

TMMOB
Makina Mühendisleri Odası
Döküm Teknolojisi Seminer Notu

LAMEL ve KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ISIL İŞLEMLERİ

Prof.Dr.Ahmet Aran
İTÜ Makina Fakültesi

İstanbul 1991

LAMEL VE KÜRESEL GRAFITLİ DÖKME DEMİRLERİN ISIL İŞLEMİ

1. GİRİŞ

Lamel ve küresel grafitli dökme demirlerden üretilmiş parçaların kullanım özellikleri ısıtma işlemleri yardımıyla önemli ölçüde geliştirilebilir. Isıtma işlemleri sayesinde içyapıdaki bağlı karbonun miktarı ve içyapı oluşum şekli geniş sınırlar içinde değiştirilerek, dökme parçanın kullanım amacına en uygun özelliklere sahip olması sağlanabilir.

Dökme demirlere uygulanan ısıtma işlemlerinin başlıcaları şunlardır:

a) Gerilme giderme tavlama: Dökme parça içindeki iç gerilmelerin azaltılması amaçlanır;

b) Yumuşatma tavlama: Sertliğin azaltılması ve dolayısıyla tokluğu artırılması amaçlanır;

c) Normalizasyon (perlitlenme): içyapı kısmen veya tamamen perlitte dönüştürülür.

d) Suverme ve ıslah işlemi: Kritik sıcaklığın üzerine ısıtılarak (yaklaşık 900°C) ostenitleme yapılır ve suverilerek sertlik, dayanım ve aşınmaya dayanıklılık artırılır. Malzemenin tokluğunu artırmak için bu işlemden sonra bir temperleme (menevişleme) uygulanabilir.

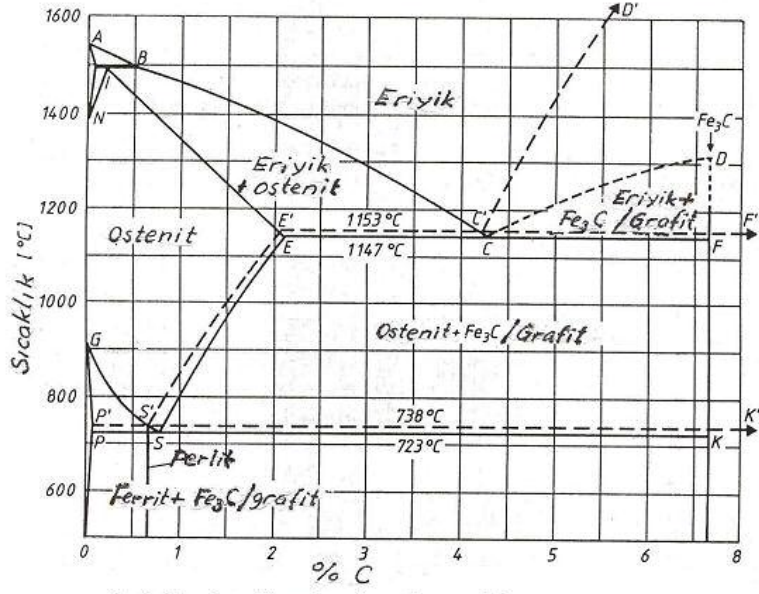
e) Beynitlenme (ostemperleme): Ostenitlemeden sonra, beynit kademesindeki bir sıcaklığa suverilen malzeme, bu sıcaklıkta tutularak ostenitin beynite izotermik dönüşümü sağlanır.

Yukarıda sıralanan ısıtma işlemleriyle sağlanan içyapı oluşturmanın esasları demir-karbon diyagramı yardımıyla anlaşılabilir, Şekil 1. Her ne kadar bu ikili faz diyagramında silisyum ve benzeri alaşım elementlerinin etkisi görülüyor ve burada verilen sıcaklık ve derişiklikler alaşımlama ile değişiyorsa da, aşağıda açıklanan ısıtma işlem prensiplerinde önemli bir fark olmaz.

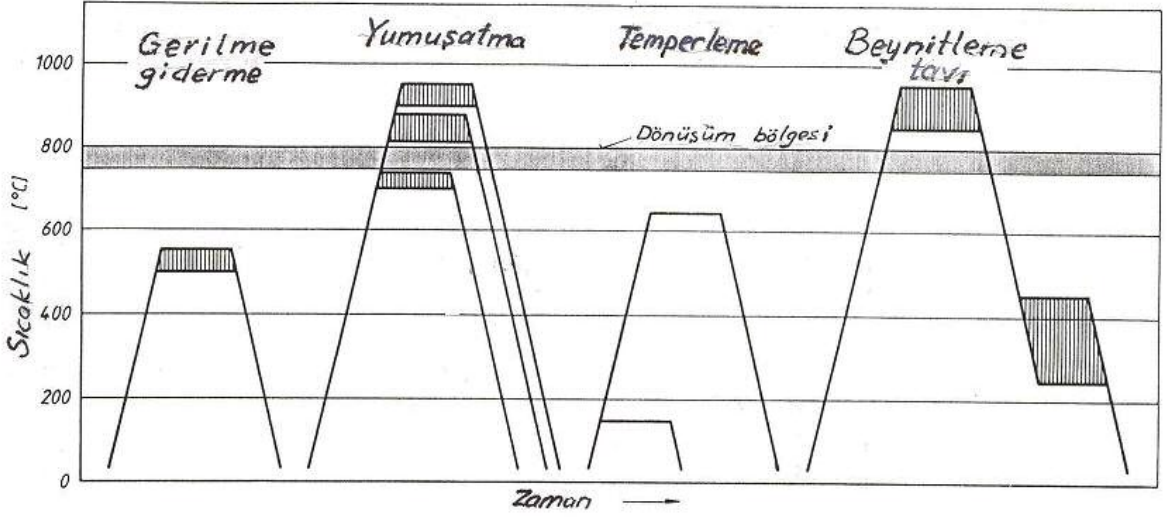
Şekil 2'de yukarıda sıralanan ısıtma işlemlerinde geçerli olan sıcaklık-zaman değişimleri verilmiştir. Görüldüğü gibi ısıtma işlemleri çeliklerin ısıtma işlemlerine oldukça benzemektedir. Dökme demir içinde bulunan bazı elementlerin dönüşümlerinin kararlı veya yarı kararlı olmasını etkilediğinden bu malzemelerin ısıtma işlemi, çeliklerin ısıtma işleminden farklılıklar gösterir. Çelikteki imkanlara ek olarak dökme demirlerde bağlı karbon uygun bir sıcaklık kontrolü ile grafit olarak da ayrıştırılması mümkündür.

Dökme demirde alaşım elementlerinin bulunması genellikle ısıtma işlemlerinin etkisini artırır. Alaşımlama işlem sıcaklıklarını biraz yükseltse de ısıtma işlem uygulamalarının daha kolaylaştığı söylenebilir. Bunun yanında alaşımlama ile malzemenin sertleşme kabiliyeti de artar.

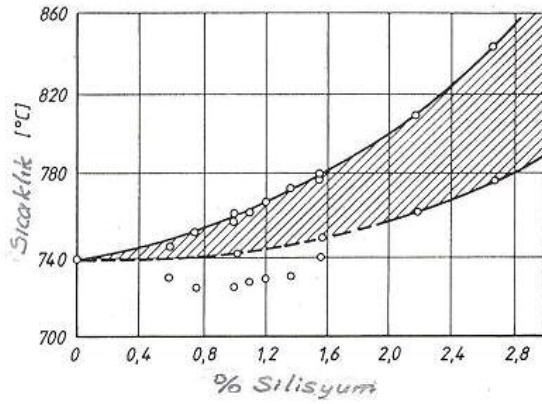
En önemli alaşım elementlerinden biri olan silisyum derişikliğinin artması ile ötektoid sıcaklığı değişir, Şekil 3. Ostenitin perlit veya grafit/ferrite dönüştüğü bu sıcaklık kritik sıcaklık (A_{c1}) olarak da adlandırılır. Görüldüğü gibi artan silisyum miktarı ile kritik sıcaklık artmakta ve dönüşüm genişliği giderek artan bir sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Bunun yanında % 0,8 C derişikliğindeki



Şekil 1: Demir-karbon diyagramı



Şekil 2: Dökme demirlere uygulanan ısıl işlemlerin bazıları



Şekil 3: Silisyum miktarıyla ötektoid sıcaklığının ve dönüşüm aralığının değişimi

ötektoid noktası da artan silisyum miktarı ile daha düşük derişikliklere ötelenmektedir.

Bazı ısıl işlemlerde kritik sıcaklığın kesin olarak bilinmesi çok önemlidir. Alaşımız dökme demirlerde bu değer yaklaşık olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$Ac_1 = 730 + 28.\%Si - 25.\%Mn (\text{°C})$$

2. GERİLME GİDERME TAVI

Döküm yöntemiyle üretilmiş bir parçanın iç gerilmersiz olarak elde edilmesi hemen hemen imkansızdır. Diğer demir-karbon döküm alaşımları ile karşılaştırıldığında dökme demirlerin iç gerilmeleri en düşüktür, çünkü katılaşma sırasındaki yoğunluğu düşük grafitin ayrışması nedeniyle kendini çekme en alt düzeydedir. iç gerilmelerin oluşum nedenleri üç grup altında toplanabilir:

a) Soğuma hızı farklılıkları: Soğuma hızı farklılıkları parçanın yüzeyi ile iç kısımları arasında olabildiği gibi, farklı cidar kalınlıklarına sahip bölgeler arasında da ortaya çıkabilir. Hızlı soğuyarak büzülmesini tamamlamış kısımlar, daha sonra sonra soğuyarak büzülmek isteyen bölgelere engel olacağından ve bu uyumsuzluk soğumuş parçada bir plastik şekil değişimi ile giderilemeyeceğinden parçada iç gerilmeler kalacaktır.

b) Serbest büzülememe: Parçanın kalıp içinde serbestçe büzülememesi sonucu da gerilmeler oluşabilir. Gerek kalıp, gerekse maça malzemelerinin büzülmeyi engelleyebilecek dayanıma sahip olmaları durumunda büyük iç gerilmeler ortaya çıkabilir.

c) Yüzey temizleme işlemleri: Kum veya bilya püskürtme gibi yüzey temizleme işlemleri basma iç gerilmeleri yaratabilir.

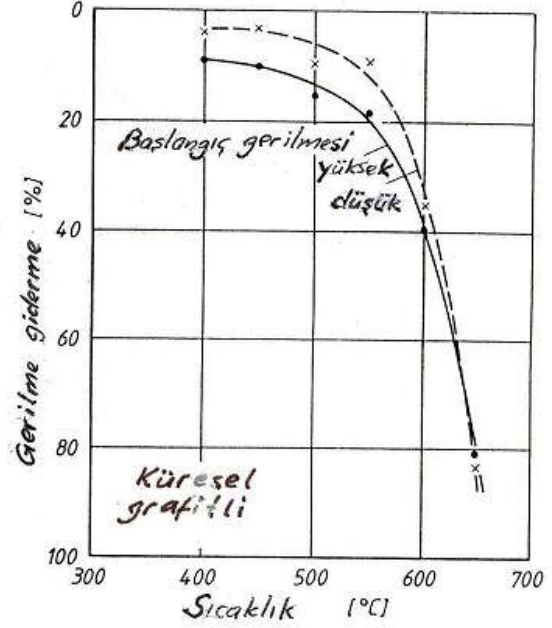
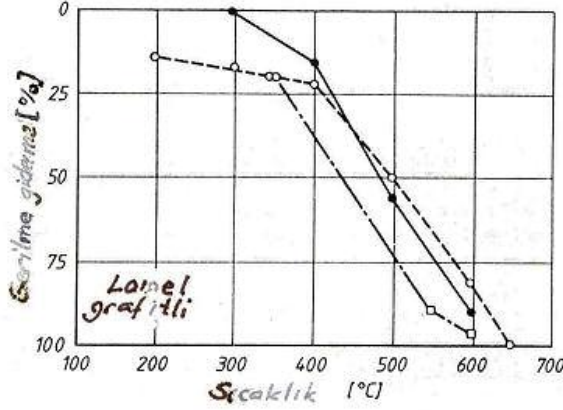
iç gerilmeleri önlemek için değişik tedbirler alınabilir. Bunlar arasında döküm tekniğine uygun biçimlendirme ve boyutlandırma ile döküme özgü tekniklerle farklı kalınlıklardaki cidarların soğuma hızlarını etkilemek sayılabilir. Döküm sonrasında parçayı kalıptan çıkarma sıcaklığını ve dolayısıyla soğuma hızını uygun seçmek de çok önemlidir.

Döküm iç gerilmelerinin azaltılması için en emin metod ısıl işlem uygulamaktır. Bu işlem sırasında yüksek sıcaklıklarda tutulan malzemenin akma sınırı düşer ve mevcut iç gerilmeler sonucu plastik şekil değişimleri oluşarak iç gerilmeler ortadan kalkar. Parçada kalıcı şekil değişimleri olabileceğinden gerilme giderme tavının parçanın işlenmesinden önce yapılması gereklidir. Ancak akma sınırı hiçbir zaman sıfıra düşürülemediğinden gerilmelerin tamamen giderilmesi sözkonusu değildir.

Gerilme giderme ısıl işlemi ostenit dönüşüm sıcaklığının altında gerçekleştirilir ve parça yavaş soğuma ile oda sıcaklığına getirilir, Şekil 2.

Gerilme giderme tavındaki ana parametreler tav sıcaklığı ve süredir. Artan sıcaklık ve süre ile işlemin etkinliği artar. Ancak artan sıcaklık, içyapı dönüşümlerine (perlitin grafit ve ferrite dönüşmesi) neden olacağı için aşırı yükseltilemez, aksi halde dayanım düşüşleri oluşur.

Sıcaklığın gerilme giderme üzerine etkisi Şekil 4'te görülmektedir. Buna göre 400 °C'ın altındaki sıcaklıklarda iç gerilmelerin ancak % 20-30'u giderilebilmektedir. 500°C sıcaklıkta ise gerilmeleri %75'inin kaybolduğu görülmektedir.



Şekil 4 ve 5: Lamel ve küresel grafitli dökme demirlerde tav sıcaklığıyla gerilme giderme yüzdesinin değişimi

Alaşımız dökme demirlerde 600°C'ın üzerindeki sıcaklıklarda veya uzun sürelerde içyapı değişimleri sonucu dayanım ile sertlik düşer, buna karşın işlenebilirlik kabiliyeti artar. Isıl işlem sonrasında yapılacak basit bir sertlik ölçümü ile içyapı değişimlerinin olup olmadığını anlayabiliriz. Alaşımız dökme demirlerde gerilme giderme ısıl işleminin sıcaklığı 500-550°C arasında seçilir. Grafitin serbest olarak bulunduğu dökme demirler daha az iç gerilmeler içereceğinden (daha az çekme!) ve lamel grafitli dökme demirlerin akma dayanımları düşük olacağından bu tür malzemelerde ısıl işlem sıcaklığı daha düşük seçilebilir. Buna karşın perlit içeren yüksek dayanımlı dökme demir türlerinde %70 oranında bir gerilme giderme sağlamak için bu sıcaklık aralığının üst sınırı 570-580°C'a yükseltilmelidir.

Düşük alaşımlı dökme demir için 550-600°C arasında bir sıcaklık aralığı önerilmektedir, çünkü krom, molibden, nikel ve vanadyum gibi elementler malzemenin yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmekte ve gerilme giderme tavi sıcaklığında malzemenin akma dayanımını yükselterek plastik şekil değiştirmeyi ve dolayısıyla gerilmelerin azalmasını güçleştirmektedir. Buna ek olarak krom, molibden ve vanadyum gibi karbür stabilizasyonu sağlayan elementlerin varlığı içyapı dönüşümü tehlikesini (örneğin perlitin parçalanması) azaltmaktadır. Bu nedenle bu tür malzemelerde sıcaklığın 620°C'a kadar artırılması düşünülebilir.

Yüksek alaşımlı malzemeler tercihan 600-650°C sıcaklıklarında tavlınırlar. Şekil 5'te verilen örnekte görüldüğü gibi ostenitik dökme demirde 600°C'da iç gerilmelerin %40'ı, 650°C'da ise %80'i giderilebilmektedir.

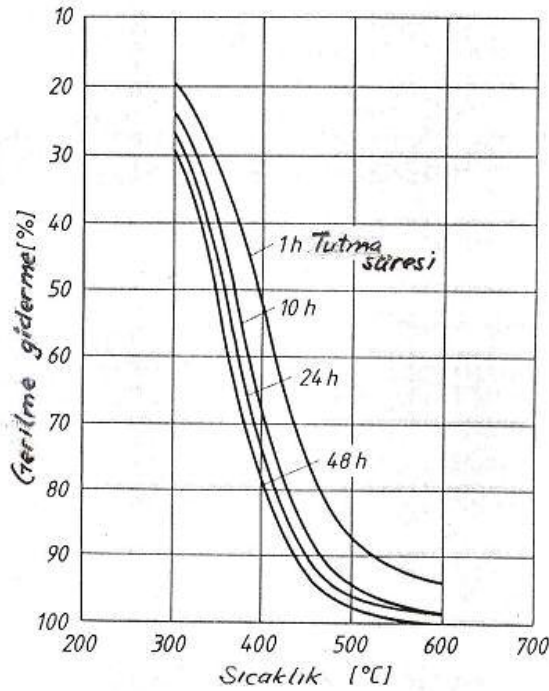
İçyapısında martenzit, beynit veya temperlenmiş martenzit bulunan dökme malzemelerde içyapı değişimlerine neden olmadan etkin bir gerilme giderme yapmak olanaksızdır.

Gerilme giderme tava için ısıtmada özellikle karmaşık biçimli ve cidar kalınlığı farklılıklarının bulunduğu parçalarda homojen bir ısıtma önerilir. Isıtma hızları 10 ile 25 °C/saat arasında kalmalıdır. Basit geometri ve cidar kalınlıklarının dengeli olduğu durumlarda ısıtma hızı 30 ila 50 °C/saat'a çıkarılabilir.

Gerilme giderme genellikle ilk 1 saat içinde gerçekleştiğinden yüksek sıcaklık ve kısa sürelerin kullanılması, düşük sıcaklık ve uzun sürelerin kullanılmasından daha ekonomiktir. Şekil 6'da tav süresinin gerilim gidermeye etkisi görülmektedir. Tav sıcaklığında tutma süresi olarak her 25 mm kalınlık için 1 saat alınabilir.

Isıl işlem sonrasında yeni iç gerilmelerin oluşmasını önlemek için dökme parçalar en azından üst sıcaklık bölgelerinde yavaş soğutulmalıdır. 650 ile 300 °C sıcaklıkları arasındaki soğuma hızı 40 °C/saat'i geçmemelidir. Birçok halde 25 - 35 °C/saat uygun olmaktadır. Genellikle ısıtma ve soğutma hızlarının eşit seçilmesi tavsiye edilir.

Çoğu kez fırında soğutma önerilmektedir, ancak izolasyonların mükemmel olduğu modern fırınlarda soğuma hızları çok düşüktür, bu durumda fırın içine hava üflenerek soğuma hızı artırılabilir. Önerilen soğuma hızına yaklaşık 300°C sıcaklığa kadar uyulması zorunludur, bundan sonra parça sakın havada soğutulabilir. Karmaşık parçalar ve cidar kalınlığı farklılıklarının büyük olduğu durumlarda 100 °C sıcaklığa kadar fırında soğutma gerekebilir.



Şekil 6: Alaşımız lamel grafitli bir dökme demirde tutma süresinin gerilme gidermeye etkisi

3. YUMUŞATMA TAVI

Yumuşatma tavında dökme demirler, içyapılarında bulunan serbest ve/veya perlit içindeki sementitin ferrit ve grafit fazlarına ayrışacağı sıcaklıklarda yeterli sürelerde tutularak mümkün olduğu kadar yumuşak bir içyapı durumu elde edilir. Bu işlemin amacı malzemenin işlenebilirlik özelliğini iyileştirmektir. Yumuşatma tavi, ferrit tavi, ferritleme veya grafitleme olarak da adlandırılmaktadır. Yumuşatma tavının bir diğer yararı da yavaş soğutmaya da dikkat edilmesi halinde parça içindeki iç gerilmelerin de giderilmesidir.

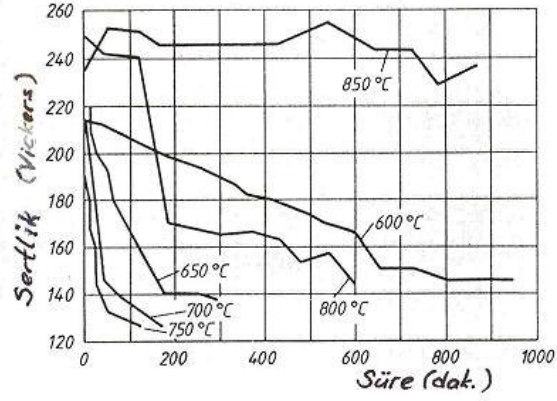
Yumuşatma tavi Şekil 7'den de görüldüğü gibi çok düşük sıcaklıklarda yapılabilir. Çok uzun tav sürelerinde alaşimsız dökme demirlerde 400 °C'tan itibaren perlit az da olsa parçalanmaya başlamaktadır. Ancak perlit parçalanmasının hızı 620°C'dan sonra hızla artmakta ve kritik sıcaklığın hemen altında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu sıcaklık alaşimsız ve az alaşımlı dökme demir türleri için 740 ile 829 °C arasında değişmektedir.

Dökme demirlerde içyapının ferritlenmesi sementit içinde bulunan karbonun grafit fazı oluşturacak şekilde yayınması ile olur. Karbonun daha düşük yoğunluklu grafit olarak ayrışmasında hacim artmaları ve malzemenin "büyümesi" sözkonusudur. Bu hacim artışı malzemenin kimyasal bileşimine, tav sıcaklığına ve tav sıcaklığına bağlıdır. Şekil 8 ve 9'da lamel ve küresel grafitli dökme demirlerin "büyümesinin" tav sıcaklığı ve tav süresi ile değişimi görülmektedir. Başlangıçta her iki malzeme de perlitik içyapıya sahiptir. Bu şekillerden sınır büyümenin lamel grafitli de daha yüksek olduğu görülmektedir.

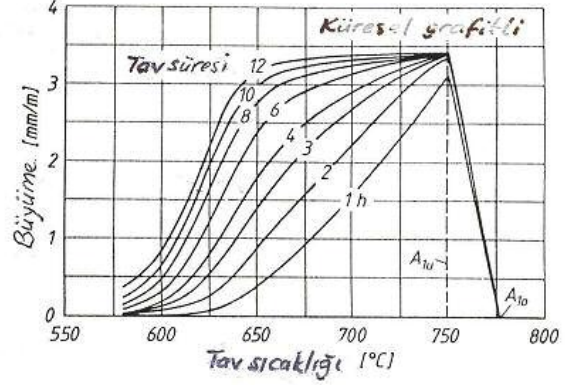
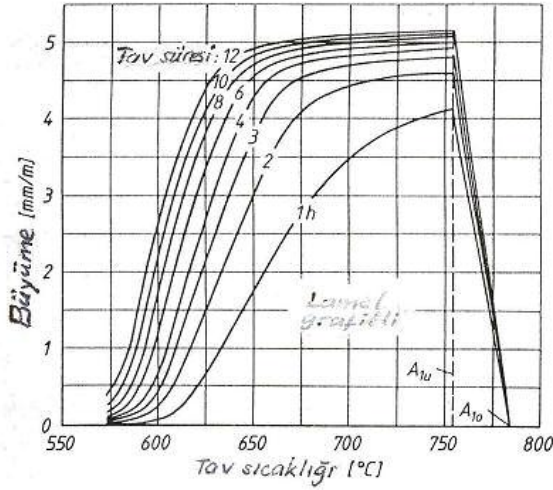
Bu şekillerden ayrıca ekonomik bir tav için sıcaklık ve sürenin uygun olarak seçiminde yararlanılabilir. Görüldüğü gibi ayrışma hızı kritik sıcaklığın hemen altında yüksek olmakta ve çok uzun tav sürelerine gitme zorunluğu ortaya çıkmadan grafit oluşumu sağlanmaktadır. Kritik sıcaklık bölgesinin seviyesi kimyasal bileşime ve alaşım elementi miktarına bağlıdır. Özellikle silisyumun etkisi büyüktür; silisyum her %1 artışı ötektoid sıcaklığını 25°C artırır, bunun yanında karbon yayınmasını da teşvik eder. Ostenit bölgesini genişleten alaşım elemanları dönüşüm sıcaklığını düşürürler. Nitekim %1 kalay bu sıcaklığı 10 °C, %1 nikel ise 30°C düşürür. Krom katkıları kritik sıcaklığı yükseltir, buna karşın vanadyum katılmasıyla vanadyum karbür oluştuğundan önemli bir etki görülmez. Molibden ise ostenit dönüşümünü geciktirir ve kritik sıcaklığın düşmesine neden olur.

Yumuşatma tavi sıcaklıklarında yeni grafit çekirdeklerinin oluşumu mümkün olmadığından perlit parçalanması ile açığa çıkan karbon yayınarak en yakın grafit çökeltisi üzerinde kristalleşir. Bu olayı kolaylaştıran veya engelleyen her etki parçalanmayı da etkiler. Bakır ve kalay gibi alaşım elemanları grafit çökeltilerinin üzerine veya çevresinde biriktiklerinden, karbon yayınmasını yavaşlatırlar ve yumuşatma tavi sırasında perlit parçalanmasını yavaşlatırlar. Nikelin ise bu olaylara önemli bir etkisi yoktur.

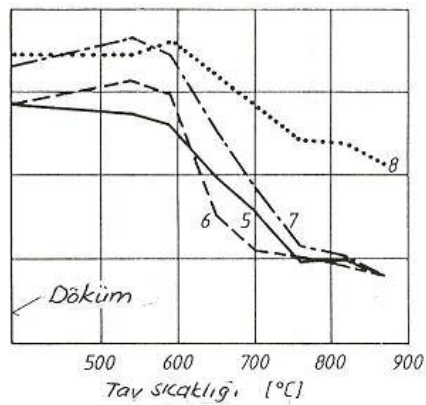
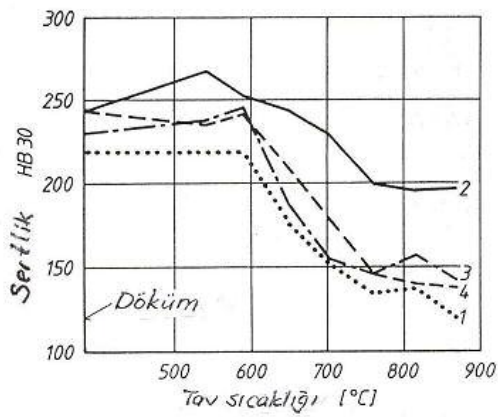
Alaşım elemanlarının miktarı ayrıca sementitin kararlılığını belirler. Silisyum ve alüminyum gibi sementitte çözünemeyen ve ferritte biriken elementler sementitin kararlılığını düşürürler. Yani silisyum ve alüminyum ferritlenmeyi teşvik ederler. Buna karşın karbür oluşturan element-



Şekil 7: Lamel grafitli bir dökme demirde yumuşatma tavi sıcaklığının sertliğe etkisi



Şekil 8 ve 9: Lamel ve küresel grafitli iki dökme demirde yumuşatma tavi sıcaklığının büyüme etkisi



- 1 = alaşımız
- 2 = 0,56 % Cr
- 3 = 1,72 % Ni
- 4 = 0,47 % Mo
- 5 = 0,12 % V
- 6 = 1,8 % Cu
- 7 = 0,54 % Mo, 0,66 % Ni
- 8 = 0,56 % Mo, 0,61 % Cr

Şekil 10: Alaşımız ve alaşımlı lamel grafitli dökme demirlerde bir saatlik bir yumuşatma tavinin Brinell sertliğine etkisi

ler sementit içinde tercihan çözünürler ve bu fazın kararlılığını artırır. Bunlar arasında krom, mangan, vanadyum ve yüksek derişikliklerde kükürt sayılabilir. Bu elementler sementitin parçalanmasını yavaşlatırlar ve hatta tümüyle önlerler. Bunlar arasında krom en etkin olanıdır.

Şekil 10'da aynı kimyasal bileşime sahip dökme demirlerde bazı alaşım elementlerinin değişik sıcaklıklarda sertlik değeri üzerindeki etkileri görülmektedir. İcyapıda krom ve/veya vanadyum karbürlerin bulunması halinde kısmi veya tam bir karbür çözünmesi için çok yüksek sıcaklıklar ve/veya tav süreleri gerekmektedir.

Perlitik bir yapının ferritik bir iç yapıya dönüşmesinde lamel grafitli dökme demirde çekme dayanımının % 10..30 düşeceği dikkate alınmalıdır. En büyük düşüşler alaşımsız dökme demirlerde ortaya çıkar. Karbür kararlılığını sağlayan elementlerin miktarına bağlı olarak yumuşatma tavi sonrasında Brinell sertliği 30..150 birim düşer. Bunun sonucu talaşlı işlenebilme kabiliyeti artar, aşınmaya karşı dayanıklılık ise önemli ölçüde azalır. Malzemenin tokluğu, titreşimleri sönmüleme kabiliyeti, ısıl ve elektriksel iletkenliği önemli ölçüde artar. Yorulma dayanımı ve kırılma tokluğu bakımından önemli bir fark saptanamamıştır. Ancak yumuşatma tavi yapılmış malzemede çatlak başlangıçlarının çok daha önce oluştuğu bilinmektedir. Bu olgu grafit/matris arayüzeyindeki bağın zayıf olması ile açıklanmaktadır. Öte yandan ferritin matriste çatlak ilerleme hızı daha yavaş olmaktadır.

Yumuşatma tavi sırasında dökme parça yüzeyinde oksidasyon oluşması daha sonra uzaklaştırılabilecek uygun yüzey kaplamaları veya koruyucu atmosfer kullanılarak önenebilir.

Malzemenin kimyasal bileşimi ve dolayısıyla başlangıçtaki icyapısına bağlı olarak yumuşatma tavi düşük, orta ve yüksek sıcaklıklarda yapılabilir. Bu üç farklı sıcaklık bölgesindeki uygulamalar aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır:

3.1. Düşük Sıcaklıkta Yumuşatma Tavi

(Acı'ın altında ferritleme)

Alaşımsız dökme demirlerin kısmen veya tamamen ferritlenmesi için genellikle Acı sıcaklığının üzerine çıkmak gerekmez. Hatta yüksek sıcaklıklarda karbon kısmen ostenit içinde çözüneceği ve soğuma sırasında perlit oluşturacağı için yüksek sıcaklıklar sakıncalıdır. Şekil 7'deki 850°C sıcaklığa tekabül eden eğride sertliğin düşmemesinin nedeni budur. Genellikle 700..760°C arasındaki bir sıcaklıkta her 25 mm kalınlık için 1 saat tutmak uygundur. Acı'e yakın sıcaklıklarda 25 mm kalınlık için tutma süresi 1 saatten 45 dakikaya indirilebilir.

Soğutma 300°C sıcaklığa kadar fırında ve en çok 50 °C/saat hızla yapılmalıdır. Düşük sıcaklıktaki yumuşatma tavi ile bu sıcaklıklarda kararlı olan serbest sementitin (perlit dışındaki) ve diğer karbürlerin çözünmesi sağlanamaz.

3.2. Orta Sıcaklıklarda Yumuşatma Tavi

(Acı'ın biraz üzerinde, tam tavlama)

Silisyum miktarının düşük olması ve karbür kararlılığını sağlayan alaşım elementlerinin yüksek miktarlarda bulunması halinde yumuşatma tavinin 790..900°C arasında uygulanması gerekir. Dökme demir türlerinin büyük çoğunluğu bu orta sıcaklıklarda tavlmalıdır. Her 25 mm için tutma süresi 1

saat seçilir.

Soğutma sırasında özellikle kritik sıcaklık bölgesindeki 800 ile 680 °C arası düşük hızla (10..20 °C/saat) geçilmelidir, aksi halde perlitin yeniden oluşması tehlikesi vardır. Bunu takiben 300 °C sıcaklığa kadar soğuma hızı 40..60 °C/saat olarak seçilebilir.

3.3. Yüksek Sıcaklıkta Yumuşatma Tavı

(Acı'ın çok üzerinde, karbür çözündürme)

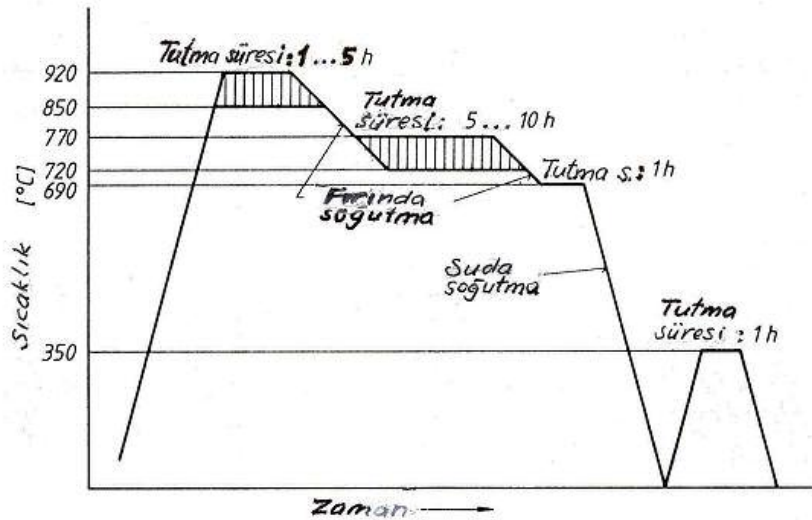
Dökme demirin içyapısında serbest sementit veya diğer karbürler varsa , bunların çözünmesi için en az 855°C'a çıkmak gerekecektir. Tav süresini kısaltmak için genellikle 900 ile 955 °C sıcaklıkları arasında işlem yapılır. Tutma süresi 1 ile 3 saat arasında seçilir ve buna her 25 mm kalınlık için ayrıca 1 saat eklenir. Fosfor derişikliği % 0,3'ü aşıyorsa tav sıcaklığı 955 °C'ı kesinlikle geçmemelidir, aksi halde fosfür ötektiğinin eriyerek sıvı faza geçmesi söz konusudur. Daha düşük fosfor miktarlarında da yüksek sıcaklıklardan kaçınılmaya çalışarak parçaların aşırı oksidasyonu önlenmelidir.

Soğuma hızı istenen nihai içyapıya göre seçilmelidir. Çekme dayanımı ve sertlik muhafaza edilerek sadece yerel sertlikler yaratan sementit ve diğer karbürlerin uzaklaştırılması amaçlanıyorsa, yani perlitik bir içyapı isteniyorsa, soğutma 550°C sıcaklığa kadar havada yapılmalıdır. iç gerilmelerin oluşmasını önlemek için bundan sonraki soğutma fırın içinde gerçekleştirilmelidir.

Ferritik bir içyapı elde etmek istenirse 800 ile 680 °C arasındaki sıcaklık bölgesi yavaş (10..20 °C/saat) geçilmelidir. Bundan sonra 300°C sıcaklığa kadar fırında 40..50 °C/saat hızlarına çıkılabilir.

3.4. İki Kademeli Yumuşatma Tavı

Küresel grafitli dökme demirden yüksek tokluk özellikleri isteniyorsa, bu sadece iki kademeli bir ısıtma işlemi ile sağlanabilir. Bu işlem genellikle 850..920°C arasında ostenitleme (1.tav kademesi), bunu izleyen fırında veya havada soğutma ve kritik sıcaklık bölgesinde sabit



Şekil 11: Küresel grafitli dökme demirin iki kademeli yumuşatma tavının şematik gösterimi

sıcaklıkta tutmadan (2.tav kademesi) oluşur. Suda soğutmadan sonra 350°C sıcaklıkta bir temperleme yapılır. Bu işlemler Şekil 11'de şematik olarak gösterilmiştir. 1.tav sırasında 900 °C sıcaklığının üzerinde tane irileşmesi olabilir. 2. tav kademesinde 650..740 °C sıcaklıkları arasında 5 ila 10 saat tutularak ya ostenit doğrudan grafit ve ferrite dönüşür, ya da mevcut perlit parçalanır.

4. NORMALİZASYON (Perlitleme)

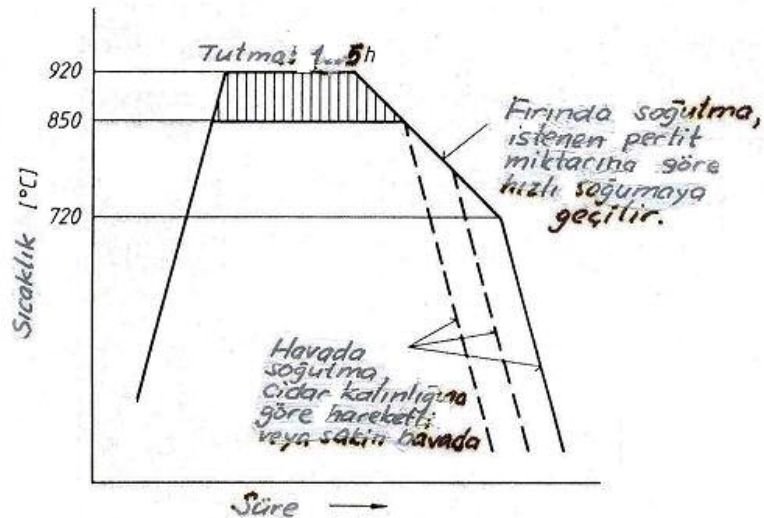
Perlitleme tavının amacı içyapıyı kısmen veya tamamen perlite dönüştürmek ve bu sayede dayanım özelliklerini geliştirmektir. Bu ısıl işlem çoğu zaman normalizasyon olarak da adlandırılmaktadır.

Perlitleme tavında başlangıç içyapısının türü önemli değildir. Ancak başlangıç içyapısında büyük oranda ferrit bulunması halinde ostenit bölgesinde tutma süresi artırılarak karbonun ostenit içinde yeterince çözünmesine fırsat verilmelidir.

Perlitlemenin ilk kademesi bir ostenitleme tavi olup bu işlem yüksek sıcaklıkta yumuşatma tavına benzer. Soğutma hızı ferrit değil perlit oluşumunu sağlayacak şekilde seçilmelidir, ancak bu hız martenzit oluşumuna neden olacak kadar yüksek olmamalıdır. Perlitleme işlemindeki sıcaklık-zaman eğrisi Şekil 12'de görülmektedir.

Ostenit bölgesindeki tutma sıcaklığının aşırı yüksek seçilerek tane irileşmesine neden olmaktan kaçınılmalıdır. Soğutma ortamı ise parçanın iriliğine göre belirlenmelidir. Perlitik bir içyapı için iri parçaların hareketli hava içinde soğutulmaları gerekirken, bazı durumlarda su püskürtmek dahi zorunlu olur. İlerde de ele alınacağı gibi arzulanan dönüşümlerin gerçekleşmesi için çoğu zaman bakır, nikel ve/veya molibden gibi alaşım elementlerinin katılması yolu seçilebilir. İnce parçalar için genellikle havada soğutma yeterli olmaktadır.

Yapının sadece kısmen perlitik olması istenirse bu durum tav sıcaklığı, süresi ve soğutma hızı ile ayarlanabilir. Ferrit oranı arttıkça malzemenin tokluğu artar ve çatlak ilerleme hızı azalır.



Şekil 12: Dökme demirlerin normalizasyon ısıl işleminin şematik gösterimi

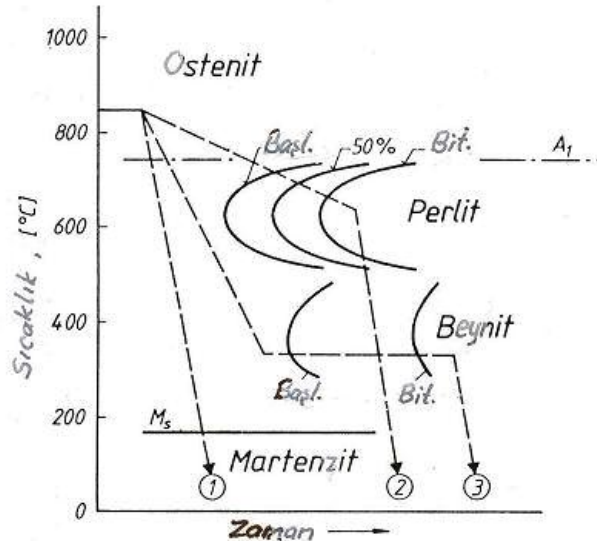
Hızlı soğutma nedeniyle oluşabilecek gerilmelerin azaltılması için teorik olarak sadece 550 °C'a kadar hızlı soğutmak , gerektiğinde bu sıcaklıkta bir süre tutmak ve daha sonra fırında soğutmak uygundur. Ancak bu sıcaklığa tam olarak inmenin güç olduğu durumlarda, önce soğutma yapılarak daha sonra gerilme giderme tavlı uygulanır.

5. SUVERME VE ISLAH ETME

Dökme demirlerin mekanik özellikleri ve aşınmaya karşı dayanıklılıkları suverme ve ıslah etme ile önemli ölçüde iyileştirilebilir.

Suverme sırasında ostenit bölgesinden yağ veya suda ortamında hızla soğutulan malzemede normal ostenit---ferrit dönüşümü gerçekleşemez. içinde daha yüksek oranda karbon çözüdüren ostenit, içinde hemen hemen hiç karbon çözüdüremeyen ferrite değil, ostenitle aynı kimyasal bileşime sahip iğneli yapıya sahip sert martenzite dönüşür. Çok gevrek olan martenzite kritik sıcaklığın altında temperleme (menevişlenerek) bir miktar süneklik kazandırılır.

Bilindiği gibi demir esaslı malzemelerin dönüşüm davranışları ZSD-diyagramlarında gösterilebilir, Şekil 13. Martenzitik bir içyapı elde etmek için perlit burnunu kesmeden geçecek bir hızda soğutmak gereklidir, 1 çizgisi. Martenzit oluşumu için gerekli minimum soğuma hızı kritik soğuma hızı olarak adlandırılır.



Şekil 13: Zaman-sıcaklık- dönüşüm diyagramı ve bazı ısı işlemlere ait soğuma eğrileri (1:suverme, 2:perlitleme, 3:beynitleme)

Karbon miktarı çok yüksek olan dökme demirlerin hemen hepsi sertleşebilir özelliklere sahiptir. Ancak tüm karbonu grafit olarak ayrılmış ve bağlı sementit miktarı çok düşük olan dökme demirlerin sertleştirilmesi pratik olarak uygun değildir, çünkü karbonu ostenit içinde çözültüye alabilmek için çok uzun tav süreleri gerekir. Kimyasal bileşim ve alaşım elementi miktarları gerekli tav sıcaklığını, tutma süresini, kritik soğuma hızını, oluşan sertliği ve sertleşme kabiliyetini etkiler.

Lamel grafitli dökme demirde karbon mümkünse % 3,3'ün altında kalmalı, silisyum ise % 1..2 olmalıdır. %2'den fazla silisyum bulunması karbonun ostenit içinde çözünmesini engeller ve elde edilen sertlik değerleri düşük olur. Daha yüksek karbon ve silisyum derişikliklerinde de yeterli bir sertliğe ulaşılabilmesine rağmen maximum değerlerin % 3,3 C ve % 2,0 Si ile sınırlandırılması uygun olur. Lamel grafitli dökme demirde grafit mümkün olduğunca ince lamelli olmalıdır. Lamelli dökme demirlerde sertleştirme sırasında oluşan iç gerilmelerin lamel uçlarındaki çentik etkisiyle mikro çatlaklar oluşturma ihtimali unutulmamalıdır.

Alaşım elementleri de sertleşme kabiliyetini etkilerler. Döküm tekniği bakımından gerekli olabilecek yüksek karbon ve silisyum oranlarında dahi alaşımlama yardımıyla başarılı bir sertleştirme yapılabilir. Kobalt dışında tüm alaşım elemanları ZSD diyagramlarını sağa kaydırır ve kritik soğuma hızını düşürür. Böylece hızlı soğutma sırasında oluşabilecek çatlak ve çarpılmalar ortadan kalkar.

Ostenitleme Sıcaklığı ve Süresi

Ostenitleme tavi sıcaklığı ferrit/ostenit dönüşüm sıcaklığına bağlı olarak seçilmelidir. Bu sıcaklık ne kadar yüksek olursa gerekli tutma süresi o kadar azalır. Karbonun grafitten çözünme hızı, grafitin içyapıda ne kadar ince dağıldığına bağlıdır. Yani yayınma mesafesi ne kadar kısa ise çözünme o kadar hızlı olur.

Dönüşüm sıcaklığının 30..60 °C üzerindeki bir sıcaklık yeterli olmasına rağmen, genellikle 850..950 °C arasındaki sıcaklıklar tercih edilir. Tam bir ostenitleme sağlamak için gerekli tutma süresi 1 saat olup buna her 25 mm kalınlık için 1 saat eklenir. ince dağılmış lamel grafitler içeren malzemelerde bu süre 15 dakikaya kadar inebilmektedir.

Suverme

Suverme sonucunda ostenit tümüyle veya kısmen sert martenzit fazına dönüşür. Gerekli soğuma hızı ZSD diyagramlarından alınabilir. Bu hıza uyulmadığı zamanlar martenzit yanında perlit ve beynit de oluşabilir.

Dökme demirlerde suverme ortamı olarak yağ banyoları yaygın olarak kullanılır. Bazı alaşımlı türler için havada soğutma da yeterli olur. Bilindiği gibi parçalar suverme banyosunda hareket ettirilmeli ve kalın kesitler banyoya önce daldırılmalıdır. iç gerilmeleri azaltmak için yaklaşık 150°C'a soğuyan parçalar banyodan çıkarılarak hemen temperlenir.

Temperleme (Menevişleme)

Dökme parçalar suvermeden sonra genellikle menevişlenirler. Bu işlem sırasında parçalar dönüşüm sıcaklığının altında 150 ile 650 °C arasında tutulurlar. Menevişleme sıcaklığı parçanın kullanım sıcaklığından yüksek seçilmelidir.

250°C sıcaklığa kadar tetragonal martenzit kübik bir

yapıya dönüşür ve bu sırada dislokasyonların bulunduğu bölgelere ϵ -karbürler çöker, sertlik çok fazla değişmemesine rağmen kırılmalık bir miktar giderilmiş olur. 250..400 °C sıcaklıkları arasında ϵ -karbürlerin ve/veya tane sınırındaki çökeltilerin sementite dönüşümü gerçekleşir. Bu durumda sertlik ve gevreklik giderek kaybolur.

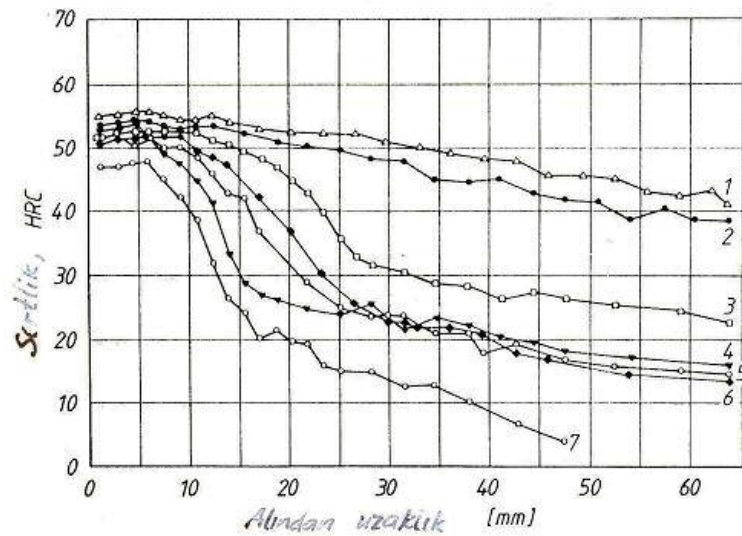
400°C sıcaklığın üzerindeki temperleme sıcaklıklarında sementit taneciklerinin büyüklüğü artar, sertlik daha da azalarak süneklik yükselir.

Tutma süresi olarak her 25 mm kalınlığa 1 saat yeterlidir. Menevişleme işlemiyle gerilmeler giderilir, kırılmalık azalır ve birçok mekanik özellik iyileşmiş olur.

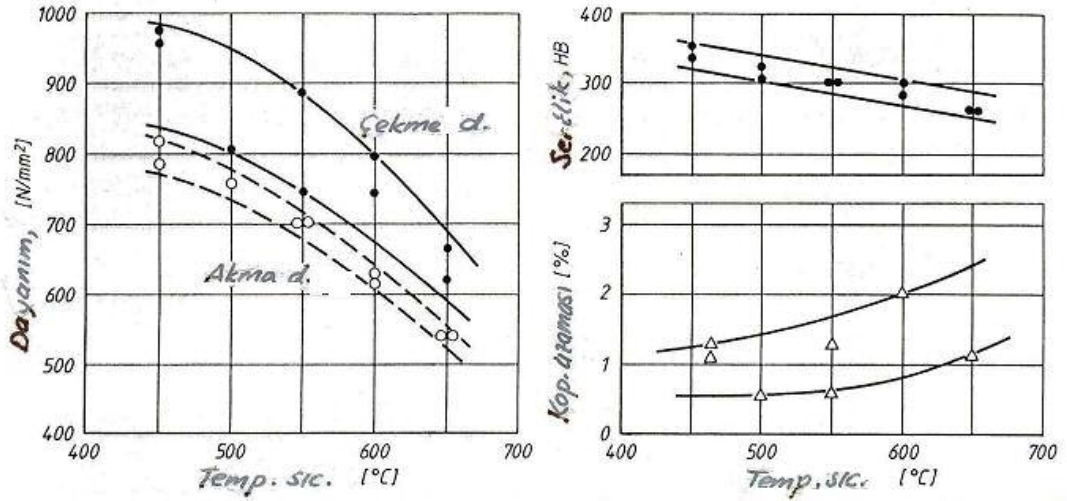
Suverilmiş ve Islah Edilmiş Dökme Demirlerin Özellikleri

Suverme sonrasında sertlik 45 ila 60 RC (430 ila 600 BSD) değerine yükselir, bu arada süneklik ve çekme dayanımı düşüktür. Dökme demirlerin sertleşme kabiliyeti çelikler için kullanılan Jominy Deneyi ile saptanabilir. Bu deneyde saptanan sertlik derinliği malzemenin serleşme kabiliyetinin ölçütüdür. Şekil 14'te değişik alaşımlı lamel grafitli dökme demirlerin sertleşme eğrileri görülmektedir. Küresel grafitli dökme demirlerde de benzer şekilde molibden, krom, bakır, mangan gibi elementlerle alaşımlama ile sertleşme kabiliyeti iyileştirilebilir.

Nr.	Kimyasal bileşim (%)						
	C	Si	Mn	Cu	Cr	Mo	Ni
1	3,29	1,96	0,59	1,23	0,28	0,41	-
2	3,27	1,97	0,59	1,21	-	0,50	-
3	3,32	2,01	0,57	2,02	0,51	-	-
4	3,28	2,07	0,59	0,17	0,53	-	-
5	3,31	2,03	0,59	1,54	-	-	-
6	3,27	1,99	0,58	1,02	-	-	1,05
7	3,29	2,08	0,67	0,13	-	-	-



Şekil 14: Değişik bileşimlerdeki lamel grafitli dökme demirlerin Jominy deneyi ile bulunan sertleşme eğrileri

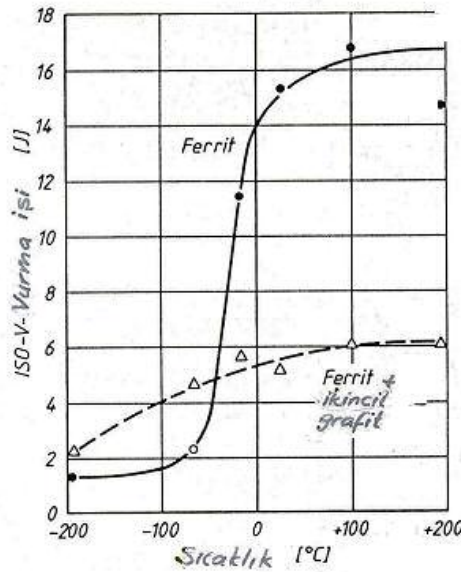


Şekil 15: İslah edilmiş küresel grafitli DDK-60 dökme demirinde temperleme sıcaklığına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi

Temperleme ile dökme demir sertlikten kaybeder, ancak çekme dayanımı ve tokluk değerleri iyileşir. 200°C'a kadar yapılan temperlemede sertlikte önemli bir azalma olmadığından bu işlem aşınma dayanımının önemli olduğu uygulamalar için idealdir. En yüksek dayanımı elde etmek için alaşımsız dökme demirler 300 ila 370 °C'ta temperlenir. İyapı kararlılığının daha yüksek olduğu alaşımlı dökme demirlerde ise temperleme sıcaklığı 400 ile 500 °C arasında seçilir.

Şekil 15'te küresel grafitli dökme demirlerde temperleme sıcaklığının özelliklere etkisi verilmektedir.

Silisyum ve fosfor miktarı yüksek olan küresel grafitli dökme demirlerde 350 ile 450 °C sıcaklıklarında bir gevrekleşme söz konusu olduğundan bu aralıkta menevişleme yapılması tavsiye edilmez. Bu temper gevrekliği bileşime molibden katılması ile azaltılabilir.



Şekil 16: İkincil grafit oluşumunun küresel grafitli ferritik dökme demirin çentik vurma işine etkisi

Küresel grafitli dökme demirlerin 540 °C 'ın üzerinde temperlenmesi halinde martenzit ikincil grafitte dönüşmektedir. Martenzitten ayrılan ikincil grafit matris içinde çok ince dağıldığından dayanım yaklaşık %10..15 artar, kopma uzaması ise % 20 azalır. Çentik vurma dayanımı ise en çok etkilenecek , %60'ın üzerinde düşüş gösterir, Şekil 16. ikincil grafit bunun yanında gevrek/sünek geçiş sıcaklığını -20'den -100 °C'a düşürür. Silisyum miktarının düşük seçilmesi ve alaşımlama ile bu ikincil grafit ayrışması azaltılabilir, ancak tamamen önlenemez.

6. BEYNYİTLEME TAVİ

Bu işlem genellikle küresel grafitli dökme demirde uygulanır ve malzemeye uygun bir dayanım+tokluk özellik çifti kazandırılması amaçlanır. Bu şekilde küresel grafitli dökme demirde 1000..1600 N/mm²'ye varan dayanımlar ve % 14 ile 2 arasında değişen kopma uzamaları elde etmek mümkün olur. Beynitlemenin suverme + temperlemeden üstünlükleri şunlardır: a) Ostenit içindeki karbonun beynite dönüşmesi sırasında oluşan hacim değişimleri çok küçüktür, bu sayede çatlak oluşma tehlikesi ve çarpılma olasılığı azalır. b) Genellikle 250..450 °C arasında sabit sıcaklıkta yapılan ve suverme sonrası uygulanan temperlemeden daha düşük olan sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu işlem sırasında ikincil grafit ayrışması ve ferrit oluşumu tehlikesi yoktur.

Beynitleme işlemi ostenitleme, beynitleme sıcaklığına soğutma, tutma ve oda sıcaklığına soğutma işlemlerinden oluşur. Şekil 13'te bu kademeler ZSD diyagramı üzerinde gösterilmiştir.

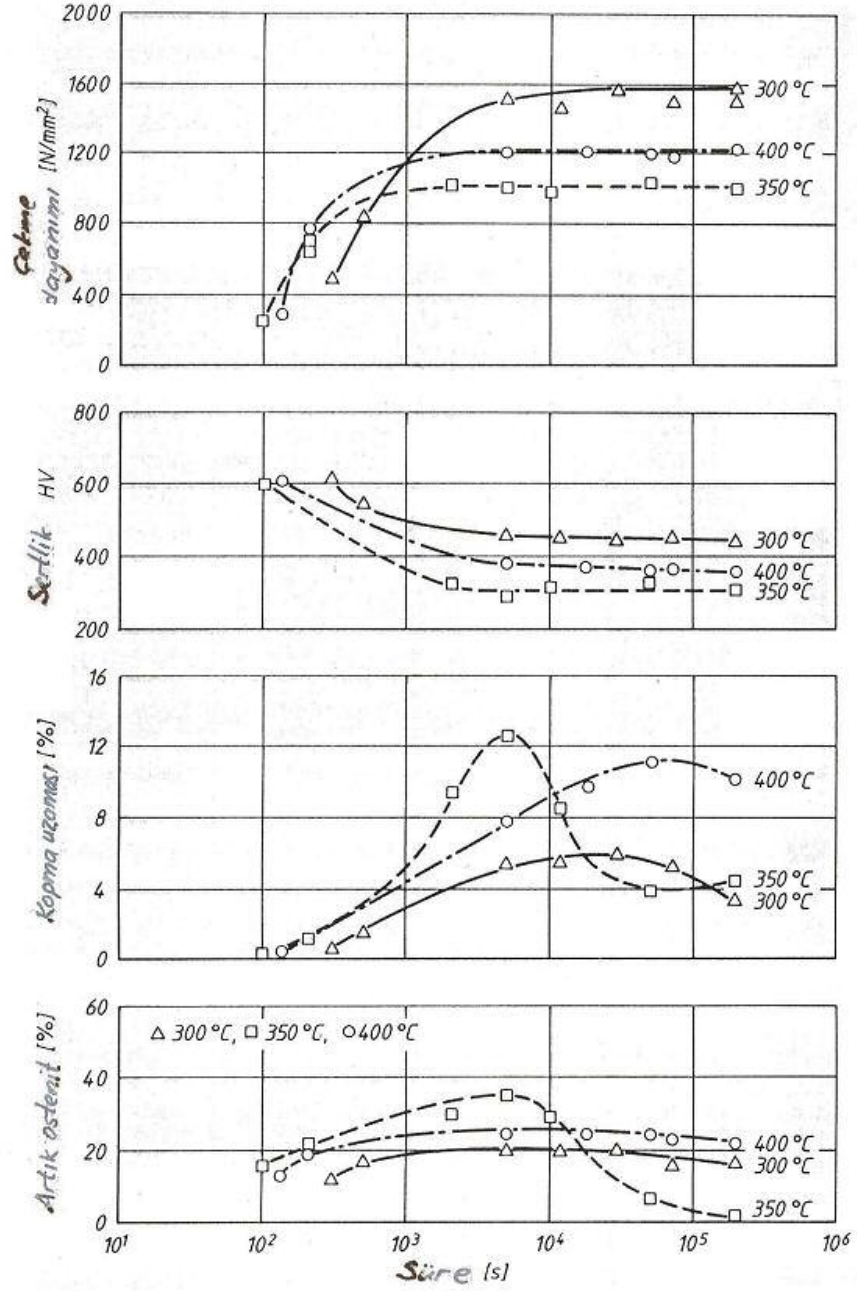
Ostenitleme 850..950 °C sıcaklık aralığında yapılır ve perlit oluşumunu önlemek için hızla beynitleme sıcaklığına inilir. Kritik soğutma sıcaklığı cidar kalınlığı ve kimyasal bileşime bağlıdır. Sadece ince parçalar sıcak banyoda soğutulur ve bu hıza erişebilirler. Kalın cidarlı parçalarda veya havada soğuma istendiğinde molibden, ve kısmen bakır ve nikel ile alaşımlama yapılmalıdır. Ayrıca tuz banyosu sıcaklığının örneğin 410'dan 290 °C'a düşürülmesi de soğuma hızını artırılabilir.

Beynitleme sıcaklığında tutma süresi dönüşüm sıcaklığı, kimyasal bileşim ve cidar kalınlığına bağlı olarak 15 dakika ile birkaç saat arasında değişir. Parçalar beynit dönüşümü tamamlanmadan banyodan çıkarılır ise geri kalan ostenit martenzite dönüşür, yani sertlik artar, süneklik düşer.

Beynitlemede silisyum miktarının da önemli bir etkisi vardır. Silisyum miktarının % 2..4 'ten yüksek olması halinde karbür oluşumu engellenecek ve içyapıda kalan kararlı artık ostenit miktarı artacaktır. Yeni araştırmalar optimum silisyum miktarının % 2,5 dolayında olduğunu göstermiştir.

Mangan da beynit oluşumunu engelleyen elementlerden biridir ve mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır, aksi halde beynit yerine tane sınırına yakın bölgelerde martenzit oluşur.

İstenen özelliklerin elde edilmesi için soğutma hızı ile beynitleme sıcaklığının uygun seçilmesi çok önemlidir. 300 °C gibi düşük dönüşüm sıcaklıklarında en yüksek sertlik, akma ve çekme dayanımı elde edilir. 350..400 °C aralığında ise çentik darbe tokluğu ve kopma uzaması yüksektir. Ancak tuz banyosu sıcaklığının yüksek olması halinde soğuma hızı düşük olacağından, içyapıda perlit bulunur ve dayanım değerleri düşer.



Şekil 17: % 0,53 Ni ve % 0,12 Mo içeren küresel grafitli beynitik bir dökme demirde mekanik özellikler ve artık ostenit miktarının beynitleme sıcaklık ve süresi ile değişimi

Şekil 17'de beynitleme sıcaklığı ve tutma süresinin etkileri görülmektedir. % 0,53 Ni ve % 0,17 Mo içeren bu alaşım önemli oranda artık ostenit içermektedir. Bu sünek içyapı bileşeni malzemeye tokluk kazandırmaktadır. Ayrıca sert mangan çeliklerinde olduğu gibi kullanım yerinde sözkonusu olabilecek şekil değişimleri ile martenzite dönüşen bu faz, sertliği ve aşınma dayanımını artırır.

7. YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ

Dökme demirlerde uygulanan değişik yüzey sertleştirme yöntemlerinin tümünde amaç sert ve aşınmaya dayanıklı bir yüzey ile, tok bir ana kütle elde etmektir. Yüzey sertleştirme işlemleriyle dış kısımlarda genellikle basma iç gerilmeleri oluşturarak, parçanın yorulma dayanımı da artırılır.

7.1. Yüzeyle sınırlı ısıtmanın uygulandığı yöntemler

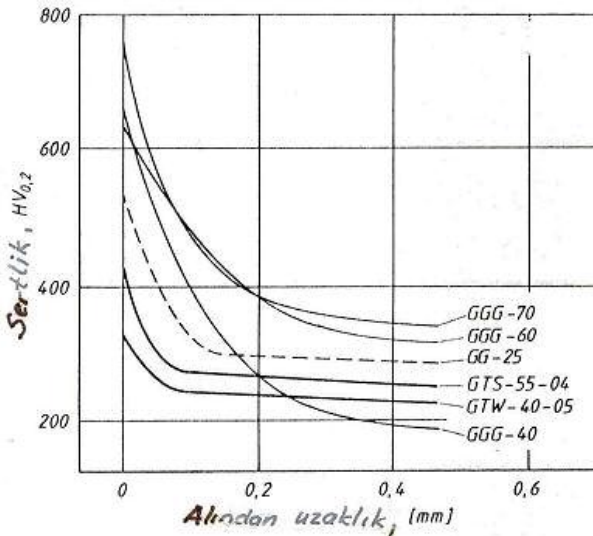
Bu yöntemlerde sertleştirilecek bölgeler yerel olarak 850..950 °C sıcaklığa çıkarılarak yağda veya suda suverilir. Isıtma alevle veya endüksiyonla yapılabilir. Bunlardan ısıtma süresi daha uzun olan alevle ısıtmada sertleştirilen bölgenin kalınlığı daha büyük olur.

Isıl iletkenliği daha düşük ve karbonun yayınma mesafeleri daha büyük olduğundan küresel grafitli dökme demir lamel grafitliye göre yüzey sertleştirmeye daha az uygundur.

Ferrit miktarının yüksek olması sertleşebilirliği olumsuz etkilerler, normalize edilmiş içyapılar daha uygundur. Dolayısıyla başlangıçtaki sertlik değeri malzemenin sertleşebilirliği için uygun bir ölçüttür. Sertlik yüksek olursa içyapıda ferritin az, perlitin çok, grafit ve perlit dağılımının ince olduğu anlaşılır ve böyle bir içyapı yüzey sertleştirme için en uygun olanıdır.

Ferritik veya ferritik-perlitik içyapılarda iki veya daha çok kademeli bir işlem uygulanması daha uygun olacaktır. Burada sertleştirilecek yüzey birkaç kez 800°C'ın üzerine ısıtılarak perlit oluşumu için tekrar 600°C'a soğutulur. Sertleştirme için 840..900 °C'a ısıtılarak suverilir. 200 °C civarında yapılacak bir temperleme sertlikte düşüşe neden olmadan iç gerilmelerin azalmasını sağlar.

Yüzey serleştirmenin en yeni uygulamalarından biri eritme ile sertleştirmedir. Burada güçlü lazer, plazma veya elektron ışınları ile yüzeydeki malzeme eritilir. Yüzeydeki bu sıvı faz içinde karbon hızla çözünür ve tekrar hızlı soğuma ile katılan malzemede ledeburitik bir içyapı ortaya çıkar. Bu ince taneli ledeburit tabakası birçok uygulama alanı için martenzitik içyapıdan da daha yüksek bir aşınma dayanıklılığı sağlar.



Şekil 18: Değişik dökme demirlerde iyon nitritleme ile elde edilen yüzey sertlik değerleri

7.2. Yüzeyde kimyasal bileşimin değiştirildiği yöntemler

Burada malzeme yüzeyine alaşım elementleri yayındırılarak bunların sert ve aşınmaya dayanıklı bileşikler oluşturması sağlanır.

Nitrürlemede değişik yöntemler yardımıyla azot 500..580 °C'da malzeme içine yayındırılır. Bu sıcaklıklarda ana malzemede herhangi bir içyapı değişikliği söz konusu olmayıp, azot alaşımında bulunan alüminyum gibi nitrür yapıcı elementlerle bileşikler oluşturur. Azot bileşiklerinin bulunduğu ve ısıtma uygulanan yöntemlere oranla çok daha ince olan bu yüzey tabakasında 800 Vickers'in üzerinde sertliklere ulaşılabilir, Şekil 19.

Yüze azot yayındırılmasında çeşitli ortamlardan yararlanılır. Tuz banyosunda nitrürlemede parça 570°C sıcaklıkta yaklaşık 20 saat siyanür banyolarında tutulur. Gaz nitrürlemede parça amonyak içeren bir ortamda 500..550°C sıcaklıklarda uzun süreler tutulur. iyon nitrürlemede parça yüzeyine bir gaz ortamında bulunan azot iyonize edilerek yüklenir. Toz nitrürleme basit ve temiz bir yöntemdir. Parçalar azot içeren katı malzemelerin bulunduğu sızdırmaz kaplara konur. Tutma süreleri tuz banyolarından daha uzundur.

Bu seminer notu, "D.B.Wolters, Waermebehandlung von Gusseisen mit Lamellen- oder Kugelgraphit, Zentrale für Gussverwendung" adlı yayın esas alınarak hazırlanmıştır.