

## ÖZET

Farklı Matris Yapılara Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması

Kadir Kaan KIRCALI

Bu çalışmada farklı matris yapılarına sahip küresel grafitli dökme demirler üzerinde çekme ve işlenebilirlik testleri yapılmıştır. Bu farklı matris yapıları elde edebilmek için numuneler farklı ısı işlemlere tabi tutulmuş ve bunun sonucunda farklı oranlarda ferrit ve perlit içeren perlitik-ferritik mikro yapı ve temperlenmiş martenzitik mikro yapı elde edilmiştir. Testlerde bu malzemelere ek olarak döküm sonrası ısı işlem görmemiş malzeme de karşılaştırma yapmak amacı ile kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalarda farklı ısı işlemlere tabi tutulmuş bu malzemelerin işlenebilirlik etüdü yapılmıştır. Sabit kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinde yapılan testlerde, işlenebilirlik takım aşınmasına, yüzey pürüzlülüğüne ve kesme kuvvetlerine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmaya ek olarak bazı malzeme gruplarında ilerlemenin takım aşınmasına ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. İşlemler sırasında kesme sıvısı kullanılmamıştır.

Farklı içyapılara sahip bu malzemeler üzerinde çekme deneyleri yapılarak ısı işlem sonucunda malzemelerde oluşan çekme dayanımı ve uzama değişiklikleri incelenmiştir. Elde edilen bu mekanik özellikler ve işlenebilirlik değerleri ile farklı matris yapılarına sahip küresel grafitli dökme demirlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** Küresel grafitli dökme demir, işlenebilirlik, mekanik özellikler, ferritik/perlitik matris yapı, martenzitik matris yapı

**ABSTRACT**

Investigation of Mechanical and Machinability Properties of Ductile Irons Which Have Different Matrix Structure

Kadir Kaan KIRCALI

In this study the machinability and tensile tests were carried out onto ductile iron specimens which have various matrix structure. Through numerous heat treatments , pearlitic-ferritic matrix structures which have different amount of ferrite and tempered martensitic matrix structures were obtained. In addition to these structures as cast material were also used in tests for comparison.

In machinability tests, cutting speed, feed rate and depth of cut were constant and machinability is evaluated through tool wear rate, surface roughness and cutting forces. Another test is carried out on some specimens to identify the effects of feed rate onto the tool wear rate and surface roughness. There is no cutting fluid were used during tests.

By tensile tests the effect of matrix structure onto the tensile strength and elongation of the specimens were investigated. With these test results different matrix structures' mechanical properties and machinability were compared.

**Keywords :** Ductile iron, machinability, mechanical properties, ferritic/pearlitic matrix structure, martensitic matrix structure

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak araç gereçlerin üretilmesi için gerekli olan malzemelerin üretiminde de hızlı bir gelişme olmaktadır. Küresel grafitli dökme demir, bu gelişmeler sonucu ortaya çıkan ve diğer dökme demirlere göre çok daha iyi mekanik özelliklere sahip olan ve bu özellikleri farklı işlem parametrelerinin değiştirilmesi çeşitlendirilebilen önemli bir malzeme grubunu oluşturmuştur.

Farklı ısı işlemler yardımıyla elde edilebilecek mekanik özellikler tasarım mühendislerine çok daha fazla olanak sunmakta böylece tasarım mühendislerini sınırlandıran etkenler azalmaktadır. Isıl işlemler ya da döküm sırasındaki bileşenlerin kontrolü ile farklı özelliklere sahip matris yapılar elde edilebilmektedir.

KGDD'lere uygulanan farklı ısı işlemler sayesinde iç yapı kontrolü sağlanmakta ve buna bağlı olarak ihtiyaca göre farklı mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Elde edilen bu farklı mekanik özellikleri küresel grafitli dökme demirin kullanılacağı yerdeki mekanik ihtiyacı karşılayabilecek şekilde ayarlanabilir.

Farklı mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için parametrelerin belirlenmesi konusunda yapılan çok sayıda çalışma vardır. Araştırmacılar, gerek bazı özelliklerin ön plana çıkartılması gerekse özellikler arasında bir denge kurulması konusunda yoğun şekilde çalışmaktadır.

Bu çalışmada farklı miktarlarda ferrit içeren ferritik-perlitik ve martenzitik matris yapıya sahip küresel grafitli dökme demirlerin çekme dayanımı ve uzama değişimiyle birlikte işlenebilirlikleri incelenmiştir. Çalışmada döküm haldeki ısı işlem görmemiş küresel grafitli dökme demirde karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ostemperleme işlemi küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir olarak bilinen bu malzemelerde osferritik bir yapı bulunmakta ve bunun sonucu olarak küresel grafitli dökme demirlere göre daha üstün mukavemet ve tokluk özelliklerine sahip olmaktadır. OKGDD'in bu üstün özelliklerinin ostemperleme işlemi sonucu oluşan osferritik matris (ferrit + karbonca zengin ostenit) yapıya sahip olması ile ortaya çıktığı bilinmektedir.

Önceleri OKGDD'in iç yapısının çeliklerde olduğu gibi beynitten oluştuğu sanılmaktaydı (Chang 1998, Dubensky 1985, Gagne 1985, Janowak 1983, Baydoğan 1996), ancak daha sonra Kovac (1991) ve Hayrynen'in (1995, 1998) yaptığı çalışmalarda çelikler ile OKGDD'in iç yapısının aynı olmadığı anlaşıldı. OKGDD'in ferrit ve karbonca zengin ostenit fazının birleşiminden oluşan osferritik bir yapıya sahip olduğunu gösterdiler. Bu çalışma diğer araştırmacılar tarafından da desteklendi (Jen ve ark. 1992, Era ve ark. 1992, Özel 1994).

KGDD 'lerde alaşım elementleri ve ısı işlemin mekanik özellikler üzerine etkisini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır (Putatunda ve Gadicherla 2000, Delia ve ark. 1998, Nazarboland ve Alliot 1997). Refaey ve Fatahalla (2003) OKGDD'lerde ve düşük alaşımlı KGDD 'lerde içyapı ile mekanik özellikler, kırılma tokluğu ve aşınma direnci arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Aranzabal (1994) OKGDD 'lerde sıcaklığın içyapı üzerindeki etkisini incelemiştir. Yine bir başka çalışmada Lin (1995), Mn, Cu, Ni ve Mo içeren OKGDD numunelerde alaşım elementlerinin iç yapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini incelemiştir. OKGDD 'nin dökme demirlerle karşılaştırıldığında sertlik değerlerinin belirgin bir fark göstermediği bununla birlikte darbe dayanımının yaklaşık olarak üç kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

OKGDD'in mekanik özellikleri döküm sırasında eklenen bileşenlere, ostenitleme ve ostemperleme sıcaklıkları ve zamanlarına bağlıdır (Baydoğan 1996, Dorazil ve ark. 1990, Massone ve ark. 1996) . Cu'nun özellikle Ni ile birlikte OKGDD'in

mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. %0,6 lık Cu eklentisi mukavemeti ve grafit nodüllerinin sayısını %0,47 oranında arttırmaktadır (Shih ve ark. 1997, Hayrynen ve ark. 1998).

350°C'nin altındaki ostemperleme sıcaklıklarında yüksek miktarda Ni eklenmesi çekme mukavemetinde düşüşe süneklikte ise iyileşmeye neden olmaktadır (Lin ve ark. 1995). Ni , Cu'a benzer olarak, düşük sıcaklıklarda osferritik yapı içerisinde karbür oluşumunu engelleyici bir görev üstlenir. Bununla birlikte, %2 den fazla Ni ilavesi, döküm sırasındaki yavaş soğuma hızlarının neden olduğu segregasyon ve buna bağlı olarak martenzit oluşumuna neden olmakta ve sünekliği düşürmektedir (Shih ve ark. 1997).

OKGDD'ler, kimyasal bileşenleri ve mikro yapısına bağlı olarak ısı işlem zamanlarınının kısa olması ve karmaşık parçaların yüksek mukavemet ve aşınma direnciyle üretilmelerine olanak sağlaması nedeniyle çeliklere göre oldukça üstündür (%10 daha düşük yoğunluk) (Degarmo ve ark. 1997). Buna ek olarak OKGDD'ler dövme alüminyumlara göre daha iyi ağırlık-yoğunluk oranına sahiptir. OKGDD ler içerdikleri grafit nedeniyle sınıfındaki çeliklere göre daha iyi darbe ve çekme mukavemetine sahiptir.

Lerner ve Kingsbury (1998) sık kullanılan aşınma direnci yüksek alaşımlara karşılık ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma özelliklerini belirlemiştir. OKGDD' in aşınma direncinin kuru kesme durumunda, perlitik KGDD 'in aşınma direncinin yaklaşık dört katı, kurşun-çinko bronzunun 12 katından fazla ve alüminyum bronzunun yaklaşık 14 katı olduğunu belirlemiştirlerdir. Zimba (2004), alaşımsız OKGDD 'lerde kalıntı ostenit oranının ve sertliğin aşınma direnci üzerine etkisini incelemiştir.

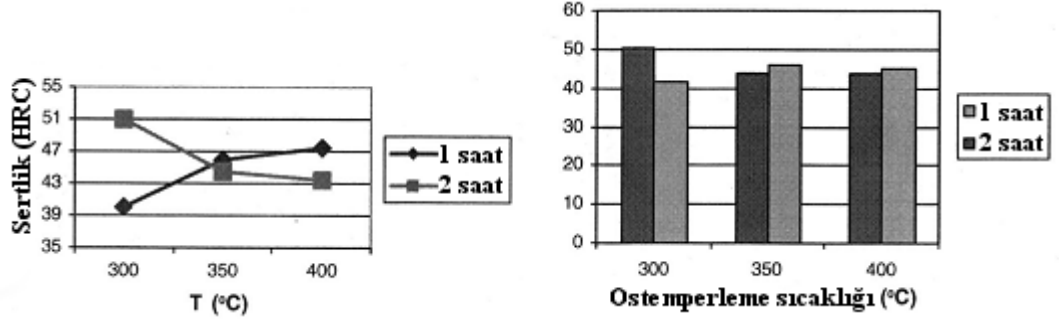
Moncoda (1998), standart testler kullanarak tornalama sırasında OKGDD 'in işlenebilirliğine etki eden bazı değişkenleri incelemiştir. Araştırmalarında işlenebilirliği, kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği gibi işleme parametreleri ile takım kalitesi ve

yanaşma açısı gibi kesici takım parametrelerine göre değerlendirmiştir. Bunların dışında takım geometrisinin, kaplamanın ve soğutma sıvısının da etkilerini incelemiştir.

Şeker ve Hasırcı (2005) ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğini kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesine bağlı olarak incelemiştir. Döküm halde ve farklı Ni ile Cu ilavesine sahip altı farklı grup malzeme deneylerde kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan deney numuneleri 900°C de 90 dakika ostenitlendikten sonra 370°C de 60, 90, 180 ve 200 dakika ostemperlenmiştir. Yapılan testler sonrası aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

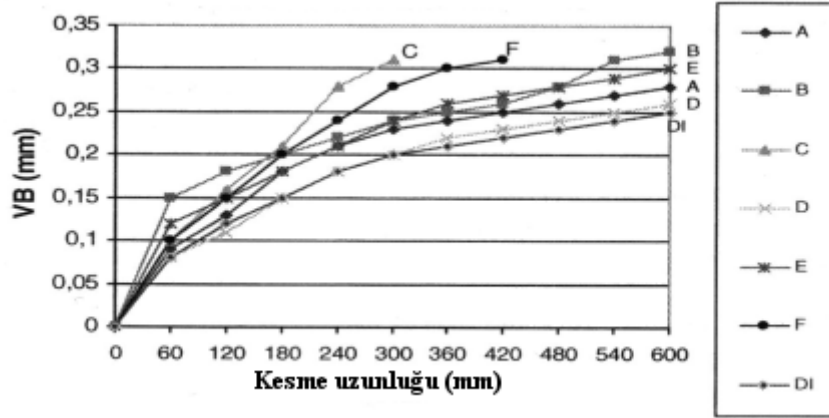
- En düşük kesme kuvveti değeri döküm haldeki numunelerden elde edilmiş buna karşılık en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri de yine bu grupta elde edilmiştir. En iyi kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri %0,7 Ni ve %0,7 Cu ilave edilmiş numunelerde gözlemlenmiştir.
- Ostemperleme işlemi bütün numunelerde yüzey kalitesini arttırmıştır.
- Döküm haldeki numunenin yüzey pürüzlülüğü değeri daha önce yapılan çalışmalar göre daha iyi çıkmıştır.
- Ostemperleme süresindeki artışının yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerinde çok fazla bir etkisi olmamıştır.
- Döküm haldeki numune dışında kesme kuvvetlerindeki değişim diğer numuneler için %20 civarında gerçekleşmiştir.
- En iyi kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri 60 dakika ostemperlenmiş %0,7 Ni ve %0,7 Cu ilavesine sahip numunede gözlemlenmiştir.

Çakır ve ark. (2005) OKGDD'lerde ostemperleme sıcaklığı ve zamanının işlenebilirlik üzerine etkilerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada üç farklı sıcaklık ve sürede ostemperlenmiş altı grup ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir kullanmış ve bu altı grup için işlenebilirliği takım ömrüne, takım aşınmasına, kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değerlendirmiştir.



Şekil 2.1 Ostemperleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik değişimi (Çakır ve ark. 2005).

Yapılan bu çalışma sonucunda Şekil 2.1 'den da görüleceği gibi 1 saat ostemperlenen KGDD'lerde sıcaklık artışıyla birlikte sertliğin azaldığını 2 saat ostemperlenen numunelerde ise sıcaklık artışıyla birlikte sertliğin arttığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.2 Test numunelerinin zamana göre aşınma değerleri (Çakır ve ark. 2005).

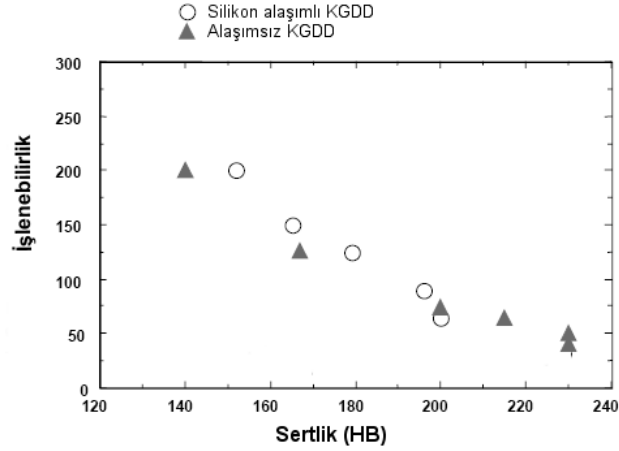
Yaptıkları çalışma sonucunda Şekil 2.2'den de görüleceği gibi sertlikle birlikte aşınmanın arttığını ancak bazı malzemelerin bu davranışa uymadığını gözlemlemişlerdir. Bu farklı davranış gösteren malzemelerde yığılma kenar oluşumunun aşınmayı arttırdığını belirlemişlerdir. Sertlik değişiminin ısı işlem parametrelerine bağlı olması nedeniyle istenen özelliklere uygun malzemelerin ısı işlem parametrelerinin doğru seçilmesiyle elde edilebildiğini göstermişlerdir.

OKGDD 'nin olası uygulamalarını arttırmak için OKGDD işlenebilirliği hakkında elde edilen bilgilerin ne kadar önemli olduğu açıktır. OKGDD 'in

işlenebilirliği üzerine, daha doğrusu işlenebilirliğini etkileyen faktörler üzerine çok fazla çalışma yapılmamıştır, ancak az sayıda, yalnızca belirli durumlardaki pratik deneyimi içeren ve belirli standartlara göre elde edilmemiş verileri barındıran çalışmalar mevcuttur.

Björkergen ve Hamberg (2003) küresel grafitli dökme demirlerde silikon ilavesinin işlenebilirlik ve mekanik özellikler üzerine etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada işlenebilirlik indeksini takım ömrüne bağlı olarak tanımlamışlar ve farklı miktarlarda silikon içeren numuneler üzerinde işlenebilirlik testleri yapmışlardır. Tanımlanan bu işlenebilirlik indeksi sertliğin bir fonksiyonu olarak alınmış ve buna bağlı olarak maliyet analizleri gerçekleştirmişlerdir ( Muhren 1988, Volvo).

İşlenebilirliğin büyük ölçüde sertlik değişimine bağlı olduğunu göstermişlerdir (Şekil 2.3). İşlenebilirlikteki iyileşmeye bağlı olarak maliyetlerde %10-20 arası bir düşüş olduğunu saptamışlardır.

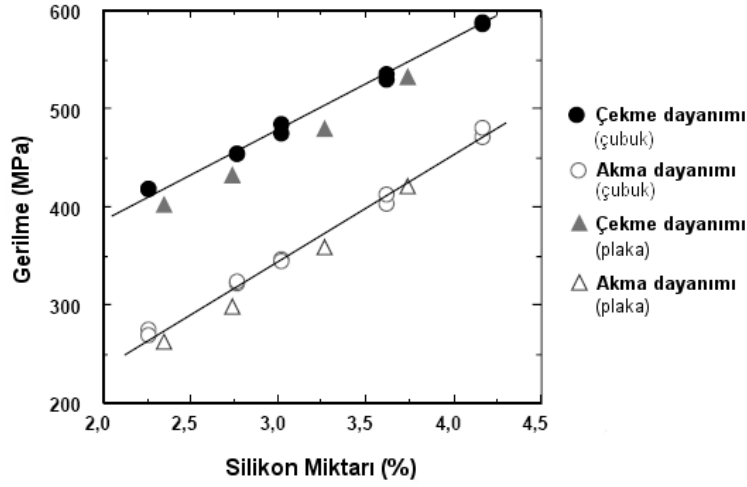


Şekil 2.3 Sertliğin işlenebilirliğe etkisi (Björkergen ve Hamberg 2003).

Sertlik dalgalanmalarının işlenebilirlik üzerine olumsuz etkisi bilinmektedir. Bu yüzden Björkergen ve Hamberg sertlik ölçümü farklı noktalarda yapmış ve buldukları sonuçların istatistiksel çalışmalarını yaparak Si ilavesinin sertlik değişimlerini düşürdüğünü buna bağlı olarak işlenebilirliğin iyileştiğini gözlemlemişlerdir .

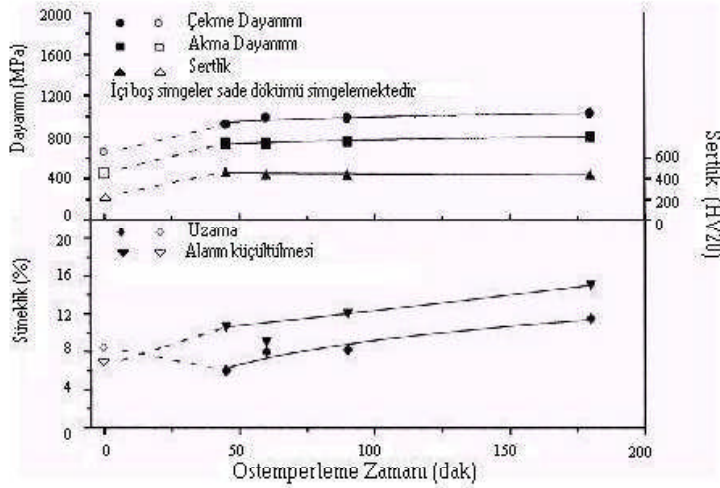


Yapılan çalışmalarda silisyum miktarının artması ile çekme ve akma mukavemetlerinin arttığını göstermişlerdir (Şekil 2.4) .



Şekil 2.4 Silikon miktarının akma ve çekme mukavemetine etkisi (Björkergeren ve Hamberg 2003).

Baydoğan ve Çimenoğlu (2001) yaptıkları çalışmada sabit olarak belirledikleri 300 °C' lik ostemperleme sıcaklığında, deney numunelerini 45, 60, 90, 180 dakika olmak üzere farklı sürelerde bekletmişlerdir. Yapılan çalışma sonucu mekanik özelliklerin normal döküme göre iyileştiği gözlenmiştir.



Şekil 2.5 Döküm haldeki ve ostemperlenmiş KGDD'in sertlik ve gerilme değişimi (Baydoğan ve Çimenoğlu 2001).

Şekil 2.5' de görüldüğü gibi, ostemperleme işlemi sırasında 45 dakikadan 180 dakikaya değişen aralıklardaki bekletme sürelerinin sertlik ve mukavemete etkisinin olmamasına karşın bekletme süresinin arttırılması tokluğun ve aşınma dayanımının artmasına yol açmıştır.

### 3. DÖKME DEMİRLER

Dökme demirler, %2 den fazla oranda karbon içeren demir-karbon alaşımlarıdır. Başlıca çeşitleri Kır, Temper , Beyaz , Alaca ve Küresel grafitli dökme demirlerdir. Bütün dökme demirlerin yapısında genel olarak şu bileşenler mevcuttur.

C	-	%2 – 4
Si	-	%0,4 – 3
Mn	-	%0,4 – 0,8
P	-	%0,1 – 0,8

Döküm endüstrisinin birçok özelliklerinden dolayı en çok kapasitesi dökme demirlere aittir. Dökme demirler, gerek döküm ve gerekse parça özellikleri bakımından birçok üstünlüklere sahiptirler. Bu özellikler ;

- Alçak ergime sıcaklığı(1150-1300<sup>0</sup> C),
- İyi akışkanlık (ötektik bileşimine yakınlık),
- Döküm ve kalıp şeklini alabilme kabiliyetinin üstünlüğü,
- Ergitme ve döküm işlemlerinin ucuzluğu,
- Kimyasal bileşim sınırlarını genişçe tutulabilmesi ve yakın özellikler elde edilebilmesi,
- Çeşitli kısımlarından ibaret bir iş parçasının tek bir işlemle elde edilebilmesi,
- Talaşlı imalat tekniğiyle iyi işlenebilmesi ,
- Titreşim söndürme özelliklerinin iyi olması,
- Basma kuvvetinin çok iyi olması,
- Aşınma ve korozyona dayanıklılık

olarak sıralanabilir.

Dökme demirlere ait yukarıda belirtilen iyi özelliklerin yanında, özellikle mühendislik projelerde aranan mukavemet ve esneklik gibi özellikleri zayıf kalır. Zira, dökme demirlerde kopma mukavemeti 14-28kgf/mm<sup>2</sup> sınırları içerisinde,kopma uzaması ise, hemen hemen yok denecek kadar küçük miktardadır.

Demir dökümlerin mekanik özelliklerini en fazla etkileyen bileşen karbondur. Yapıdaki karbon, ya bileşik halde (sementit) ya da serbest halde (grafit) olarak bulunur. Grafitli dökme demirler ise, grafitin yapısına göre çeşitlilik arz eder. Başlıcaları ;

- Lamel Grafitli ( Gri) dökme demir,
- Rozet Grafitli ( Temper) dökme demir,
- Küresel Grafitli dökme demir

olarak adlandırılır.

Grafitlerin yapıdaki şekli, sayısı ve büyüklüğü malzemenin mukavemetini önemli ölçüde etkiler. Grafitlerin ince tabakalı ve keskin köşeli olması, iç gerilmelere sebep olur ; bu bölgelerde kırılma ve çatlamlar meydana gelir. Grafitlerin lamel şekilli olması sebebiyle, mevcut yapının çekme mukavemeti değeri 60-100 kgf/mm<sup>2</sup> 'den 10-30 kgf/mm<sup>2</sup> 'ye düşmektedir. Ayrıca lamel grafitli dökme demirler gevrek olduğundan uzama oranı da %0-3 civarındadır. Temper dökme demirlerde ise, yumuşatma tavlama ile çekme mukavemeti 32-42 kgf/mm<sup>2</sup> değerlerine ulaşabilir.

Yukarda sıralanan iyi ve kötü özellikler, endüstride kullanılan dökme demirlerin %95' inden fazlasını teşkil eden gri dökme demirlere aittir. Bu özellikler, genellikle, gri dökme demirin yapısında bulunan lamel veya levha şeklindeki grafitlerin mevcudiyetinden ve bunların dağılım tarzından ileri gelmektedir.

İyi olarak nitelendirdiğimiz özelliklerden dolayı döküm endüstrisinin vazgeçilmez malzemesi olan dökme demirlerin mukavemet, esneklik ve plastiklik gibi mühendislik özelliklerini de istenen seviyeye ulaştırmak amacı ile bu alanda yapılan çalışma ve kaydedilen gelişmeleri şöyle özetleyebiliriz:

Gri dökme demirler, karbonun lamel tipi grafitler halinde çökmesi ve bu grafitlerin malzemenin esas yapısında bir devamsızlık getirmelerinden dolayı, daha evvel belirtilen kötü özelliklere sahip olmaktadır. Gri dökme demirleri imalatı esnasında aşılama (inokülasyon), aşırı ısıtma bileşimi kontrol ve alaşımlandırma gibi tatbikatlar neticesinde özelliklerin istenen ölçüde olmamakla beraber, bir miktar düzeltilmesi mümkün olmaktadır.

Dökülmüş vaziyette yapısında grafit ihtiva etmeyen ve “beyaz dökme demir” diye isimlendirilen dökme demir tipinin temperleme ısı işleminin neticesinde, yapıdaki karbürleri parçalamak ve katı fazlar içerisinde küreye benzeyen biçimde grafitler meydana getirmek mümkün olmaktadır. Bu yolla elde edilen malzemeye “ temper dökme demir ” denir. Grafitlerin sakıncalı lameller halinde olmayıp, daha küçük yüzeylere sahip yumru şeklinde olması, malzemenin mukavemetinde ve kopma uzamasında hayli yükselmelere sebep olmaktadır.

Bu görüşten hareketle, dökme demir yapısındaki grafitlerin küçük boyutlu ve küresel biçimli olarak muntazam bir şekilde dağılımının sağlanması ve böylece malzeme özelliklerinin çok daha iyi seviyelere yükseltilmesi amacıyla “KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR” malzemesi ortaya çıkarılmıştır.

Genel olarak, gri dökme demir bileşimindeki malzemenin içerisinde çok küçük miktarda Mg,Ce gibi alaşım elementleri ilavesi ile küresel grafitli dökme demirlerin elde edilmeleri mümkün olmaktadır.

Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlerin iyi özellikleri ile çeliğin mühendislik alanlarındaki üstünlüklerini (yüksek mukavemet, sağlamlık, esneklik ve ısı işleme serleştirilebilme özelliklerini) birleştirilmiş üstün kaliteli mühendislik malzemeleridir.

### **3.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler**

Küresel grafitli dökme demir, ismini bileşimindeki küresel şekilli grafitler den alır. Bu dökme demire sfero dökme demir de denir. Lamel grafitlerde görülen çentik etkisini azaltmak amacıyla, katılma sırasındaki müdahalelerle ( %0,5 Ce veya %0,5 Mg ilavesi gibi) iç yapıda küre şeklinde grafit oluşumunun sağlandığı dökme demirlerdir. Küre şekilli grafitler dökme demire yumuşaklık (süneklik) kazandırır.

Küresel grafitli dökme demirin bileşimi ile gri dökme demirin bileşimi arasında belirli farklar yoktur. Fakat özellikleri kullanma amaçları ve alanları bakımından büyük

farklar vardır. Gri dökme demirin yapısında grafitler lamel halindedir. Bu grafitler yapı içerisinde boş hacim meydana getirerek dayanımı düşürürler. Gri dökme demirin sayısız fayda ve kullanım alanı olmasına rağmen içerisinde bazı katkı maddeleri konularak küresel grafitli dökme demirin yapımı gerçekleştirilmiştir.

Endüstrinin bütün alanlarındaki kritik parçalarda KGDD'in çok aydaki başarılı uygulamaları bu malzemenin çok yönlülüğünü belirtir ve beraberinde pek çok ilave uygulama sunar. KGDD'i güvenilir şekilde kullanmak için tasarım mühendisleri bu malzemenin mekanik özelliklerini dikkate almak zorundadırlar. Bu mekanik özellikler; elastik davranış, statik dayanım, süneklik, sertlik, kırılma tokluğu ve yorulma özellikleridir. Mekanik özelliklerin yanı sıra termal genleşme, termal iletkenlik, ısı kapasitesi, yoğunlu, manyetik ve elektriksel özellikler ile şekil verilebilirlik ve işlenebilirlik KGDD'lerde ön plana çıkan özelliklerdir. Bu özelliklerin benzer metaller ile karşılaştırılması Çizelge 3.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerinin diğer döküm metaller ile karşılaştırılması (Ductile Iron Data 1998)

Karakteristik	KGDD	Dövme Demir	Gri Demir	Dökme Çelik*	Beyaz Demir
Dökülebilirlik					
İşlenebilirlik					-
Sönümlene					
Sertleştirilebilirlik					-
Elastisite Modülü					-
Darbe Direnci					-
Korozyon Direnci					
Mukavemet/Ağırlık					-
Aşınma Direnci					
İmalat Maliyeti					

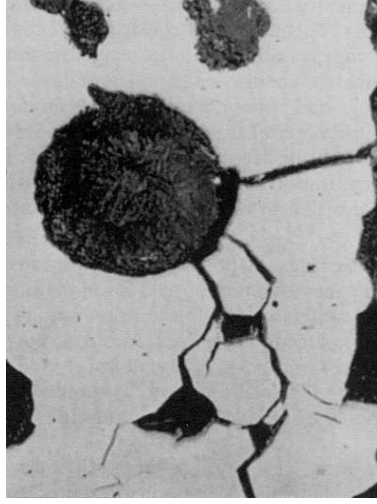
İYİ



KÖTÜ

\* %0.3 C içeren

Küresel grafitli dökme demirler tek bir malzeme değil, iç yapı kontrolüyle farklı özelliklere sahip olabilen bir malzeme grubudur. Bütün bu malzemelerin ortak özelliği küresel yapıya sahip grafit tanecikleridir. Şekil 3.1’ den de görülebileceği gibi grafit tanecikleri çatlakları doldurma görevi üstlenir ve KGDD’in sünek olmasını sağlar.



Şekil 3.1 Çatlakları dolduran grafit taneciği (Ductile Iron Data 1998)

Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri, yapısındaki yüksek miktardaki grafit içeriğiyle birlikte, matris yapısı ile belirlenir. Çizelge 3.2 iç yapı ve çekme mukavemeti arasındaki bu ilişkiyi göstermektedir. Matris yapısının bu öneminden dolayı KGDD sınıflandırılması matris yapısına göre yapılır.

Çizelge 3.2 Farklı küresel grafitli dökme demirlere ait içyapı resimleri ve çekme mukavemeti değerleri (Ductile Iron Data 1998)

MATRİS YAPISI							
Ferritik	Ferritik - Perlitik	Perlitik	Martenzitik	Temperlenmiş Martenzitik	OKGDD	OKGDD	Ostenitik
414MPa	552 MPa	690 MPa	-	793 MPa	1050 MPa	1600 MPa	310 MPa

### 3.2 Küresel Grafitli Dökme Demirin Kimyasal Bileşimi

Dökme demirlerin özellikleri ve kullanılışları üzerinde kimyasal bileşimin etkisi büyük ölçüde iki alaşım elementine (C ve Si) ve bunların grafit oluşumuna olan etkilerine bağlıdır. Her iki element de artan yüzdelerde grafit oluşumunu arttırıcı rol oynar. Çizelge 3.3’de KGDD’in bileşiminde bulunan elementler ve bunların miktarları gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Genel olarak küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimi (TS 526 EN 1563 2000).

Karbon	C	3,00-4,00
Silisyum	Si	2,00-3,00
Mangan	Mn	0,10-0,90
Fosfor	P	0,10 Maks.
Kükürt	S	0,03 Maks.
Magnezyum	Mg	0,030-0,080

Karbon dökme demirde karbür (sementit) halinde bulunabilir ve bu durumda “birleşik karbon” olarak tanımlanır, veya serbest şekilde grafit halinde de oluşabilir; dolayısıyla grafitleşme olayı ya serbest karbonun çökmesi ya da kimyasal bileşik halindeki karbonun serbest hale dönüşmesi olayıdır. Grafitleştirici elementler grafit oluşumunu teşvik ederler (SG Iron Properties 1967).

Küreselleştirici elementlerinin ve kükürdün dışında bileşimdeki (C), silisyum (Si), mangan (Mn) ve fosforun (P) alaşımın özelliklerine etkileri gri dökme demirin özelliklerine olan etkileri gibidir. Bileşimdeki karbon miktarı arttıkça alaşımın dayanımı azalır. Fosfor gri dökme demirde olduğu gibi küresel grafitli dökme demirde de alaşıma kırılganlık veren bir elementtir. Bu nedenle fosfor alaşım içinde bulunabildiği minimum miktarda yani %0,10 civarında tutulması zorunludur. Alaşımın sertliğini ve kırılganlığını arttırmamak için bileşimdeki mangan miktarı maksimum %0,50 civarında olmalıdır. Küreselleştirici elementlerin etkilerinin azalmaması için,





Ferritik KGDD elde etmek için üç yol vardır: Sıvı dökme demire, ağırlığına göre uygun miktarda magnezyum alaşımı katmak; perlitik küresel grafitli dökme demire ısıtma işlemi uygulamak ve sıvı küresel grafitli dökme demirin katılaşmasını çok yavaş bir şekilde yapmak. Ferritik KGDD döküm yoluyla elde edilebilir ancak sertleştirme tavlama ile maksimum süneklik ve düşük sıcaklık tokluğuna sahip olması sağlanabilir.

### **3.3.2 Ferritik – Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir**

Bu tip malzemeler en yaygın küresel grafitli malzeme çeşididir ve genellikle doğrudan döküm yoluyla elde edilir. Grafit kürecikleri hem ferrit hem de perlit içeren matris yapı içerisine dağılmış olarak bulunur.

Mekanik özellikleri perlitik ve ferritik küresel grafitli dökme demirlerin arasındadır. İşlenebilirliği iyidir ve üretim maliyetleri düşüktür.

### **3.3.3 Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir**

Perlit matris yapısı içerisinde bulunan grafit kürecikleri dökme demire, yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci ve ortalama süneklik ve darbe direnci kazandırır. İşlenebilirlik ise benzer mekanik özelliklere sahip çeliklere göre oldukça üstündür.

Yukarıda belirtilen üç grup KGDD en yaygın olanlarıdır ve genellikle döküm yoluyla elde edilir. Bunların dışında ısıtma işlemleri yoluyla farklı iç yapılara sahip küresel grafitli dökme demirler elde edilebilmektedir.

### **3.3.4 Martenzitik Küresel Grafitli Dökme Demir**

Bu cins KGDD’de perlit oluşumunu önlemek için yeterince alaşım elementi ilavesi yapılır veya su verme+temperleme ısıtma işlemi uygulanır. Isıtma işlemi sonucunda oluşan temperlenmiş martenzit yapısı yüksek statik dayanım ve aşınma direnci yanında düşük süneklik ve tokluk sağlar.

### **3.3.5 Beynitik Küresel Grafitli Dökme Demir**

Küreel grafitli dökme demirin bu cinsi alaşımlama ve / veya ısıtım işlemi uygulanarak elde edilen sert ve aşınma dirençli bir malzemedir.

### **3.3.6 Ostenitik Küresel Grafitli Dökme Demir**

Ostenitik matris elde etmek için alaşımlanan bu cins küresel grafitli dökme demir, korozyon ve oksidasyon direnci, üstün manyetik özellikler, statik dayanım ve yüksek sıcaklıklarda boyutsal değişimin kararlı olmasını sağlar.

Matris ostenitten ve az miktarda perlitten oluşur. Grafitler küresel şekillerini bir miktar kaybederler. Genellikle yüksek miktarda Ni ihtiva eder.

### **3.3.7 Ostemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir (OKGDD)**

Küresel grafitli dökme demir ailesine en son katılan ostemperlenmiş KGDD geleneksel KGDD'e özel bir ostemperleme ısıtım işlemi uygulanarak elde edilir. Bu cins düşük maliyet, tasarım esnekliği, talaşlı işlenebilirlik, yüksek dayanım/ağırlık oranı, tokluk, aşınma direnci ve yorulma dayanımlarına sahiptir. Herhangi bir cins KGDD'e ostemperleme ısıtım işlemi uygulanarak OKGDD elde edilebilir.

## **3.4 Küresel Grafitli Dökme Demir Bileşimindeki Ana Elementlerin Kontrolü**

### **3.4.1 Karbon**

Ticari küresel grafitli dökme demirde karbon oranı %3-4 arasında değişir. Ancak arzu edilen karbon genellikle daha dar limitler içindedir. Grafit kürelerin sayısı, karbon yüzdesine doğrudan bağlıdır. Bir başka deyişle karbon yüzdesi arttıkça grafit küre sayısı da artar. Karbon oranındaki artış ayrıca akışkanlık ve beslenme özelliklerini de iyileştirerek dökülebilirlik kabiliyetini artırır. Karbon ekivalansı 4,3 den daha büyük değeri grafit kürelerin oluşumunu ve büyümesini teşvik eder. Karbon ekivalansı 4,6 dan daha büyük olan bileşimlerde ve 2,64 cm den daha kalın kesitlerde

grafit kürelerin döküm parçasının üst yüzeyine doğru yüzmesi (Flotasyon) ve karbon segregasyonuna neden olması doğaldır.

### 3.4.2 Silisyum

Küresel grafitli dökme demir de , silisyum miktarı normal olarak %1,80 ile %2,80 arasındadır. Silisyum miktarı karbon ekivalansını etkilediği için grafitleşme ve karbon segregasyonu üzerinde de önemli rol oynar. Silisyum ötektoid dönüşümde oluşan ferritin oranını ve sertliğini arttırarak dökme demir mukavemetinde de bir artış meydana getirir. Silisyum, daha çok ferrosilisyum olarak, işlem sonunda sıvı metale ilave edildiğinde (aşılama) grafit küre sayısının kontrolü açısından daha etkin olur.

### 3.4.3 Kükürt

Küresel grafitli dökme demir demirde kükürdün en önemli etkisi grafitleri küreleştirmek amacıyla ilave edilen Mg miktarını artırmaktır. Dökme demirde Mg ilavesinden önceki kükürt oranı ergitmedeki uygulamanın ve şarj bileşiminin fonksiyonu olarak değişiklik gösterir. Mg ilavesinden sonraki kükürt oranı yaklaşık %0,015 civarındadır.

### 3.4.4 Fosfor

Gri dökme demirde olduğu gibi, küresel grafitli dökme demir de fosfor, “Steadit” olarak bilinen çok kırılgan bileşiğin oluşumuna yol açar. Fosfor, malzeme tokluk ve sünekliğini kötü yönde etkilediği için, genellikle % 0,05 maksimum değerinde sınırlandırılır.

### 3.4.5 Mangan

Önem sırasında karbon ve silisyumdan sonra yer alan elementtir. Döküm halinde karbürlerin oluşmasını önlemek için mangan oranını kontrol altında tutmak

gerekir. Mangan orta dereceli bir karbür oluşturucu etkisi olduğundan, silisyum % Si ve kesit aralığına bağlı olan bir maksimum değerde sınırlanır. Kesit kalınlığı 25 mm veya biraz fazla olan ince dökümlerde, mangan karbür oluşumunu teşvik edici etkisi, artan silisyum miktarı ile karşılanmakta ve bu durum döküm inceldikçe devam etmektedir ; 12 mm kesit kalınlığındaki bir döküm parçası için silisyum oranının %2,5 dan %3,0 'e artışı, mangan oranının %0,25 den %~0,35'e artmasına imkan verir. Kalın kesitli döküm parçalarında segregasyon nedeniyle bu tür mangan artışı söz konusu olmaktadır.

Mangan tercihli olarak sıvı içersinde secrete olur. Soğutma ne kadar yavaş olursa bu segregasyon daha çok olacaktır. Ortalama %0,4 Mn içeren alaşımda son katılaşan sıvıdaki Mg oranının %2,5 veya daha fazla olabileceği kanıtlanmıştır. Özellikle, nispeten kalın kesitlerde bu segregasyon silisyum tarafından engellenemez, zira silisyum segregasyonu tam tersinedir. Yani ilk katılaşmada zenginleşir.

### 3.4.6 Magnezyum

Hipo ve hiper ötektik bileşimleri için küresel grafitler elde edilmesinde en çok kullanılan yöntem Magnezyum ilavesidir. Mg 'dan başka elementler aynı amaçla denenmişe de bunlardan hiç biri yeter derecede uygun olmamıştır. Bu elementler arasında seryum, kalsiyum ve yitriyum sayılabilir.

Magnezyum ayrıca ergimiş metal için bir oksijen ve kükürt muhtevası çok yüksek ise önemli miktarda Magnezyum, magnezyum oksit ve sülfürlerin oluşumunda harcanmaktadır. Henüz kesin açıklanamayan bir mekanizma ile magnezyum lamel grafit oluşumunu önleyip, grafit şeklinin küre olmasını sağlamaktadır.

Genel olarak küreleşmenin sağlanması için bileşiminde %0.05 oranında artık magnezyum gerekir.

Magnezyum ile muamele esnasında hem asit hem bazik usulle ergitme için, dökme demir sıcaklığı (1538-1566°C) civarında olup, magnezyumun buharlaşma

sıcaklığının oldukça üzerindedir. Dolayısıyla sıvı metal ile temas eden magnezyum aniden buharlaşır. Ve uygun şekilde yapılmadığı takdirde reaksiyon çok şiddetli olabilir.

Magnezyumun verimi hava ile temas etmeden önce magnezyum buharın içinden geçerek yükseldiği sıvı demir derinliğine bağlıdır. Dolayısıyla sıvı metalin magnezyum buharı ile yıkandığı süre ve yıkanan derinlik magnezyum verimi açısından önemli olmaktadır.

Gerek reaksiyon şiddetini azaltmak gerekse optimum metalürjik şartları (örneğin döküm halinde karbürsüz yapı) sağlamak için, genellikle magnezyum başka elementlerle alaşımlandırılır.

Küreselleştirme işlemi ergitmeyi, yapıyorsa kükürt gidermeyi, takip eder. Bazı uygulamalarda sıvı metal bir “ön hazırlama” işlemine tabi tutulur. Bu işlemde çeşitli ilaveler kullanılırsa da SIC (silisyum karbür ) ilavesi ile ön hazırlama, küreselleştirme işleminin başarısını arttırmakla, ayrıca döküm yapısında karbür oluşumu meylini de azaltmaktadır. Sıvı metale ilave edilecek magnezyum miktarı ile ilgili bir çok formül geliştirilmiştir . Bunlar arasında en basit ve kullanımı en kolay olanı aşağıda verilmiştir.

$$\%Mg \text{ (ilave edilen)} = \frac{\text{İstenen Mg \% si}}{\text{Mg verimi ( \% ) *0.01}} + \text{Bileşimdeki S( \%)} \quad (3.1)$$

Bu bağlantıda seçilmesi en zor olan şartlara bağlı oran, magnezyum verimine ait olandır. Bu oran %10-%90 arasında değiştirebileceğinden her uygulayıcı kendi şartlarına ve önceki tecrübelerinin sonuçlarına göre bu oranı saptamak durumundadır. Aşırı magnezyum kullanmanın ekonomik sakıncası yanında, çekilme boşluğunun oluşumuna meyli arttırmak için ve döküm yapısında karbürleri meydana getirmek gibi önemli sakıncaları vardır. Dolayısıyla bileşimde kalması istenen magnezyum oranı  $\pm\%0.015$  mertebesinde kontrol edilmelidir ki buda bilinen küreselleştirme yöntemleri ile mümkündür (Çavuşoğlu 1991).

### 3.4.7 Diğer Elementler

Karbür oluşumunu magnezyum gibi hatta ondan daha kuvvetli elementler Krom, Vanadyum, Bor, Tellüryum ve Molibdendir. Bu elementlerin tavsiye edilen maksimum oranları şunlardır.

$$\begin{aligned} \text{Cr} &= \%0.05 \\ \text{V} &= \%0.03 \\ \text{B} &= \%0.003 \\ \text{Te} &= \%0.003 \\ \text{Mo} &= \%0.01-0.75 \end{aligned}$$

Ancak bu değerler döküm parçasının kesitini göz önüne almayan ortalama değerlerdir. Belirtilen elementlere ilaveten Nikel, Bakır ilaveleri ile de daha tok, daha mukavemetli, yüksek sıcaklığa ve korozyona direnci daha yüksek alaşımlar elde edilir.

Yine Nikel ya da Kurşun ilavesiyle küreselleşme arttırılabilir.

### 3.5 Grafitin Dağılımı ve Şekli Etkileyen Elementler

Grafit dağılımı tarif olarak birim hacimdeki grafit kürelerinin sayısıdır. Bu değer kesit üzerinde birim alana düşen grafit küre kesiti sayısı ile doğru orantılıdır ve “grafit küre sayısı/mm<sup>2</sup>” olarak ölçülür.

Grafit kürelerinin dağılımını yarı-kimyasal olarak etkileyen element silisyumdur. Silisyum oranı arttıkça küre sayısı da artar. Ancak fazla Si (Chunk-type) “gelişmemiş grafit partikülleri” şekline yol açar.

Karbon miktarı hem grafit şeklini hem de boyutunu etkiler, zira karbon ekivalansını değiştirir. Grafit küreleri, hiper-ötektik küresel grafitli dökme demirde daha küçük ve daha düzgün şekillidir.

Yüksek nikel ve silisyum içeriği de grafit şeklinin bozulmasını kolaylaştırabilir. Bu etki özellikle, orta veya kalın kesitli, yüksek nikelli ostenitik küresel grafitli dökme demirde görülmektedir.

As, Sb gibi çok küçük miktarlarının dahi zararlı olduğuna inanılan elementler, laboratuvar çalışmalarında ve bazı sınırlı endüstriyel uygulamalarda perlit oluşumunu teşvik ve grafit şeklini düzeltme amacıyla seryum ile beraber ilave edilmektedirler. Bir zamanlar küresel grafit oluşumunun sağlanmasında temel element olarak bilinen seryum'un ise bazı eser miktardaki elementler mevcut olmadığı takdirde, (Chunk-grafit) oluşumun yol açtığı, özellikle ostenitik küresel grafitli dökme demirlerde, gözlemlenmiştir. Küresel grafitli dökme demirde, tamamen küre şekilli bir yapı ancak küreselleştirici elementlerden bir veya birkaçının ilavesiyle elde edilebilir. Bu elementleri içeren grup Magnezyum, Kalsiyum, Lityum, Sodyum, Fosfor, Seryum, Berilyum ve diğer bazı elementlerden oluşmaktadır. Bunlar grafit şeklini etkileyen elementler olarak bilinir. Ancak çeşitli araştırmalar daha kırk veya fazla elementinde grafit şekline etkili olduğunu ileri sürmektedir.

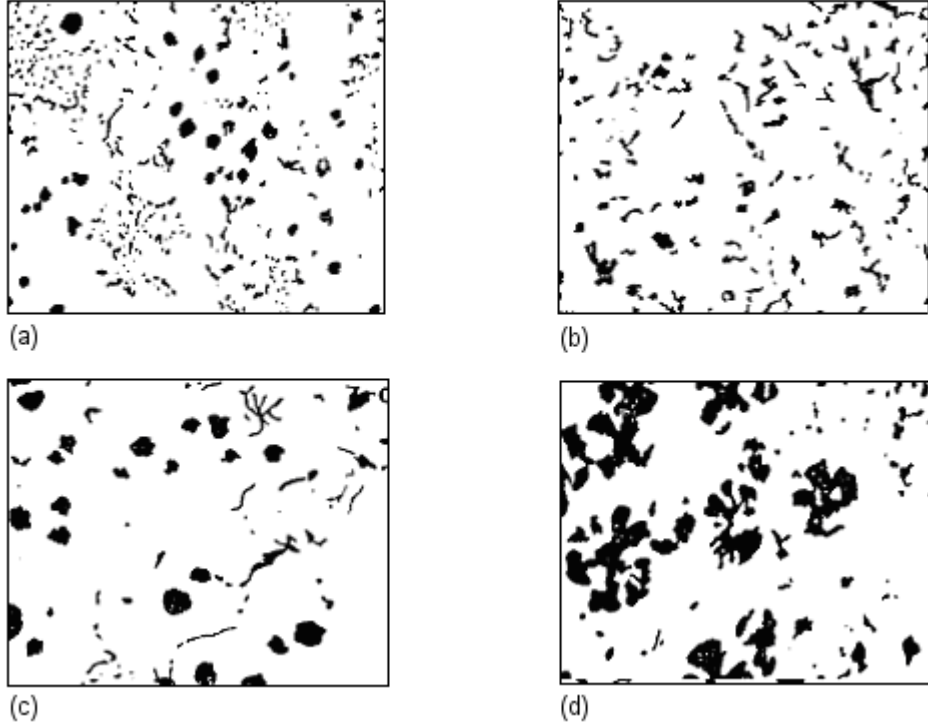
Küresel grafitli dökme demirde grafit şeklinin küreden sapışı kabaca dört şekilde olmaktadır;

- “Exploded graphite” patlamış grafit küresi,
- “Quasi-flake graphite” yarı lameler grafit,
- “Flake graphite” küçük lamelli grafit,
- “Chunk graphite” gelişmemiş grafit parti külleri

İstenmeyen bir grafit şekli olan yarı-lameler tipinin yanında patlamış küre tipinin dökme demirin mekanik özelliklerine büyük oranda bir menfi etkisi olmadığı anlaşılmıştır. Özelliklere en çok zararı olan , hücreler ara sınırlarındaki küçük grafit lamelleri ve “Chunk grafit” tipleridir. Hücreler arası grafit lamellerinin oluşumuna yol açan elementler muhtemelen katılaşma sırasında katıdan atılarak sıvıda zenginleşip bu son katılaştıran sıvı içerisinde grafit lamellerinin çökmesine neden olacak konsantrasyona erişmektedirler. Bunun sonucu hücreler

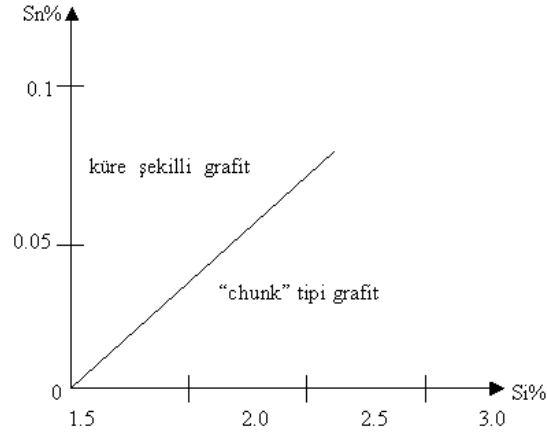


arası grafit lamelcikleri ( Şekil 3.2 c) daha çok, segregasyon için geniş zaman bulunabilen kalın kesitli dökme demirde rastlanmaktadır.



Şekil 3.2 Küresel grafitli dökme demirde normal grafit yapısından sapmalar. (a) Chunk grafit (b) Yarı lameler grafit (c) Hücreler arası grafit lamelcikleri (d) Patlamış grafit küreleri (Sümer 1981).

“Chunk” grafit ise ( Şekil 3.2-a) hücre içlerinde oluşmaktadır, hücre sınırlarında ise genellikle iyi şekillenmiş grafit küreleri mevcuttur; bu durum her ne kadar kesit kalınlığı arttıkça belirgin oluyorsa da, sebep olarak segregasyona bağlamak oldukça zordur, daha çok lamel tipi grafit oluşumuna yardım eden elementlerin “Chunk” tipi grafit oluşturan elementlerce nötralize edilmesi söz konusudur. Bu açıdan bakıldığında “Chunk” tipi grafitin elimine edilip tam küresel şekilde grafitin elde si , Şekil 3.2-c tipi grafit oluşumunu teşvik eden elementlerin ilavesi ile elde edilir. Kısaca bir elementin zararlı etkisi, yine zararlı kabul edilen bir başka elementin katkısıyla giderilmektedir. Örneğin Chunk tipi grafit oluşumuna tanımlanan silisyum ile hücreler arası grafit lâmelilerinin oluşumunu teşvik edici olarak bilinen kalay arasındaki yaklaşık ilişki (Şekil 3.3) de verilmektedir.



Şekil 3.3 Grafit şekli üzerinde değişik etkileri olan silisyum ve kalay arasındaki denge durumu (Sümer 1981).

Bir başka örnek titanyum için verilebilir. Küresel grafitli dökme demir bileşiminde, gerek kalıp gerekse maçalarda kullanılan bağlayıcılardan gelebilecek azotun kötü etkisini karşılamak için %0.02-0.04 oranlarında istenebilir, ancak yüksek oranda Ti, Mg 'un etkisini henüz bilinmeyen nedenlerle ters yöne çevirerek lamel tipi grafitleşmeye yol açtığı için arzu edilmez.

Grafit şekli üzerinde etkisi önemli olan kükürtün dökme demirdeki oranı ne kadar az olursa küreleştirmek için yapılacak ilave miktarı da o kadar az olur.

Sonuç olarak grafit şeklini etkileyen elementleri zararlı, nötr ve yararlı olarak sınıflamanın gerçekte uymadığı söylenebilir, daha öncede belirtildiği gibi bu elementlerin dökme demir yapısında bulunuş şekline (beraber veya ayrı ayrı) bağlı olarak etkileri birbirine tamamen zıt yönde gelişebilir ve birbirlerinin etkilerini kuvvetlendirebildikleri gibi nötrale edebilirler. Kesin bir sınıflandırma olmamakla birlikte grafit şekli üzerinde etkili elementler: Mg, Ce, Ca, Li, Na, K, Se, Be, Y olarak bilinmektedir. Ancak yayınlanmış çeşitli literatürlerde Al, As, Bi, C, Cd, Cu, Ni, Pb, Sb, Sn, Se, Si, Te, Ti, Zn, Zr ve nadir toprak elementlerinde grafit şekli üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Bu elementlerin etkili oranları çok değişik olabilmekte, bazıları çok çok düşük oranlarda aktif olabilmektedir. Küresel grafitli dökme demir üreten bazı küçük döküm hanelerde her iki ürünün hurdaları ile

uniform bir şarj kullanılmaktadır. Tabii bu şarj, küresel grafitli demir için ön şartları sağlayacak şekilde teşkil edilir ve gerek fosfor gerekse kükürt ve manganez içeriği düşüktür. Kükürt ve manganez miktarı gri dökme demir üretiminde pota ilavesi yoluyla yükseltilir.

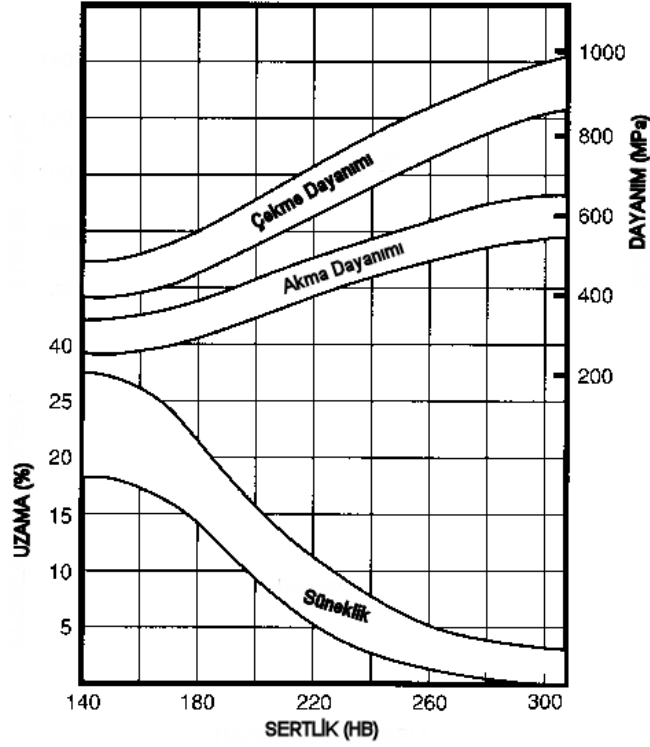
### **3.6 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri**

Küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri çelik ile dökme demirler arasında yer alır. Mekanik özellikler yönünden çeliğe benzerken, kimyasal ve fiziksel özellikleri dökme demirlere yaklaşıır. Bu sebepten geniş kullanım sahaları bulur.

KGDD'lerde proses ve bileşen kontrolü ile ya da ısıl işlemler ile matris kontrolü yapılabilir ki bu da tasarımcıya farklı mekanik özelliklere sahip KGDD kullanabilme şansı verir. Şekil 3.4'de KGDD tarafından elde edilebilecek dayanım, süneklik ve sertlik değerleri görülmektedir. İyi bir sünekliğe sahip ferritik KGDD'lerde %18 ila 30 arasında bir uzama elde edilebilir ki bu değer de çekme dayanımı düşük karbonlu çeliklere yakındır. Perlitik KGDD'lerde ise çekme dayanımı değeri 825 MPa'nın üzerine çıkar ancak süneklik azalır. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler (OKGDD) ise çok daha iyi mekanik özelliklere ve aşınma direncine sahiptir (çekme dayanımı 1600MPa üzerinde olabilir).

#### **3.6.1 Sertlik**

KGDD'in sertliği çoğunlukla ve en iyi bir şekilde 10 mm çapında sertleştirilmiş çelik veya tungsten karbür bilyenin düz bir KGDD numune yüzeyine batırıldığı Brinell sertlik ölçümü ile yapılır. Sertlik, Brinell iz çapı veya Brinell sertlik değeri olarak ifade edilir. Sertlik HB/3000 olarak da tanımlanır. Burada 3000 batıcı bilyeye uygulanan kg olarak kuvveti göstermektedir. Brinell izinin boyutu ve ilgili plastik deformasyonun hacmi büyük oranda iç yapıya bağlıdır.



Şekil 3.4 KGDD'lerde sertlik ve dayanım arasındaki ilişki (Ductile Iron Data 1998)

Brinell sertlik değeri pek çok KGDD özelliğini kapsar. Sertlik özelliği üretim kontrolünde kullanılabilir. Örneğin, talaşlı işlenebilirliği kontrol etmek için. KGDD matrisindeki fazların sertliğini ölçmede Knoop veya Vickers batıcı uçları kullanılarak mikro sertlik deneyleri yapılır.

İçyapı bileşenlerinin mikro sertlik değerleri döküm halindeki, tavlanmış ve normalize edilmiş ticari KGDD'in çekme özelliklerini belirlemek için kullanılabilir. Şekil 3.5 dayanım ve uzama değerlerini aşağıdaki lineer dağılım eğrileri ile kıyaslamaktadır.

$$\text{Çekme Dayanımı } (\sigma_c) \text{ [ksi]} = 0,10 + 0,36 \times \text{CMMH} \quad (3.1)$$

$$\text{Akma Dayanımı } (\sigma_{A0,2}) \text{ [ksi]} = 12 + 0,18 \times \text{CMMH} \quad (3.2)$$

$$\text{Uzama [\%]} = 37,85 - 0,093 \times \text{CMMH} \quad (3.3)$$

Burada CMMH kompozit matris mikro sertliği olup denklem 3.4 ile ifade edilmektedir;

$$\text{CMMH} = [(\text{HF} \times \%F) + (\text{HP} \times \%P)] / 100 \quad (3.4)$$

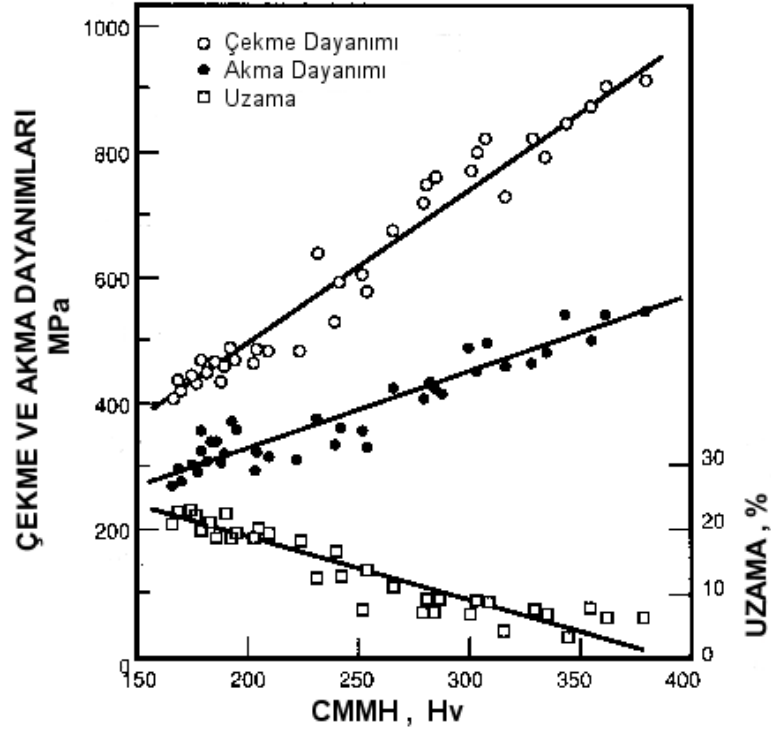
burada HF : Ferritin sertliğini,

%F : Ferritin hacimsel oranını (%),

HP : Perlitin sertliğini,

%P : Perlitin hacimsel oranını (%)

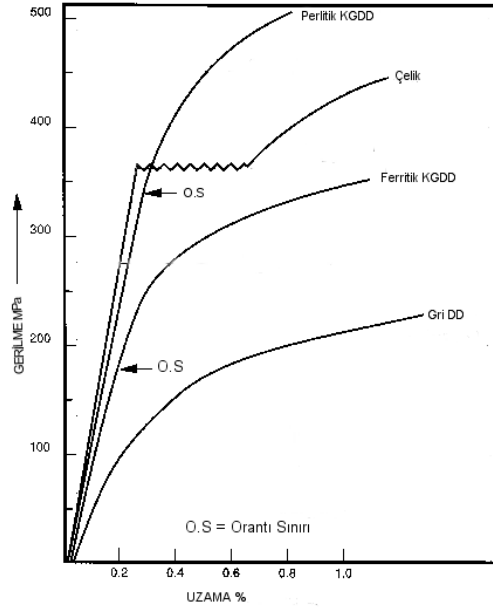
göstermektedir.



Şekil 3.5 Kompozit matris mikro sertliğinin çekme ve akma dayanımları ile uzamaya etkisi (Ductile Iron Data 1998).

### 3.6.2 Çekme Dayanımı

KGDD'in çekme özellikleri, bilhassa süneklik, akma ve çekme dayanımları mekanik davranış üzerinde en çok etkili olan belirleyicilerdir. Sertlik değerleri genellikle ek bilgi olarak sunulmakta ve darbe özellikleri ise sadece belirli ferritik türlerde önem kazanmaktadır. Ayrıca KGDD'in elastisite modülü ve oranı sınırı da önemli tasarım kriterlerindedir. Şekil 3.6'de çelik, gri dökme demir, ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirler için çekme (gerilme-uzama) diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.6 Ferritik ve Perlitik KGDD ile Gri DD ve çeliğin elastik ve akma davranışı (Ductile Iron Data 1998).

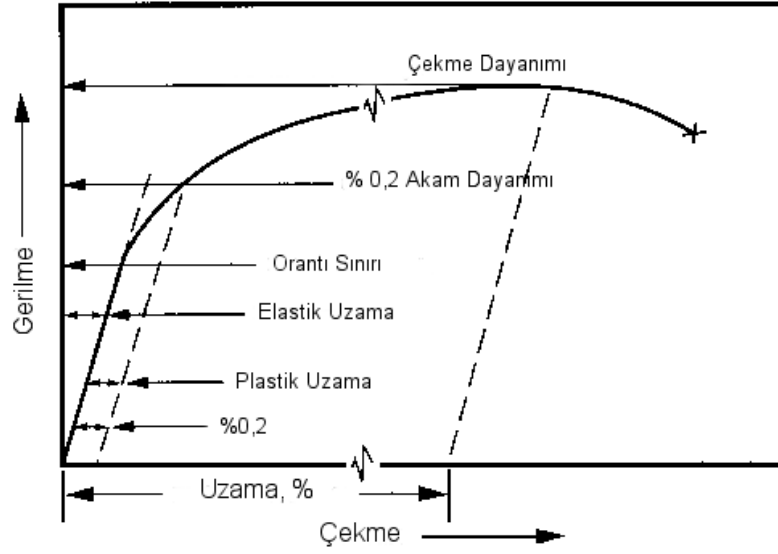
Mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme ve akma dayanımıyla birlikte sertlik ve uzama önemli bir rol oynar.

Çekme dayanımı malzemenin kopmadan öne dayanabileceği maksimum gerilme değerine karşılık gelmektedir. Çekme testi sırasında uygulanan maksimum kuvvetin numune kesit alanına bölümü yolu ile hesaplanır. Küresel grafitli dökme demirlerde çekme dayanımı değeri ferritik yapılar için 414 MPa, martenzitik yapılar için 1380 MPa'ın üzerindedir.

Çekme deneylerinden elde edilen enine elastik deformasyonun boyuna elastik deformasyona oranı olarak bilinen Poisson oranı KGDD'lerde küçük bir değişim gösterir. Genel olarak KGDD için kabul edilen poisson oranı 0,275'tir.

### 3.6.3 Elastisite Modülü

Şekil 3.7' den görülebileceği gibi düşük çekme gerilmelerinde gerilme ve uzama arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu ilişki Hooke kanunu olarak bilinir ve bu doğrunun eğimi elastisite modülü olarak adlandırılır.



Şekil 3.7 Sünek malzemeler için tipik uzama-gerilme eğrisi (Ductile Iron Data 1998).

Şekil 3.7’ de görüldüğü üzere küresel grafitli dökme demirin uzama – gerilme özelliği benzer çelik ve gri dökme demir arasında kalmaktadır. Küresel grafitli dökme demir çeliğinkine benzer bir orantılılık veya elastik gerilme - uzama özelliği gösterir fakat plastik deformasyonun başlama seviyesi çeliğinkinden farklıdır. KGDD’in çekme esnasında ölçülen elastisite modülü  $1,62 - 1,7 \times 10^5$  MPa arasında değişir.

Küresel grafitli dökme demirlerde çekme özellikleri üzerinde grafit morfolojisinin ve matris yapısının etkisi önemli boyutlarda olması bu özellikler arasında bir ilişki kurulmasını sağlar. Siefer ve Orth (1970) küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri üzerine yaptığı istatistiksel çalışmada çekme dayanımı ile uzaman arasında

$$(\text{Çekme dayanımı [ksi]})^2 * \text{uzama [\%]} / 1000 = Q \quad (3.5)$$

şeklinde bir ilişki olduğunu bulmuşlardır. Burada Q bir sabit olup büyük Q değerleri yüksek dayanım ve uzamanın birleştiği daha iyi mekanik performansı göstermektedir. Crews (1974) bu Q değerini küresel grafitli dökme demir için kalite endeksi olarak QI tanımlamıştır. Gerek QI gerekse bunun altında yatan dayanım ve uzama arasındaki ilişki farklı dökümlerin kalitesi hakkında ve çeşitli özelliklere sahip döküm elde etme konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Büyük QI değerleri, yüksek küresellik ( fazla

sayıdaki küresel ya da küresele yakın grafit sayısı), bölgeler arası grafit varlığı, yüksek kürecik sayısı, düşük karbür hacimsel kesri, düşük fosfor miktarı (< %0,03) ve iç gözeneklerin oluşmaması ile sağlanabilmektedir.

### 3.7 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

DKK işareti “Dökme Demir Küresel Grafitli” anlamına gelmektedir. DKK işaretini izleyen sayılar ise minimum çekme mukavemetini gösterir. Alman DIN standartlarında küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması aynen TSE’deki gibidir, ancak işareti GGG olarak verilmektedir. Amerikan ASTM A536 –70’e göre ise minimum çekme %0,2 akma mukavemeti (p.s.i olarak) ve uzama %’sini gösteren rakamlar sınıflandırma işareti olarak kullanılmaktadır. Örneğin 60-40-18 işaretli malzeme, 60.000 p.s.i minimum çekme mukavemeti, 40.000 p.s.i %0,2 akma mukavemeti ve %18 uzaması olan küresel grafitli dökme demirdir. Fransız standartlarında NFA 32-201 Küresel grafitli dökme demir için kullanılan işaret FGS olup izleyen rakamlar,  $\text{kg/mm}^2$  olarak minimum çekme mukavemetini ve % uzama değerini göstermektedir, örneğin FGS 70-2. İngiliz BS 2789 standartlarında , yine çekme mukavemeti  $\text{ton/in}^2$  ve minimum % uzamayı belirtecek şekilde, örneğin SNG 24-17. Rus GOST 7293-70 standartlarında VCH 38-17 işaretiyle  $38 \text{ kg/mm}^2$  minimum çekme mukavemeti ve % 17 uzamaya sahip küresel grafitli dökme demir belirtilmektedir.



### 3.8 Lamel Ve Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler

#### 3.8.1 Giriş

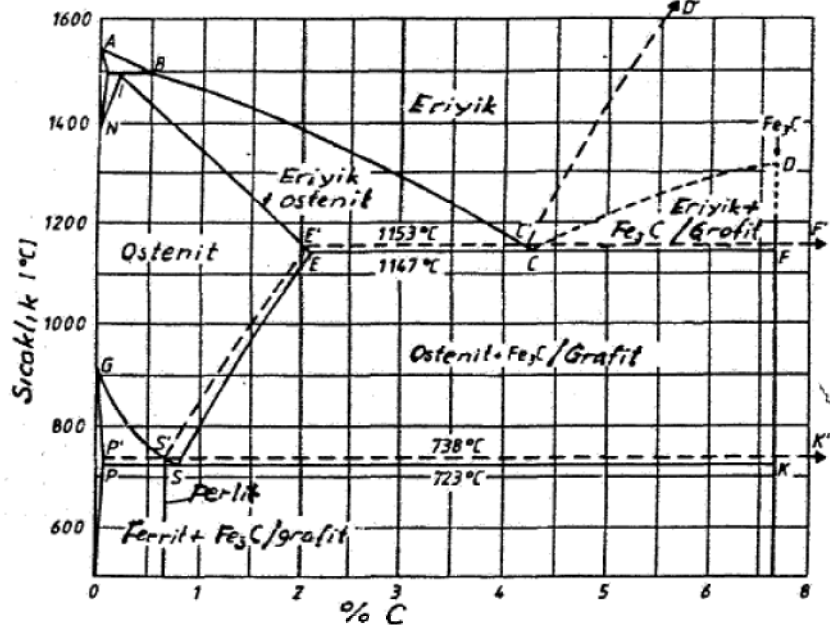
Lamel ve küresel grafitli dökme demirlerden üretilmiş parçaların kullanım özellikleri ısı işlemler yardımıyla önemli ölçüde geliştirilebilir. Isıl işlemler sayesinde içyapıdaki bağlı karbonun miktarı ve içyapı oluşum şekli geniş sınırlar içinde değiştirilerek, dökme parçanın kullanılma amacına en uygun özelliklere sahip olması sağlanabilir. Dökme demirlere uygulanan ısı işlemlerin başlıcaları şunlardır:

- Gerilme giderme tavlama: Dökme parça içindeki iç gerilmelerin azaltılması amaçlanır;
- Yumuşatma tavlama: Sertliğin azaltılması ve dolayısıyla tokluğun artırılması amaçlanır;
- Normalizasyon (perlitleme): içyapı kısmen veya tamamen perlitte dönüştürülür.
- Su verme ve ıslah işlemi: Kritik sıcaklığın üzerine ısıtılarak (yaklaşık 900°C) ostenitleme yapılır ve su verilerek sertlik, dayanım ve aşınmaya dayanıklılık artırılır. Malzemenin tokluğunu artırmak için bu işlemden sonra bir temperleme (menevişleme) uygulanabilir.
- Beynitleme (ostemperleme): Ostenitlemeden sonra, beynit kademesindeki bir sıcaklığa su verilen malzeme, bu sıcaklıkta tutularak ostenitin beynite izotermik dönüşümü sağlanır.

Yukarıda sıralanan ısı işlemlerle sağlanan içyapı oluşturmanın esasları demir-karbon diyagramı yardımıyla anlaşılabilir, Şekil 3.8. Her ne kadar bu ikili faz diyagramında silisyum ve benzeri alaşım elementlerinin etkisi görülüyor ve burada verilen sıcaklık ve derişiklikler alaşımlama ile değişıyorsa da, aşıağıda açıklanan ısı işlemler prensiplerinde önemli bir fark olmaz.

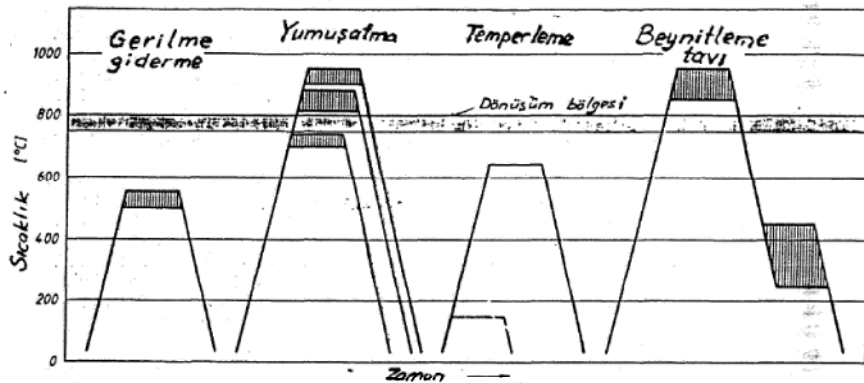
Şekil 3.9'de yukarıda sıralanan ısı işlemlerde geçerli olan sıcaklık-zaman değişimleri verilmiştir. Görüldüğü gibi ısı işlemler çeliklerin ısı işlemlerine oldukça benzemektedir. Dökme demir içinde bulunan bazı elementler dönüşümlerin kararlı veya

yarı kararlı olmasını etkilediğinden bu malzemelerin ısı işleme, çeliklerin ısı işleminde farklılıklar gösterir. Çelikteki imkanlara ek olarak dökme demirlerde bağlı karbon uygun bir sıcaklık kontrolü ile grafit olarak da ayrıştırılması mümkündür.



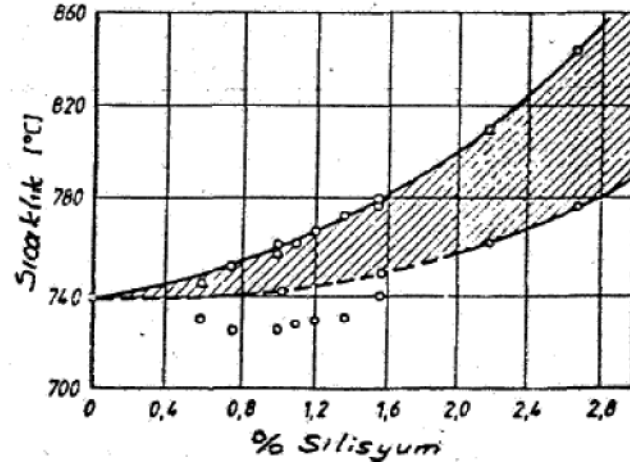
Şekil 3.8 Demir-karbon diyagramı ( Aran 1991).

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



Şekil 3.9 Dökme demirlere uygulanan ısı işlemlerden bazıları (Aran 1991).

En önemli alaşım elementlerinden biri olan silisyum derişikliğinin artması ile ötektoid sıcaklığı değişir, Şekil 3.10. Ostenitin perlit veya grafit/ferrite dđnüştüđü bu sıcaklık kritik sıcaklık ( $A_{c1}$ ) olarak da adlandırılır. Görüldüğü gibi artan silisyum miktarı ile kritik sıcaklık artmakta ve dđnüşün genişliği giderek artan bir sıcaklık aralığında gerçekteşmektedir. Bunun yanında % 0,8 C derişikliğindeki ötektoid noktası da artan silisyum miktarı ile daha düşük derişikliklere ötelenmektedir. Bazı ısıl işlemlerde kritik sıcaklığın kesin olarak bilinmesi çok önemlidir.



Şekil 3.10 Silisyum miktarıyla ötektoid sıcaklığının ve dđnüşüm aralığının değişimi (Aran 1991).

### 3.8.2 Gerilme Giderme Tavı

Döküm yöntemiyle üretilmiş bir parçanın iç gerilmesiz 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 gerilemelerin oluşum nedenleri üç grup altında toplanabilir:

- 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 soğuyarak büzülme 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 bilye püskürtme gibi yüzey temizleme işlemleri basma iç gerilmeleri yaratabilir.

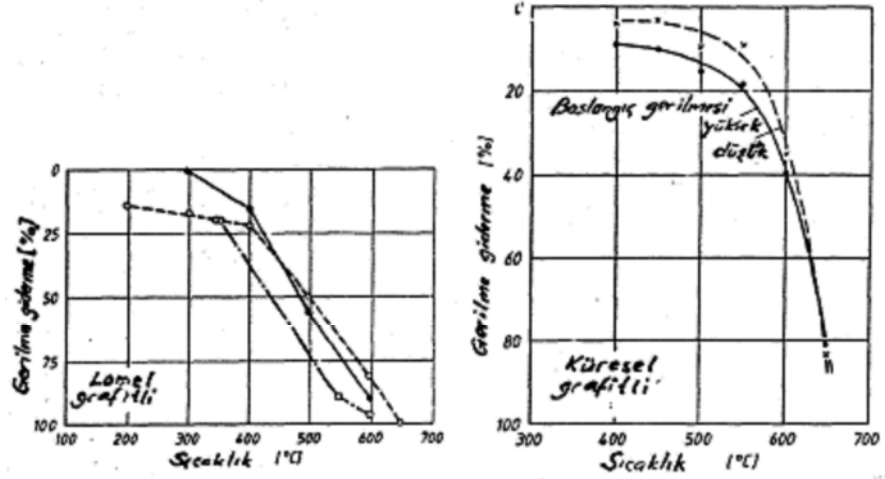
İç gerilmeleri önlemek için değişik tedbirler alınabilir. Bunlar arasında döküm tekniğine uygun biçimlendirme ve boyutlandırma ile döküme özgü tekniklerle farklı kalınlıklardaki cidarların soğuma hızlarını etkilemek sayılabilir. Döküm sonrasında parçayı kalıptan çıkarma sıcaklığını ve dolayısıyla soğuma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

Döküm iç gerilmelerinin azaltılması için en emin metot ısı 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 islenmesinden önce yapılması gereklidir. Ancak akma sınırı hiçbir zaman sıfıra düşürülemeyeceğinden gerilmelerin tamamen giderilmesi söz konusu değildir.

Gerilme giderme ısı işlemi ostenit dönüşüm sıcaklığının altında gerçekleştirilir ve parça yavaş soğuma ile oda sıcaklığına getirilir (Bkz. Şekil 3.9)

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 3.11'te görülmektedir. Buna göre 400°C'nin altındaki sıcaklıklarda iç gerilmelerin ancak % 20-30'u giderilebilmektedir. 500°C sıcaklıkta ise gerilmeleri %75'inin kaybolduğu görülmektedir.



Şekil 3.11 Lamel ve küresel grafitli dökme demirlerde tav sıcaklığıyla gerilme giderme yüzdesinin değişimi (Aran 1991).

Alaşımız dökme demirlerde 600°C'in üzerindeki sıcaklıklarda veya uzun sürelerde içyapı değişimleri sonucu dayanım ile sertlik düşer, buna karşın işlenebilme kabiliyeti artar. Isıl işlem sonrasında yapılacak basit bir sertlik ölçümü ile içyapı değişimlerinin olup olmadığını anlaşılabilir. 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 sınırını 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 tercihen 600-650°C sıcaklıklarında tavlanylrlar. Şekil 4'te verilen örnekte görüldüğü gibi ostenitik dökme demirde 600°C'da iç gerilmelerin %40'ı, 650°C'da ise %80'i giderilebilmektedir.

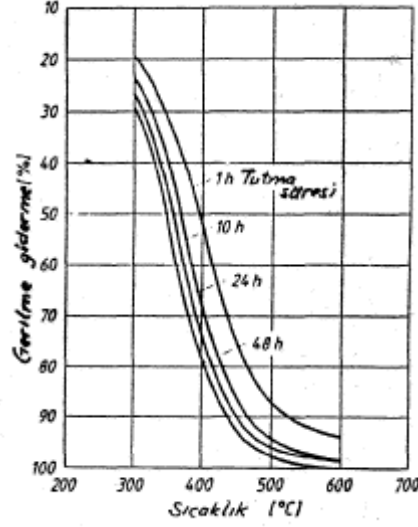
İçyapısında martenzit, beynit veya temperlenmiş martenzit bulunan dökme malzemelerde içyapı değişimlerine neden olmadan etkin bir gerilme giderme yapmak olanaksızdır.

Gerilme giderme tavı 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 geometrili ve cidar kalınlıklarının dengeli olduğu durumlarda ısıtma hızı 30 ila 50 °C/saate çıkarılabilir.

Gerilme giderme genellikle ilk 1 saat içinde gerçekleştiğinden yüksek sıcaklık ve kısa sürelerin kullanılması, düşük sıcaklık ve uzun sürelerin kullanılmasından daha ekonomiktir. Şekil 3.12'da tav süresinin gerilim gidermeye etkisi görülmektedir. Tav sıcaklığında tutma süresi olarak her 25 mm kalınlık için 1 saat alınabilir.

Isıl işlem sonrasında lokal iç gerilmelerin oluşmasını önlemek için dökme parçalar en azından üst sıcaklık bölgelerinde yavaş soğutulmalıdır. 650 ile 300 °C sıcaklıkları arasındaki soğuma hızı 40 °C/saati 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.

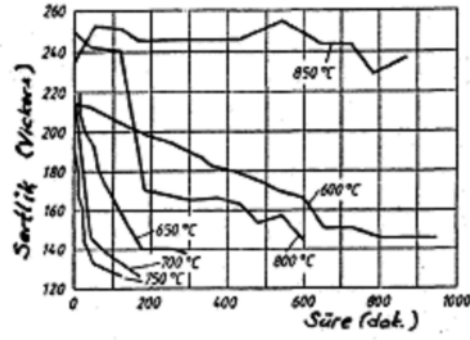


Şekil 3.12 Alaşım-sız lamel grafitli bir dökme demirde tutma süresinin gerilme gidermeye etkisi (Aran 1991).

### 3.8.3 Yumuşatma Tavı

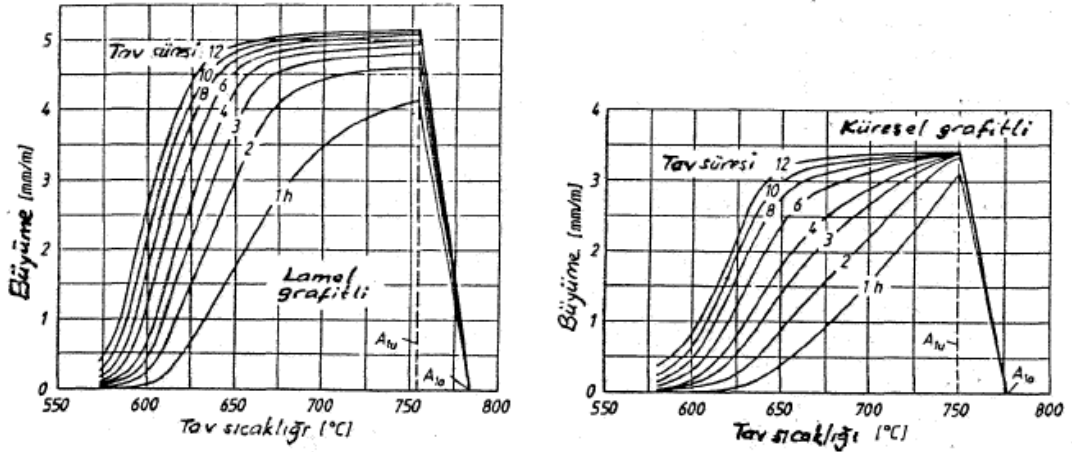
Yumuşatma tavında dökme demirler, içyapılarında bulunan serbest ve/veya perlit içindeki sementitin ferrit ve grafit fazlarına ayrışacağı sıcaklıklarda yeterli sürelerde tutularak mümkün olduğu kadar yumuşak bir içyapı durumu elde edilir. Bu işlemin amacı malzemenin izlenebilirlik özelliğini iyileştirmektir.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

Yumuşatma tavı Şekil 3.13'den de görüldüğü gibi çok değişik sıcaklıklarda yapılabilir. Çok uzun tav sürelerinde alaşım-sız 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 alaşım-sız ve az alaşımlı dökme demir türleri için 740 ile 829 °C arasında değişmektedir.



Şekil 3.13 Lamel grafitli bir dökme demirde yumuşatma tavi sıcaklığının sertliğe etkisi (Aran 1991).

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" söz konusudur. Bu hacim artışı malzemenin kimyasal bileşimine ve tavi sıcaklığına bağlıdır. Şekil 3.14 'da lamel ve küresel grafitli dökme demirlerin "büyümesinin" tavi sıcaklığı ve tavi süresi ile değişimi görülmektedir. Başlangıçta her iki malzeme de perlitik içyapıya sahiptir. Bu şekillerden sınır büyümenin lamel grafitli de daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.14 Lamel ve küresel grafitli iki dökme demirde yumuşatma tavi sıcaklığının büyümeye etkisi (Aran 1991).

Bu şekillerden ayrıca ekonomik bir tavi için sıcaklık ve sürenin uygun olarak seçiminde yararlanılabilir. Görüldüğü gibi ayrışma hızı kritik sıcaklığın hemen altında yüksek olmakta ve çok uzun tavi sürelerine gitme zorunluluğu ortaya çıkmadan grafit



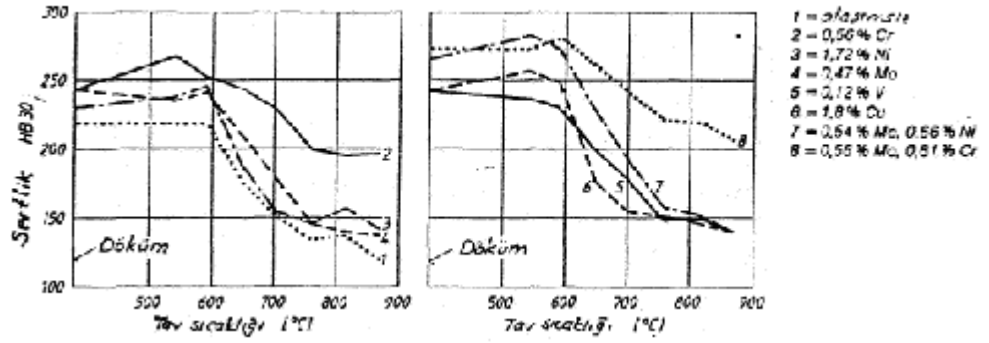
oluşumu sağlanmaktadır. Kritik sıcaklık bölgesinin seviyesi kimyasal bileşime ve alaşım elementi miktarına bağlıdır, özellikle silisyumun etkisi büyüktür. Silisyum değerindeki her %1'lik artış ötektoid sıcaklığını 25°C artırır, bunun yanında karbon yayınmasını da teşvik eder. Ostenit bölgesini genişleten 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 tavlama 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 tavlama 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 elementler sementit içinde tercihen 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 3.15'da aynı kimyasal bileşime sahip dökme demirlerde bası alaşım elementlerinin değişik sıcaklıklarda sertlik değeri üzerindeki etkileri görülmektedir, içyapıda krom ve/veya vanadyum karbürlerin bulunması halinde kısmi veya tam bir karbür çözünmesi için çok yüksek sıcaklıklar ve/veya tavlama 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 tavlama 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, ısı ve elektriksel iletkenliği önemli ölçüde artar. Yorulma dayanımı ve kırılma tokluğu bakımından önemli bir fark saptanamamıştır. Ancak yumuşatma tavı yapılmış malzemede çatlak başlangıçlarının çok daha önce olduğu bilinmektedir. Bu olgu grafit/matris ara yüzündeki bağın zayıf olması ile açıklanmaktadır, öte yandan ferritin matriste çatlak ilerleme hızı daha yavaş olmaktadır.



Şekil 3.15 Alaşım ve alaşımsız lamel grafitli dökme demirlerde bir saatlik yumuşatma tavinin Brinell sertliğine etkisi (Aran 1991).

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

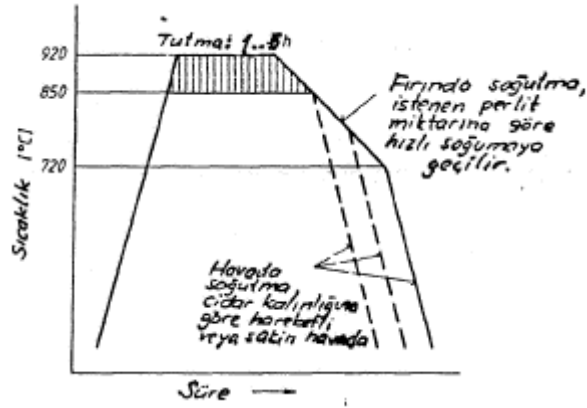
Malzemenin kimyasal bileşimi ve dolayısıyla başlangıçtaki iç yapısına bağlı olarak yumuşatma tavı düşük, orta ve yüksek sıcaklıklarda yapılabilir.

### 3.8.4 Normalizasyon Tavı

Normalizasyon tavinin amacı iç yapıyı kısmen veya tamamen perlitte dönüştürmek ve bu sayede dayanım özelliklerini geliştirmektir. Bu ısı işlem çoğu zaman perlitlenme olarak da adlandırılmaktadır.

Normalizasyon 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.

Normalizasyonun ilk kademesi bir ostenitleme tavı 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. Normalizasyon işlemindeki sıcaklık-zaman eğrisi Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16 Dökme demirlerin normalizasyon ısıl işleminin şematik gösterimi (Aran 1991).

Ostenit bölgesindeki tutma sıcaklığının aşırı yüksek seçerek tane irileşmesine neden olmaktan kaçınmalıdır. 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.

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 tavı uygulanır.

### 3.8.5 Su Verme ve Islah Etme

Dökme demirlerin mekanik özellikleri ve aşınmaya karşı dayanıklılıklarını su verme ve ıslah etme ile önemli ölçüde iyileştirilebilir.

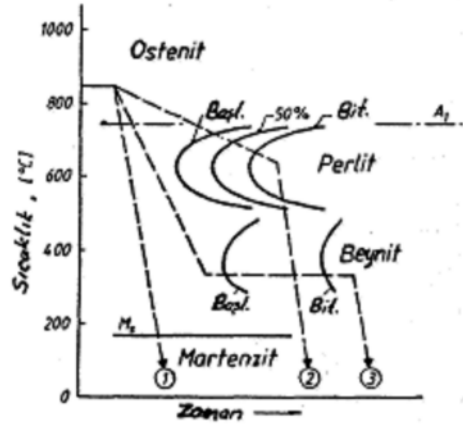
Su verme sırasında ostenit bölgesinden yağ veya suda ortamında hızla soğutulan malzemede normal ostenit ferrit dönüşümü gerçekleşmez. İçinde daha yüksek oranda karbon çözüdüren ostenit, içinde hemen hemen hiç karbon çözüdüremeyen ferrite değil, ostenitle aynı kimyasal bileşime sahip iğneli yapıya sahip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

Bilindiği gibi demir esaslı malzemelerin dönüşüm davranışları , Şekil 3.17' de olduğu gibi ZSD-diyagramlarında gösterilebilir. Martenzitik bir içyapı elde etmek için perlit burnunu kesmeden geçecek bir hızda soğutmak gereklidir, Şekil 3.17 - 1 çizgisi. Martenzit oluşumu için gerekli minimum soğuma hızı kritik soğuma hızı olarak adlandırılır.

Karbon miktarı çok yüksek olan dökme demirlerin hemen hepsi sertleşebilir özelliklere sahiptir. Ancak tüm karbonu grafit olarak ayrıışmış ve bağlı sementit miktarı çok düşük olan dökme demirlerin sertleştirilmesi pratik olarak uygun değildir, çünkü karbonu ostenit içinde çözeltiye 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 maksimum 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.



Şekil 3.17 Zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramları ve bazı ısıl işlemlere ait soğuma eğrileri ; 1 : su verme, 2 : perlitlenme, 3: ostemperleme (Aran 1991).

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 tavı 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.

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

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

Temperleme : Dökme parçalar su vermeden 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 karbürler çökelir, sertlik çok fazla değişmemesine rağmen kırılma bir miktar giderilmiş olur. 250-400°C sıcaklıkları arasında 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, kırılma azalır ve birçok mekanik özellik iyileşmiş olur.

Su verme sonrasında sertlik 45 ila 60 RC (430 ila 600HB) 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 sertleşme kabiliyetinin ölçütüdür.

Küresel grafitli dökme demirlerde de benzer şekilde molibden, krom, bakır, mangan gibi elementlerle alaşımlama ile sertleşme kabiliyeti iyileştirilebilir.

Temperleme ile dökme demir sertlikten kaybeder, ancak çekme dayanımı ve tokluk değeri 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 karalılığının daha yüksek olduğu alaşımlı dökme demirlerde ise temperleme sıcaklığı 400 ila 500°C sıcaklıklarında bir gevrekleşme söz konusu olduğundan bu aralıkta menevişleme yapılması tavsiye edilmez. Bu temper gevrekliği bileşime molibden katılması ile azaltılabilir.

Küresel grafitli dökme demirlerin 540 °C'ın üzerinde temperlenmesi halinde martenzit ikincil grafitte dönüşmektedir. Martenzitten ayrışan 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'in üzerinde düşüş gösterir, Şekil 16. İkincil 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.

### 3.8.6 Ostemperleme

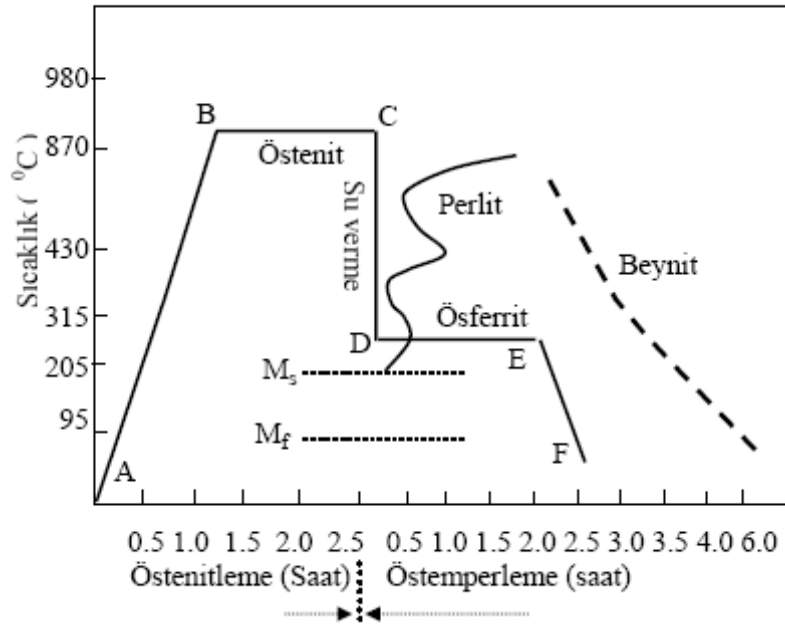
Bu işlem genellikle küresel grafitli dökme demirde uygulanır ve malzemeye uygun bir dayanım+tokluk özellik çifti kazandırılması amaçlanır. Bu şekilde küresel grafitli dökme demirde 1000..1600 N/mm<sup>2</sup>'ye varan dayanımlar ve % 14 ile 20 arasında değişen kopma uzamaları elde etmek mümkün olur.

Ostemperlemenin su verme + temperlemeden üstünlükleri şunlardır:

- Ostenit içindeki karbonun beynite dönüşmesi sırasında oluşan hacim değişimleri çok küçüktür, bu sayede çatlak oluşma tehlikesi ve çarpılma olasılığı azalır.

- Genellikle 250..450 °C arasında sabit sıcaklıkta yapılan ve su verme sonrası uygulanan temperlemeden daha düşük olan sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu işlem sırasında ikincil grafit ayrışması ve ferrit oluşumu tehlikesi yoktur.

Ostemperleme işlemi ostenitleme, ostemperleme sıcaklığına soğutma, tutma ve oda sıcaklığına soğutma işlemlerinden oluşur. Bu kademeler Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Geleneksel (tek kademeli) ostemperleme işleminin şematik gösterimi (Çetin ve Gül 2006).

OKGDD ısı işlem döngüsü iki aşamalı prosesle gerçekleştirilir. I. aşamada ostenit, ferrit ( $\alpha$ ) ve yüksek karbonlu ostenit ( $\gamma_{yk}$ )'e ayrışır.

$$\gamma = \alpha + \gamma_{yk} \quad (3.6)$$

Döküm malzeme ostemperleme sıcaklığında çok uzun süre bekletilirse, II. aşama reaksiyonu başlar ve yüksek karbonlu ostenit ( $\gamma_{yk}$ ), ferrit ve karbüre ayrışır:

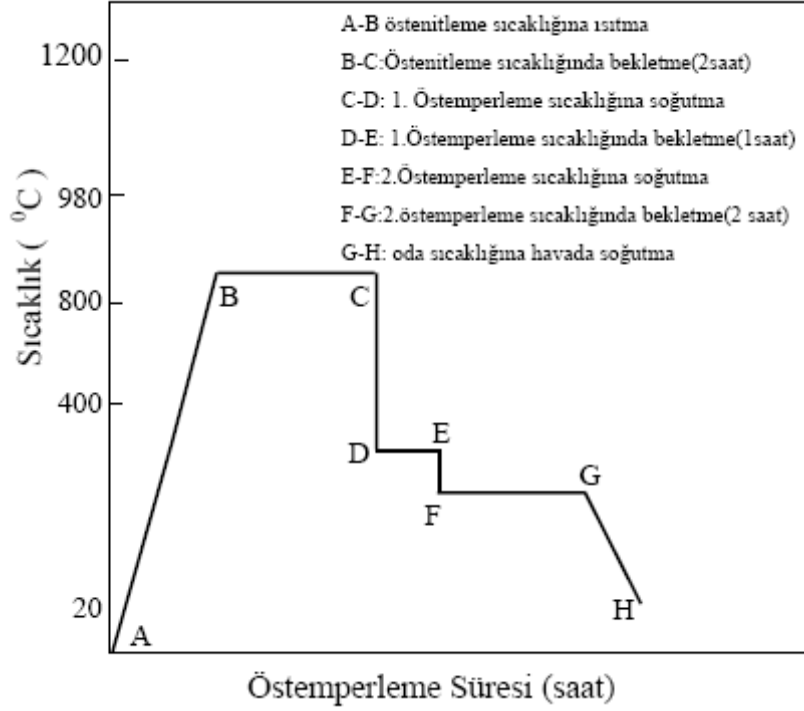
$$\gamma_{yk} = \alpha + \epsilon \text{ (karbür)} \quad (3.7)$$



Optimum mekanik özellikler birinci aşama reaksiyonu tamamlanıp ikinci aşama reaksiyonu başlamadan önce elde edilir. Birinci aşama sonu ve ikinci aşama reaksiyonu başlangıcı arasındaki süre “işlem aralığı” olarak isimlendirilir. İşlem aralığı Ni, Mo ve Cu gibi alaşım elementlerinin ilavesiyle genişletilebilir. 340°C'nin üzerinde yapılan ostemperleme işlemiyle elde edilen ürün üst osferrit olarak isimlendirilirken, bu sıcaklığın altında yapılan ostemperleme işlemiyle elde edilen ürün ise alt osferrit olarak adlandırılmaktadır (Putatunda 1999, Rao 2003, Yang 2004). Alt osferritik sıcaklık aralığında daha fazla ferrit ve daha az kalıntı ostenit vardır, birinci aşama reaksiyonu sırasında karbonca zenginleşmiş ostenit ve ferritle birlikte karbür çökmesi meydana gelir. Üst osferrit sıcaklık aralığında ise tam tersi durum oluşur.

KGDD malzemede, ostenit matris katılma sırasında bazı elementlerin segregasyonundan dolayı homojen değildir. Genel olarak, grafit kürelerinin (ötektik hücreler) etrafındaki ostenit içerisinde Si ve Ni gibi alaşım elementlerinin konsantrasyonu oldukça yüksektir. Genellikle hücrelerarası bölge olarak tanımlanan Primer ostenit bölgesi yüksek Mn, Mo, Cr ve V konsantrasyonuna sahiptir. Segregasyon miktarı soğuma şartlarına bağlıdır fakat çoğu dökümlerde bu alaşım elementleri malzeme bünyesinde düşük miktarlarda mevcuttur ve 850-950°C sıcaklık aralığında ostenitleme işlemiyle kısmen giderilebilir. Homojensizliğin kalması ostemperleme reaksiyonu kinetiği üzerinde önemli etkiye sahiptir. Hücrelerarası bölge içerisinde Mn ve Mo yüksek konsantrasyonu östeniti güçlü kararlaştırıcı etkiye sahiptir ve ayrıca karbonun çözünebilirlik derecesini yükseltir. Bunun sonucu ferritte çekirdeklenme ve büyüme sergilemez, birinci aşama reaksiyonun tamamlanması uzar. Belirli durumlarda hücrelerarası bölge içerisinde birinci aşama reaksiyonu henüz tamamlanamazken, arzu edilmeyen ikinci aşama reaksiyonu ötektik hücreler içinde başlar (Bosnjak ve ark. 2003, Hamid ve Elliot 1996). Bu problemi çözmek için iki kademeli proses uygulanmaktadır (Şekil 3.19). Birinci kademede ostemperleme işlemi 400°C gibi yüksek sıcaklıklarda başlatılır, böylece ötektik hücre içerisinde birinci aşama reaksiyonu tamamlanır. Bunu takiben malzemeler 300°C sıcaklıkta başka bir tuz banyosuna alınır. Böylece hücrelerarası bölge içerisinde birinci aşama reaksiyonu için itici kuvveti artar ve ötektik hücre içerisinde karbürlerin çökmesi geciktirilir. İki kademeli ostemperleme ile

ötektik hücreler içerisinde üst osferrit ve hücreler arası bölge içerisinde alt osferrit yapı elde edilir (Bosnjak ve ark. 2003).



Şekil 3.19 İki kademeli ostemperleme işleminin şematik gösterimi (Çetin ve Gül 2006).

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

Ostemperleme 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.

Ostemperlemede 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 m¼mk¼n olduğunca d¼ř¼k tutulmalıdır, aksi halde beynit yerine tane sınırına yakın b¼lgelerde martenzit oluşur. İstenen özelliklerin elde edilmesi için soğutma hızı ile ostemperleme sıcaklığının uygun seçilmesi çok ¼nemlidir. 300 °C gibi d¼ř¼k d¼n¼ř¼m sıcaklıklarında en y¼ksek sertlik, akma ve çekme dayanımı elde edilir. 350..400 °C aralığında ise çentik darbe tokluğu ve kopma uzaması y¼ksektir. Ancak tuz banyosu sıcaklığının y¼ksek olması halinde soğuma hızı d¼ř¼k olacağından, içyapıda perlit bulunur ve dayanım değerleri d¼řer.

#### 4. İŞLENEBİLİRLİK

İşlenebilirlik evrensel olarak tanımlanmış, standart bir özellik değildir. Genellikle iş parçasının işlenebilme kabiliyeti, bir başka deyişle iş parçasının kesici bir takım ile şekillendirilmesinin ne kadar kolay veya zor olduğu işlenebilirlik olarak adlandırılır. Kesici takımlardaki gelişmeler, değişen koşullar ve metotlar nedeniyle işlenebilirlik kavramı karşılaştırmalı değerler cinsinden ifade edilmesi zor olan bir kavramdır.

İş parçası malzemesinin metalürjisi, kimyasal yapısı, mekanik özellikleri, ısıl işlemi, katkıları, kalıntıları, yüzeyindeki sert tabakanın kalınlığı vb. özellikleri, kesici kenar, takım bağlama biçimi, takım tezgahı, işleme biçimi ve işleme şartları gibi faktörler işlenebilirlik üzerinde etkilidir. Malzemeler için işlenebilirlik değerleri, en ideal durumlarda bile, daha ileri düzeyde optimizasyon için başlangıç değerlerine kılavuzluk eder. Sınırlı bir malzeme dizisindeki belli sayıda operasyonun gerçekleştirilmesinde bir atölye veya işletme, işleme sırasındaki zorluklar veya kolaylıklara göre kendi önceliklerini benimser. İşlenebilirliği geliştirmek için; döküm kalitesini iyileştirmek, malzemeyi kolay işlenebilir hale getirmek veya değiştirmek, takım malzemesini, takım geometrisini, bağlama şartlarını veya kesme sıvısı vb. değiştirmek gerekebilir. En geniş anlamda işlenebilirlik kesici takım – iş parçası çiftine ait aşağıda verilen kriterlerce tanımlanan bir özellik olarak adlandırılabilir.

- Takım ömrü
- Talaş oluşumu
- Yüzey kalitesi
- Talaş debisi
- Kesme kuvveti / güç
- Yiğme kenar eğilimi

İş parçası malzemesinin kullanılabilir verileri ve gerçekleştirilen işlenebilirlik deneylerinin sonucunda, özel işlemlerde olduğu kadar geniş üretim alanlarında da uygun olarak kullanılacak işlenebilirlik verilerinin belirlenmesi mümkündür. Ancak

bir grup işlem için iyi olarak kabul edilen işleme koşulları bir başka grup işlem için uygun olmayabilir.

#### 4.1 İşlenme Kabiliyeti

İşlenme kabiliyeti terimi kesin olarak tarif edilmiş bir terim değildir. Bununla birlikte genel anlamı terimin isminden de anlaşılacağı gibi verilen bir i parçası malzemesinin ne derece kolaylıkla işlendiğidir.

İşlenme kabiliyeti farklı işleme değerlerine göre değişir, bununla beraber farklı malzemelerin aynı işleme koşulları altında karşılaştırmasını yapmak mümkündür.

İşlenme kabiliyetini ölçmek için esas tutulacak en önemli noktalar şunlardır:

- Belirli kesme şartları altında takım ömrünün ve kesme hızının büyüklüğü. Bu durumda kesme hızı ya da takım ömrü ne kadar fazlaysa o malzemenin işlenebilme kabiliyetinin o derece iyi olduğu söylenebilir.
- Kesme kuvvetlerinin büyüklüğü veya güç sarfiyatı. Belirli kesme koşullarında, bir malzeme ne kadar az kesme kuvveti veya güç sarfiyatı ile işlenebiliyorsa, o malzemenin işlenme kabiliyetinin o derece iyi olduğu kabul edilir.
- İş parçasının yüzey pürüzlülüğü. Bu durumda da belirli kesme koşulları altında o malzemenin yüzey kalitesi ne kadar iyi ise o malzemenin işlenebilirliği o kadar iyi olduğu söylenebilir.

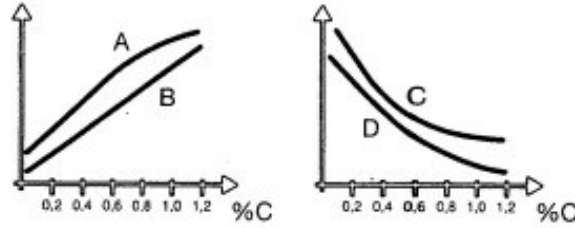
Bunlar arasında en önemlisi birinci maddedir, yani takım ömrü veya kesme hızıdır. Bununla birlikte kesme kuvvetinin ve güç sarfiyatının derecesi de büyük rol oynar.

Belirli bir malzeme işlendiği zaman elde edilen takım ömrü, güç sarfiyatı ve yüzey kalitesi talaş kaldırma parametrelerine göre değişir. Belirli işleme parametrelerine göre belirlediğimiz işlenebilme kabiliyeti, işleme parametrelerinden birinin değişmesi durumunda aynı kalmaz. İşte bu belirsizlik ya da değişkenlik nedeniyle işlenebilirliği kesin olarak tayin etmek mümkün değildir.

## 4.2 İş Parçası Malzeme Özelliklerinin İşlenebilirliğe Etkisi

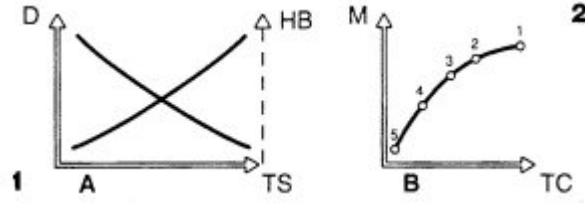
İşlenebilirliğin değerlendirilmesi ve işleme şartlarının optimizasyonu amacı ile yaygın olarak kullanılan iş parçası malzemeleri incelendiğinde öncelikle temel malzeme özellikleri ve bunların işlenebilirliği nasıl etkilediği dikkate alınmalıdır.(Çakır 2000)

- Sertlik ve dayanım : Malzemelerin genellikle düşük sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olması arzu edilir. Çok sünek malzemeler, yığma kenar oluşumu nedeniyle kötü yüzey kalitelerinin elde edilmesi, çapak oluşması ve kısa takım ömrü gibi problemler nedeniyle bu kurala bir istisna teşkil eder. Bu durumda soğuk çekme ile sertliğin artırılması işleminin olumlu bir etkisi vardır. Şekil 4.1’de da karbon yüzdesine göre değişim gösteren dört mekanik özellik gösterilmiştir. Burada (A) çekme mukavemetini, (B) sertliği, (C) darbe mukavemetini, (D) uzamayı temsil etmektedir.



Şekil 4.1 Mekanik özellikler (Çakır 2000)

- Süneklik : Düşük süneklik değerleri genellikle daha olumludur. Bu durumda talaş oluşumu avantajlı ve kesme işlemi enerji açısından verimlidir. İyi işlenebilirlik genellikle sertlik ve süneklik arasındaki bir ayar noktasıdır. Şekil 4.2’ de (1) no’lu diyagramda sünekliğin (D) ve setliğin (HB) çekme mukavemetine (TS) göre değişimi gösterilmiştir.
- Isıl iletkenlik : Yüksek ısıl iletkenlik kesme işlemi esnasında oluşan ısının derhal kesme bölgesinden uzaklaştırılması anlamına gelmektedir. Talaş kaldırma açısından bakıldığında yüksek bir ısıl iletkenlik bu nedenle genellikle faydalıdır. Şekil 4.2’de (2) no’lu diyagramda işlenebilirlik oranının (M) ısıl iletkenliğe (TC) göre değişimi gösterilmiştir. Bu diyagramda 1-Alüminyum, 2-Alaşımsız çelik, 3-Alaşımlı çelik, 4-Paslanmaz çelik, 5-Isıl dirençli alaşımları temsil etmektedir.



Şekil 4.2 Süneklik ve ısı iletkenlik (Çakır 2000)

- Pekleşme : Plastik deformasyon sonrasında, metallerin dayanımı, değişen değerlerde artar. Dayanımdaki artış, deformasyon yüzdesine ve malzemenin pekleşme kabiliyetine bağlıdır. Yüksek pekleşme oranının anlamı, deformasyon oranındaki artışa bağlı olarak hızlı bir dayanım artışıdır.
- Kalıntılar : Malzemenin yapısı içerisinde makro mikro düzeyde iki tip kalıntıdan söz etmek mümkündür. Makro inklüzyonlar, boyutu 150  $\mu\text{m}$ ' den büyük olan inklüzyonlardır. Bunlar genellikle, çok sert ve aşındırıcı olup, inklüzyonlardan bağımsız bir malzemeyi kuşatma eğilimlerinden dolayı önemlidir. Düşük kaliteli çeliklerde bulunan inklüzyonlar, üst cüruf veya uygun olmayan cüruf alma vb. gibi fırınlama sırasındaki üretimden kaynaklanır. Pek çok ani takım kırılma problemleri muhtemelen bu tip inklüzyonlar ile açıklanabilir. Mikro inklüzyonlar, çelik içinde değişik miktarlarda daima mevcuttur.
- Malzeme yapısı : Malzemenin yapısı işlenebilirliği etkiler. Bazı yapılar, aşındırıcı özelliktedir ve malzemenin dayanımı yapı tipiyle değişir. Çeliklerdeki aşındırıcı bileşen karbürlerdir. Bunların miktarı ve biçimi, malzeme özelliklerini doğrudan etkiler. Karbon ve diğer alaşım elementlerinin miktarı, yapıyı doğrudan etkiler. Karbon, karbonlu çeliklerdeki en önemli alaşım elementi olup, muhtevasına bağlı olarak çok farklı yapılar elde edilebilir. Çelikte ostenite ilave olarak üç tip fazdan söz etmek mümkündür ve bunlar işlenebilirliği doğrudan etkiler. Bu fazlar: ferrit, perlit, sementittir.

### 4.3 Takım Ömrü

Kesme işlemleri sırasında önemli olan takım ömrünün aşınma nedeniyle tamamlandığı anın belirlenmesidir. Kesme kuvvetleri ile takım ömrü arasında direkt bir ilişki bulunmaktadır.  $F_s$  kesme kuvveti talaş kaldırma işlemleri sırasında takımın aşınma miktarı ile orantılı olacak şekilde, lineer olarak artmakta, takımın ömrünü tamamlaması anında kesme kuvvetinde büyük bir artış görülmektedir (Choi 1997).

Genelde talaş kaldırma olayı: iş parçası, takım , tezgah ve proses olmak üzere dört faktöre bağlıdır. Kesme işlemine etki eden ve optimum talaş kaldırma işlemi için değiştirilebilen faktörler kesme hızı, talaş derinliği ve ilerleme miktarıdır. Yapılan deneyler sonucu bu faktörlerin takım ömrüne etkileri farklı oranlarda olmaktadır. Bu oranlar şunlardır.

Talaş derinliğinin % 50 oranında artırılması takım ömrünün %15 oranında azalmasına neden olmaktadır.

İlerleme miktarının % 50 oranında artırılması takım ömrünün %60 oranında azalmasına neden olmaktadır.

Kesme hızının % 50 oranında artması takım ömrünün %90 oranında azalmasına neden olmaktadır (Işık 2001).

Uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi ile takım ömrünün artırılması mümkün olmaktadır. Kesme hızının düşük seçilmesi takım uçunda kopmalara ve bunun sonucu takımın değiştirilmesine, kesme hızının yüksek seçilmesi ise takımın kısa sürede kırılmasına neden olmaktadır. Optimum kesme hızının belirlenmesinde takım ömrü ile talaş oluşum oranı ve üretim hızı arasında denge kurulmalıdır. Maksimum üretim hızı için kesme hızı, talaş derinliği ve ilerleme miktarı arasında minimum takım değiştirmeyi sağlayacak bir denge kurulmalıdır. Üretim hızını etkileyen diğer faktörler;

- Tezgah gücü (talaş iletim oranım sınırlar)
- Yüzey pürüzlülüğü (ilerleme miktarım sınırlar)
- Tezgah rijitliği (kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğim sınırlar)
- Talaş kaldırma rijitliği (talaş derinliğim sınırlar)



#### 4.4 Takım Aşınması ve Aşınma Mekanizmaları

Talaşlı işlemden takım malzemesi termik ve mekanik yüklemeler altında aşınır, kesme yeteneğini kaybeder. Bu nedenle herhangi bir talaşlı işlem sisteminde hangi aşınma mekanizmalarının devreye girdiğini belirlemek için takım üzerindeki yüklemelerin bilinmesi gerekir (Çakır 1999).

Tezgahın devreye girmesi ile üretilen enerji, yeni yüzeylerin (iş parçasının işleme yüzeyi ve talaş yüzeyi) yaratılması için kullanılır. Ancak iş parçası içerisindeki kayma bölgesinde ve takım/talaş temas yüzeyinde gerçekleşen kayma ve viskoz akma işlemi nedeniyle ısı oluşur. Tornalama işleminde ısı akımı ve belirli bir kesme şartı için takım/iş parçası/ talaş içi sıcaklıklar gösterilmiştir. Takım ve iş parçası malzemelerinin ısı iletkenlikleri ve ısı kapasitelerinin belirlediği takım sıcaklığı, artan kesme hızı ile (ısı iletimi için gerekli sürenin azalmasıyla) artar. Sıcaklık bölgesel olarak oldukça yüksek değerlere erişerek takımın yumuşamasına ve böylece sertliğini kaybetmesine neden olur.

Talaş/takım temas yüzeyinde basma ve kayma gerilmeleri etki eder. Basma gerilmesinin maksimum etkisi kesme köşesinde görülürken, kayma gerilmesi tüm talaş/takım yapışma bölgesi boyunca eşit viskoz akma nedeniyle sabit kalır ve talaş/takım etkileşiminin noktasal sürtünmeye dönüşmesiyle düşer.

Termal ve mekanik gerilmeler altında takım aşınır. Aşınma tipi, kesme koşullarına bağlı olarak değişir.

##### 4.4.1 Abrasiv Aşınma

En yaygın aşınma tiplerinden biridir. Genellikle iş malzemesine ait sert parçacıklar nedeniyle ortaya çıkar. Bu durum, iş parçası yüzeyi ile takım arasında giren sert parçacıkların neden olduğu taşlama işlemine benzer bir durumdur. Bu aşınma tipi kesici ucun serbest yüzeyinin aşınmasına yol açar. Kesici kenarın abrasiv aşınmaya dayanma kabiliyeti önemli ölçüde ucun sertliğine bağlıdır. Sert parçacıkların sıkıştırılması ile elde edilen takım malzemesi önemli ölçüde abrasiv aşınmaya

dayanacaktır ancak bu malzemenin diğ er tip yüklere de dayanabilmesi için gereken önlem alınmalıdır.

#### 4.4.2 Difüzyon Aşınması

Bu aşınma tipi kesme işlemi esnasında daha çok kimyasal yükten etkilenir. Takım malzemesinin kimyasal özellikleri ile takım-iş parçası malzemesi arasındaki afinite difüzyon aşınması mekanizmasının ortaya çıkmasına neden olur. Takım malzemesi sertliğinin bu tip aşınma üzerine etkisi yoktur. Malzemeler arasındaki metalürjik ilişkiler aşınma miktarını belirler. Bazı takım malzemeleri birçok iş parçası malzemesiyle etkileşime girmez, bazılarının ise bazı iş parçaları ile afinitesi yüksektir.

Örneğin tungsten karbür ile çelik arasında bir etkileşim söz konusudur. Bu ise difüzyon aşınması mekanizmasının ortaya çıkmasına neden olur ve aşınma sonucu kesici ucun talaş yüzeyi üzerinde bir krater oluşur. Bu aşınma mekanizması önemli ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Aşınma yüksek kesme hızlarında en büyük kesme hızlarına ulaşır.

Difüzyon aşınmasının yüksek kesme hızlarında artması söz konusudur. Bu tip aşınma tüm takım malzemeleri için söz konusu değildir ve bu tip aşınmayı önlemek için çeşitli önlemler alınabilir. Örneğin çeliklerin işlenmesinde sinterlenmiş karbür kalitesini iyileştirmek amacıyla ilave bir gama fazı koruyucu kalkan görevi görecektir. Mesela  $Al_2O_3$  hiçbir şekilde iş parçası ile reaksiyona girmeyen malzemedir. Bu nedenle de yüksek difüzyon aşınması direncine sahiptir.

#### 4.4.3 Oksidasyon Aşınması

Yüksek sıcaklık ve havanın varlığı birçok metal için oksidasyon demektir. Oksitler birbirlerine göre farklılık gösterirler. Tungsten ve kobalt gözenekli oksit film tabakaları oluştururlar, ancak bu tabakalar talaş ile yüzeyden uzaklaştırılabilirler. Alüminyum oksit gibi bazı oksitler ise son derece dayanıklı ve serttir. Bu bazı takım malzemeleri için kesici takımın aşınması söz konusudur. Özellikle kesici kenarın talaş ile temasta olan kısmında, talaş genişliğinin sona erdiği noktada (talaş derinliğinde)

havada kesme işlemine etkide bulunur ve oksidasyon nedeni ile kenarda çentikler oluşur. Oksidasyon aşınması günümüzde talaşlı imalat alanında pek yaygın olmayan bir aşınma tipidir.

#### **4.4.4 Yorulma Aşınması**

Termo-mekanik bir kombinasyonun sonucudur. Sıcaklıktaki dalgalanmalar ve takıma etkiyen kesme kuvvetlerinin sıfır ile maksimum değerler arasında değişmesi kesici kenarın çatlamasına ve kırılmasına yol açar. Aralıklı kesme işlemi ucun sürekli olarak ısınıp soğumasına ve talaş ile temasta olan kesici kenarda şok etkisine neden olur. Bazı takım malzemelerinin diğer takım malzemelerine göre yorulma aşınmasına daha duyarlı olduğu bilinmektedir. Mekanik yorulma kesme kuvvetlerinin kesici kenarın mukavemetinden çok daha büyük olduğu durumlarda görülür. Bu durum sert ve dayanıklı iş parçası malzemelerinin çok yüksek ilerleme hızlarında işlendiği veya takım malzemesinin yeterince sert olmadığı durumlarda söz konusudur. Bu gibi durumlarda plastik deformasyon oluşur.

#### **4.4.5 Adheziv Aşınma**

Genellikle takımın talaş yüzeyindeki düşük ilerleme sıcaklıklarından dolayı ortaya çıkar. Çelik, alüminyum ve dökme demir gibi uzun ve kısa talaş oluşumunun söz konusu olduğu malzemelerde görülür. Bu aşınma mekanizması genellikle kenar ile talaş arasında yığılma kenar oluşumuna neden olur. Yığılma kenar oluşumu talaş tabakalarının sürekli olarak kesici kenar üzerine kaynak olup kenarın bir parçası haline gelmeleri işlemidir. Bu kenarın çok fazla büyümesi ve bir noktada kopması, kesici kenar üzerinden bir kısım malzemenin de yığılma kenar ile uzaklaşmasına neden olur. Bazı kesici takım malzemeleri ve sünek çeliklerde yığılma kenar oluşumu diğerlerine göre çok daha fazladır. Belirli bir sıcaklık aralığında takım ve iş parçası malzemeleri arasındaki afinite ve kesme kuvvetlerinden dolayı ortaya çıkan yük adheziv aşınmayı oluşturan nedenlerdendir. Belirli bir malzemenin işlenmesi esnasında bu aşınma türü talaş derinliğinin maksimum değerinde hızlı bir bölgesel aşınmaya neden olur.

## 4.5 Aşınma Tipleri

Takım aşınma tiplerinin sınıflandırılması gerçekleştirilecek talaş kaldırma işleminin belirlenmesi ve optimize edilmesi açısından bir temel teşkil eder. Belli başlı aşınma tipleri; serbest yüzey aşınması, krater aşınması, plastik deformasyon, çentik oluşumu, ısıl çatlaklar, mekanik yorulma çatlakları, kesici kenardan parçacık kopmaları, kesici ucun kınılması ve yığma kenar oluşumu sayılabilir.

### 4.5.1 Serbest Yüzey Aşınması

Kesici kenarın serbest yüzeyinde meydana gelir. Talaşın oluşumu sırasında ve sonrasında ana kesici kenar, yardımcı kesici kenar ve köşe radyüsü veya paralel kenar iş parçası ile temastadır. En yaygın aşınma tiplerinden biridir. Serbest yüzey aşınmasında belirli bir değerin üzerine çıkmasıyla yüzey kalitesi kötüleşir, hassasiyet azalır, sürtünme artar.

### 4.5.2 Krater Aşınması

Krater, talaş kaldırma esnasında sert parçacıkların takımın talaş yüzeyinde taşlama işlemine benzer bir işlem gerçekleştirmeleri sonucunda veya takım ile talaş malzemesi arasında, talaş yüzeyinin en sıcak kısmında oluşan difüzyon nedeniyle ortaya çıkar. Krater aşınmasının belli bir değerin üzerine çıkması halinde kesici kenarın geometrisi değişir ve uç zayıflar.

### 4.5.3 Plastik Deformasyon

Plastik deformasyon kesici kenar üzerinde yüksek sıcaklıklar ve yüksek basıncın bir kombinasyonu sonucunda oluşur. Kesici kenarın bu şekilde deformasyona uğraması daha yüksek sıcaklıkların oluşumuna, geometri deformasyonuna ve talaş akışının değişimine neden olacaktır.

#### **4.5.4 Yardımcı Kenarda Çentik Oluşumu**

Bu aşınma tipik bir adhezyon aşınmasıdır. Çentik, kesici kenar ile malzemenin ayrıldığı noktada oluşur. Çentik aşınmasının belli bir değerin üzerine çıkması ince işlemlerde yüzey kalitesini etkiler, kesici kenar zayıflar.

#### **4.5.5 Isıl Çatlaklar**

Bu aşınma tipi genellikle ısı sirkülasyonu nedeniyle ortaya çıkan yorulma aşınmasıdır. Özellikle frezelemede söz konusu olan sıcaklık değişimleri bu tip aşınmaya neden olur. Bu aşınma sonucunda kesici kenara dik çatlaklar meydana gelir ve takım malzemesi kenarda dışa doğru zorlanır. Bu zorlanma sonucunda takım malzemesinde ani kırılma ve ucun kullanılmaz hale gelmesi söz konusudur. Kesme esnasında değişen talaş kalınlıkları da sıcaklık oluşumuna etkide bulunur.

#### **4.5.6 Mekanik Yorulma Çatlakları**

Kesme kuvvetlerindeki ani değişimler sonucunda ortaya çıkarlar. Mekanik yükün kendi başına çatlak oluşturacak büyüklükte olmamasına rağmen mekanik yükteki sürekli değişim çatlaklara neden olur. Kesmenin başlangıcında ve kesme kuvvetinin büyüklüğü ve yönündeki değişimler kesici ucun mukavemetinden ve tokluğundan fazla olduğunda bu tip aşınma gözlenir.

#### **4.5.7 Kesici Kenardan Parça Kopması**

Kesici kenarın aşınmaktan çok kırılması nedeniyle oluşur. Bu aşınma tipinde genellikle takıma etkiyen yükün sürekli olarak üst ve alt değerler arasında değişmesi nedeniyle bir yorulma oluşur ve bunun sonucunda takım malzemesi takım yüzeyinden kopar. Darbeli kesme işlemi bu tip aşınmanın en sık görülen nedenlerinden biridir. Kenar üzerindeki dikkatli bir inceleme aşınmanın serbest yüzey aşınması mı yoksa kenardan parçacık kopması aşınması mı olduğunu belirleyecektir.

#### 4.5.8 Kesici Kenarın Kırılması

Kesici kenarın ömrünü tamamlamasına neden olan bir aşınma tipidir. Kenardaki büyük miktarlardaki kırılma mümkün olduğunca kaçınılması gereken en tehlikeli aşınma türüdür. Kenarın kırılması bir çok diğer aşınma tipi içinde yolun sonu demektir. Geometrinin değişimi, kenarın zayıflaması, sıcaklıktaki ve kuvvetlerdeki artışlar kesici kenarın bu tip bir aşınmaya maruz kalmasına neden olur. Yüksek kesme hızlarında ve diğer talaş kaldırma koşullarında kesici kenar üzerinde oluşan çeşitli gerilmeler kesici ucun mukavemet sınırını aştığı anda kırılmanın oluşumu kaçınılmazdır.

#### 4.5.9 Yığma Kenar Oluşumu

Önemli ölçüde sıcaklığa dolayısıyla kesme hızına bağlı bir aşınma türüdür. Takım yüzeyine kaynak olan malzemeden dolayı ortaya çıkan, takım yüzeyinden parçacık kopmasına neden olan yığma kenar istenmeyen durumdur. Yığma kenar oluşumuna iş parçası ve takım arasındaki afinite de etkide bulunur. Düşük sıcaklıklar ve yüksek basınçlar iş parçası malzemesinin takım yüzeyine kaynak olmasına neden olur. Yığma kenar oluşumuna sebebiyet veren sıcaklık ve kesme hızları bilindiğinden bu tip aşınmanın kolaylıkla önüne geçilebilir.

Birçok modern talaş kaldırma işleminde kesme hızları yığma kenar oluşum alanının çok üzerindedir ve birçok kalite yığma kenar oluşumuna engel olacak şekilde seçilir. Yığma kenar oluşumuna izin verildiği takdirde yüzey kalitesi bozulur ve bu oluşum devam etmesi halinde kenarın kırılması ve hatta ömrünü tamamlaması söz konusu olabilir.

Yukarıda ana aşınma tiplerinden bahsedilmiştir. Bu aşınma tiplerinden bazıları aşınma olmayıp kesici ucun aniden kırıldığı durumlardır ve bu durumların önüne geçilmesi şarttır. Daha çok serbest yüzeyde görülen düzenli bir aşınma kesici kenarın ne zaman değiştirileceğini belirlemesi sayesinde optimum takım ömrü sağlayacaktır.

#### 4.6 Dökme Demirlerin İşlenebilirliği

Dökme demirlerde görülen temel aşınma mekanizmaları; abraziv, adheziv ve difüzyon aşınmalarıdır. Adheziv aşınma düşük kesme hızlarında ve düşük sıcaklıklarda meydana gelir. Bu aşınma tipi dökme demirin ferritik yapısından kaynaklanmaktadır. Kesme hızı ve sıcaklığın artırılmasıyla önlenir. Difüzyon aşınması ise yüksek hız ve yüksek sıcaklıklarda görülür. Dökme demir ile takım arasındaki reaksiyona bağlıdır. Bu aşınma seramik takım kullanımıyla giderilir. Böylelikle yüzey kalitesi de iyileştirilmiş olur.

Dökme demir işlemede aranan tipik takım özellikleri yüksek kıvrım sertlik ve kimyasal kararlılıktır. Ancak işleme koşullarına bağlı olarak tokluk ısı darbelere karşı direnç ve mukavemette kesici kenardan beklenir.

Dökme demir işlemede iyi sonuçların elde edilebilmesi için kesici kenarda aşınmanın ne şekilde geliştiği önemlidir. Isıl çatlaklar ve kesici uçtan ufak dökümler ucun kırılması sonucunda da ani körelmeye, iş parçasından parça kopmasına ve kötü yüzey kalitesine neden olabilir.

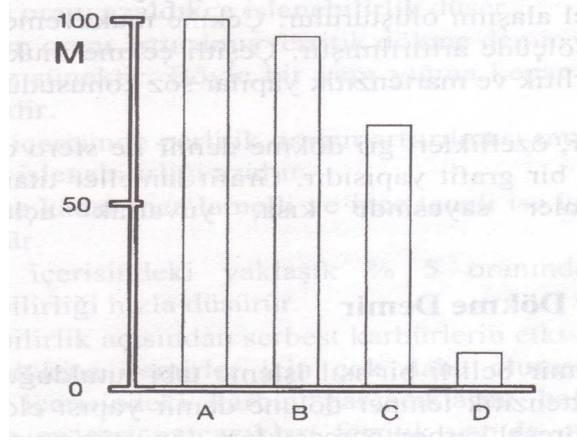
Dökme demirlerde düşük karbon içeriği daha düşük işlenebilirliğe neden olur. Buna neden oluşan grafitin kırılma dayanımının düşük olmasındandır.

Perlit matrisli bir dökme demirde, perlitin matristeki serbest karbürlere asılması nedeniyle, serbest karbürlerin etkisi, perlit matrisli bir dökme demirde daha olumsuzdur. Bu durum, ferritik yapıda olduğu gibi yumuşak ferrit içine doğru sürüklenme ve itme etkisi yerine kesici kenarın daha sert partiküller boyunca kesme yapması anlamını taşır. Yüksek perlit içeriği daha yüksek dayanım, daha yüksek sertlik ve daha düşük işlenebilirliğe neden olur.

Dökme demir matrisindeki %5 civarındaki serbest karbür işlenebilirliği önemli ölçüde düşürür.

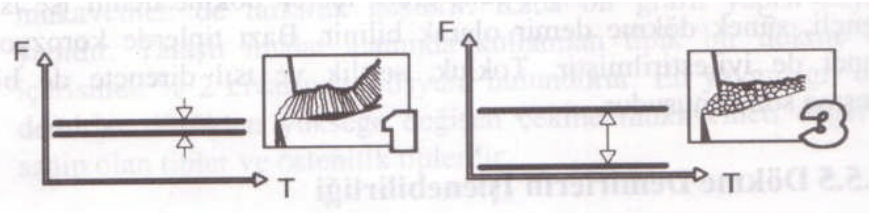
Ayrıca dökme demirin üst yüzeyi cüruf, döküm kumu ve benzeri düzensizlikler nedeniyle düşük işlenebilirlik sergiler. Dökme demirlerde kum kalıntılarına ve serbest karbürlere bağlı aşındırıcı sertlik işlenebilirlik üzerinde oldukça negatif bir etkiye sahiptir.

Talaşlı imalatta kullanılan dökme demirlerin bir çoğunun işlenebilirliği iyidir. Sert perlitik dökme demirlerin işlenmesi zordur. Gri dökme demir kısa talaş, temper ve sfero dökme demir uzun talaş oluşturur. Grafit lamelli dökme demirin ve temper dökme demirin işlenebilirliği mükemmeldir. Şekil 4.3' de belli başlı dökme demir tiplerinin birbirlerine göre işlenebilirlikleri gösterilmiştir. Şekilde (A) gri, (B) temper, (C) sfero ve (D) beyaz dökme demiri temsil etmektedir.



Şekil 4.3 Dökme demir tiplerinin birbirlerine göre işlenebilirlikleri (Çakır 1999)

Kesme kuvvetlerindeki değişim açısından Şekil 4.4' de (1) alaşımsız çeliklerle (3) dökme demirler kıyaslanmıştır. Dökme demirlerin kesme kuvvetlerindeki değişim alaşımsız çeliklere göre daha büyüktür.



Şekil 4.4 Alaşımsız çeliklerle dökme demirlerin kesme kuvvetlerinin kıyaslanması (Çakır 1999)



Çizelge 4.1' de gri, küresel ve dövülebilir dökme demirler (temper döküm) de 30 dakikalık takım ömrü için tornada alınması gereken kesme hızları verilmiştir. İlginç olan % 100 ferrit yapısına sahip olan küresel dökme demirin (170 HB) sertliğinin büyük ölçüde ferritik gri dökme demirden yüksek olmasına karşın (100 HB), 30 dakikalık takım ömrü için kesme hızları birbirine çok yakındır.

Çizelge 4.1 Matriks iç yapısının takım ömrüne etkisi (ASM Machining 1981)

Malzeme	Matriks iç yapısı	Grafit tipi	Sertlik HB	Kesme hızı (m/dak)	En son çekme dayanımı (Mpa)
Gri dökme demir	%100 ferrit	Ufak yassı	100	270	108
	İri perlit	Ufak yassı	195	110	241
	İnce perlit	Ufak yassı	225	105	310
	İğnemsiz	Ufak yassı	263	60	407
KGDD	%100 ferrit	Küresel	170	25	483
	%97 ferrit, %3 perlit	Küresel	183	175	531
	%60 ferrit, %40 perlit	Küresel	207	130	584
	%60 ferrit, %40 perlit	Küresel	215	110	641
	%20 ferrit, %80 perlit	Küresel	265	75	671
ASTM 32510	%100 ferrit	Temper karbon	109	290	345
ASTM 48004	Küresel	Temper karbon	179	140	483
ASTM 60003	Küresel	Temper karbon	230	85	552
ASTM 80002	Küresel	Temper karbon	250	80	690

#### 4.6.1 KGDD'lerin İşlenebilirliği

KGDD'lerin işlenebilirlikleri yapı ve sertlikle belirlenir. Çeliklerle kıyaslandıklarında iç yapılarında bulunan grafit partikülleri nedeniyle işlenebilirlikleri

daha iyidir. Grafit partikülleri kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü etkilerken matriks ise takım ömrünü belirler.

Talaşlı imalatla ilgili el kitaplarında KGDD' in çeliğe göre işlenebilirliklerinin daha iyi olduğuna ait veriler bulunmamaktadır. Genaral Motors' un yaptığı araştırmalardan alınan verilere göre pinyon ve iç dişli üretiminde KGDD' in çeliğe göre takım ömründe %20 ile %900 iyileşme sağladığı görülmüştür. Bu veriler Çizelge 4.2' de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2 Dövme çelik yerine ferritik KGDD kullanımı ile takım ömründe sağlanan iyileşme (Ductile Iron Data 1998)**

İşleme Operasyonları	Takım Ömründe iyileşme %
Pinyon dişli taslakları	
-Merkez pres	30
-Matkap	35
-Kaba tornalama	70
-İnce tornalama	50
-Taşlama	20
Geri vites dişli taslakları	
-Fazlalıkların tornalanması	200
-Delme	20
-Raybalama	20
Dişli işleme	
-Pinyon kaba	900
-Pinyon ince	233
-İç dişli kaba	962
-İç dişli ince	100

Aynı şekilde Fiat firmasından alınan verilere göre 18CrMo4 dövme çelik yerine ferritik KGDD dökme demir kullanılmış ve Çizelge 4.2' de görüldüğü gibi takım aşınmasında önemli iyileşmeler sağlanmış verim artarken maliyetler azalmıştır.

Dönme hızı ve ilerlemenin seçiminde etkili olan döküm iç yapısı ve sertliği ve işlemede hangi kesici takım malzemesinin seçildiğidir. Torna için nominal kesme hızları ve ilerlemeler, hız çelik tipleri ve karbür uçlarla beraber sıkça işlenen KGDD tipleri Çizelge 4.3' te listelenmiştir.

Çizelge 4.3 Dövme 18CrMo4 çeliği ile KGDD' in işlenebilirliğinin karşılaştırılması (Ductile Iron Data 1998).

Parça	Operasyon	KGDD		Çelik	
		İşlenen parça adedi	Aşınma (mm)	İşlenen parça adedi	Aşınma (mm)
Ayna Dişlisi	Kaba delik işleme	250-300	0,5-0,7	80-100	1,5
	Alın tormalama	250	0,2	100	0,4
	Cıvata deliklerinin delinmesi, raybalanması ve klavuz çekilmesi	1300	-	500	-
	Kaba dişli işleme	1300	0,4-0,5	180	0,9-1,0
	İnce dişli işleme	1300	0,2	200	0,5
Konik pinyon dişli	Her iki ucun ölçüye getirilmesi	3200	-	1600	-
	Sap ve konik baş kısmın tormalanması	400	0,4	200	-
	Kaba dişli işleme	1300	0,4-0,5	200	0,9-1,0
	İnce dişli işleme	1300	0,2	200	0,4

Çelik dökümlerle karşılaştırıldığında, KGDD' ler aynı kesit ölçüleri için daha düşük bir işleme payına ihtiyaç duyarlar. Döküm boyutlarındaki tutarlılık, modern işleme merkezlerinde iyi performans alınması için etkin bir faktördür.

KGDD' lerin işlenmesinde talaşlı imalat el kitaplarından bazı verilerin elde edilmesi mümkündür.

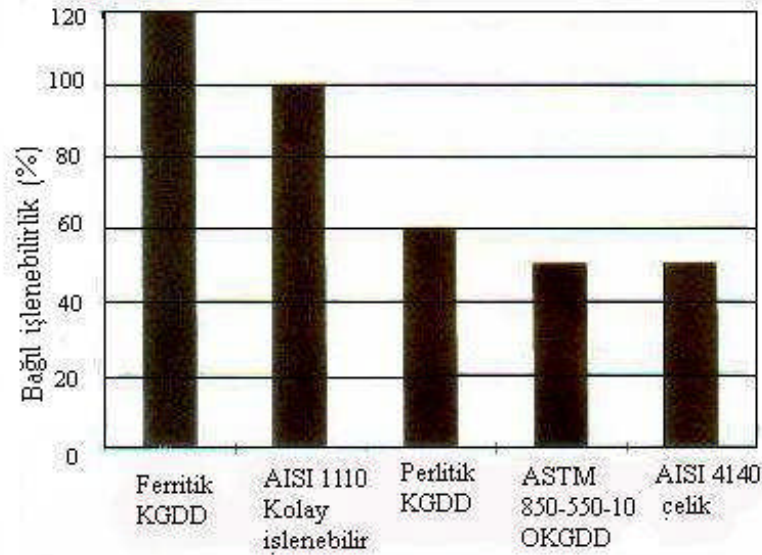
KGDD oldukça ince bitirme yüzeyleri elde edilebilecek şekilde işlenebilir. Bitirme yüzeyinin yüzey pürüzlülük değeri tane yapısının inceliğine ve uygulanan bitirme işlemi metoduna bağlıdır. KGDD' in farklı sınıfları için değişik işleme yöntemleri ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri, mikroinch ve  $\mu\text{m}$  olarak, Çizelge 4.4' de verilmiştir.

Çizelge 4.4 KGDD' de farklı işleme operasyonları sonucu elde edilen yüzey pürüzlülükleri (Ductile Iron Data 1998)

	KGDD Tipleri							
	60-40-18 152 BHN		80-55-06 223 BHN		100-70-03 265 BHN		120-90-02 302 BHN	
İşleme operasyonları	Mikroinch	µm	Mikroinch	µm	Mikroinch	µm	Mikroinch	µm
Suda çözünen yağ esaslı soğutma sıvısı ile kaba tornalama	60-80	1,52-2,03	55-80	1,40-2,03	60-100	1,52-2,54	60-100	1,52-2,54
Sementit karbür kesici takım ve suda çözünen soğutma sıvısı ile ince tornalama	70-80	1,78-2,03	40-60	1,02-1,52	50-100	1,27-2,54	50-100	1,27-2,54
Sementit karbür kesici takım ile faturalı ve faturasız kaba alın tornalama	100-400	2,54-10,16	70-350	1,78-8,89	70-400	1,78-10,16	90-400	2,29-10,16
Sementit karbür kesici takım ile faturalı ince alın tornalama	80-120	2,03-3,05	60-80	1,52-2,03	60-70	1,52-1,78	80-110	2,03-2,79
Kaba düzlem taşlama	15-30	0,38-3,76	15-25	0,28-0,64	15-25	0,38-0,64	15-25	0,38-0,64
İnce düzlem taşlama	4-15	0,10-0,38	4-15	0,10-0,38	3-12	0,08-0,38	3-10	0,08-0,25
Kaba silindirik taşlama	21	0,53	21	0,53	21	0,53	21	0,53
İnce silindirik taşlama	4	0,10	4	0,10	4	0,10	4	0,10
Kaba düzlem lebleme	12-20	0,30-0,51	12-20	0,30-0,51	12-20	0,30-0,51	12-20	0,30-0,51
İnce düzlem lebleme	6-11	0,15-0,28	6-11	0,15-0,28	6-11	0,15-0,28	6-11	0,15-0,28
Silindirik lebleme	7-9	0,18-0,23	7-9	0,18-0,23	7-9	0,18-0,23	-	-
Honlama	4-6	0,10-0,15	4-9	0,19-0,23	4-6	0,10-0,15	-	-
Süper bitirme	5-11	0,13-0,28	-	-	5-9	0,13-0,23	3-4	0,08-0,10

#### 4.6.2 OKGDD' lerin İşlenebilirliği

OKGDD' in dayanımlarının ve aşınma dirençlerinin yüksek oluşu göz önüne alınırca işlenebilirliklerinin düşük olması beklenebilir. Fakat OKGDD' in yumuşak sınıflarının işlenebilirlikleri eşdeğer dayanıma sahip çeliklerin işlenebilirliklerine eşit veya daha iyidir. Ayrıca, ostemperleme işlemi sonrası malzemenin hangi özelliklerinin geliştirileceği bilindiği için malzeme ostemperleme öncesi yumuşak döküm halinde iken veya ön ısıt işlem sonrası tamamen işlenebilir. Bu durumda daha yüksek hız ve ilerleme de kullanılabilir. OKGDD' in işlenebilirliğinin diğer malzemelerle kıyası Şekil 4.5' de verilmiştir.



Şekil 4.5 Demir esaslı bazı malzemelerin birbirlerine göre işlenebilirlikleri (Ductile Iron Data 1998)

OKGDD ısıt işlem sonrası ilk boyutuna göre %0,4 oranında bir boyut değişimine uğrar. Bu, dar toleranslara sahip bir parçanın bile ısıt işlem öncesi başarıyla işlenebilmesini mümkün kılar.

Çizelge 4.5'de OKGDD' in çeliğe göre takım ömründe %20 ile %900 iyileşme sağladığı görülmüştür.

Çizelge 4.5 Karbonlanmış dövme çelik dişli yerine OKGDD dişli kullanılmasıyla sonuçlanan takım ömrü iyileşmesi (Ductile Iron Data 1998)

İşleme Operasyonları	Takım Ömründe iyileşme (%)
Pinyon dişli taslakları	
-Merkez pres	30
-Matkap	35
-Kaba tornalama	70
-İnce tornalama	50
-Taslama	20
Geri vites dişli taslakları	
-Fazlalıkların tornalanması	200
-Delme	20
-Raybalama	20
Dişli işleme	
-Pinyon kaba	900
-Pinyon ince	233
-İç dişli kaba	962
-İç dişli ince	100

Şekil 4.5'den de görülebileceği gibi farklı matris yapıları sahip küresek grafitli dökme demirlerde işlenebilirlik farklılık göstermektedir. Matris yapı içerisinde bulunan fazların sertliği doğrudan işlenebilirliği etkilemektedir. Perlite göre daha yumuşak bir faz olan ferritik bir yapının işlenebilirliği perlitik yapının neredeyse iki katıdır.

## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında yapılan testler iki grupta toplanmıştır. Birinci grup testler işlenebilirliği incelemek üzere yapılan işlenebilirlik testleri, ikinci grup testler ise numunelerin dayanımını incelemek üzere yapılan çekme deneyleridir.

### 5.1 İşlenebilirlik Testleri

Küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğini incelemek üzere yapılan testlerde işlenebilirlik takım ömrüne, takım aşınmasına, yüzey pürüzlülüğüne ve kesme kuvvetlerine bağlı olarak incelenmiştir.

İşlenebilirlik testleri ISO 3685'e göre yapılmıştır. Bu standart işlem, iş parçasının sabit kesme hızında ( $V_c$ ) tornalanmasını ve belirli bir takım aşınması değeri elde edebilmek için gerekli olan kesme zamanının ( $T_c$ ) belirlenmesini kapsamaktadır.

Testlerde klasik bir torna kullanılması nedeniyle farklı devir sayıları dolayısıyla sabit kesme hızı elde edilemediği için benzer sertliğe sahip, aynı boyda ve benzer içyapıya sahip üçer adet test numunesi kullanılmış, parçalardan birer boy işlenerek testler yapılmıştır. Bu sayede çap ve devir sayısı değişmediği için kesme hızı sabit tutulmuştur. İlk parçalar sonunda aşınma değerleri istenilen düzeye ulaşmadı ise parçalardan tekrar birer boy işlenilmiş ve aşınma değeri 0,3mm olana kadar testler bu şekilde tekrarlanmıştır.

Yine bunlarla birlikte bazı malzeme grupları için ilerlemenin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini görmek üzere farklı ilerlemelerde takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülerek bunlar arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

Testler sırasında başlangıçta 40 mm olmak üzere her 80 mm' de testlere ara verilmiş ve takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü kaydedilmiştir. Yine işlem boyunca ölçülen kesme kuvvetleri ölçümü de bu noktalarda kesilerek değerler kaydedilmiştir. Her üç yöndeki kesme

kuvveti (teğetsel, radyal ve aksenal) ölçülmüştür ancak değerlendirme de en büyük kuvvet olan teğetsel kuvvetler kullanılmıştır.

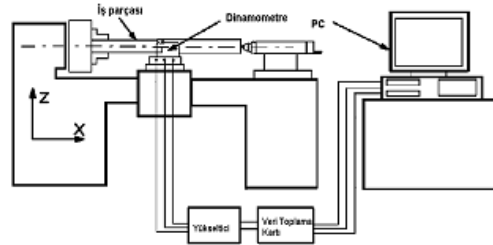
Kesme işlemi sırasında herhangi bir soğutma sıvısı kullanılmamış kuru kesme yapılmıştır.

İşlem için Iscar WNMG 080408-NF silici uçları kullanılmıştır. Dökme demirlerde de kullanılan bu uçların kesme hızı aralığı 140..300 m/dak arasındadır. Testler bu aralık göz önüne alınarak kesme hızları belirlenmiştir.

Tornaya bağlanan parçalarda salgı ölçülerek engellenmeye çalışılmışsa da parçalardan 1,5 mm paso kaldırılarak salgı alınmıştır. Salgısı alınan her bir parçalarda farklı malzeme gruplarındaki numunelerin (dolayısıyla farklı matris yapıya sahip KGDD'lerin) işlenebilirlik kriterini inceleyebilmek amacıyla sabit ilerleme ( $f = 0,18$  mm/d) ve pasoda ( $a_p=1.5$  mm) testler yapılmıştır.

### 5.1.1 Sistem Donanımı

Testler için oluşturulan sistem donanımında bir dinamometre, bir analog /sayısal dönüştürücü ve bir masaüstü bilgisayarı kullanılmıştır. Donanım universal ve sayısal denetimli takım tezgahlarına kolaylıkla adapte edilebilecek bir sistemdir. Şekil 5.1' de sistem donanımı görülmektedir. Sistemin kullanılması sırasında dinamometreden elde edilen analog sinyaller algılama limitlerinin altında kalabilmektedir. Bunun engellenmesi ve ölçü köprülerinde oluşan en küçük gerilim değişikliklerinin kolaylıkla okunabilir sınırlar içerisine yükseltilmesi amacıyla işlem amplifikatörü kullanılmıştır.



Şekil 5.1 Sistem donanımı



Kesme kuvvetlerinin deneysel olarak belirlenmesi için mekanik, hidrolik, pnömatik, elektronik, elektrik, optik ve piezoelektrik yöntemlerin kullanıldığı ölçme sistemleri kullanılmaktadır. Kesme kuvvetlerini ölçmek için kullanılan mekanik sistemlerde dinamometreler esasen takım sistemine yerleştirilen birer yaydır. Ölçme işlemi, yayın yani dinamometrenin elastik şekil değiştirmesine dayanır. Yer değiştirmeler uzama ölçer yardımıyla bir gösterge veya kaydetme cihazına gönderilir. Genel olarak kesme kuvvetlerini ölçmek için kullanılan dinamometrelerden istenilen özellikler;

- Hassasiyet
- Doğruluk
- Rijitlik
- Tekrarlanabilirlik;

Hassasiyet ve rijitlik dinamometrelerin en önemli özellikleridir. Bir dinamometrenin kesme kuvvetlerini ölçmek için yüksek hassasiyete sahip ancak kendi şekil-değiştirmeleri ile kesme işlemini etkilemeyecek kadar rijit olması gerekir. Buna göre hassasiyet bakımından, kesme kuvvetlerini ölçmek için kullanılan dinamometrelerin %  $\pm 1$  hassasiyetinde olmaları gerekir. Ölçülen en küçük şekil değiştirme genelde  $1\mu\text{m}$  civarındadır. Dinamometrelerin rijitliği, genelde  $200\text{ kN / mm}$  dir. Kesme kuvvetlerinin tam olarak iletilebilmesi için dinamometrenin özgül frekansının, takıma etki edebilecek dış etkilerin frekansından en az 4....5 misli daha büyük olması gerekir. Dinamometrelerin önemli başka bir özellik olarak doğrusal bir kalibrasyona sahip olmaları gerekir. Bu durumda kuvvetler büyük bir doğrulukla ölçülebilir. Kalibrasyonu engelleyen en önemli faktör histerizisdir. Histerizis; kuvvet şekil değiştirme eğrilerinde yükleme ve boşalmalar arasındaki farktır. Bu nedenle histerizis olayı mümkün mertebede sıfır veya dinamometrenin hassasiyetine göre çok küçük olmalıdır.

Bu çalışmada yapılan testlerde kesme kuvvetlerini ölçmek için TD-500 tipi dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre bilgisayar bağlantılı olarak ölçme yapmakta, aynı anda üç eksendeki kesme kuvvetleri ölçülebilmektedir. Maksimum ölçme değerleri  $F_s; 500$

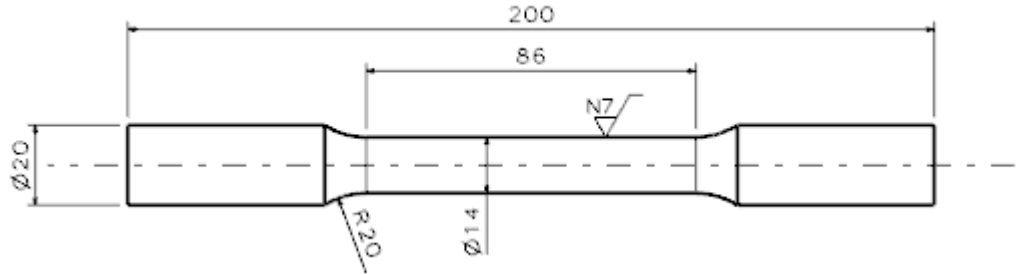
KN, Fr; 300 KN, Fv; 200 KN' dır. Kuvvetlerin birbirlerine olan etkileri minimum düzeydedir. Hata oranı % 1,5 civarındadır.

Dinamometrede yapılan ölçümlerin doğru olabilmesi için kesici takım uzunluğu dinamometreden en fazla 20 mm dışarıda olması gerekmektedir. Ölçme işleminden önce sistemin dengelenmesi için 5 dakika boşa çalıştırılması gerekmektedir. Kullanılan kater boyutları 11, 13, 16, 19 olabilmekte, kesici takım dinamometre merkezinden +/-7 mm sağ veya sol tarafta konumlandırılabilir. Dinamometreler tüm bu özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çok küçük değerleri bile hassas bir şekilde ölçmek mümkün olmaktadır. Dinamometre  $1 \times 10^{-6}$  miktarına kadar olan yer değiştirmeleri ölçebilmektedir. 350 ohm' luk uzama-ölçer kullanılmıştır.

Serbest yüzey aşınması Nikon104 mikroskobu, iş parçasının yüzey pürüzlülüğü bir profilometre (Taylor Hobson Talysurf) kullanılarak ölçülmüştür.

## 5.2 Çekme Testleri

Çekme testlerinde TSE 138 standardına göre hazırlanan ve ölçüleri Şekil 5.2 verilen test çubukları kullanılmıştır. Her bir malzeme grubunda üçer adet test çubuğu kullanılmıştır.



Şekil 5.2 Çekme testi numunesi ve ölçüleri

Testlerde çekme hızı yaklaşık 1 m/ dak olan hidrolik çekme testi cihazı kullanılmıştır.

### 5.3 Test Numuneleri

İĞREK DÖKÜM tesislerinde dökülen GGG50 test numunelerinin kimyasal bileşimi Çizelge 4.1' de verilmiştir. Döküm sonrası Ø92x320 mm olarak gelen işlenebilirlik testi numuneleri dökümü çapakları ve punta delikleri açıldıktan sonra boyutları Ø90x300 mm olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 5.1 Testlerde kullanılan KGDD'in alaşım elementleri

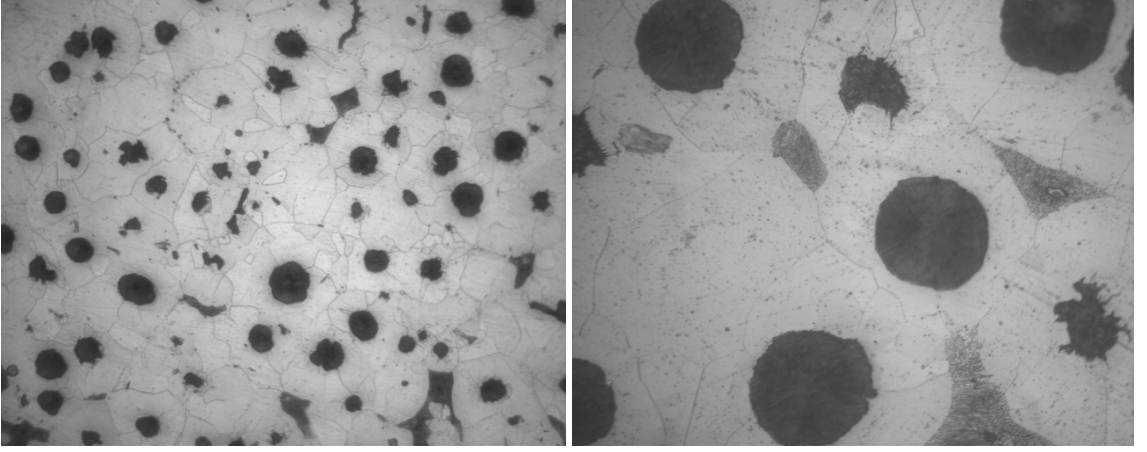
C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu
3,70	2,47	0,01	0,02	0,07	0,02	0,03	0,008	0,23

Testlerde kullanılan küresel grafitli dökme demirler farklı ısıl işlemlere tabi tutulmuş ve bunu sonucunda farklı iç yapılar elde edilmiştir. Yapılan bu testler sonucu elde edilen gruplar, bunların içyapıları ve sertlik değerleri Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Testlerde kullanılan malzeme grupları ve özellikleri

GRUP	AÇIKLAMA	İÇ YAPI	SERTLİK [HB]
A	Döküm halde KGDD	Perlitik/Ferritik	121
B	Perlitik/Ferritik – 1 KGDD	Perlitik/Ferritik	133
C	Perlitik/Ferritik - 2 KGDD	Perlitik /Ferritik	144
D	Temperlenmiş Martenzit	Martenzitik	375

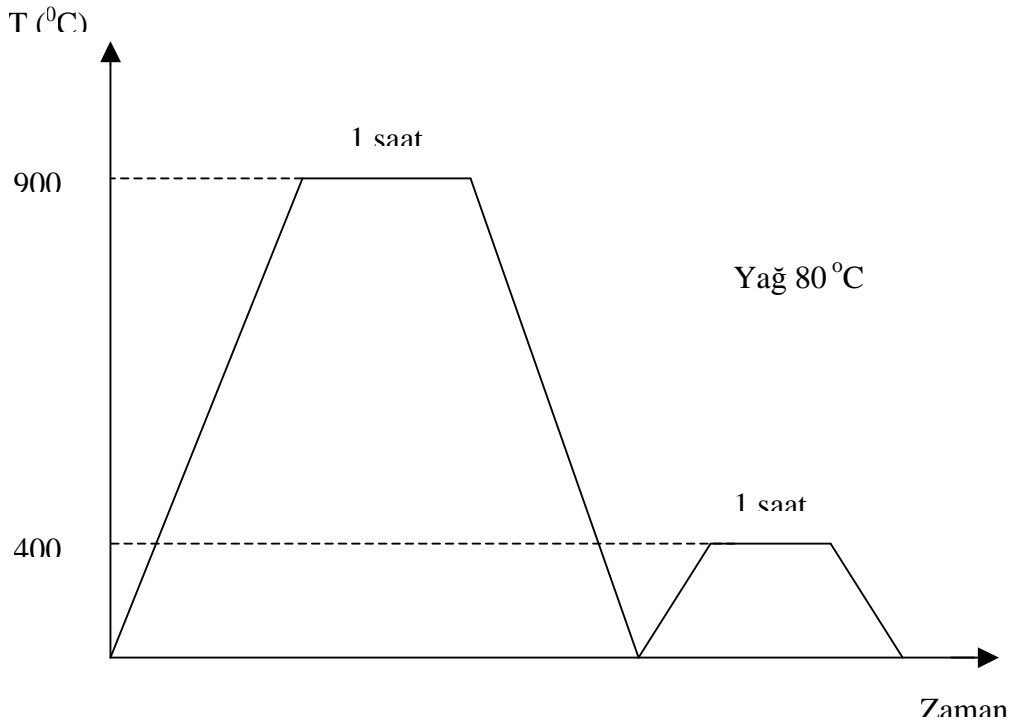
Döküm sonrası malzemelerde perlitik/ferritik içyapı bulunmaktadır. %50 küreselleşme sağlanmıştır. Döküm haldeki malzemenin içyapı resimleri Şekil 5.3' de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi küresel grafitlerin etrafında ferrit grupları bulunmaktadır. Ferrit gruplarının arasında ise perlit oluşumları gözlenmektedir. Ferrit miktarının perlitte oranla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3 Döküm malzemenin içyapı resimleri

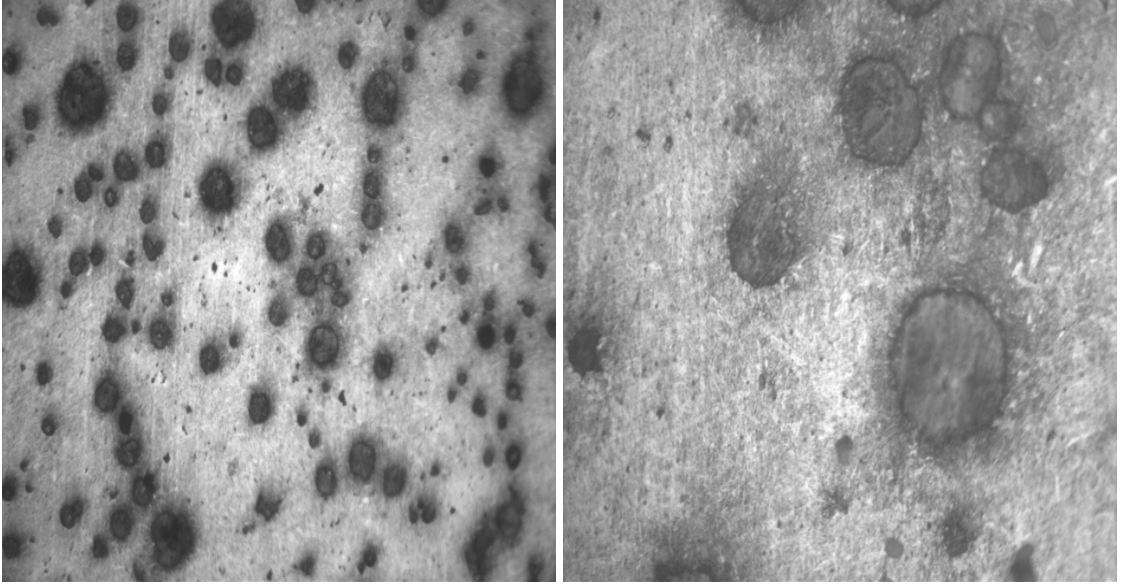
### 5.3.1 Temperlenmiş Martenzit Yapı Elde Etme

Döküm sonrası, bir grup test numunesinde temperlenmiş martenzitik bir yapı elde edebilmek için numuneler ön ısıtmadan sonra  $900^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat ostenitlenerek,  $80^{\circ}\text{C}$ 'ye yağda soğutulmuş ve daha sonra  $400^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat temperlenmiştir. Temperleme sonrası numuneler havada soğutulmaya bırakılmıştır. Bu işlem adımları Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Temperlenmiş martenzit elde etmek için uygulanan ısı işlem basamakları.

Yapılan ısııl işlemler sonucunda elde edilen içyapı resimleri Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Resimlerden de görüleceği gibi küresel grafitlerin etrafında yoğun miktarda martenzit yapı bulunmaktadır.

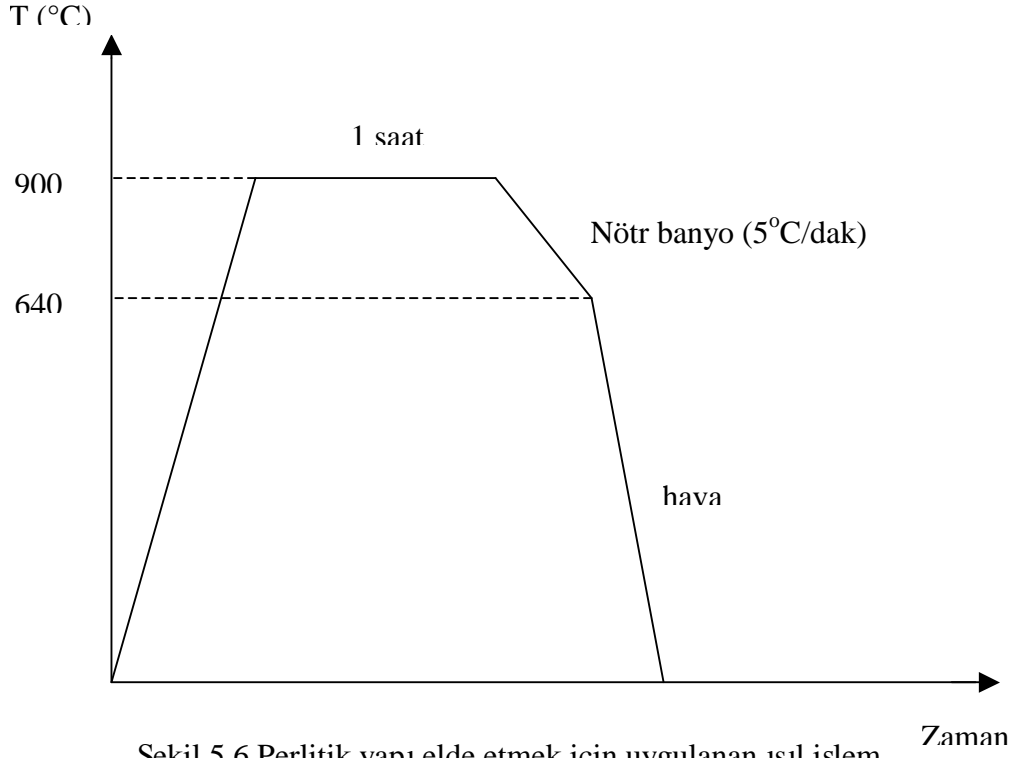


Şekil 5.5 Temperlenmiş martenzit içeren KGDD’in iç yapısı

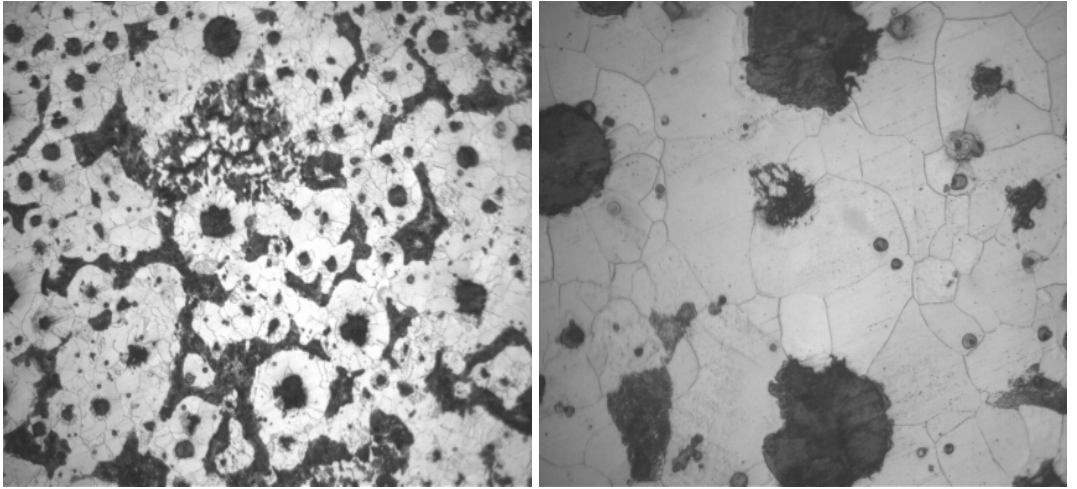
İçerdiği bu martenzit dolayısıyla testlerde kullanılan sertlik değeri en yüksek (375HB) malzeme grubunu oluşturmaktadır.

### 5.3.2 Perlitik/Ferritik - 1 Yapı Elde Etme

Döküm işleminden sonra C grubundaki malzemelerde perlit miktarı artırılmış perlitik/ferritik bir yapı elde etmek amaçlanmıştır ve bunun için numuneler 900°C’de 1 saat ostenitlendikten sonra 640°C’ye kadar 5°C/dak soğuma hızıyla nötr banyoda, daha sonra durgun havada soğutulmuştur. Bu işleme ait fırın rejim eğrisi Şekil 5.6’te verilmiştir.



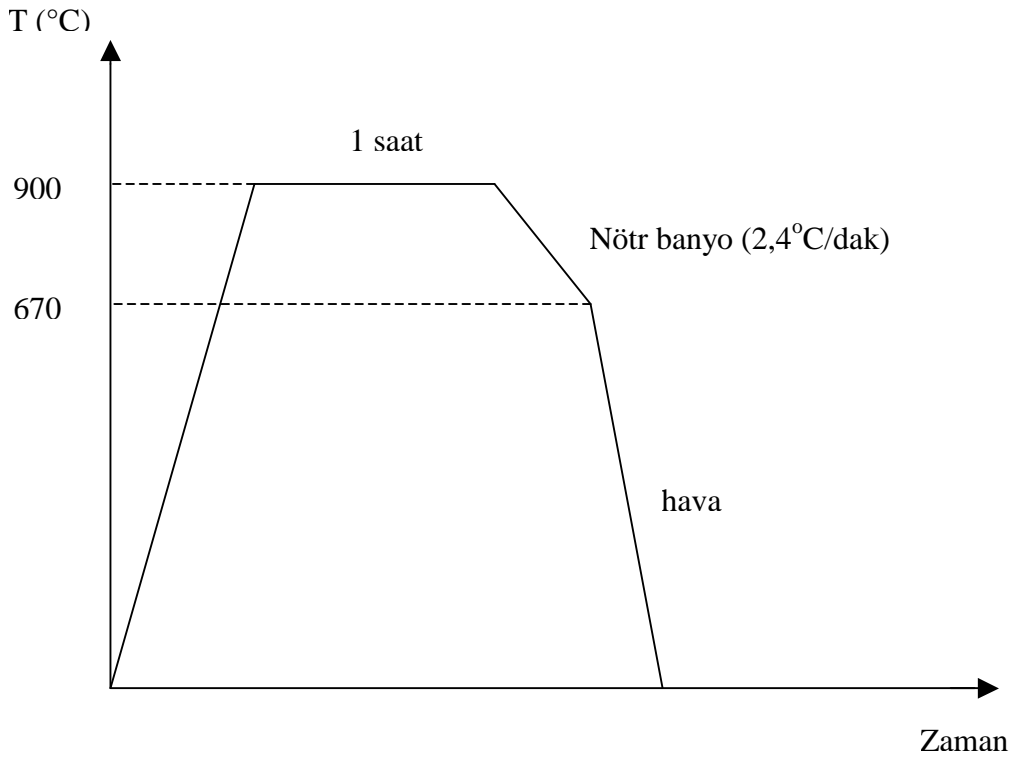
Uygulanan ısıtım işlemi neticesinde elde edilen içyapı resmi Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Küresel grafitlerin etrafında yine ferrit oluşumları gözlenmektedir. Ancak ısıtım işlemi görmemiş malzemeye göre perlit miktarında bir artış olmuştur.



Şekil 5.7 Perlitik/Ferritik - 1 yapıya sahip KGDD’in içyapı resimleri

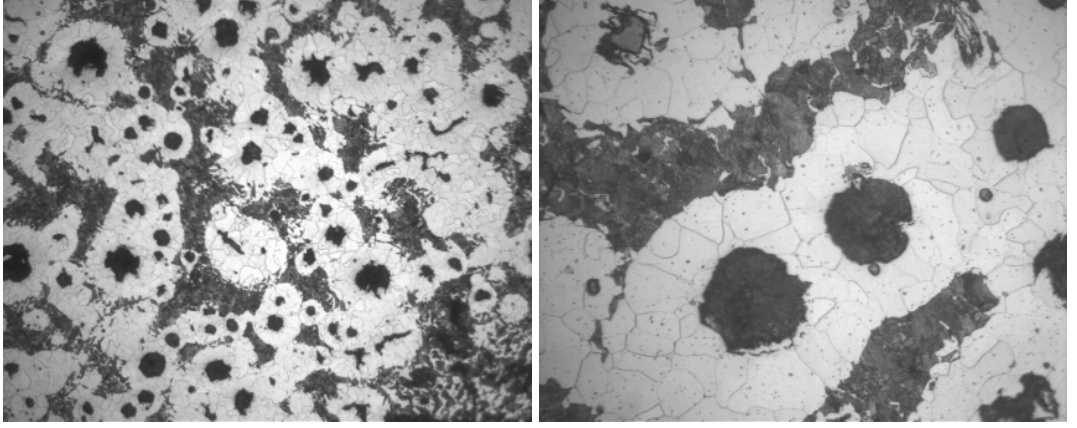
### 5.3.3 Perlitik/Ferritik - 2 Yapı Elde Etme

Döküm sonrası bir diğer grup malzemede ise yine perlit miktarı arttırılmış perlitik/ferritik bir yapı elde etmek amacıyla numuneler ön ısıtmadan sonra 900°C'deki nötr banyoya alınıp 1 saat süreyle ostenitlenip 2,4°C/dak'lık soğutma hızında banyo içerisinde 670°C'ya kadar soğutulduktan sonra durgun havada soğutulmaya bırakılmıştır. Bu ısıl işlemin fırın rejim eğrisi Şekil 5.8' de verilmiştir.



Şekil 5.8 Perlitik/Ferritik yapı elde etmek için uygulanan ısıl işlem programı

İşlem sonrası elde edilen içyapı Şekil 5.9'de verilmiştir. Diğer malzeme gruplarına benzer bir mikro yapıya sahip bu malzeme grubunda perlit miktarının diğerlerine göre artış gösterdiği Şekil 5.9'da görülmektedir. Yine küresel grafitlerin etrafında ferrit oluşumları mevcuttur.



Şekil 5.9 Perlitik/Ferritik içyapı resimleri

Yukarıda belirtilen ısı işlemler yardımıyla farklı iç yapılara sahip küresel grafitli dökme demirler elde edilmiştir. Döküm sonrası ısı işlem görmemiş malzemelerde ve ısı işlem sonrası B ve C grubu malzemelerde perlitik/ferritik bir yapı bulunmaktadır. Ancak bu malzemelerdeki perlit miktarı sırasıyla artış göstermektedir.



## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 6.1 Çekme Testi Sonuçları

Farklı mikro yapıya sahip dört farklı KGDD grubunda üçer adet test numunesi ile yapılan testler sonucunda elde edilen bilgiler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Çekme testi sonuçları

		Çekme Dayanımı [MPa]	Uzama [%]
<b>A</b>	1	419,17	6,98
	2	565,05	11,63
	3	489,71	8,14
<b>B</b>	1	527,38	8,14
	2	488,43	9,30
	3	511,52	8,14
<b>C</b>	1	602,72	8,14
	2	629,47	9,30
	3	560,18	6,28
<b>D</b>	1	1343,18	0,47
	2	1356,75	1,16
	3	1457,50	4,65

Yapılan testler sonucunda herbir grup için elde edilen ortalama çekme dayanımı ve uzama değeriyle numunelerin sertlik değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Numunelerin ortalama çekme dayanımı, uzama ve sertlik değerleri

GRUP	ORTLAMA ÇEKME DAYINIMI [Mpa]	ORTALAMA UZAMA [%]	SETLİK [HB]
A	491,31	8,91	121
B	509,11	8,53	133
C	597,46	7,91	144
D	1385,81	2,09	375

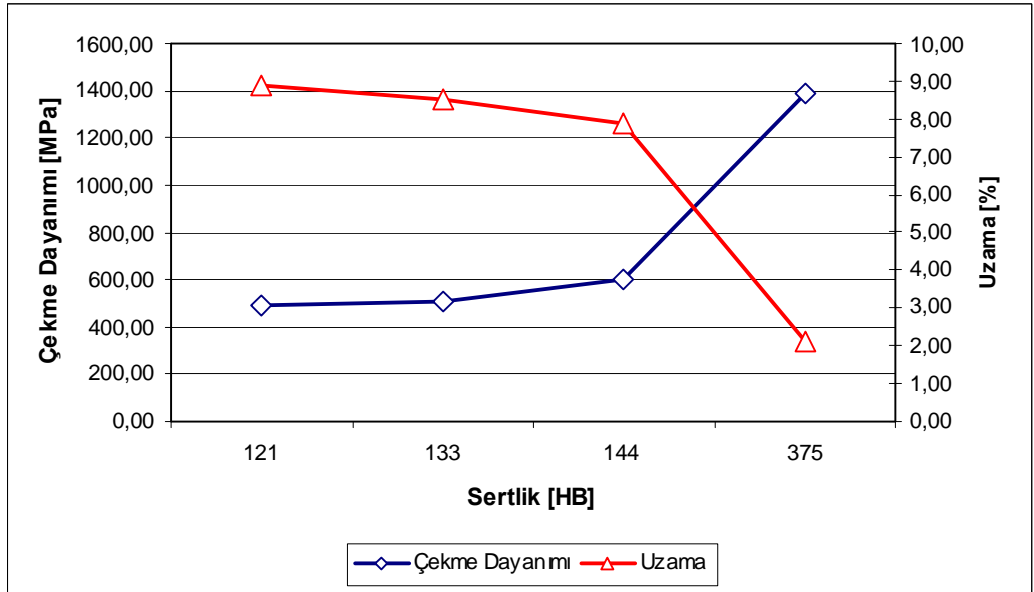
Değişik mikro yapıları KGDD’lerin sertlik değerleri literatürde verilen her bir matris için verilen sertlik değerlerine yakın çıkmıştır. Daha yumuşak ve sünek bir faz olması nedeniyle ferrit miktarı daha fazla olan A grubu malzemede sertlik düşük çıkmıştır. Perlit miktarının artmasıyla birlikte sertlik değeri de artmaktadır. Bu sonuç, iç

yapılarında farklı oranlarda ferrit ve perlit içeren küresel grafitli dökme demirlerin sertlik incelemelerinin yapıldığı çalışma ile de uygunluk göstermektedir (Hafız 2001).

En yüksek sertlik değerine sahip olan D grubu malzemelerin (temperlenmiş martenzitik yapı) sünekliliğinin en düşük değere sahip olduğu buna karşılık çekme dayanımının diğer numuneler arasında en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür.

En düşük çekme dayanımı değerinin A grubu malzemedeki döküm sonrası ısıtma işlemi görmemiş küresel grafitli dökme demirde olduğu görülmektedir. En fazla sünekliliğe sahip olan malzeme grubu ise yine A grubu malzemeler olmuştur.

Farklı ısıtma işlemlerine tabi tutulmuş KGDD'lerin çekme dayanımı, uzama ve sertlik bağıntısını Şekil 6.1'de görülmektedir.



Şekil 6.1 Sertlik ile çekme dayanımı ve uzamanın değişimi

Şekil 6.1'den de görüldüğü gibi mikro yapıların sertliğinin artışıyla birlikte çekme dayanımı artarken sünekliliği azalmaktadır. Daha önceki bölümlerde Denklem 3.1 ve 3.3 da belirtildiği gibi kompozit matris mikro sertliği arttıkça malzemelerin çekme dayanımı artmakta, % uzama değeri azalmaktadır. Yine Denklem 3.5'de % uzama değeri ile çekme dayanımı arasında ters bir orantı olduğu çekme dayanımının arttıkça % uzamanın azaldığı Şekil 6.1'de görülmektedir.

Perlit miktarı daha fazla olan C grubu perlitik/ferritik – 2 malzemelerin çekme dayanımının B grubu perlitik/ferritik -1 mikro yapıya sahip malzemelere göre daha iyi olduğu ve % uzama değerinin ise daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sonuç, perlitik bir yapının ferritik olana göre gerek dökme demirlerde ve gerekse çeliklerde dayanım ve sertliğin artmasına buna bağlı olarak sünekliğin düşmesine sebep olması ile uygunluk göstermektedir (Toktaş 2004).

En düşük çekme dayanımı değerinin A grubu malzemelerde olması bu döküm halde ve içyapısı kısmen perlitik/ferritik bir matristen oluşan numunelerde ferrit miktarının perlit miktarına göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Yine yapıda bulunan yüksek miktardaki ferritin daha yumuşak ve sünek bir faz olması A grubu malzemelerde % uzama değerinin en yüksek değere sahip olmasını sağlamaktadır.

## **6.2 İşlenebilirlik Testi Sonuçları**

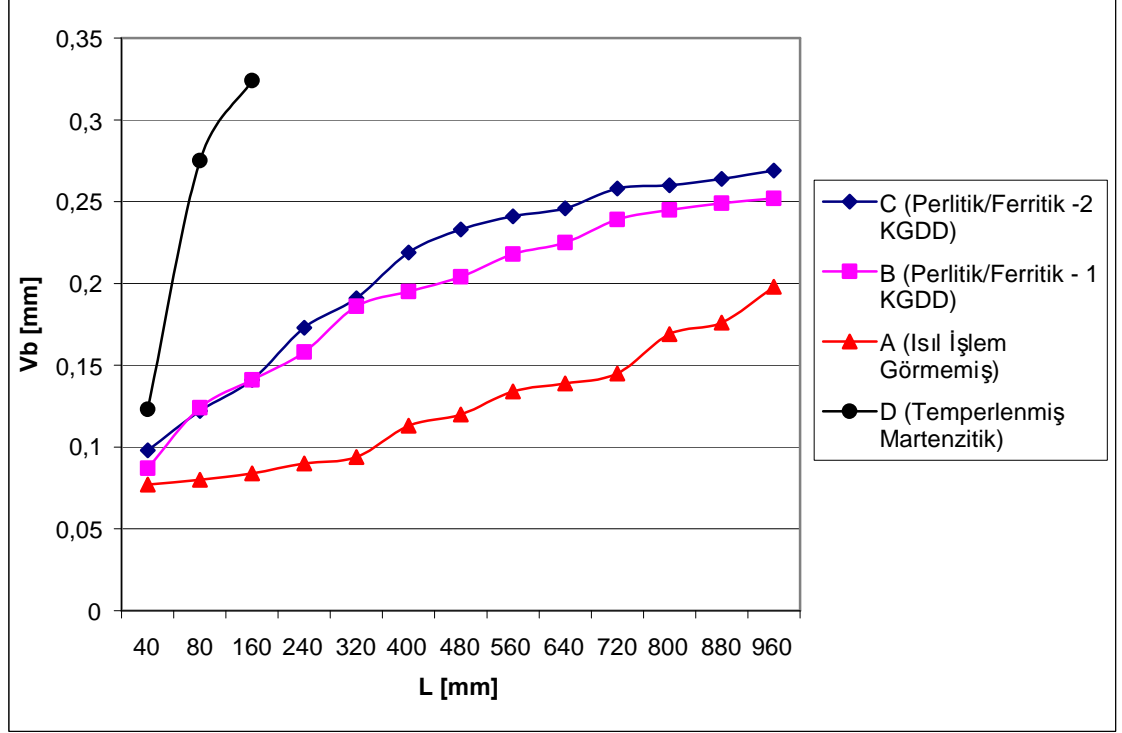
İki farklı kısımda yapılan işlenebilirlik testlerinde, ilk kısımda farklı matris yapıya sahip küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği incelenmiştir. Yapılan testlerde takım ömrü takım aşınmasına, yüzey pürüzlülüğüne ve kesme kuvvetlerine bağlı olarak incelenmiştir.

### **6.2.1 Takım Aşınması**

Farklı içyapıların takım aşınması üzerine etkileri Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda matris yapısına bağlı olarak artan sertliğin işlem sonunda takım aşınmasını arttırdığı görülmüştür.

Temperlenmiş martenzitik yapıya sahip D grubu malzemeler takımı işleme başlandıktan hemen sonra hızla aşındırılmış ve kısa süre sonra takım kırılmıştır. Yapı içerisinde bulunan yüksek sertlikteki martenzit (375 HB) bu hızlı aşınmanın nedeni olarak gösterilmiştir.

Diğer matris yapıları bakıldığında yapısında diğerlerine göre daha fazla ferrit bulduran dolayısıyla, sertliği daha düşük olan A grubu malzemelerde (döküm haldeki malzemeler) takım aşınması işlem sonunda en düşük değerde kalmıştır.

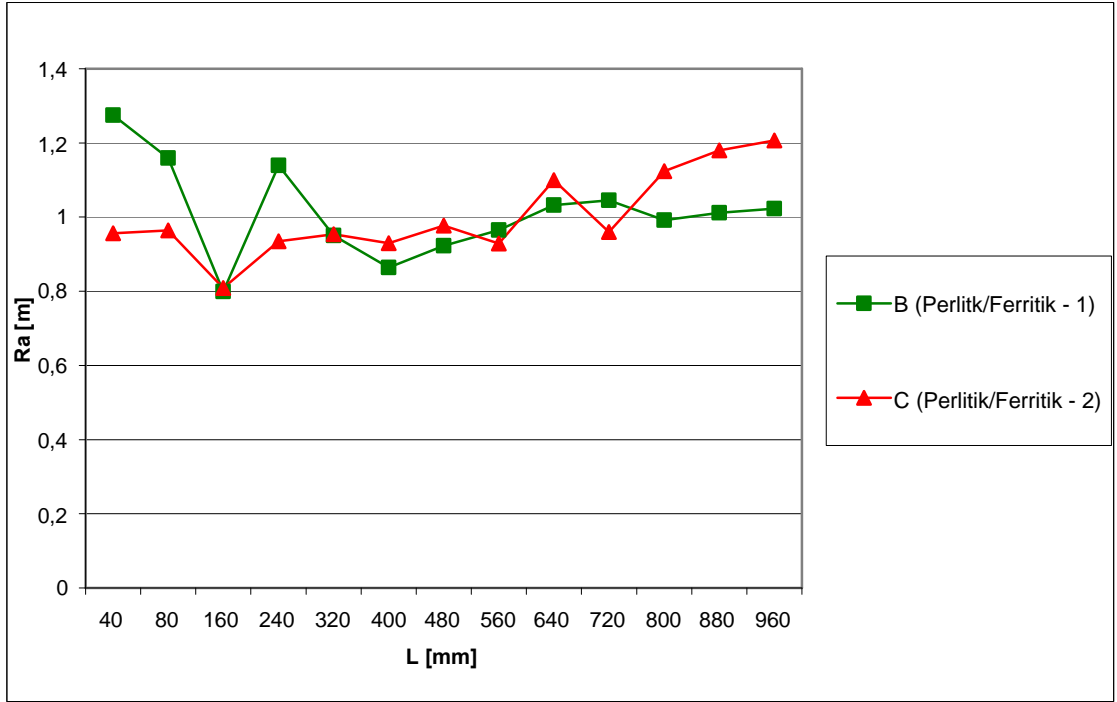


Şekil 6.2 Farklı matris yapıların takım aşınması üzerine etkileri

C ve B grubu malzemeler karşılaştırıldığında daha fazla perlit içeren ve daha sert olan C grubu malzemelerin, takımı, perlit miktarı daha düşük olan perlitik/ferritik yapıya sahip ve sertliği daha düşük olan B grubu malzemelerden daha fazla aşındırıldığı gözlenmiştir.

### 6.2.2 Yüzey Pürüzlülüğü

Yapılan testler sonucu işlenen numuneler üzerinden alınan yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 6.3'de görülmektedir.



Şekil 6.3 Farklı içyapılarda işlem sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri

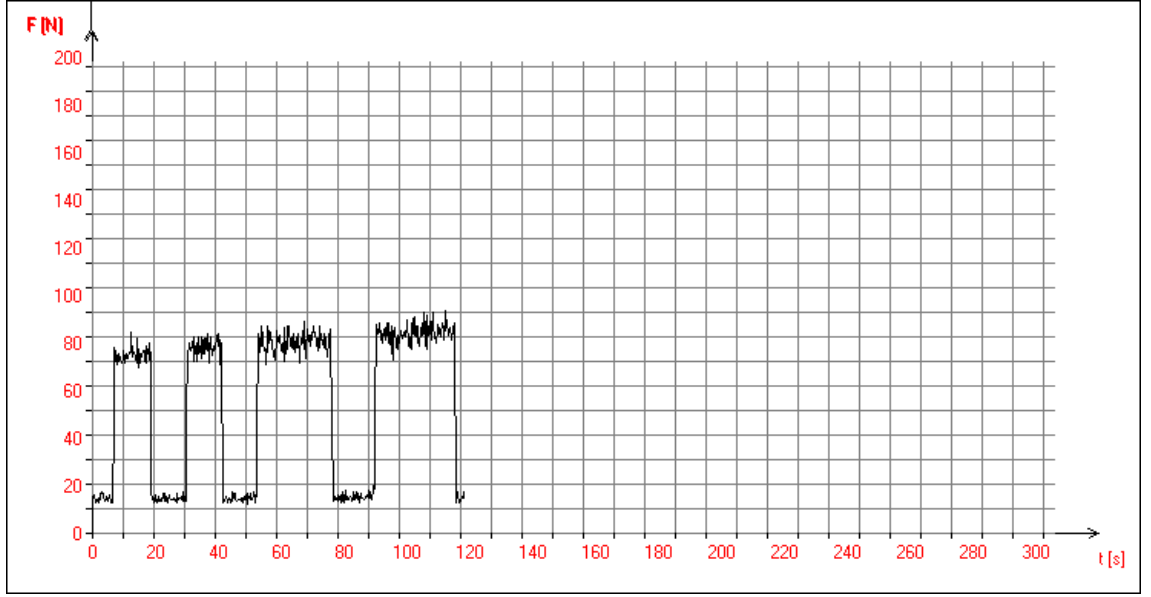
Yine parçalar punta taraflarından punta ile sabitlense de bu kısımlarda salınım nedeniyle yüzey kalitesi bozulmuş ancak işlemin devamında aynaya yaklaştıkça salınım azalmış ve ölçümler daha doğru sonuçlar vermiştir. Testlerde tek bir parça kullanılmaması nedeniyle yukarıda bahsedilen bu problem her yeni parçada ortaya çıkmış bunu sonucu olarak Şekil 6.3' deki gibi dalgalanmalar ortaya çıkmıştır.

İşlemler sonucunda takım aşınması arttıkça yüzey kalitesinin bozulduğu görülmüştür. Takımı daha fazla aşındıran C grubu malzemelerde yüzey pürüzlülüğünün B grubu malzemeye göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

D grubu malzemeler ( temperlenmiş martenzit) takımı kısa sürede aşındırdığı için yüzey pürüzlülüğü karşılaştırılmasında kullanılmamıştır.

### 6.2.3 Kesme Kuvvetleri

Testlerde takım ömrünün incelenmesi için karşılaştırılan bir başka değişken kesme kuvvetleridir. Testler sırasında ölçülen kesme kuvvetlerine ait örnek grafik Şekil 6.4' de verilmiştir.



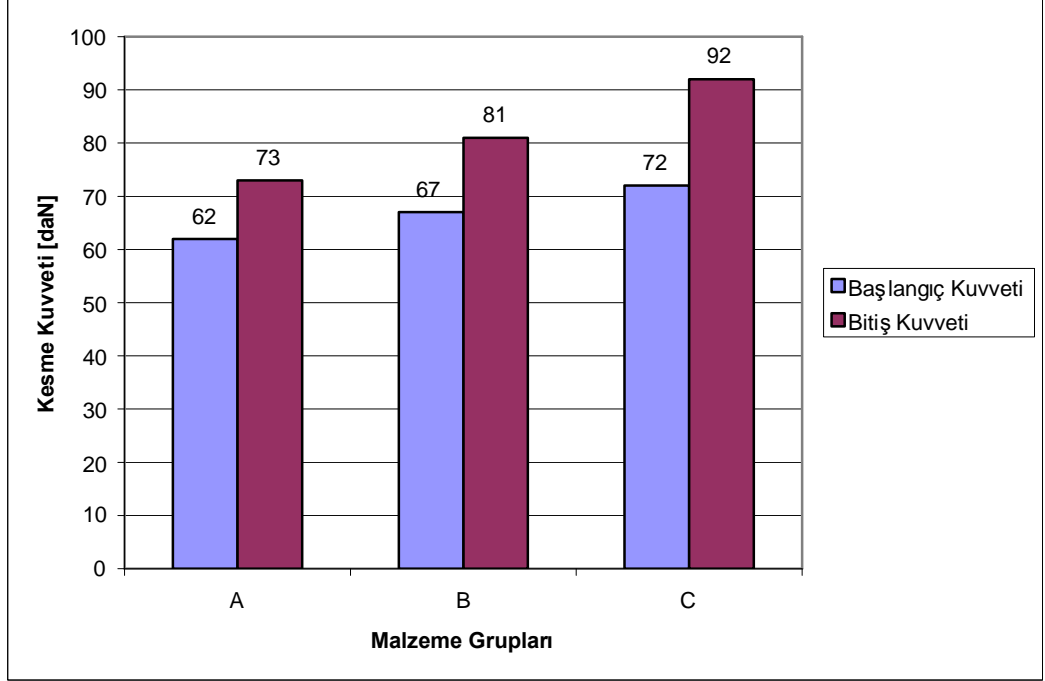
Şekil 6.4 Kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi

İşlem sırasında her üç yöndeki kesme kuvveti ölçülmesine rağmen değerlendirmeye yalnızca en büyük kuvvet olan teğetsel kuvvet alınmıştır.

Kesme kuvvetlerindeki artış takım aşınmasının göstergesidir. Bu kriteri göz önüne alarak bir karşılaştırma yapabilmek için işleme başladıktan hemen sonra ölçülen kesme kuvveti değeri ile işlem sonrasında ölçülen kesme kuvvetleri arasındaki artış değerlendirmelerde kullanılmıştır. Bu başlangıç ve bitiş kuvvetlerine ait değerler Şekil 6.5' de gösterilmiştir.

Şekil 6.5'den de açıkça görüldüğü gibi sertlik artışı ile birlikte başlangıç kesme kuvvetlerinin arttığı görülmektedir. Başlangıç ve bitiş kuvvetleri arasındaki en fazla artışın (%28) C grubu malzemelerde olduğu görülmüştür. Yine en yumuşak olan ve

takımı en az aşındırdığı bilinen A grubu ısıl işlem görmemiş malzemelerdeki kuvvet artışının en az olduğu (%18) görülmüştür.



Şekil 6.5 Başlangıç ve bitiş kuvvetleri ile bu kuvvetler arasındaki % fark

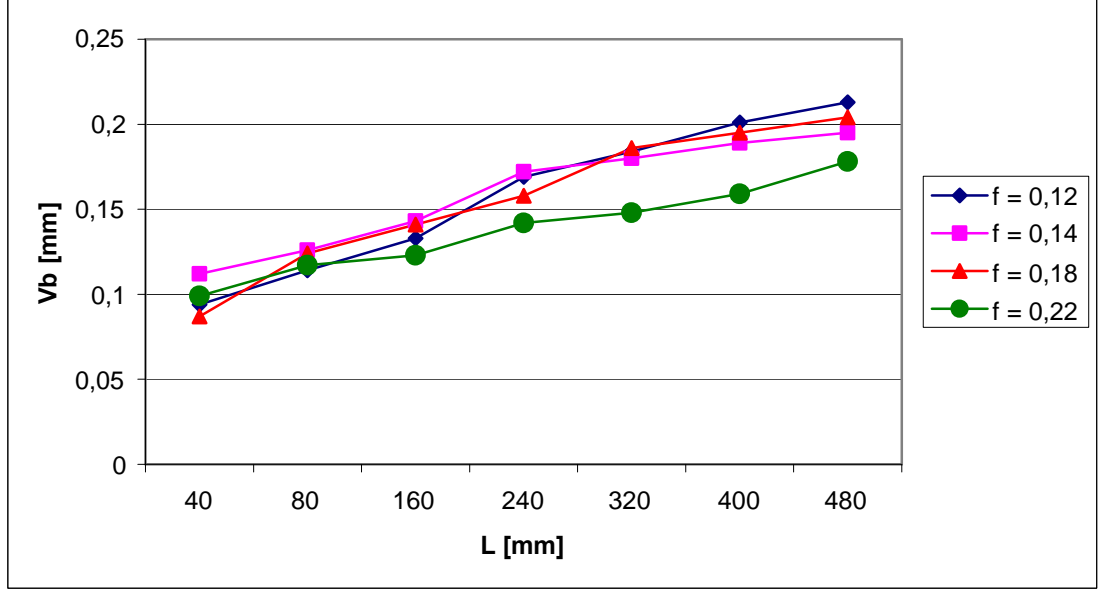
Yine D grubu malzemeler (temperlenmiş martenzitik mikro yapı), takımı hızla aşındırdığı için kesme kuvvetlerinin karşılaştırılmasında kullanılmamıştır.

İkinci kısım testlerde aynı malzeme üzerinde ilerleme değiştirilerek, ilerlemenin takım aşınmasına ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir. İncelenen malzeme grupları B (perlitik/ferritik – 1 matris yapı) ve C (perlitik/ferritik - 2 matris yapı) grubu malzemelerdir.

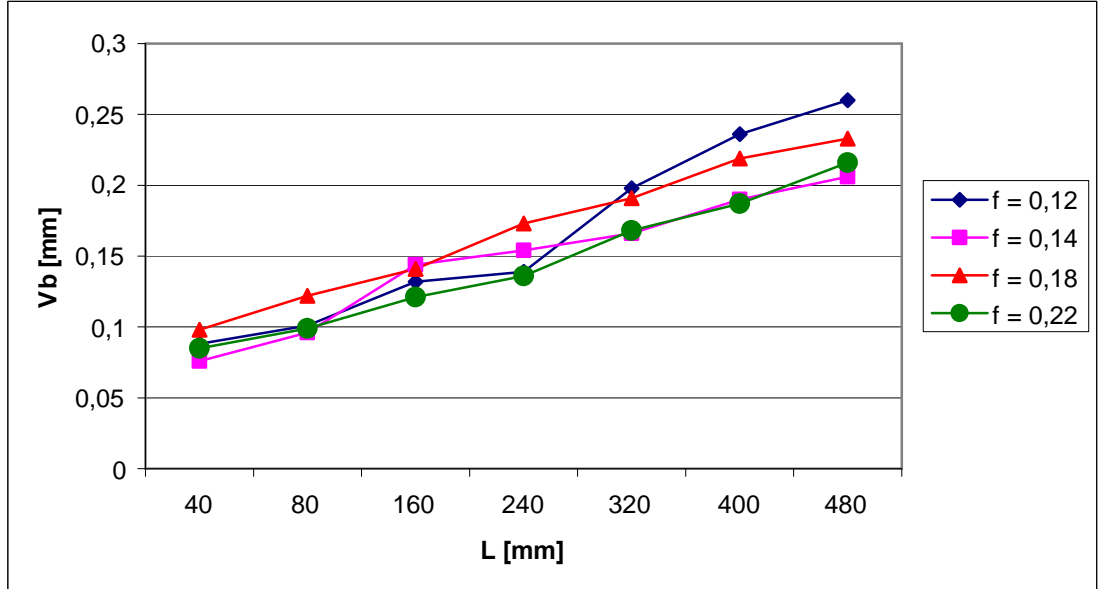
Testlerde kesme hızı ve talaş derinliği sabit tutulurken, ilerleme değerleri sırasıyla 0,12, 0,14, 0,18 ve 0,22 olarak değiştirilmiştir. B ve C grubu malzemelere ait test sonuçları sırasıyla Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de verilmiştir.

En yüksek aşınma değeri  $f = 0,12$  mm/dev ilerleme de ortaya çıkmıştır. İlerlemenin düşük olması nedeniyle takım/iş parçası temas süresinde bir artış ve buna

bağlı olarak sıcaklığın artması ve aşınmayı hızlandırması bunun nedeni olarak düşünülmektedir.



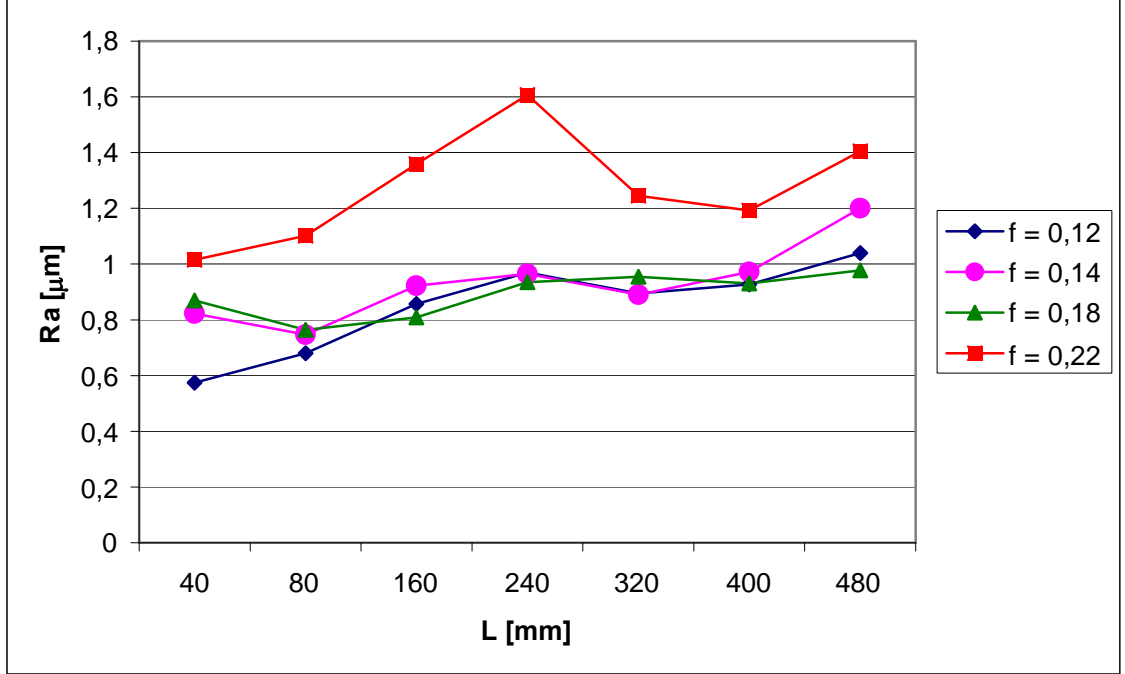
Şekil 6.6 B grubu (Perlitik/Ferritik – 1) malzemelerde ilerlemenin takım aşınmasına etkisi



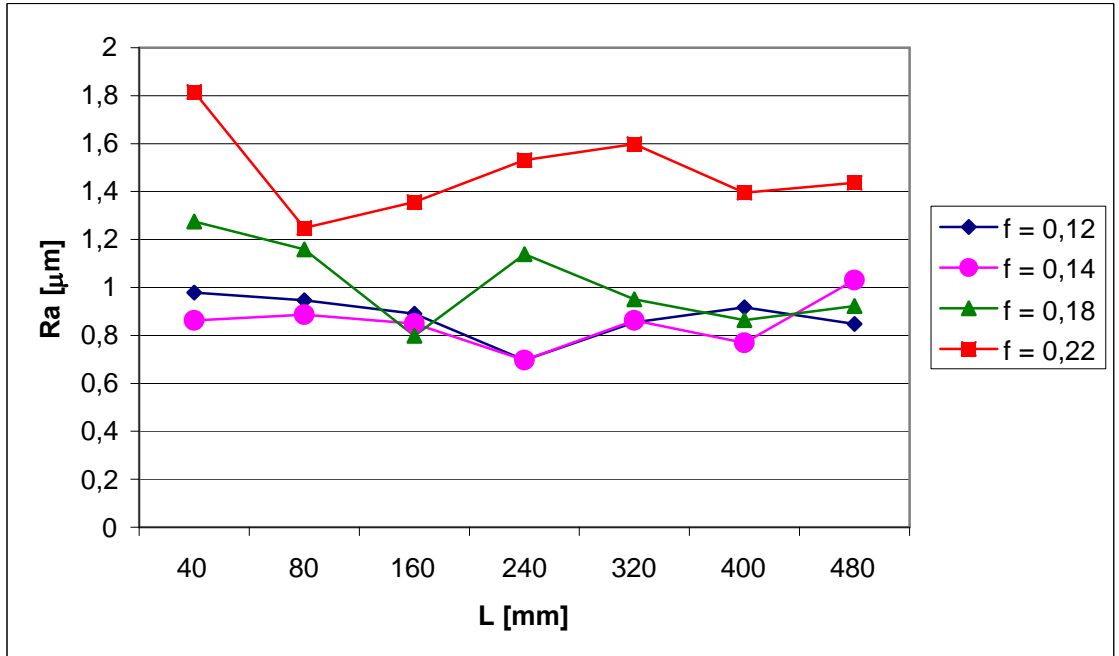
Şekil 6.7 C grubu (Perlitik/Ferritik – 2) malzemelerde ilerlemenin takım aşınmasına etkisi



$f = 0,18$  mm/dev ilerlemede parça çapının farklı olması ( malzemelerin işlenebilirliğinin incelendiği deneyler için) nedeniyle aşınma değeri daha önce bahsedilen ilişkiyi bozmaktadır.



Şekil 6.8 B grubu (Perlitik/Ferritik – 1) malzemelerde ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi



Şekil 6.9 C grubu (Perlitik/Ferritik – 2) malzemelerde ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’ da farklı ilerleme değerlerinin sırasıyla B ve C grubu malzemelerde yüzey pürüzlülüğüne etkileri görülmektedir. Beklendiği üzere ilerleme artışıyla birlikte yüzey kalitesinde bir bozulma meydana gelmektedir. Yine aşınma artışıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün artışı grafiklerden görülmektedir.

Parçaların sökölüp takılması nedeniyle yine yüzey pürüzlülüğü değerlerinde dalgalanmalar olmuştur. Farklı iki malzemenin aynı ilerlemelerde yaklaşık olarak aynı yüzey pürüzlülüğü değerlerini verdiği görülmektedir.

İlerleme değişiminin takım aşınması üzerine etkilerini incelemek amacıyla daha fazla test yapılması ve bulunan sonuçların değerlendirilmesi gerekmektedir. İlerlemenin aşınmaya ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi işleme parametrelerinin optimizasyonu için önem kazanmaktadır. İyi bir yüzey kalitesi ya da iyi bir takım ömrü istenilebilirken her ikisi içinde bir optimum nokta bulunabilir.

## 7. GENEL SONUÇLAR

Çalışma kapsamında yapılan çekme ve işlenebilirlik testleri sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- En yüksek sertlik değeri (375 HB) D grubu, temperlenmiş martenzitik mikro yapıya sahip malzemelerde, görülmüştür.
- En düşük sertlik değeri (121 HB) A grubu, döküm sonrası ısı işlem görmemiş malzemelerde, ölçülmüştür.
- Malzemelerin iç yapılarındaki perlit miktarının artmasıyla sertlik değerleri artış göstermektedir. Bu durum perlitik/ferritik yapıya sahip A, B ve C grubu malzemelerde görülmektedir.
- Çekme testlerinde en yüksek çekme dayanımı D grubu malzemelerde görülmüştür.
- En yüksek uzama değeri ise A grubu malzemelerde ölçülmüştür.
- KGDD'lerde sertlik artışıyla birlikte çekme dayanımının arttığı, sünekliğin ise azaldığı belirlenmiştir.
- Test numuneleri arasında takımı en çok aşındıran malzeme grubu D grubu (temperlenmiş martenzitik mikro yapı) malzemeler olmuştur ve takım kısa bir süre sonra kırılarak ömrünü tamamlamıştır.
- Takımı en az aşındıran malzemeler ise düşük sertliğe sahip, ısı işlem görmemiş döküm haldeki A grubu malzemeler olmuştur.
- D grubu malzemelerde takımın kırılması nedeniyle yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesinde dikkate alınmamıştır.
- Perlitik / Ferritik yapıya sahip üç grup malzeme incelendiğinde (A, B ve C grubu malzemeler) perlit miktarının sertliği arttırdığı ve buna bağlı olarak takım aşınmasını arttırdığı görülmektedir.
- Takım aşınması artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir. Tek bir parçanın işlenememesi ve parça söküp takma işlemleri nedeniyle yüzey pürüzlülüğü değerlerinde bir dalgalanma olmuştur.

- Takımın aşınmasına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde bir artış olmaktadır. En yüksek artışı %28 ile C grubu (perlitk/ferritik – 2) malzemelerde gözlemlenmiştir.
- En düşük kesme kuvveti artışı ise % 18 ile A grubu ısıt işlem görmemiş malzemelerde görülmüştür.
- İlerlemenin azalmasıyla takım aşınmasında bir artış görülmüştür.
- Düşük ilerlemelerde kesici ucun parçayla daha fazla temas halinde olması nedeniyle aşınmanın arttığı düşünülmektedir.
- En yüksek ilerleme değerinde (  $f = 0,22$  mm/dev) aşınma değerleri düşük çıkmıştır.
- $f = 0,18$  mm/dev ilerlemede parça çapının dolayısıyla kesme hızının farklı olması nedeniyle aşınma değeri yukarıdaki ilişkiyi bozmuştur.
- Yalnızca iki malzeme grubunun karşılaştırıldığı ilerleme testlerinde yüzey pürüzlüğü değerlerinin her iki malzeme (B ve C ) için yaklaşık aynı çıktığı görülmüştür. Sertliği daha yüksek olan C grubu malzemelerde yüzey kalitesi az da olsa B grubu malzemeye göre daha iyi çıkmıştır.

Isıl işlemler yardımıyla iç yapı kontrolünün sağlandığı küresel grafitli dökme demirlerde istenilen mekanik özelliklere sahip malzemelerin elde edilebilmesi için ısıt işlem parametrelerinin doğru belirlenmesi gerekir. Çok farklı olanaklar sunabilen bu malzeme cinsinde mekanik özellikler ile işlenebilirlik arasında bir optimizasyon mümkün olmaktadır. Yapılan bu çalışmalar bize, ısıt işlem sonrası mikro yapının değişiminin ve buna bağlı olarak işlenebilirlik ve mekanik özellik değişimlerinin kontrolü hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

**KAYNAKLAR**

Aran, A. 1991. TMMOB Makine Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Döküm Teknolojisi Seminer Notu.

Aranzabal, J., Gutierrez, I., Urcola, J.1994. Mater. Sci. Technol. 10, p728–737.

Baydoğan M., Çimenoğlu H.2001. The effects of austempering time on mechanical properties of a ductile iron. Scandinavian Journal of Metallurgy, p391-395.

Baydoğan, M.1996. Effect of austempering heat treatment on tensile, fatigue and wear properties GGG-60 class ductile iron., Yüksek Lisans Tezi, ITU.

Björkergergen, L.E., Hamberg K.2003. Silicon Alloyed Ductile Iron With Excellent Ductility And Machinability. Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron.

Bosnjak, B., Verlinden, B., and Radulovic, B. 2003. Dry Sliding Wear of Low Alloyed Austempered Ductile Iron. Materials Science and Technology, 19, p650-656.

Chang, L.C. 1998. Carbon Content Of Austenite In Austempered Ductile Iron. Scr. Mater. p35–39.

Crews,D.L.1974. Quality and Specifications of Ductile Iron. Transactions, American Foundrymen's Society, Sayı 82, p223-228.

Çakır, M.C., 1999. Modern Talaşlı İmalat Esasları, Vipaş. Bursa.

Çakır, M.C., 2000. Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri, Vipaş. Bursa.

Çakır, M.C., Bayram, A., Işık, Y., Salar, B. 2005. The Effects of Austempering Time and Temperature Onto the Machinability of Austempered Ductile Iron. Material Science and Engineering, A 407, p147-153.

Çakır, M.C., Işık, Y., 2001. Tornalama İşlemlerinde Taylor Takım Ömrü Denklemine DeneySEL Olarak İncelenmesi, Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji Dergisi., Yıl 3, Sayı 3-4, s.130-140.

Delia, M., Alaalam, M., Grech, M.1998. J. Mater. Eng. Perform. 7 (2), p265–272.

Dorazil E., Podrabsky, T., Svejcar, J.1990. Micro-inhomogeneity of low alloy austempered ductile cast iron matrix. AFS Trans. 13-90, p765–774.

Dubensky,W.J., Rundman,K.B. 1985. An electron microscope study of carbide formation in austempered ductile iron. AFS Trans., 64-85, p389–394.

Ductile Iron Data. 1998. [www.ductile.org/didata/default.htm](http://www.ductile.org/didata/default.htm)

Era, H., Kishitake, K., Nagai, K., Zhang, Z.Z.1992. Elastic modulus and continuous yielding behavior of ferritic spheroidal graphite cast iron. Mater.Sci. Technol. 8, p257–261.

Gagne M.1985. The influence of manganese and silicon on the microstructure and tensile properties of austempered ductile iron. AFS Trans., 85-133, p801–812.

Hafız, M. 2001.Mechanical Properties of SG-iron with different matrix structure. Journal of Materials Science, 36, p1293.

Hamid Ali A.S. and Elliot, R. 1996. Influence of Austenitising Temperature on Austempering of an Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron, Part 1- Austempering Kinetics and the Processing Window. Materials Science and Technology,12, p1021-1031.

Hayrynen, K.L. 1998. Another avenue for ductile iron foundries, austempered ductile iron presents a horizon of opportunities for foundries. Modern Cast, p28–30.

Hayrynen, K.L., Loftus, S.M., May, R.L., Moore, D.J., Rudman, K.B. 1995. Microstructural study of ausformed – austempered ductile iron. AFS Trans., 95-51, p157–163.

Janowak, J.F., Gundlach, R.B. 1983. Development of a ductile iron for commercial austempering. AFS Trans., 54-83, p377–388.

Jen, K.P., Wu, J., Kim, S. 1992. Study of fracture and fatigue behavior of austempered ductile iron. AFS Trans. 92-133 , p833–846.

Jianghuai Yang, J., Putatunda, S.K. 2004. Improvement in Strength and Toughness of Austempered Ductile Cast Iron by a Novel Two-Step Austempering Process. Materials and Design , 25, p219–230.

Kovacs, B. 1991. Heat treating of austempered ductile iron. AFS Trans., 91-75, p281–286.

Lin, B.Y., Chen, E.T., Lei, T.S. 1995. Scripta Metall. Mater. 32, p1363–1367.

Muhren, C. 1988. The Impact Of Machining, New Tooling, Expensive Machine Tools And Equipment On Casting Quality Requirement. BCIRA International Conference.

Massone, J.M., Boeri, R.E., Sikora, J.A. 1996. Decomposition of high-carbon austenite in ADI. AFS Trans. 96-148, p133–137.

Nazarboland, A., Alliot, R. 1997. Mater. Sci. Technol. 13, p223–232.

Özel A., 1994. Investigation of the effect of Austempering heat treatment on the impact strength and impact transition temperature in GGG 40–80 class ductile irons. Doktora Tezi, ITU.

Putatunda, S.K., Gadicherla, K., 2000. J. Mater. Eng. Perform. 9 (2) , p193–203.

Putatunda, S.K., Gadicherla, K. 1999. Influence of Austenitizing Temperature on Fracture Toughness of a Low Manganese Austempered Ductile Iron (ADI) with Ferritic as Cast Structure. *Materials Science and Engineering, A* 268, p15–31.

Rao,P., Putatunda, S.K. 2003. Investigations on the Fracture Toughness of Austempered Ductile Irons Austenitized at Different Temperatures. *Materials Science and Engineering , A* 349, p136-149.

Rao, P., Putatunda, S.K. 2003. “Investigations on the Fracture Toughness of Austempered Ductile Iron Alloyed with Chromium. *Materials Science and Engineering, A* 346, p254-265.

Refaey, A., Fatahalla, N., 2003, *J. Mater. Sci.* 38 , p351–362.

Shih, T.S., Lin, C.K., Twan, H.Z.1997. Mechanical properties of various section ADIs. *AFS Trans.* 26-97, p367–376.

Shimizu, K., Noguchi, T., Doi,S. 1993. Basic study on the erosive wear of austempered ductile iron. *AFS Trans.* 78-93, p225–229.

Siefer, W., Orths K.1970. Evaluation of Ductile Iron in Terms of Feasible Properties of the Material. *Transactions, American Foundrymen's Society, Sayı 78*, p382-387.

Sümer, A. 1981. *Demir Döküm*. Birsen Yayınevi.

Toktaş, G. 2004. *Matriks Yapılarının Grafitli Dökme Demirin Yorulma ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi*. Doktora Tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Volvo Air Corporation Annual Reports, 6470-7 1075-01.

Yazdani, S., Elliot, R.1999, *Mater. Sci. Technol.* 15, p896–902.



## TEŞEKKÜR

Yaptığım bu çalışmada her konuda yardımlarını esirgemeyen başta tez danışmanım Prof.Dr. Ali BAYRAM olmak üzere Prof. Dr. Cemal ÇAKIR'a, malzeme temininde yardımcı olan İĞREK DÖKÜM çalışanlarına, test numunelerinin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı tüm KBE Mühendislik çalışanlarına, ısı işlemler konusunda yardımcı olan ISTAŞ A.Ş. çalışanlarına, deneylerde yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Mak. Yük. Müh. İlker DEMİRAYAK ve Arş. Gör. Cihat ENSARİOĞLU'na ve bu güne gelmemde desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1981 yılında Ankara'da doğdu. 1999 yılında lise öğrenimini Antalya Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra aynı yıl Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2003 yılında Otomotiv bölümünden mezun oldu. 2003 yılında Konstrüksiyon ve İmalat ana bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen küresel grafitli dökme demirler üzerinde yüksek lisans çalışmalarını sürdürmektedir. 2006 yılı Mart ayından bu yana CADEM A.Ş. de CATIA V5 Knowledge Uzmanı olarak görev yapmaktadır.