından görülür. % 0,45 C içeren ötektoid altı çeliğin ZSD diyagramı Şekil 7.22'de, % 1,2 C içeren ötektoid üstü çeliğin ZSD diyagramı ise Şekil 7.23'de görülmektedir.



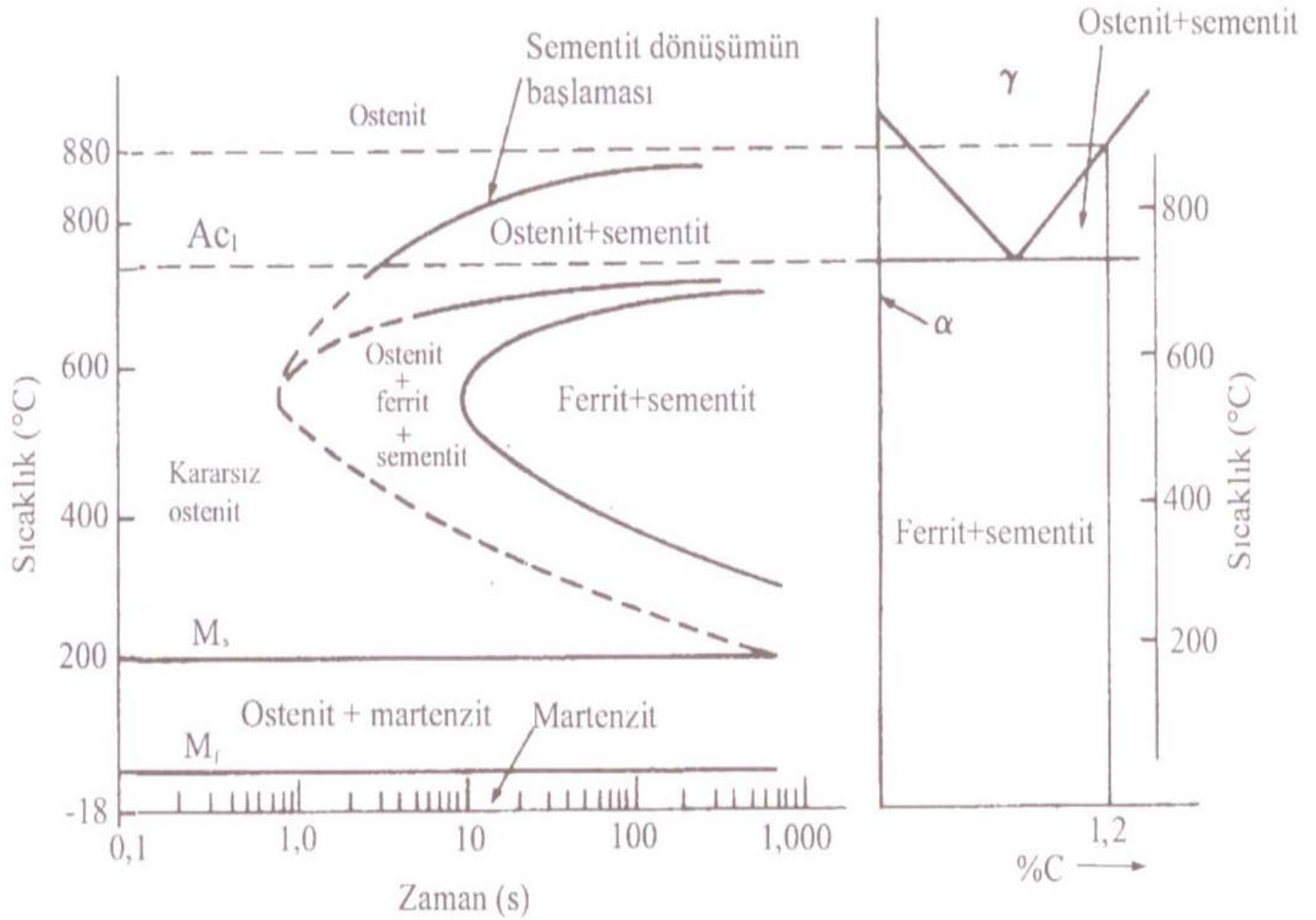
Şekil 7.20 Ötektoid bileşimdeki çeliğin ZSD diyagramı ve bu diyagram üzerinde izotermal dönüşüm ürünlerinin gösterimi



Şekil 7.21 Ostenit- martenzit dönüşümünü gösteren tipik bir dönüşüm eğrisi ile değişik sıcaklıklarda oluşan yapıların görünümü. Bu yapılardaki beyaz bölgeler ostenit, koyu bölgeler ise martenzit fazını göstermektedir.



Şekil 7.22 % 0,45 C içeren ötektoid altı çeliğin ZSD diyagramı



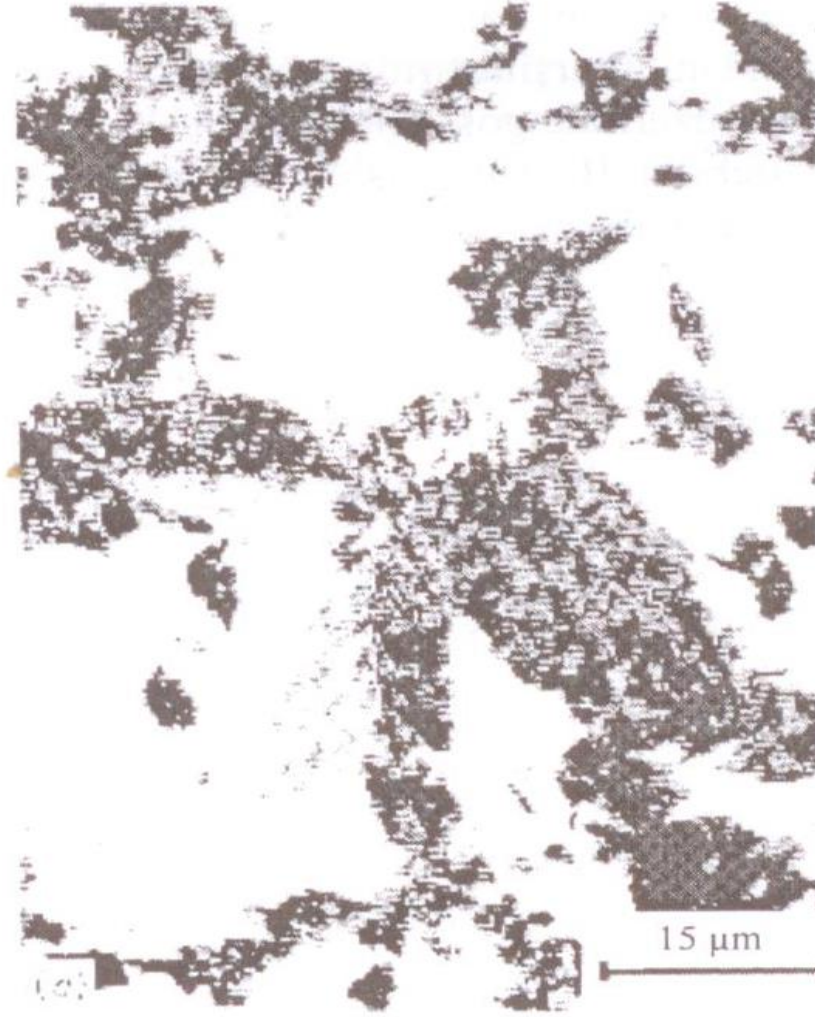
Şekil 7.23 % 1,20 C içeren ötektoid üstü çeliğin ZSD diyagramı

7.8 Perlit ve Beynit Dönüşümü

Ötektoid bileşimdeki çeliğin ZSD diyagramına tekrar dönülürse, diyagramın burun kısmının üstündeki bölgede oluşan dönüşüm ürününün perlit olduğu açıkça görülür. Perlit, birbiri üzerine dizilmiş ferrit ve sementit katmanlarından oluşan lamelli bir yapıya sahiptir. İzotermal dönüşüm sonucunda oluşan perlitin inceliği (lameller arası uzaklık) ve sertliği dönüşüm sıcaklığına bağlıdır. Örneğin; Ac_1 çizgisinin hemen altındaki bir sıcaklıkta oluşan yapı kaba perlit olup, bu yapının sertliği 15 RSD-C civarındadır. İzotermal dönüşüm sıcaklığı azaldıkça perlit incelir, başka bir deyişle ferrit ve sementit katmanları arasındaki uzaklık azalır ve yapının sertliği artar. Sıcaklığın azalması ile perlitte meydana gelen incelme, ferrit ve sementit tabakalarının ışık mikroskobu ile ayırt edilemeyecek bir görünüme sahip olmalarına neden olur. Dönüşüm sıcaklığı azaldıkça, perlitin sertliği artar ve söz konusu sertlik ZSD diyagramının burun bölgesinde en yüksek değerine ulaşır. Sertlik artışı, yumuşak ferrit matrisi içerisindeki sert sementit tabakaları arasındaki uzaklığın azalması nedeniyle meydana gelir.

ZSD diyagramının burnu ile M_s sıcaklık çizgisi arasında yer alan bölgede, dağıldığında siyah gözüken farklı bir yapı meydana gelir. Ferrit- sementit karışımından oluşan bu yapıya ilk bulan kişi olan E.C.Bain' in adına atfen "beynit" adı verilmiştir. 500°C dolayındaki sıcaklıklarda bu yapı perlite benzeyen bir görünüm sergiler ve söz konusu yapıya üst beynit veya tüylü beynit adı verilir. Bu yapı Şekil 7.24'de görülmektedir. Düşük dönüşüm sıcaklıklarında elde edilen beynit ise iğneli martenzitik yapıyı andırır ve buna da alt beynit veya iğneli beynit adı verilir, Şekil 7.25. Beynitin sertliği 40 ile 60 RSD-C arasında değişir. Üst beynitin sertliği yaklaşık 40 RSD-C olup, alt beynitin sertliği ise 60 RSD-C civarındadır. Perlitte olduğu gibi, dönüşüm sıcaklığı düştükçe sementit tabakaları arasındaki uzaklık azaldığından, beynitin sertliği artar. Beynitin sertliği, perlitin sertliği ile martenzitin sertliği arasında yer alır,

Sonuç olarak beynit; ostenitin izotermal dönüşümü sonucunda perlit bölgesinin alt sınırı ile M_s sıcaklık çizgisi arasındaki bölgede meydana gelen ve ferrit ile sementit fazlarından oluşan kararsız dengeli (metastabil) bir yapıdır.



Şekil 7.24 Martenzitik bir matris içerisinde yer alan üst beynitin (tüylü beynit) görünümü



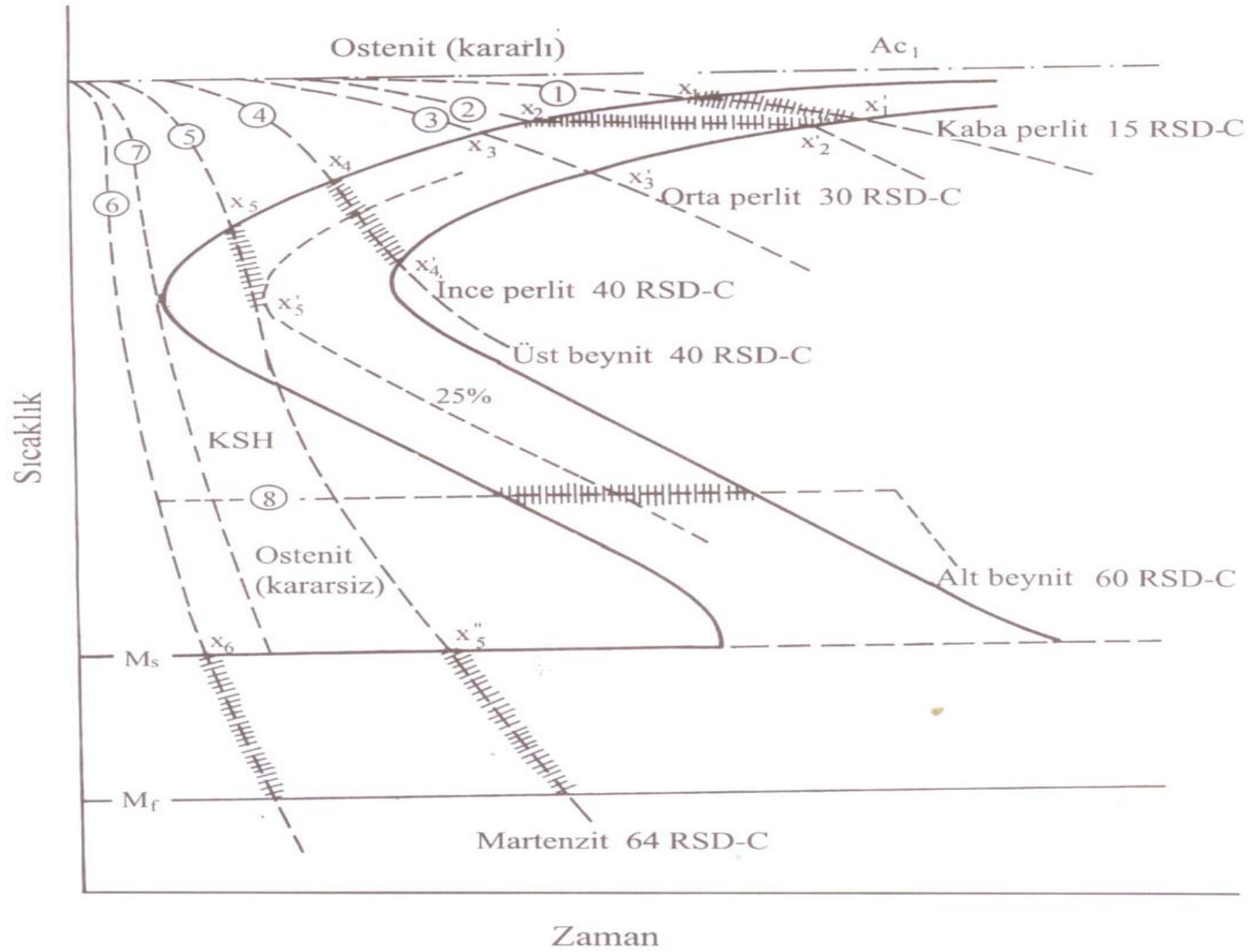
Şekil 7.25 Martenzitik bir matris içerisinde yer alan alt beynitin (iğneli beynit) görünümü

7.9 Soğuma Eğrileri ve İzotermal Dönüşüm Diyagramı

Soğuma eğrisi, malzeme sıcaklığının soğuma süresine göre değişimini gösterir. Bu nedenle söz konusu eğriler, değişik soğuma sürelerinde malzemenin sıcaklığı ölçülerek çizilir. Soğuma eğrisinin koordinatları ile izotermal dönüşüm diyagramının koordinatları aynı olduğundan, karşılaştırma yapmak amacıyla soğuma eğrileri izotermal dönüşüm diyagramı üzerinde gösterilebilir. Başka bir deyişle, soğuma eğrileri ZSD diyagramı üzerine çizilebilir. Bazı ısı işlemlere ait soğuma eğrilerinin, ötektoid bileşimindeki çeliğin ZSD diyagramı üzerindeki çizimi Şekil 7.26'da görülmektedir.

Buradaki 1 numaralı eğri, yumuşatma tavına ait tipik bir soğuma eğrisini göstermektedir. Diyagramdan görüldüğü gibi, çeliğin yapısı uzun bir süre ostenit olarak

kalmaktadır. Dönüşüm, soğuma eğrisinin ZSD diyagramının ilk veya başlangıç eğrisini kestiği X_1 noktasında başlar. Bu sıcaklıktaki dönüşüm ürünü kaba perlit olup, dönüşüm soğuma eğrisinin ZSD diyagramının bitiş eğrisini kestiği X'_1 noktasında tamamlanır. Dönüşümün başlama ve bitiş sıcaklıkları arasında çok az bir fark olduğundan, başlangıçta oluşan perlit ile en son oluşan perlit arasında lamel aralığı bakımından çok az bir fark vardır. Soğuma sonucunda elde edilen bütün dönüşüm ürünü, sertliği düşük olan kaba perlitten oluşur. X'_1 noktasından sonraki soğuma hızının, çeliğin yapı ve özelliklerine herhangi bir etkisi yoktur. Yani, X'_1 noktasından sonra çelik malzemenin soğuma hızı ne olursa olsun, yapı ve özellikleri değişmez. Bu husus, ısıtma işlem uygulayan endüstriyel şirketler için oldukça önemlidir. Çünkü, yüksek sıcaklıklarda dönüşüm tamamlandıktan sonra çelik parçalar fırından alınarak havada soğutulabilir. Bu işlem fırında soğutmaya oranla, daha az zaman aldığından bazı ekonomik avantajlar sağlar.



Şekil 7.26 Ötektoid bileşimdeki çeliğin ZSD diyagramı üzerinde soğuma eğrilerinin gösterimi

Izotermal veya salınımlı tavlama işlemini gösteren 2 numaralı soğuma eğrisi, doğrudan izotermal dönüşüm diyagramından çıkarılmıştır. Bu işlemde, malzeme A_c kritik sıcaklık çizgisinden, ZSD diyagramının ilk eğrisi üzerinde önceden belirlenen bir sıcaklığa kadar aniden soğutulur ve o sıcaklıkta dönüşüm tamamlanıncaya kadar bekletilir. Bu işlem sayesinde, geleneksel tavlama işleminin aksine, malzemede homojen bir yapı ve yüksek sertlik elde edilir. Diğer taraftan, söz konusu tavlama işlemi geleneksel tavlama işlemine göre daha az zaman alır.

Üç (3) numaralı soğuma eğrisi ise yumuşatma işlemindeki soğumadan daha hızlı bir soğumayı göstermekte ve normalizasyon tavlı için tipik bir soğuma eğrisini temsil etmektedir. Diyagramdan görüldüğü gibi, X_3 noktasında kaba perlit oluşumu ile başlayan dönüşüm, yumuşatma tavına göre daha kısa sürede tamamlanmaktadır. Söz konusu dönüşüm X'_3 noktasında orta büyüklükteki perlit oluşumu ile sona erer. X_3 ile X'_3 noktaları arasındaki sıcaklık farkı, X_1 ile X'_1 noktaları arasındaki sıcaklık farkından daha fazla olduğundan, normalize edilen çeliğin perlit yapısı, tam yumuşatma tavına tabi tutulan çeliğin perlitik yapısından farklıdır. Şöyle ki, normalize edilen çeliğin perlit yapısının lamelleri arasında daha büyük farklılık meydana gelmekte ve söz konusu yapı daha az oranda kaba perlit içermektedir.

Dört (4) numaralı soğuma eğrisi, yağda su verme işlemi sırasındaki tipik bir soğumayı göstermekte olup, sonuçta ince ve orta büyüklükteki perlitten oluşan bir yapı elde edilir. Beş (5) numaralı soğuma eğrisi, orta hızlı soğumayı gösterir ve ince perlite dönüşme olayı nispeten kısa bir süre sonunda X_5 noktasında başlar. İnce perlite dönüşme işlemi, soğuma eğrisi %25'lik dönüşüm eğrisine X'_5 noktasında teğet oluncaya kadar devam eder. Bu sıcaklığın altında, soğuma eğrisi boyunca dönüşüm oranı azalır. Yani, soğuma eğrisi azalan dönüşüm oranı yönünde ilerler. Soğuma sırasında perlit ostenite dönüşemeyeceğinden, X'_5 noktasında dönüşüm durur. Bu noktada ostenit tanelerinin sınırlarında %25 oranında ince perlit bulunur. Bu yapı, M_s sıcaklık çizgisi üzerindeki X''_5 noktasına kadar değişmez. X''_5 noktasında, yapıdaki ostenit martenzite dönüşür. Oda sıcaklığında elde edilen iç yapıda ise %75 oranında martenzit ile %25 oranında perlit bulunur. Perlit, daha çok dönüşüm öncesi yapıda bulunan östenitin tane sınırlarında yer alır. Altı (6) numaralı soğuma eğrisi, tipik bir su verme işlemi sırasındaki soğumayı gösterir. Bu durumda soğuma, ZSD diyagramının burun bölgesinde dönüşüme meydan vermeyecek kadar hızlıdır. Yapı, M_s çizgisi üzerindeki X_6 noktasına kadar ostenit olarak kalır. M_s ve M_f çizgileri arasında, ostenitik yapı martenzite dönüşür. Sonuçta, yüksek sertliğe sahip, tamamen martenzitik bir iç yapı elde edilir.

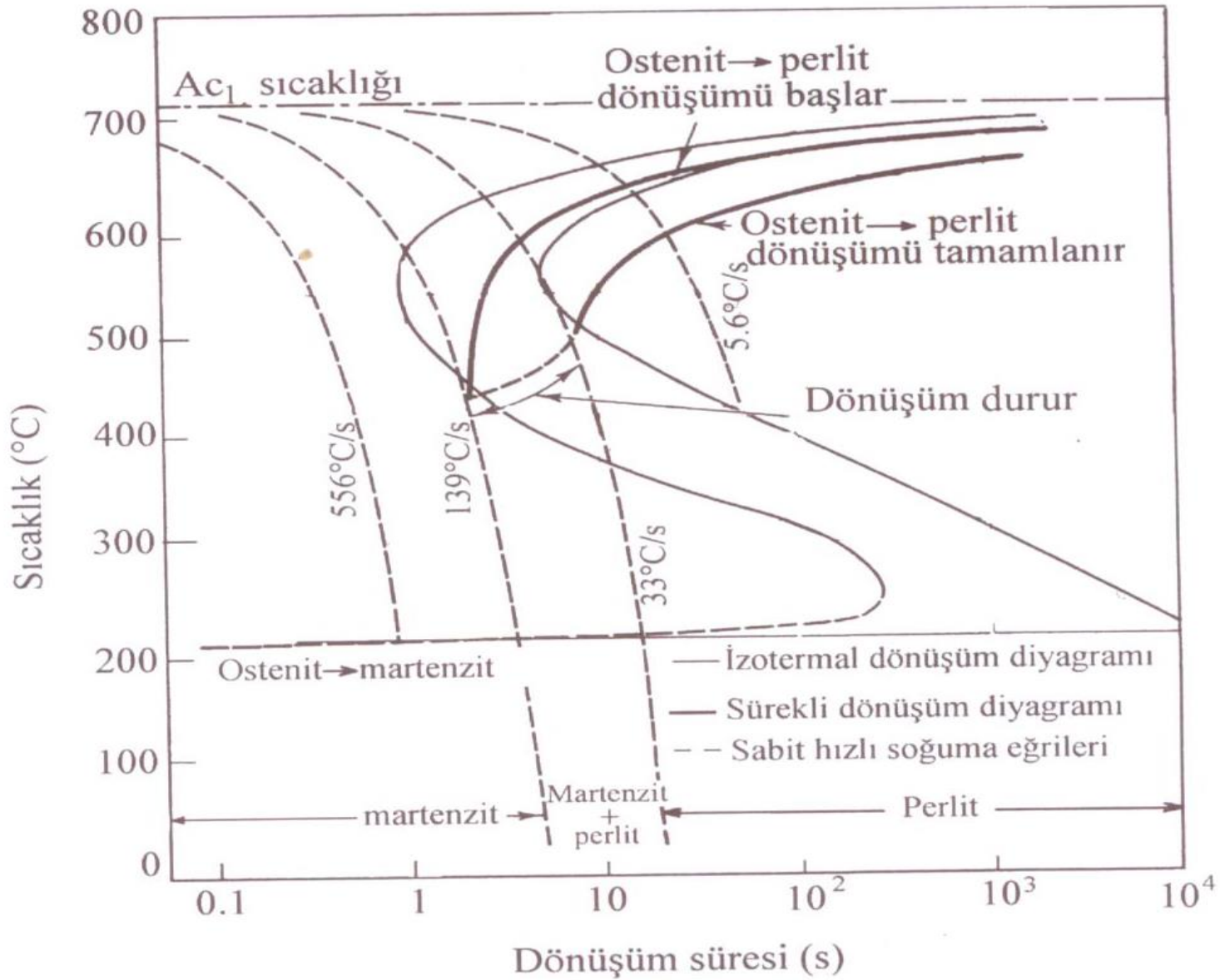
Tamamen martenzitik bir yapı elde etmek için ZSD diyagramının burun bölgesindeki dönüşümü önlemek gerekir. Bu nedenle buruna teğet olan yedi (7) numaralı soğuma eğrisine, bu çeliğin kritik soğuma eğrisi denilir ve bu eğrinin eğimi kritik soğuma hızını gösterir. Kritik soğuma hızından daha düşük soğuma hızlarını gösteren soğuma eğrileri burun bölgesinin üstündeki dönüşüm eğrisini keser ve bu nedenle kritik soğuma hızından daha düşük hızlarda soğutulan çeliklerde martenzitten daha yumuşak dönüşüm ürünleri oluşur. Kritik soğuma hızından daha yüksek hızlarda soğutulan çeliklerde ise tamamen martenzitten oluşan bir yapı elde edilir. Çelikler, bazen kritik soğuma hızlarına göre de karşılaştırılabilir.

Şekil 7.26'daki diyagramdan görüldüğü gibi; sürekli soğma sonucunda çelik malzemelerde %100 oranında perlit veya martenzit oluşurken, %100 oranında beynit oluşması mümkün değildir. Eğer çelik, ostenitleştirme işleminden sonra kritik soğuma hızından daha yüksek bir hızla soğutulup, M_s çizgisinin üzerindeki bir sıcaklıkta bütün dönüşümler tamamlanıncaya kadar tutulursa tamamen beynitik bir yapı elde edilir. Şekil 7.26'daki 6 ve 8 numaralı soğuma eğrileri bu durumu göstermektedir. Buradan; tamamen beynitik yapı elde edebilmek için izotermal dönüşümün gerekli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, sürekli soğutulan çeliklerde çok düşük oranlarda beynit bulunur.

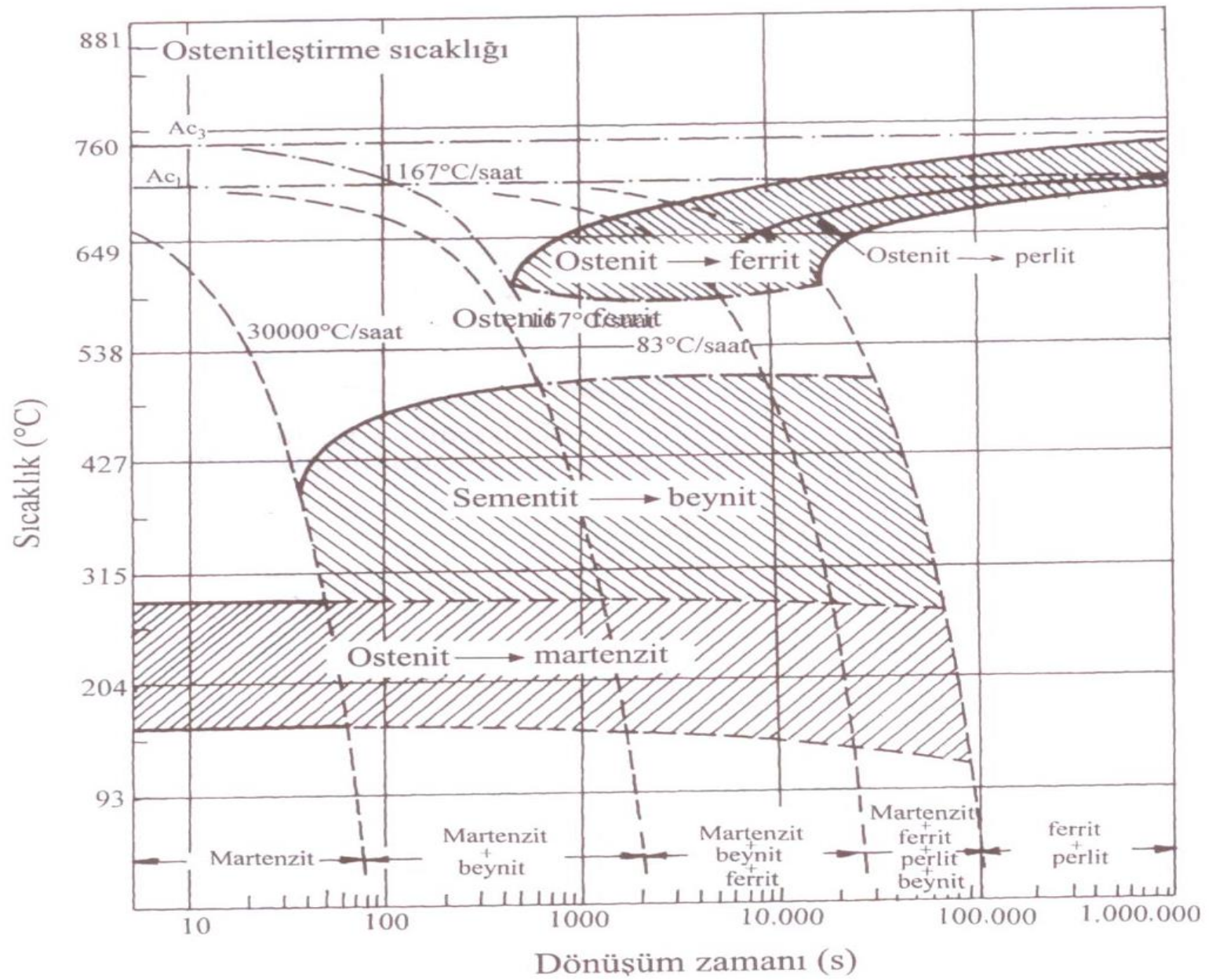
7.10 Sürekli Soğuma Sırasındaki Dönüşüm

Teorik olarak, soğuma hızlarını gösteren eğriler bir önceki bölümde açıklandığı gibi, izotermal dönüşüm diyagramına ait ZSD eğrileriyle çakışmazlar. Çünkü; ZSD diyagramı sabit sıcaklıktaki ostenitik dönüşümün zaman-sıcaklık ilişkisini gösterir. Ancak, ısıt işlemlerin çoğu sürekli soğuma sırasında meydana gelen dönüşümlerle ilgilidir. Yani, ısıt işlemlerin çoğunda faz dönüşümü sürekli soğuma sırasında meydana gelir. İzotermal dönüşüm diyagramından, sürekli soğuma sırasında meydana gelen dönüşümleri gösteren başka bir diyagram çıkarmak mümkündür. Bu diyagrama, sürekli soğuma-dönüşüm (S-D) diyagramı adı verilir. Şekil 7.27’de, ötektoid bileşime sahip çeliğe ait ZSD diyagramı üzerine çizilen S-D diyagramı görülmektedir.

ZSD diyagramı, S-D diyagramına ait eğrilerin konumuna göre incelendiğinde; sürekli soğuma etkisi ile burun kısmının aşağıya ve sağa doğru kaydığı görülür. S-D diyagramının burnuna teğet olan eğrilerden, kritik soğuma hızının $139\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ olduğu görülmektedir. Ancak, bu soğuma hızı ZSD diyagramında gösterilen kritik soğuma hızından bir hayli düşüktür. Bu nedenle kritik soğuma hızının belirlenmesinde, ZSD diyagramının burnuna teğet olan eğriyi kullanmak biraz hatalı sayılabilir. Ancak, ZSD diyagramının burnuna teğet olan eğri daha yüksek bir soğuma hızı gösterdiğinden, sözü edilen hata martenzitik dönüşümün daha güvenli olmasını sağlar. Yukardaki S-D diyagramında ostenit-beynit dönüşüm bölgesi yer almamaktadır. Çünkü, bu çeliğe ait S-D diyagramında beynit bölgesi perlit burnunun değişimi veya kayması nedeniyle kaybolmuştur. Normal olarak, sürekli soğuma sırasında alaşımsız çeliklerde yüksek oranda beynit oluşmaz. Alaşımlı çeliklerde ise durum daha farklıdır. Bir alaşımlı çeliğin (örneğin; AISI 4340 çeliği) S-D diyagramı Şekil 7.28'de görülmektedir. $0,42\text{C}$ içeren bu çeliğin S-D diyagramında, ötektoid bileşime sahip alaşımsız çelikte bulunmayan ostenit-ferrit dönüşüm bölgesi yer almaktadır. Bu çelikte, perlit bölgesi sağa kaymış olup, beynit bölgesini örtmemektedir. Bu nedenle $1167\text{ }^{\circ}\text{C/saat}$ ile $3000\text{ }^{\circ}\text{C/saat}$ 'lik soğuma hızları arasında, yapıda önemli oranlarda beynit elde etmek mümkündür. Bu diyagramda, üst buruna teğet olan eğrinin gösterdiği hız $1167\text{ }^{\circ}\text{C/saat}$)



Şekil 7.27 Ötektoid bileşimdeki alaşımsız çeliğe ait izotermal dönüşüm (ZSD) diyagramından çıkarılan sürekli soğuma - dönüşüm (S-D) diyagramı



Şekil 7.28 %0,42C, %0,78Mn, %1,79Ni, %0,80Cr ve %0,33Mo içeren AISI 4340 veya 34 CrNiMo6 şeklinde gösterilen çeliğin soğuma-dönüşüm diyagramı