

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME
DEMİRDE ÖSTENİT MARTENZİT DÖNÜŞÜMÜ**

Metalurji Mühendisi Cem AKÇA

**F.B.E. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nihat G. KINIKOĞLU

Prof. Dr. Nihat KINIKOĞLU
Prof. Dr. A. Ulvi AVCI
Prof. Dr. Nisan SÖNMEZ

İSTANBUL, 2002

128267

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMA LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÖSTEMPERLENMESİ.....	2
2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler.....	2
2.1.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri.....	5
2.2 Östemperleme Isıl İşlemi	6
2.2.1 Östemperleme Kinetiği.....	8
3. ÖSTEMPERLEMİYİ ETKİLEYEN PARAMETRELER	13
3.1 Östenitleme ve Östemperleme Şartlarının Etkisi.....	13
3.2 Alaşım Elementlerinin Östemperlemeye Etkisi.....	16
4. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÖZELLİKLERİ.....	20
4.1 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri	20
4.1.1 Çekme Özellikleri.....	21
4.1.2 Darbe ve Sertlik Özellikleri.....	23
4.2 ÖKGDD lerin Teknolojik Önemi ve Uygulama Alanları.....	25
5. ÖSTENİT-MARTENZİT DÖNÜŞÜMÜ	32
5.1 Martenzitik Dönüşüm.....	32
5.2 Fe-C'de Martenzitik Dönüşümün Kristalçizisi.....	33
5.3 Martenzit Çeşitleri	33
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
6.1 Deneyde Kullanılan Cihaz ve Teçhizatlar	37
6.2 Yöntem.....	41
7. SONUÇLAR.....	43
8. GENEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	49
KAYNAKLAR.....	50
ÖZGEÇMİŞ.....	52

KISALTMA LİSTESİ

BCRIA	British Casting Research institute Assoc.
KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
ÖKGDD	Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir
DDK	Dökme Demir Küresel (Türk Standartları Normunda)
GGG	Dökme Demir Küresel (Alman Normunda)
TTT	Time Temperature Transformation



Şekil 2.1	Küresel grafitli dökme demir (%1 Nital, 200x) (Özel, 1994).	3
Şekil 2.2	Östempereleme ısııl işleme şeması (1).....	7
Şekil 2.3	Östempereleme tempkimesi (Dorazil, 1991).....	9
Şekil 2.4	Östempereleme süresi ile çekme uzaması arasındaki ilişki (Dorazil, 1991).....	9
Şekil 2.5	Dönüşüm %'si ve mikroyapısal değişimler; (a) üst beyrit, (b) alt beyrit (1., 2. basamakta ve işlem penceresinde) (Darwish and Elliott, 1993).....	10
Şekil 2.6	t ₂ zamanının bulunması için kullanılan kalıntı östenit-süre ilişkisini gösteren diyagram (Darwish and Elliott, 1993).....	11
Şekil 3.1	ÖKGDD'lerde östempereleme sıcaklığı ve süresinin akma ve çekme mukavemetine etkisi (Çelik, 1996).	14
Şekil 3.2	ÖKGDD'lerde östempereleme sıcaklığı ve süresinin sertlik ve birim uzamaya etkisi (Çelik, 1996).....	15
Şekil 3.3	Hacimsel östenit miktarı ve östempereleme süresi arasındaki reel ilişki (Dorazil, 1991).	15
Şekil 3.4	Alaşım elementine göre mikroyapısal farklılıklar (Lin;Chen;Lei, 1994).....	19
Şekil 4.1	Çekme mukavemeti uzama ilişkisi (Çelik, 1996).	20
Şekil 4.2	%0.55 Mn, %0.8 Cu içeren KGDD'de sertliğin östempereleme süresine ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi (Çelik, 1996).	21
Şekil 4.4	Darbe testi sıcaklığının darbe direncine etkisi (Dorazil, 1991).....	23
Şekil 4.5	Oda sıcaklığında V-çentikli Charpy numunesinin darbe enerjisinin östempereleme süresine bağlı değişimi (Çelik, 1996).	24
Şekil 4.7	ÖKGDD ve Ray Çeliği arasında mikrosertlik karşılaştırması (1).	29
Şekil 4.8	Çeşitli ray/teker malzemesi ve yük kombinasyonları için kütle kayıpları (1). .	30
Şekil 5.1	Martenzit varyant görünüşüne bağlı olarak makroskobik şekil değişikliğinin basitleştirilmiş gösterilişi (3).....	32
Şekil 5.2	Martenzit varyantlarının görünüşü (3).	32
Şekil 5.3	Fe-C'de martenzitik dönüşümün Bain modeli ve östenit-martenzit Kurdjumov- Sachs'a göre yönelim ilişkileri. İçi boş yuvarlaklar C atomlarının muhtemel yerlerini göstermektedir (4).....	33
Şekil 5.4	Tipik martenzit (500x) ve östenit mikroyapıları (150x) (4).	33
Şekil 5.5	(a) Tabaka tipi martenzit, (b) iğnesel martenzit (2).....	34
Şekil 5.6	Martenzit ve östenit (150x) (4).....	34
Şekil 5.7	Yorulma nedeniyle kırılmış örneğin kırınım modeli (Grosse vd., 1999).	35
Şekil 5.8	Martenzit miktarının çevrim sayısına bağlılığı (Grosse vd., 1999).....	36
Şekil 6.1	Östenitleme ve östempereleme banyoları.	38
Şekil 6.2	Ultrasonik temizleme cihazı.	38
Şekil 6.3	Ezme deney düzeniği ve numuneler; (a) büyük ve içi boş, (b) küçük ve içi boş,(c) içi dolu.....	39
Şekil 6.4	Metalografik numune hazırlama cihazı.	40
Şekil 6.5	Mikroskop düzeniği.	40
Şekil 6.6	Güncel kullanılan ezme cihazında numune tutturma tertibatı.	41
Şekil 7.1	900 °C östenitleme (30 dak) , 415 °C östempereleme (55 dak); 33,3 kg/numune, 44 saat (500x, Nital 2).....	43
Şekil 7.2	900 °C östenitleme (30 dak) , 415 °C östempereleme (55 dak); 43 kg/numune, 65 saat (500x, Nital 2).....	43
Şekil 7.3	Şekil 7.2'deki optik mikroskop görüntüleri bulunan numunelerin SEM forografları (3500x).....	44

Şekil 7.4	900 °C östenitleme (30 dak) , 375 °C östemperleme (55 dak); 75 kg/numune, 72 saat (500x, Nital 2).	44
Şekil 7.5	900 °C östenitleme (21 dak) , 375 °C östemperleme (39 dak); 25 kg/numune, 6 saat (500x, Nital 2).	44
Şekil 7.6	900 °C östenitleme (21 dak) , 375 °C östemperleme (39 dak).	45
Şekil 7.7	25 kg/numune, 6 saat. Ezilme sonrası yüzeyden merkeze doğru eşit aralıklarla çekilmiş mikroyapı fotoğrafları. 1 no'lu, yüzeye en yakın, 10 no'lu merkeze en yakın bölgeyi ifade etmektedir (x500, Nital 2).	45
Şekil 7.8	Görüntü çözümleyici çalışması sırasında numunelerin mikroyapı görüntüleri.	46
Şekil 7.9	Mikroyapı fotoğrafları (x500, Nital 2), (a) östemperlenmiş, (b) ezilme sonrası.	46
Şekil 7.10	Deney numunesinin x-ışını kırınım modeli.	47
Şekil 7.11	Ezilmiş numunenin (a) dış ve (b) merkeze yakın bölümlerinden alınan modeller. 78 derecedeki, martenzit pikidir.	48

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	TS 526'a göre küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri (Çelik, 1996).....	5
Çizelge 4.1	25 mm çaplı ÖKGDD'lerin 2 saat 360 °C'de östemperlenmesi sonucu elde edilen çekme özellikleri (Çelik, 1996).	22
Çizelge 4.2	ÖKGDD ve çelik dişlilerin üretiminde kullanılan enerji miktarları (Kısakürek, 1987).....	27
Çizelge 4.3	Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan malzemelerin mukavemet değerleri (Özel, 1994).	28
Çizelge 4.4	Alternatif malzeme olarak ÖKGDD kullanıldığında maliyetteki düşüşü gösteren çizelge (I).	31
Çizelge 7.1	Ezilme öncesi ve sonrası kalıntı östenit miktarları karşılaştırması.....	46

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince beni yönlendiren, mevcut imkanları ve bilgiyi yararlanmama sunan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Nihat G. Kınıkoğlu'na, tezin her aşamasında vaktini ayırarak benden yardımını hiçbir zaman esirgemeyen sevgili hocam Yrd. Doç. Dr. Nilgün Kuşkonmaz'a ve her zaman yanımda olan değerli dostlarıma, çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.



ÖZET

Dökme demirler çok uzun süredir kullanılmakta olan ve üzerinde çok sayıda çalışma yapılan bir malzeme grubudur. Ancak östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin kullanımı nispeten yeni sayılır. 1970'lerden sonra bu konudaki araştırmalar yoğunlaşmış ve 1980'lerin sonlarına doğru kullanım alanı bulmuştur. Üstün özelliklerine rağmen bu malzeme ailesi yeterince iyi tanınmamaktadır ve özelliklerini geliştirmeye dair çalışmalar sürmektedir.

Östemperleme sonucu yapıda kalan kalıntı östenit çeşitli şartlar altında kalıntı östenit martenzite dönüşebilmektedir. Parça yüzeyinin sertleşmesine yol açan bu dönüşüm bazı koşullarda avantajlı olmaktadır. Bu çalışmada, hangi koşullar altında östenit-martenzit dönüşümünün olduğu araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, östemperleme sonucu yapıda en çok miktarda kalıntı östenitin bırakılmıştır. Bunun nedeni kalıntı östenit miktarı ne kadar fazla olursa dönüşümün gözlemlenmesinin o kadar kolay olacağıdır.

Kalıntı östenit martenzit dönüşümünün en önemli noktası, malzemenin normal çalışma şartları altında bu dönüşümü göstermesidir. Bu da normal çalışma şartları altında dayanımı çalıştıkça artan bir malzemeyi işaret etmektedir.

Bu çalışmada GGG60 malzemedan teker numuneler östemperlenmiş ve döner bir ezme cihazında ezilmiştir. Ezilme öncesi ve sonrası mikroyapı farklılıkları da metalografi, görüntü çözümü ve x-ışını kırınımı araçlarıyla tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Östemperleme, küresel grafitli dökme demir, kalıntı östenit, martenzit, martenzitik dönüşüm.

ABSTRACT

Cast irons are a material group that is used in the industry for plenty of years and researched. But usage of austempered ductile cast irons is quite newer. Studies on this material family had increased after 1970's and found place in usage toward late 1980's. Superior properties are having attention in spite of short lasting researches. This material family is not considered enough and studies for advancing properties are still going on.

Retained austenite in the microstructure can be transformed to martensite in various conditions. This transformation resulting surface strengthening is advantageous in some circumstances. In this study, it is investigated how this transformation occurs.

In practical studies, maximum amount of retained austenite was held in the structure. Because it is easier to investigate the transformation as the retained austenite percent increases.

The key point of austenite martensite transformation is the occurrence of this transformation under normal working conditions. And it indicates a material that strengthens under normal working conditions.

In this study, mini wheel specimens are austempered and then processed at a cyclic squash device. Microstructural differences before and after squashing are determined by the mean of metallography, image analyzing and x-ray diffraction tools.

Keywords: Austempering, ductile iron, retained austenite, martensite, martensitic transformation.

1. GİRİŞ

Dökme demirler, uzun yıllar önce kullanılmaya başlanmış metal malzemelerdir. Zamanla, daha yüksek dayanımlı ve düşük maliyetli dökme demir ürünlerinin elde edilmesi mümkün olmuştur. Dökme demirlerin üretimindeki önemli gelişmelerin başında denetimli katılaşma yönteminin geliştirilmesi ve grafitlere küre şeklinin verilmesi sayılabilir. Küresel grafitli dökme demirler hem mukavemet hemde süneklik yönünden, aynı matriks yapıya sahip kır dökme demirlerden daha üstündür. Başlangıçta ferritik, ferritik-perlitik ve perlitik mikroyapılarda üretilebilen küresel grafitli dökme demirlerin, günümüzde çok daha yüksek mukavemet değerleri verebilen matriks yapılarda da üretimleri yaygınlaşmaktadır. Beynit buna örnek olabilecek bir mikroyapıdır. Beynitik yapı ilk kez çelik malzemelerde, Davenport ve Bain tarafından geliştirilmiştir. Küresel grafitli dökme demirlerde beynitik yapı, yüksek mukavemet süneklik ve tokluk değerlerini birarada vermektedir.

ÖKGDD, uygun bileşimdeki KGDD'lerin östemperleme ısı işleminden uygulanmasıyla elde edilen beynitik yapı malzemedir. ÖKGDD'ler aynı matriks yapıdaki çelik malzemelere yakın mukavemet ve süneklik değerlerine sahiptirler. Bugün birçok firma ÖKGDD malzemedan üretilmiş parçalar kullanmaktadır. Özellikle zorlu çalışma şartlarında çalışan araçların dişli kutularında, aşınmaya karşı dayanıklı olduğu ve yorulma ömrü uzun olduğu için bu malzeme tercih edilmektedir.

ÖKGDD malzemeler, KGDD malzemelerin üstün dökülebilme ve işlenebilme özellikleri ile aynı boyuttaki çelik malzemelerin yüksek mukavemet özelliklerini biraraya getirir. Bu nedenle hem daha ucuz hem de daha dayanıklıdır (Çelik, 1996).

2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÖSTEMPERLENMESİ

Östemperleme ısıl işleminde, östenitleme süre ve sıcaklığıyla, östemperleme süre ve sıcaklığı da sonuçta elde edilecek beynitik yapıyı, dolayısıyla tüm özellikleri doğrudan etkiler. Başarılı bir östemperleme ısıl işlemi için tüm parametrelere etkin bir şekilde müdahale etmek, işlemin her basamağını, dökümden ısıl işlemin sonuna kadar, denetim altında tutmak gerekir. İşlem denetimlerini başarılı olarak yapabilmek için hem küresel grafitli dökme demirlerin hem de östemperleme ısıl işlemi sonucu elde edilen beynitik yapının biçiminin iyi incelenmesi gereklidir (Dorazil, 1991).

2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler

Küresel şekilde grafit içeren dökme demirlerin ilk üretimi 1946 yılı temmuz ayında British Cast Iron Research Association'dan H. Morrogh tarafından yapılmıştır. Bu uygulamada küreleştirici olarak Ce kullanılmıştır. Fakat çok mükemmel denetlenmesinin gerekliliği ve yüksek maliyeti nedeniyle bu yöntem geniş kullanım alanları bulamamıştır. II. Dünya savaşı sırasında, International Nickel Company, kır dökme demirlerde karbür oluşumunu önlemek amacıyla magnezyum kullanmıştır. Fakat ergimiş demirle magnezyum karıştırıldığında meydana gelen tempkimenin şiddeti nedeniyle, magnezyumu doğrudan katmak mümkün olmamıştır. Tempkime şiddetini azaltmak için magnezyumu doğrudan katmak yerine, magnezyum alaşımları kullanmak yoluna gidilmiştir. Bu amaçla başlangıçta bakır-magnezyum ve nikel magnezyum kullanılmıştır. Kır dökme demire bu malzemenin katılmasıyla mukavemetin ve sünekliğin arttığı görülmüştür. Bu malzemelerin metalografik incelemelerinde ise yapıdaki grafitlerin küre şeklinde olduğu saptanmıştır. Bu ilk örneğin ardından yapılan geliştirme çalışmalarından sonra 1947 yılında magnezyum-küresel grafitli dökme demir işlemi tanıtılmıştır. Günümüzde kullanılan küresel grafitli, çeliğe benzer matriks yapılı, dökme demirlerin ilk örnekleri verildikten sonra, üretim teknikleri konusunda pek çok çalışma yapılmış ve sonuçlandırılmıştır. Şekil 2.1'de küresel grafitli dökme demirler için bir mikroyapı örneği verilmiştir.

Bu gelişimin sonucu olarak tasarım mühendisleri için uygun, yeni bir malzeme ortaya çıkmıştır. Küresel grafitli dökme demirler, tek başına bir metalin sağlayamayacağı özellikleri verebilen önemli bir malzemedir. Çok ince kesitli parçalarda da (1.5 mm) çok büyük parçalarda da (800mm) iyi döküm sonucu verebilirler. Küresel grafitli dökme demirler, kır dökme demirlerin mükemmel dökülebilme özellikleriyle, çeliklerin mukavemet ve süneklik özelliklerini birarada sağlayabilen ender malzemelerdendir.



Şekil 2.1 Küresel grafitli dökme demir (%1 Nital, 200x) (Özel, 1994).

Küresel grafitli dökme demirlerin önemi, yıllık döküm istatistiklerinden de görülebilir. 1986 yılı itibarıyla BCRIA tarafından yapılan istatistikler dünya döküm ürünlerinin ağırlıkça %24'ünün küresel grafitli dökme demir olduğunu göstermektedir (Çelik, 1996).

Küresel grafitli dökme demirler kır dökme demirlerden farklı olarak, aynı karbon eşdeğeri için, ötektik katılaşması daha yüksek sıcaklıkta başlayan malzemelerdir. Bu durumda küre şekilli grafit bir östenit kabuğu ile çevrilir ve yalnız bir faz (östenit) ötektik yapıyla temas halinde kalır. Her bir östenit kabuğu bir hücredir. Bu hücre içindeki grafitin büyüebilmesi için östenit kabuğundan içeriye doğru karbon yayınımlı olmalıdır. Bu nedenle küresel grafitli dökme demirlerde, kır dökme demirlere nazaran daha yavaş bir katılaşma olmaktadır. Dolayısıyla küresel grafitlerin sayısı katılaşmanın hemen başlangıcında belirlenmiş olur. Ötektoid sıcaklığına kadar mevcut grafitler üzerine karbon çökmesi olur (Çavuşoğlu, 1981).

Küresel grafitli dökme demirlerin genel sınıflandırmaları, mekanik özellikleri ve malzeme yapısı esas alınarak yapılmaktadır. Bu tarz dökme demirlerde grafitlerin küresel şekilleri nedeniyle, mekanik özellikler matriksin yapısına bağlıdır. Kürelerin büyüklüklerinin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi azdır. Küresel grafitler dökümün kesit kalınlığına ve grafit çökmesi için gerekli çekirdek sayısına bağlı olarak çeşitli büyüklüklerde olabilirler. Genellikle daha ince kesitlerde daha çok sayıda çekirdek bulunur. Buna bağlı olarak, ince kesitlerde grafit kürelerinin boyutları daha küçük olacaktır.

Küresel grafitli dökme demirlerde, grafitlerin sayısı ve dağılımı metalurjik kalitenin çok iyi ve hassas bir göstergesidir. Küre sayısının 100 adet/mm² olması ortalama bir değer olarak tercih edilir.

Küresel grafitli dökme demirlerin yapısı, bir matriks ve bu matriks içindeki küresel grafitlerden oluşur. Grafitlerin hacimsel olarak yapının %8-10'unu kaplaması tercih edilir. Yapıda bulunabilecek karbürler ise, östenitik küresel grafitli dökme demirler dışında tercih edilmez. Karbürler mukavemeti ve tokluğu olumsuz yönde etkilerler.

Katılaşmanın hemen sonrasında alaşımlı ve alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerin yapısı tamamen östenittir ve katı çözelti halinde yaklaşık %1 C içerir. Döküm soğudukça, karbonun östenitteki çözünürlüğünde azalır. Çözeltiden itilen karbon çöker ve grafit kürelerine eklenir. Bu süreç, katılaşma tamamlanıncaya kadar devam eder.

Alaşımsız küresel grafitli dökme demirlerde östenit oda sıcaklığında kararlı bir faz değildir ve demirin başka bir kristallografik formu olan ferrite dönüşür. Bu dönüşümün sıcaklığı yapıdaki Si miktarından etkilenir ve 723°C civarındadır.

Küresel grafitli dökme demirlerde östenit-ferrit dönüşümü matriks yapının karbon oranını etkiler. Östenitin kristalleşme sıcaklığında karbon oranı %1 civarındadır ve bu oran soğuma sırasında azalır. Östenit-ferrit dönüşümü sırasında karbonun östenitteki çözünürlüğü %0.55 civarındadır. Buna karşın karbonun ferrit içinde çözünürlüğü sıfırdır. Bu durumda dönüşüm sırasında karbon açığa çıkar. Açığa çıkan bu karbon; soğuma hızına, kimyasal bileşime ve grafit dağılımına bağlıdır. Düşük soğuma hızlarında açığa çıkan karbon çöker ve grafit kürelerine eklenir. Bu durumda matriks yapı tamamen ferrittir ve ferritik küresel grafitli dökme demir elde edilmiş olur. Oysa hızlı soğuma karbonun çökmesine olanak vermez. Karbon ferrit içinde çözünemediği ve östenitte katılaşma sırasında dönüşümüne devam ettiği için, östenit doku içinde çok ince demir karbür plakaları oluşmaya başlar. Bu plakalar matriksin sürekliliğini bozar ve ferrit ile ardışık plakalar oluşturur. Ortaya çıkan bu yapı perlittir. Bu şekilde oluşan demir ise perlitik küresel grafitli dökme demirdir.

Küresel grafitli dökme demirlerin döküm sonrası matriks yapıları çeşitli oranlarda ferrit ve perlit içerirler. Bunun dışında çeşitli ısı işlem ve katılaştırma teknikleriyle yapıyı değiştirmek mümkündür. Soğuma hızına müdahale edilerek veya katılaşmadan sonra mamul üzerinde ısı işlem uygulamalarıyla beynitik, martenzitik veya östenitik matriks yapılar elde edilebilir (Çelik, 1996).

2.1.1 Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri

Günümüzde pekçok ülke küresel grafitli dökme demirleri mekanik özelliklerine göre sınıflandırmış ve standartlaştırmıştır. Örneğin Türk Standartları Enstitüsü “Dökme Demir Küresel” anlamındaki DDK kodu ardından minimum çekme mukavemetini verir. Alman standartlarında bu gösterim GGG ile Amerikan standartlarında ise A536-70 gibi özel numaralarla ifade edilmiştir (Çavuşoğlu, 1981).

Çizelge 2.1’de TS 526’ya göre küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri verilmiştir. Küresel grafitli dökme demirler, aynı matriks yapıdaki kır dökme demirlerin iyi dökülebilme, iyi işlenebilme gibi özellikleriyle daha iyi mekanik özellikleri birarada sağlarlar. Yapılarındaki küresel grafitlerin yağlayıcı etkisi nedeniyle, krank mili, dişli gibi aşınma direnci gerektiren birçok uygulamada kullanılabilmektedirler. Çalışma koşullarında ani sıcaklık değişimlerine karşı küresel grafitli dökme demirler, kır dökme demirlere göre daha dirençlidir. Küresel grafitli dökme demirlerin darbe direnci, çelik malzemelerde olduğu gibi sıcaklığa, malzemenin yapısına ve kimyasal bileşimine göre değişir. Matriks ferritik yapıya doğru gittikçe malzemenin tokluğu artar. Tokluk, perlit yüzdesinin artmasıyla azalır. Sıcaklık azaldıkça malzemenin darbe direnci %80’e kadar azalır. Matriks yapının beyritik olması durumunda ise bu azalma miktarı daha düşüktür (Çavuşoğlu, 1981).

Çizelge 2.1 TS 526’a göre küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri (Çelik, 1996).

Kısa Gösteriliş	Doku	Çekme dayanımı kgf/mm ²	0.2 Akma sınırı kgf/mm ²	Kopma uzaması %	Brinell sertliği (BSD) kgf/mm ²
DDK-40	Ferritik	42	28	12	140-201
DDK-50	Ferritik Perlitik	50	36	7	170-211
DDK-60	Perlitik/Ferritik	60	40	3	192-269
DDK-70	Perlitik	70	45	2	229-302
DDK-80	Perlitik	80	50	2	248-352
DDK-35.3 ¹⁾	Ferritik	35	22	22	-
DDK-40.3 ¹⁾	Ferritik	40	25	18	-

¹⁾ Darbeli çalışması öngörülen tiplerdir

Küresel grafitli dökme demirlerde kesit boyutlarının özellikler üzerine doğrudan etkisi yoktur. Fakat ince kesitlerde soğuma hızının yüksek olması, oluşan tane boyutunu ve matriks yapının cinsini belirler. Küçük taneli ve perlitik bir yapı daha mukavim olmakla beraber daha kötü süneklik özellikleri gösterecektir. Bununla beraber, ferritik bir matriks yapıda ise süneklik daha iyi olacaktır.

Çok kalın kesitlerde soğuma hızının düşmesi yapıda segregasyonlara neden olacağı için hem küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerini hem de östemperleme ısı işlemi sonucu oluşacak yapının özelliklerini kötü yönde etkileyecektir.

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri ve mikroyapıları üzerine yapılan çalışmalar sonunda özellikle Mangan alaşım elementinin kalın kesitli parçaların yavaş soğuması sırasında segregasyonlara sebep olduğu tespit edilmiştir.

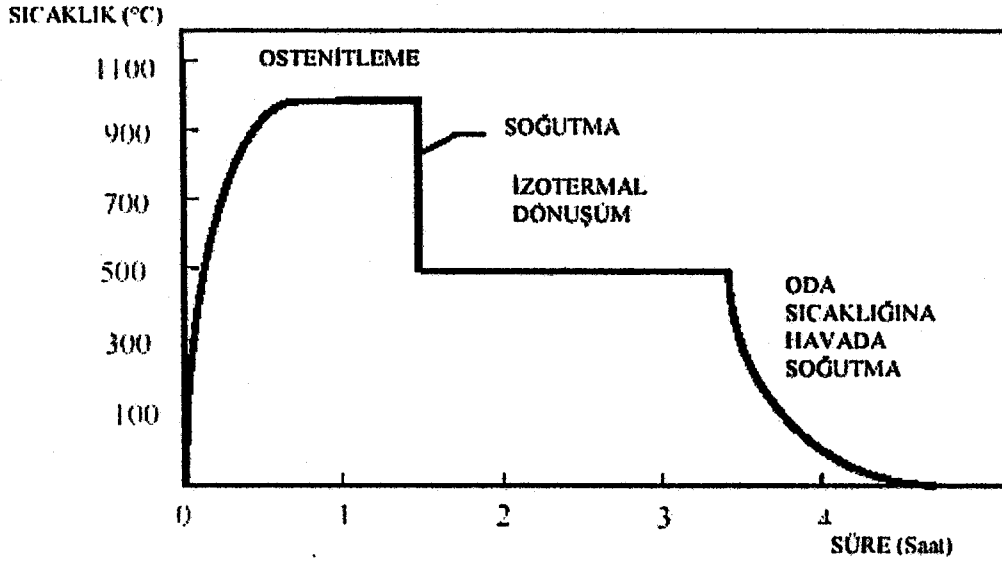
Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri büyük ölçüde matriks yapılarına bağlıdır. Kürelerin şekli, miktarı ve dağılımı mekanik özellikler üzerine matriks yapıdan daha az etkilidir. Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri üzerine; matriks yapının bileşimi, matriksin alaşım elementi miktarı, grafit küreleri sayısı, katılaşma sırasındaki soğuma oranı ve östenit yapının homojenliği birarada etki eder (Çelik, 1996).

2.2 Östemperleme Isıl İşlemi

Küresel grafitli dökme demirlerin ticari üretimlerinde, son dönemlerdeki en önemli gelişme, östemperleme olarak bilinen eşsıcaklıklı bir ısı işlemle matriks yapıyı beynite dönüştürmektir. Şekil 2.2'de çizgi resimsel olarak gösterilen östemperleme ısı işleminin basamakları şöyledir:

1. 850-950°C sıcaklıklar arasında enaz 1 saat östenitleme. Bu işlem yüzeyde karbonsuzlaşmayı önlemek için, denetimli atmosferli elektrikli veya gazlı fırınlarda yapılabilir. Alternatif olarak, yüksek sıcaklıklara dayanabilen klorür bazlı tuz banyoları veya akışkan yatak kullanılabilir.
2. Parçaların fırınlardan alınması ve hızlı bir şekilde, 235-450°C sıcaklıklar arasındaki tuz banyosunda hızlı soğutma. Alternatif hızlı soğutma ortamı, maksimum çalışma sıcaklığı 260°C civarında olan yağ veya akışkan yataktır. Su verma oranı, östemperleme sıcaklığına soğuma sırasında perlit tepkimenini önleyecek kadar yüksek olmalıdır. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, örneğin kalın kesitli parçalarda, döküm sırasında yapıya ilave edilecek Mo, Cu ve Ni gibi alaşım elementleriyle perlit burnunun sağa kaydırılması sağlanabilir.
3. Östemperleme sıcaklığında bekleme. Bu sıcaklıkta östenit eşsıcaklıklı bir dönüşümle beynitik ferriti oluşturur. Östemperleme sıcaklığında bekleme süreleri, demirin alaşım elementi miktarına, östenitleme süresine ve sıcaklığına bağlı olarak değişir. Ortalama olarak 0.5-4 saat arasında değişir.

4. Oda sıcaklığına suda veya havada soğutma (Engineering Casting Solutions, 2001).



Şekil 2.2 Östemperleme ısıt işleminin şeması (1).

Verilen bir bileşimdeki küresel grafitli dökme demirin östemperleme sonucu elde edilecek, mekanik özelliklerine, östenitleme süre ve sıcaklığı, alaşım elementlerinin miktarı ve östemperleme süre ve sıcaklığı doğrudan etki eder. Yapılan araştırmalar en büyük etkinin, östemperleme süre ve sıcaklığından kaynaklandığını, özellikle östemperleme sıcaklığının oluşacak beynitik yapıyı doğrudan etkilediğini göstermişlerdir (Dorazil, 1991).

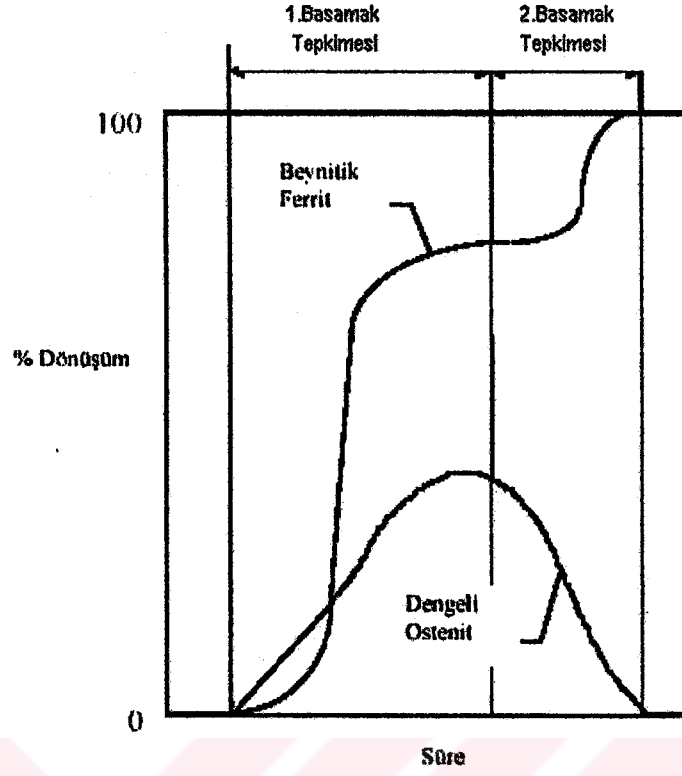
Östemperleme ısıt işleminin birinci basamağında, 850-950°C arasında östenitleme işlemi yapılmasının amacı matriks yapıyı östenite dönüştürmek ve östenitin karbon oranını, dökümün bileşimine ve östenitleme sıcaklığına bağlı olarak denetlemektir. Yapılan ikinci basamak, 235-450°C sıcaklıklar arasında, 0.5-4 saat yapılacak olan östemperleme işlemi sıcaklığına hızla soğutmaktır. Bu ısıt işlem prosedürü sonunda yüksek karbonlu östenit, östemperleme sıcaklığına bağlı olarak, beynitik ferrit veya beynitik ferrit-karbür fazlarını oluşturur. Östenitin karbon oranı yeterince yüksek olursa, ısıt olarak dengeli hale gelir. Böylece östemperleme ısıt işleminden sonra bir miktar östenit kalıntı (dönüşmeyen) östenit olarak yapıda kalır (Özel ve Kısakürek, 1990).

İdeal östemperleme mikroyapılarını elde edebilmek için östemperleme süresi doğru olarak seçilmelidir. Bu sürenin doğru seçilebilmesi için östemperleme ısıt işleminin kinetiğini incelemek gerekir.

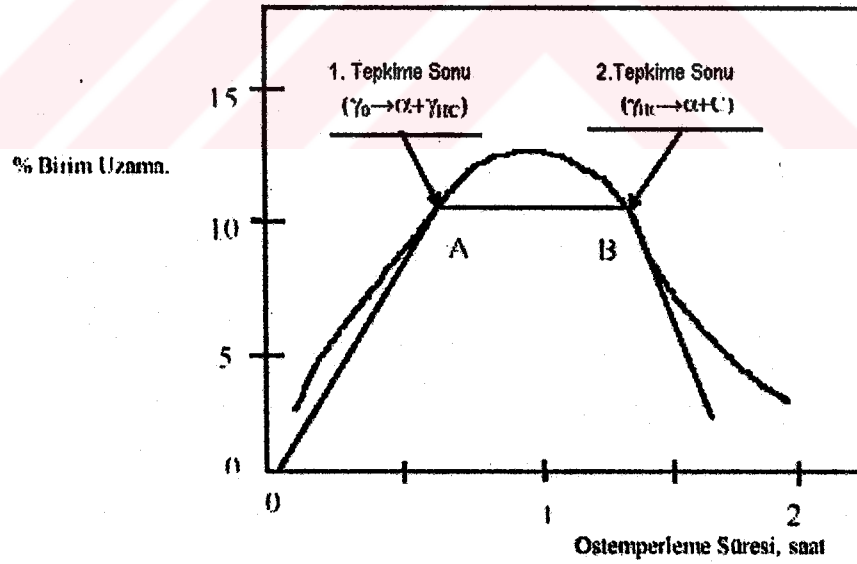
2.2.1 Östemperleme kinetiği

Küresel grafitli dökme demirlerde ve yüksek Si içeren çelik malzemelerde beynitik tempkime, geleneksel çelik malzemelerdeki beynitik tempkimeden farklıdır. Küresel grafitli dökme demirlerde eşsıcaklıklı bekleme süresi boyunca östenit içinde beynitik ferrit çekirdekleri büyür. Aynı süre içinde östenit içindeki büyüyen ferrit plakaları içinden karbon atılır. Malzemedeki yüksek Si içeriği, beynitik tempkime boyunca normal olarak karbür parçacıklarının oluşumunu engeller. Sonuç olarak kalıntı östenit beynitik tepkime boyunca karbon emmeye devam eder. Östenitin karbonca zengin hale gelmesiyle dengeli olma hali artar ve östenitten ferrite dönüşüm kolaylaşır. Beynitik ferrit tabakalarının büyümesi bir noktadan sonra, engellenir ve tempkime geçici olarak durur. Bu tempkime, östemperleme dönüşümünün birinci tempkimesi olarak isimlendirilir (Darwish and Elliott, 1993).

Yüksek karbonlu östenit belirgin olarak dengeli değildir. Yeterli bir süreyle, özellikle yüksek östemperleme sıcaklıklarında, östenit içinde karbür çökmesi olur ve sonuçta östenit ferrit ve karbüre dönüşür. Östemperleme tempkimesi Şekil 2.11'de genel hatlarıyla verilmiştir. İkinci tempkime sünekliği ve tokluğu azalttığı için istenmez. Şekil 2.12'de küresel grafitli dökme demir için östemperleme süresi ile çekme uzaması arasındaki ilişki gösterilmiştir. Teorik olarak A noktası 1. tempkimenin bittiği yeri gösterir. B noktası ise 2. tempkimenin başlama noktasıdır. A ve B arasındaki zaman aralığı, maksimum sünekliğin sağlandığı işlem penceresidir. Verilen bir malzeme için kritik östemperleme süresini bulmak için birinci tempkimenin bittiği ve ikinci tepkimenin başladığı noktaları iyi tespit etmek gereklidir.



Şekil 2.3 Östemperleme tempkimesi (Dorazil, 1991).

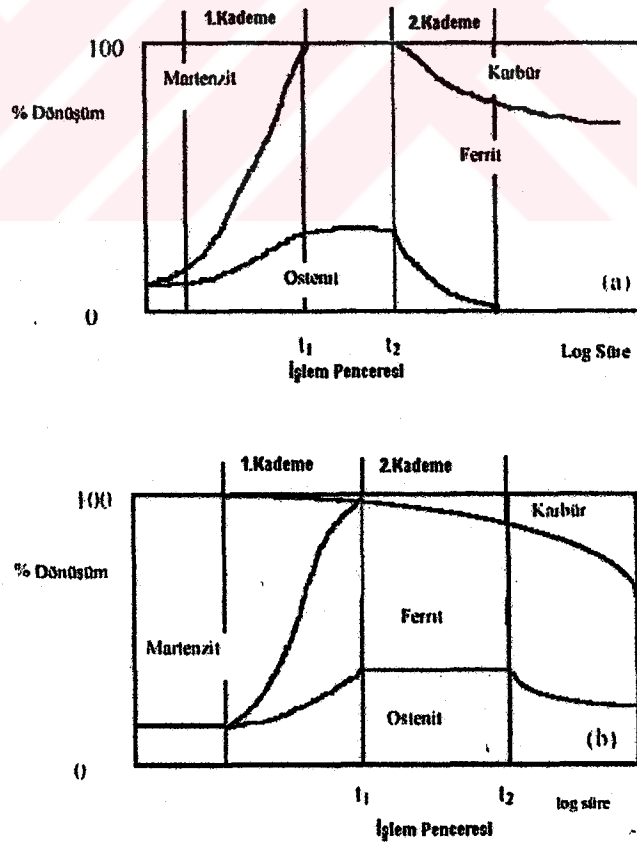


Şekil 2.4 Östemperleme süresi ile çekme uzaması arasındaki ilişki (Dorazil, 1991).

Östemperleme ısıl işleminde, tempkimenin iki basamağını incelerken, oluşan beynit şekline göre, dönüşümün farklı olduğunu göz önüne almak gereklidir.

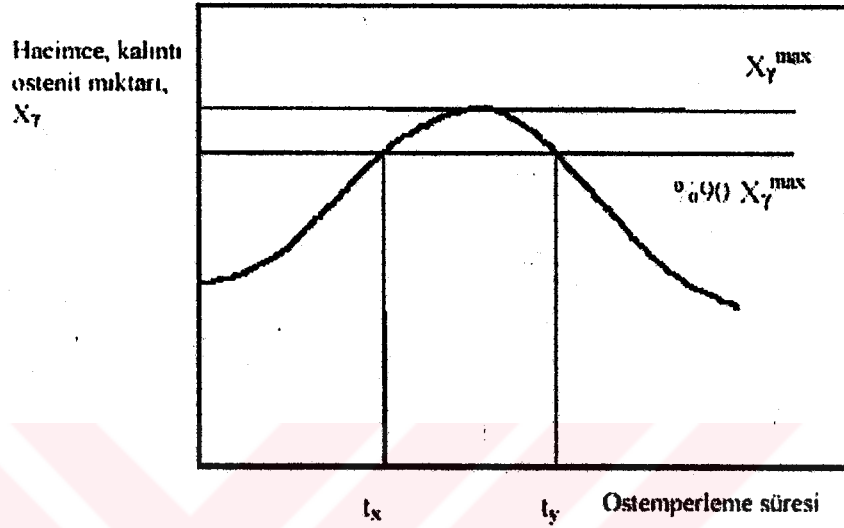
Şekil 2.13'de alt ve üst beynitik oluşum için ayrı ayrı, dönüşüm ve süre diyagramları verilmiştir.

Östempereleme işlem penceresi zaman aralığında, östemperlenmiş yapı dengededir ve demir optimum mekanik özellikleri bu aralıkta verir. 1. basamakta martenzitin, 2. basamakta ise karbürün oluşumu, mekanik özelliklerden tokluk ve sünekliği olumsuz yönde etkiler. İşlem penceresi bu temel üzerine oturtularak tarif edilmelidir. t_1 olarak tanımlanan pencerenin başlangıcından oda sıcaklığına soğutma sırasında östemperlenmiş yapıda %1 martenzit oluşur. t_1 başlangıç zamanı kantitatif metalografi yöntemleriyle bulunabilir. t_2 zamanı, ikinci basamak tepkimesi sonucu beklenen karbür oluşumu miktarına bağlı olarak hazırlanan bir eşitlikle bulunur. Yapıdaki kalıntı östenitin miktarı ($X_{\gamma}^{\sim}$), ikinci basamak tepkimesi sonucu (hacimce) azalır. t_2 zamanını bulmak için $X_{\gamma}^{\sim}$ 'nin en büyük değeri bulunur. Bunun için östempereleme zaman eğrisi (Şekil 2.14) ve bu eğriye %90 kalıntı östenitten çizilen doğru kullanılır. %90'dan çizilen doğrunun eğriyi kestiği noktalarda östempereleme süreleri t_x ve t_y okunur. t_2 değeri, bu değerler kullanılarak 2.1 no'lu eşitlik yardımıyla bulunur (Darwish and Elliott, 1993).



Şekil 2.5 Dönüşüm %'si ve mikroyapısal değişimler; (a) üst beynit, (b) alt beynit, (1., 2. basamakta ve işlem penceresinde) (Darwish and Elliott, 1993).

$$\ln t_2 = \frac{\ln t_x + \ln t_y}{2} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$



Şekil 2.6 t_2 zamanının bulunması için kullanılan kalıntı östenit-süre ilişkisini gösteren diyagram (Darwish and Elliott, 1993).

Östempereleme ısısal işleminde elde edilecek sonuç özellikler, ısısal işlem şartlarıyla tamamen bağlantılıdır. Eğer ısısal işlem işlem penceresi dahilinde tamamlanırsa elde edilecek özellikler optimum olur. Östempereleme sonucu elde edilecek olan beynitik yapı, martenzitik dönüşüm sıcaklığı üzerinde, perlitik tempkime sıcaklığı altında, östenitin çözünmesiyle oluşmaktadır. Çeliklerde ve dökme demirlerde, beynitik yapı eşsıcaklıklı olarak veya sürekli soğuma sırasında elde edilir.

Pek çok malzemede beynitik oluşum sıcaklığı perlit burnunun altında başlar ve perlitik dönüşüm aralığından ayrılır. B_f (beynit bitiş) sıcaklığının altında tamamen beynitik yapı elde edilir. Fakat daha yüksek sıcaklıklarda beynitik dönüşüm östenitin çözünmesi tamamlanmadan durdurulabilir. Bu durumda yapıda dönüşmemiş (kalıntı) östenit kalır. Östenitin çözünme miktarı malzemenin bileşiminin ve östempereleme sıcaklığının bir fonksiyonudur. Eşsıcaklıklı tempkime sıcaklığı azaldıkça, beynit oluşum yüzdesi artar, B_s (beynit başlama) sıcaklığı, TTT diyagramında yaklaşık olarak perlit burnunun biraz altındadır.

Klasik demir beynit, lameler olmayan çubukların biraraya gelmesinden veya içine karbür partikülleri çökelmiş düzlem şeklindeki ferrit taneleri içerir. Bununla beraber bazı malzemelerde (örneğin, yüksek Si içerenler) klasik üst beynitik ferritin oluşması beklenirken, ferrit tanelerinde tamamen karbür çökmesi görülür.

Bazı demirdışı metallerde, çeliklerdeki beynitik yapıya benzer mikroyapılar elde etmek mümkündür. Demir alaşımlarında elde edilen beynitin bir diğer karakteristik özelliği yüzey gerilimi sonucu beynitik ferrit tabakalarının şekillenmesidir, bu oluşum martenzit tabakalarının oluşumuna benzer.

Beynitik dönüşüm sıcaklığı aralığında dönüştürülmüş çeliklerde oluşan mikroyapılar için pek çok terim kullanılmaktadır. Alt ve üst beynit en klasik ve temel terimlerdir. Davenport ve Bain tarafından yapılan ilk çalışmayı izleyen 50 yıllık süreç içinde metalurjik araştırmalarla beynitin oluşumu izah edilmeye çalışılmıştır. Beyniten araştırılmasının bir sebebi tercih edilen özellikleri, bir diğer sebebi ise bazı özelliklerinin yayılımı, bazı özelliklerinin kayma modunda dönüşüm özellikleri veren katı hal dönüşüm tempkimesi olmasıdır. Beynitik dönüşüme (hem alt hem de üst beynitik dönüşüm), yüzey gerilimlerinin eşlik etmesi, beynit miktarının dönüşüm sıcaklığına bağlı olmaması, beynitik dönüşüm sahasında östenitin dengede olması, beynitik dönüşümü martenzitik dönüşüme benzer kılmaktadır.

Aoronson'a göre beynitin üç farklı tanımı vardır. Bunlar; mikroyapısal tanım, kinetik tanım ve yüzey gerilimi tanımıdır. Mikroyapısal tanım, beyniti ötektoid tepkimenin lamel olmayan ürünü olarak tanımlar. Kinetik tanım beynitin C-eğrisinden ayrılarak oluştuğunu söyler. Yüzey gerilimi tanımına göre ise beynit yavaş yavaş büyüyen plakalar halindedir (Koyabashi ve Yamada, 1996).

3. ÖSTEMPERLEMİYİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Östempereleme ısıı işleminin küresel grafitli dökme demirler üzerindeki başarılı uygulamaları, bu malzemelerin pekçok alanda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Östempereleme ısıı işlemini boyunca meydana gelen oluşumlar araştırmalara konu olmuş, bu araştırmalar sonunda daha mükemmel yapılı östemperelemenmiş küresel grafitli dökme demir üretmek mümkün olmuştur.

Östempereleme, dökümden ısıı işleme çok iyi kalite ve işlem denetimi gerektiren bir süreçtir. Dökümün kalitesi, alaşım elementlerinin miktarı, alaşım elementlerinin segregasyonu, östenitleme süre ve sıcaklığı, östempereleme süre ve sıcaklığı, işleme tabi tutulan malzemenin boyutları östemperelemeyi etkileyen parametrelerdendir.

3.1 Östenitleme ve Östempereleme Şartlarının Etkisi

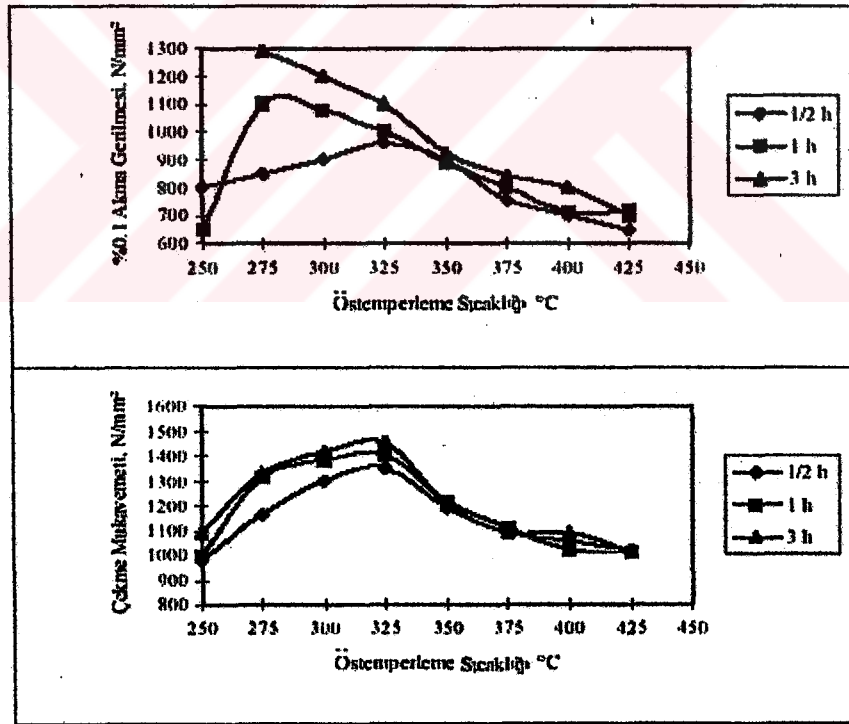
Östempereleme sonucu tatmin edici mekanik özellikler elde edebilmek için, ısıı işlem şartları da döküm şartları gibi oldukça iyi denetim edilmelidir. Östenitleme sıcaklığı, östemperelemenmiş demirin mekanik özelliklerini ve yapısını doğrudan etkileyen östenitin karbon oranı üzerinde etkilidir. Östenitleme sıcaklığı arttıkça, östenitin karbon oranı artar ve östenitlenecek parça yüksek sıcaklıkta yeterli bir süre tutulursa, östenitin arzu edilen karbon oranına ulaşılır (Hamid ve Elliott, 1993).

BCRIA’da yapılan araştırmalar sonucunda çekme mukavemeti ve süneklik için en mükemmel kombinasyonun 900-925°C sıcaklıklar arasında 1-3 saat östenitleme olduğu gözlemlenmiştir.

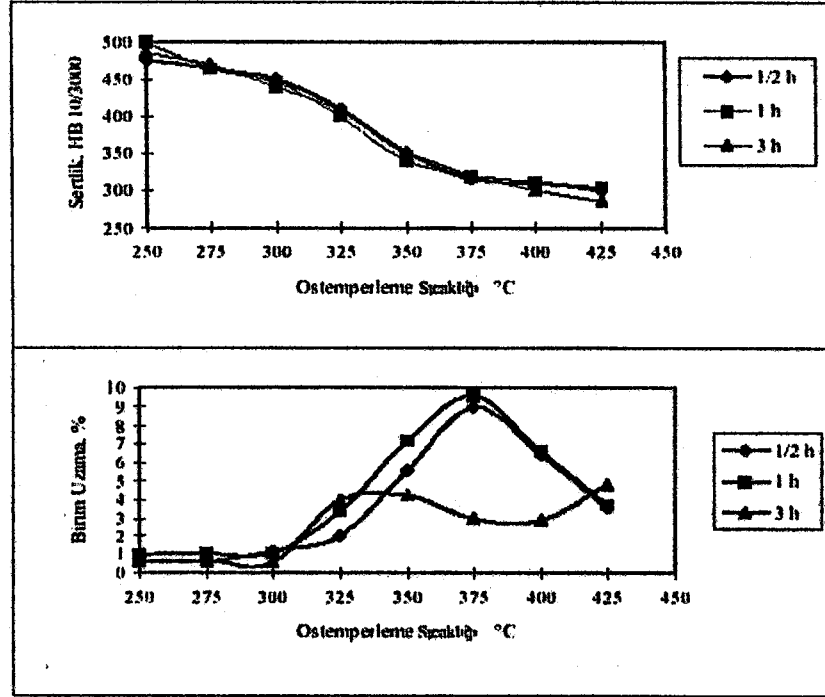
Östenitleme sıcaklığı ve süresinin sözü geçen miktarlarında optimum özellik kombinasyonunu sağlamak mümkündür. Östenitleme süresinin artmasıyla östenitin karbon oranının artmasının yanında ayrıca mikro segregasyonlarda giderilmiş olur. Östenitleme şartları işleme tabi tutulan demirin başlangıç mikroyapısından da etkilenir. Başlangıçta matriks yapı ferritik ise östenitleme süresi daha uzun olmalıdır. Perlitik durumda ise süre daha kısa tutulabilir (Dorazil, 1991).

Eğer yapıda yeterince alaşım elementi varsa östenitleme sıcaklığı 850°C civarında olabilir. 925°C’nin üzerindeki östenitleme sıcaklıklarında, eşsıcaklıklı bekleme sıcaklığına hızlı soğutma sırasında yapıda bir miktar martenzit oluşabilir. Bu oluşum sünekliğin azalmasına neden olur. 900°C sıcaklığın altında ise malzemenin yapısına bağlı olarak östenitleme tamamlanamayabilir. Bu ise tüm özelliklerde genel bir kötüleşmeye neden olacaktır. Bu nedenle östenitleme 900°C civarında yeterince uzun bir süre yapılmalıdır (Hamid ve Elliott, 1993).

KGDD lerde östemperleme şartlarının mekanik özelliklere etkisi Şekil 3.1 ve 3.2'de verilmiştir. 2. bölümde bahsedildiği gibi, östemperleme sonucu elde edilecek yapı, östemperleme sıcaklığından doğrudan etkilenir. 235-330°C sıcaklıklar arasında alt beynitik yapı 370-450°C sıcaklıklar arasında ise üst beynitik yapı oluşur. 330-370°C sıcaklıklar arasında oluşan beynit ise, her iki türden farklıdır. Bu tür beynitik yapının mekanik özellikler üzerine etkisi daha farklı olacaktır. En büyük çekme gerilmeleri 275-325°C sıcaklıklar arasında elde edilir. Bu oluşuma sürenin doğrudan bir etkisi yoktur. Bu aralıkta oluşan beynitik yapının sünekliği ise genel olarak düşüktür. Süneklik üzerine en büyük etki östemperleme süresinden gelir. Özellikle östemperleme ısı işlem penceresi içinde durdurulan ve havada soğutulan numunelerde alt beynitik yapılarda oluşabilecek enbüyük süneklik değerlerine ulaşılır. Üst beynitik yapılarda çekme mukavemeti daha düşüktür, fakat süneklik genel olarak yüksektir. Süneklik üzerine sürenin etkisi bu yapılarda, alt beynitik oluşumda olduğu gibidir. Üst beynitik oluşumlarda da en büyük süneklik değerleri ısı işlem penceresi içinde deneyi tamamlanan numunelerde elde edilmiştir (Hamid ve Elliott, 1993).

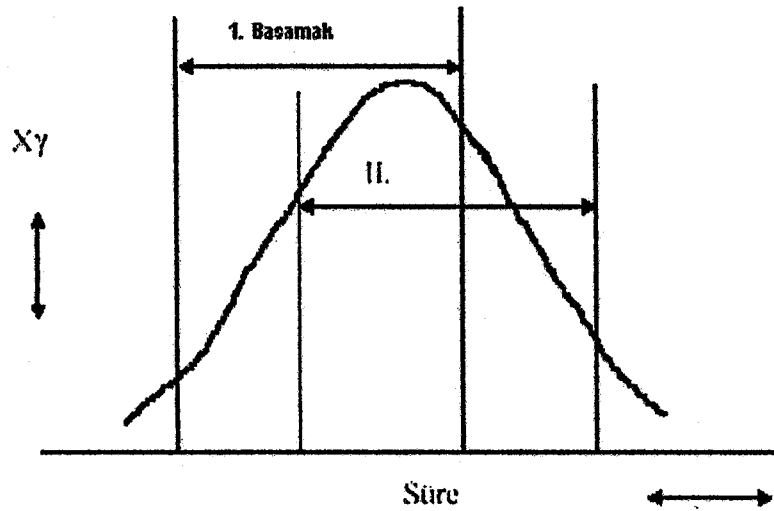


Şekil 3.1 ÖKGDD'lerde östemperleme sıcaklığı ve süresinin akma ve çekme mukavemetine etkisi (Çelik, 1996).



Şekil 3.2 ÖKGDD'lerde östempirleme sıcaklığı ve süresinin sertlik ve birim uzamaya etkisi (Çelik, 1996).

Östenitleme sıcaklığı ve süresi de östempirleme sonuçları üzerinde oldukça etkilidir. 2. bölümde işlem penceresi anlatılırken değinilen %90 östenit hattı, östenitleme sıcaklığı düştükçe, yukarı çıkar ve sonuçta östenitin hacimsel miktarı ile östempirleme süresi arasında çizilen reel değişim eğrisindeki I. basamak ve II. basamak kesişim bölgesi daralır (Şekil 3.3) (Çelik, 1996).



Şekil 3.3

Hacimsel östenit miktarı ve östempirleme süresi arasındaki reel ilişki (Dorazil, 1991).

Östemperleme işleminde eşsıcaklıklı bekleme sıcaklığı ve süresi ele alındığında oluşan mikroyapıların süre ve sıcaklıktan etkilendiği görülmektedir. Kısa östemperleme süreleri sonunda yapıda bir miktar martenzit olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak bazı östenit bölgelerine yeterince karbon çözünmemiş olması ve bu nedenle beynitik dönüşümün bu kısımlarda uzun süreler gerektirmesi gösterilmektedir. Östemperleme süresi arttıkça karbon yayılımı nedeniyle, martenzit oluşumu azalır.

Kimyasal bileşim östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin yapısında önemli rol oynar. Başlangıçtaki kimyasal bileşim, istenen sonuç özelliklere uygun olarak seçilmeli ve karbür içermeyen bir döküm yapısı elde edilmelidir. Eşdönüşümlerin sağlanmasıyla segregasyon minimum olmalıdır. Beynitik dönüşümün ikinci tepkimeninden kaçınmak için işlem penceresini büyüten alaşım elementleri tercih edilmelidir. Özellikle Ni ve Mo alaşım elementleri, ikinci tepkimesi geciktiren ve işlem penceresini genişleten elementlerdir. Aşağıda alaşım elementlerinin etkileri ele alınmıştır (Darwish ve Elliott, 1993).

3.2 Alaşım Elementlerinin Östemperlemeye Etkisi

Karbon: Karbon oranının %3-4'lere artması, östemperleme sonucu elde edilecek çekme mukavemetini artırır. Süneklik azalır, sertlik ise değişmez.

Silisyum: Yapıda bulunan Si miktarı %1.8-3.2 arasında olabilir. Si arttıkça çekme mukavemeti azalır. Buna rağmen süneklikte bir iyileşme olmaz. Sertlik ise değişmez. Şekil 3.4'de Si miktarının süneklik ve çekme mukavemetine üzerine etkisi çeşitli östemperleme şartlarına bağlı olarak verilmiştir. Si miktarının artmasıyla çekme mukavemetinin azalması, Si arttıkça pro-ötektoid ferrit ve perlitin su verme ve östemperleme boyunca oluşumunu desteklemesi nedeniyledir. Ferrit ve perlitin yüksek Si içeriği ile meydana gelen bu oluşumunu önlemek için alaşım elementi ilavesi yoluna gidilmelidir.

Yapılan çalışmalar Si miktarının kırılma tokluğu üzerinde büyük etkisinin olduğunu göstermiştir. Si miktarı %2.6-3 arasındayken çatlak başlama aralığı, c, ve kırılma tokluğu yüzey gerilimi, K_{IC} , %12-23 artmaktadır. Bunun bir sebebi, yüksek Si içeriğinin Mn'ın oluşturduğu etkileri gidermesinden dolayıdır (Mi, 1994).

Kırılma tokluğundaki bu artışın östemperleme sonucu yapıda kalan kalıntı östenitten dolayı olduğu da saptanmıştır (Dorazil, 1991).

Dorazil ve Luyendijk, Si miktarının artmasıyla darbe direncinde arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca Luyendijk, Si miktarının %1.87'den %2.4'e kadar artmasıyla darbe geçiş sıcaklığının -10°C'den -80°C'ye indiğini belirlemiştir. Günümüze kadar yapılan çalışmalar, yüksek Si içeriğinin avantaj olduğunu göstermektedir. Perlit dönüşümünden su verme sırasında kaçınmak için ise alaşım elementleri kullanılmalıdır. Ayrıca yüksek Si içeriği ötektik karbür oluşumunda engeller. Si miktarı üzerine yapılan çalışmalar %2.5-2.9 arasındaki miktarın en iyi sonuçları verdiğini göstermiştir.

Mangan: Mn miktarındaki artış KGDD'in sertleşebilme yeteneğini artırır. Mn miktarındaki artışın, östemperleme sonucu elde edilecek çekme mukavemetini azalttığı görülmüştür. Sertlik üzerinde ise büyük bir etkisi yoktur.

Mn'ın ötektik tane sınırlarında segregasyonu ve yapısal heterojenlikleri artırması, östenitin bu kısımlarda dönüşümünün gecikmesine neden olur. Bu bölgelerde, sertliğin düşmesi ve malzemenin çekme mukavemetinin azalması bu nedenledir. Tane sınırlarında oluşan östenit, Mn karbon çözünmesine engel olduğu için, dengeli değildir, ancak yüksek karbon içeriği ile bu bölgelerdeki östenit dengelenebilir. Böylece M_s sıcaklığı 150°C seviyesine çekilebilir, bu da, östemperleme ısı işleminden sonra tane sınırlarında kalan kalıntı östenitin martenzite dönüşmesine neden olur. Martenzit oluşumu ise yorulma mukavemetini ve kırılma tokluğunu olumsuz yönde etkiler.

Dorazil Mn miktarındaki artışın, segregasyonu artırdığını ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin kötüleştiğini iddia etmektedir. Mn miktarı kesite bağlı olarak, kesit büyüdükçe özellikle tane sınırlarında daha kolay segrege olan bir elementtir. Bu nedenle, büyük kesitli parçalarda özellikle soğuma hızının artırılmasıyla bu segregasyon azaltılmış olur (Dorazil, 1991).

Dorazil, ÖKGDD'lerde Mn miktarının %0.6 civarında olmasını önermektedir. Karbür ve martenzitin ferrit plakaları arasında oluşumu ve dağılımı beynitik matrikste sürekliliği azaltır. Bu oluşumun temel nedeni yapıdaki yüksek Mn içeriğidir. Benzer gözlemler Harris ve Maitland tarafından da yapılmıştır. Onlar da ÖKGDD'lerde Mn miktarının en fazla %0.5 olması gerektiğini iddia etmişlerdir. Tüm gözlemler ince kesitli malzemeler üzerinde yapılmıştır.

Kalın kesitli parçalarda ise soğuma yavaş olacağından, segregasyon daha kolay olacaktır. Bu yüzden Mn miktarı kalın kesitli parçalarda %0.3'ü geçmemelidir.

Bakır: %1.5'un üzerinde katılan bakırın, 325-400°C sıcaklıklar arasında yapılan östemperleme işlemlerinde çekme mukavemeti ve sertlik üzerine etkilerinin olduğu gözlenmiştir. Östemperleme sıcaklığı 325°C'in altında ise süneklik Cu miktarı arttıkça artar. Fakat yüksek östemperleme sıcaklıklarında Cu miktarının süneklik üzerine bir etkisinin olmadığı görülmektedir. ÖKGDD'lerde Cu kalıntı östenit miktarı üzerine etki yapmamaktadır. 325°C'in altındaki işlemlerde bakırın karbür oluşumunu engellediği, bu yüzden sünekliği artırdığı bilinmektedir (Dorazil, 1991).

Östemperleme ısı işlemi sonunda optimum mekanik özellikler, %60-80 beynit, %20-40 kalıntı östenit içeriğinde elde edilmektedir. Dorazil, %0.74-1.58 Cu içeren numuneler üzerinde yaptığı deneylerde, bakırın östemperleme süresine bağlı olarak, çekme mukavemeti, birim uzama, sertlik ve kalıntı östenit üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bakır miktarının artması çekme mukavemeti ve sertlik üzerinde belirgin değişimler yapmazken, birim uzama miktarını arttırmaktadır (Şekil 3.5).

Nikel: %1'in altındaki Ni miktarının çekme mukavemeti, sertlik ve süneklik üzerine 300-400°C sıcaklıklar arasında yapılan östemperleme işlemlerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Fakat Ni içeriği %1- 4 arasındayken 350°C'in altındaki östemperleme işlemlerinde çekme mukavemetinin belirgin olarak düştüğü görülmektedir. Alt beynitik yapılarda Ni, Cu'a benzer olarak karbür oluşumunu engeller. %2'nin üzerindeki Ni miktarlarında, segregasyonlar nedeniyle, havada soğutma sonucu martenzit oluşumu artar, bu da sünekliğin düşmesine neden olur.

Molibden: Mo miktarı arttıkça, çekme mukavemeti, sertlik ve süneklik azalır. %0.2'nin üzerindeki Mo içeriklerinde Mo tane sınırlarında segrege olur ve bu bölgelerde karbür oluşumunu teşvik eder. Mo, Mn ile benzer etkiler gösterir. Buna ek olarak Mo sertleşebilme kabiliyetini artırır ve beynitik dönüşüm sıcaklığını (B_s) yükseltir.

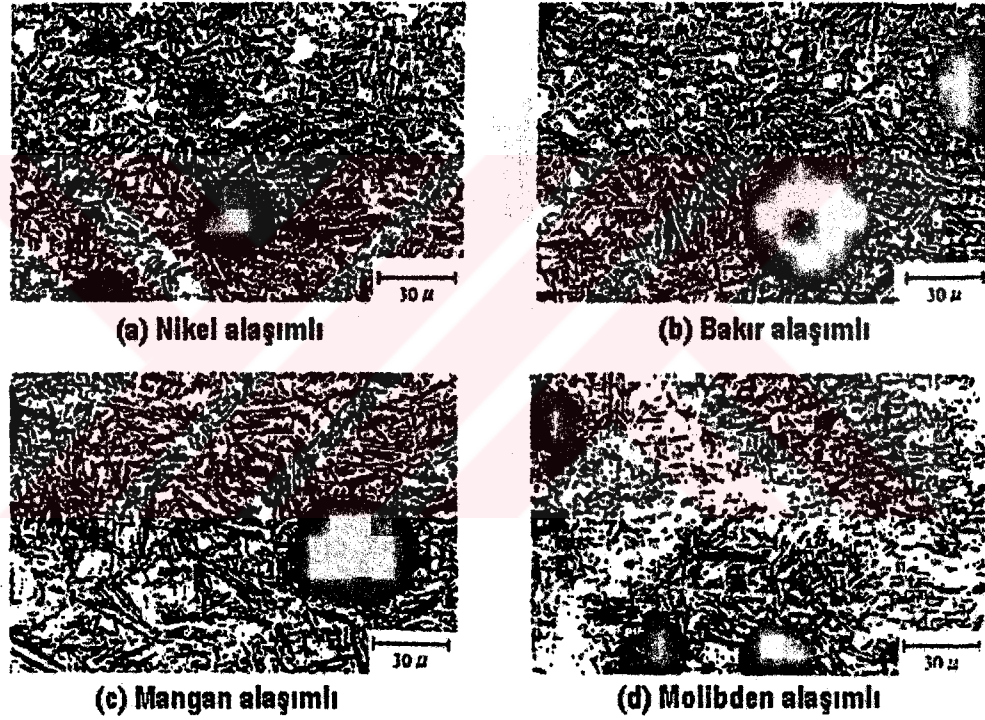
Mo alaşımlı küresel grafitli dökme demirlerde, östemperleme ısı işlemi sonucu mekanik özelliklerin optimum değerleri kalıntı östenitin en büyük olduğu yerlerde elde edilmektedir.

Krom ve Fosfor : Cr ve P ötektik tane sınırlarında kolaylıkla segrege olan elementlerdir. Bu nedenle tane sınırlarında karbür, fosfür ve karbür-fosfür komplekslerinin oluşumuna neden olurlar. Bu oluşumlar mekanik özellikleri kötü yönde etkiler. Bu etkiden korunmak için yapıdaki Cr ve P miktarının %0.05'in altında olması istenir.

Küresel grafitli dökme demirlerde sertleşebilirliği olumlu yönde etkileyen elementler Cu, Ni ve Mo'dir. %0.3'lük Mo ilavesi, östemperlenebilecek çap değerini ikiye katlar. Bu konuda Cu, Mo kadar etkin değildir. %1.5 Cu ilavesi ancak %0.3 Mo ilavesine eşdeğer etki yapar. Fakat yüksek Ni ilavesi Cu'dan daha etkindir. Sertleşebilirlik üzerine bakırın etkisi %1.5'dan sonra fazla değildir. Sertleşebilirlik üzerine alaşım elementlerinin etkileri Şekil 3.4'de gösterilmiştir (Johansson, 1994).

Mn sertleşebilirliği artıran daha ucuz bir alaşım elementidir. Fakat tane sınırlarında daha kolay segregasyon olması nedeniyle kırılabilirliği artırdığından tercih edilmez.

Ni, Cu, Mn ve Mo içeriklerine göre mikroyapısal farklılıklar Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 Alaşım elementine göre mikroyapısal farklılıklar (Lin;Chen;Lei, 1994).

Östemperleme sonucu istenen özelliklere ulaşabilmek için alaşım elementlerinin etkileri çok iyi gözden geçirilmeli ve istenen özellikleri verebilecek miktarlar titizlikle seçilmelidir.

Tüm alaşım elementlerinin belli kombinasyonlarda yapıya ilavesinin, mekanik özelliklere ne tür etkiler yaptığı konusunda yapılmış birçok çalışma olmasına rağmen henüz yeterlilik sağlanamamıştır (Çelik, 1996).

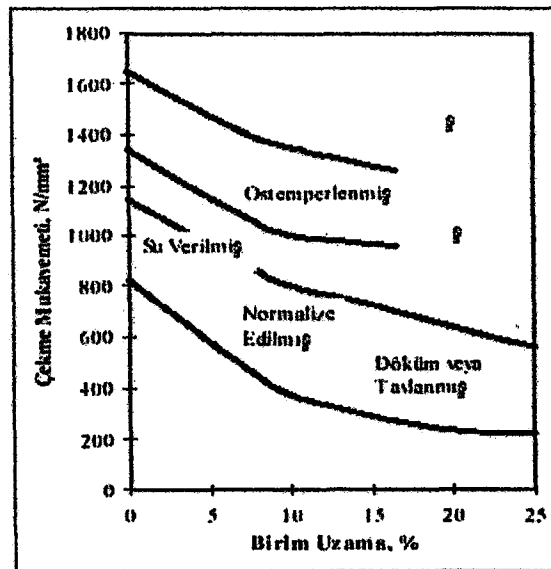
4. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÖZELLİKLERİ

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini tesbit etmek üzere yapılmış çalışmalar, bu malzemelerin aynı matriks yapıdaki çeliğe göre daha mukavim olduğunu göstermiştir. Bu durum ÖKGDD malzemeleri mühendisler için ilgi çekici malzemeler haline getirmektedir. ÖKGDD malzemelerin mekanik özellikleri, üretimden ısıtılma işlemine birçok etki altındadır. Döküm sırasında yapıya katılan alaşım elementleri, bu elementlerin segregasyona yatkın olup olmaması, ısıtılma işleminin yapılaş şekli, parçanın boyutları sonucu mekanik özellikleri doğrudan etkileyen parametrelerdir.

4.1 Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri

ÖKGDD'ler dökme demirler içinde en büyük mukavemete sahip malzemelerdir. Şekil 4.1'de ÖKGDD'lerin diğer demirlerle çekme mukavemeti mukayesesi yapılmıştır.

ÖKGDD'lerde mekanik özellikler elde edilen yapıya ve işlem parametrelerine göre değişim gösterir. Alt beynitik yapılarda 500 VSD'nin üzerinde sertlik, 1200-1600 N/mm² arası çekme mukavemeti ve %1-3 kopma uzaması elde edilirken, üst beynitik yapılarda 280-320 BSD sertlik, 900-1050 N/mm² çekme mukavemeti ve %6-12 kopma uzaması elde edilebilmektedir (Dorazil, 1991).

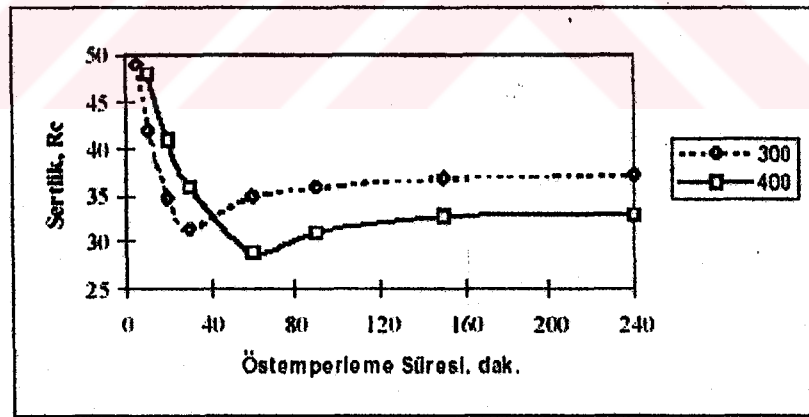


Şekil 4.1 Çekme mukavemeti uzama ilişkisi (Çelik, 1996).

Dorazil yaptığı çalışmalarda alt beynitik oluşumlarda elde edilen mekanik özelliklerin beynitik oluşumlardan farklı olduğunu savunmuştur. KGDD östemperlendiği zaman, ya alaşım elementi olsun veya olmasın, alt beynitik oluşumlarda yüksek mukavemet ve süneklik, üst beynitik oluşumlarda ise düşük mukavemet yüksek süneklik elde edilmektedir. Fakat bu görüşe karşı fikirlerde ortaya atılmıştır. Örneğin Hitchcox, 1986'da yaptığı çalışmada, yüksek performans dişlisi olarak kullandığı ÖKGDD'lerde, yüksek östemperleme sıcaklıklarında, düşük östemperleme sıcaklıklarına göre daha yüksek mukavemet elde ettiğini bildirmiştir. Aynı şekilde Hamid vd, düşük Mn içeren KGDD'ler üzerinde yaptığı çalışmalarda düşük östemperleme sıcaklıklarında, mukavemetin belirgin olarak düştüğünü dikkat çekmişlerdir (Hamid ve Elliott, 1993).

4.1.1 Çekme özellikleri

ÖKGDD'lerde elde edilen çekme mukavemeti değerleri, başlangıç matris yapıyla çeliklerden ve dökme demirlerden daha yüksektir. Bahmani, %0.8 Cu,%0.55 Mn içeren KGDD'lerde, sertliğin çekme mukavemeti ile paralel değiştiğini belirtmiş ve östemperleme sıcaklığında 400°C'den 300°C'ye azalmanın, östenitin hacimsel miktarını artırdığını ve bu da sertliği belirgin olarak iyileştirdiğini öne sürmüşlerdir (Şekil 4.2) (Çelik, 1996).



Şekil 4.2 %0.55 Mn, %0.8 Cu içeren KGDD'de sertliğin östemperleme süresine ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi (Çelik, 1996).

Aynı şekilde Cu-Ni alaşımlı KGDD'lerin östemperleme ısı işleminin sonrası özellikleri belirlemek üzere yapılan çalışmalarda, östemperleme ısı işlemiyle çekme özelliklerinin, parçanın boyutuna, östemperleme sıcaklığına ve süresine bağlı olduğu görülmektedir.

Ayrıca benzer çalışmalar kapsamında, çekme mukavemetinin, ne Ni ne de Cu miktarının bir fonksiyonu olmadığı, buna karşın başlangıç mikroyapıdaki ferrit miktarının çekme özellikleri üzerinde daha etkili olduğu belirtilmektedir. Çizelge 4.1'de Cu-Ni alaşımlı KGDD malzemelerde elde edilebilecek en iyi çekme özellikleri verilmiştir. Çizelge 4.1'deki veriler, Cu-Ni alaşımlı KGDD'lerde optimum çekme özelliklerinin 360°C de 2 saat östempereleme sonucu elde edildiğini göstermektedir (Dorazil, 1991).

Çizelge 4.1 25 mm çaplı ÖKGDD lerin 2 saat 360°C'de östemperelemesi sonucu elde edilen çekme özellikleri (Çelik, 1996).

Östempereleme sıcaklığı/süresi °C/saat	Kimyasal Bileşim %	Kopma uzaması (%)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
360 / 2	Cu-Ni, 0.002 Mn	14	635	995
	Cu-Ni 0.4 Mn	10	607	987
	Ni-Mo 0.2 Mn	11	635	990
	1.48 Cu	5	725	1100
	0.6Cu-0.25Mn	9	700	1000
	0.96 Mn	3	620	970
310 / 2	Cu-Ni 0.02 Mn	7	860	1210
	Cu-Ni 0.4 Mn	6	775	1155
	Ni-Mo 0.2 Mn	6	890	1220

ÖKGDD'lerde yorulma mukavemetine etki eden faktörler özetle, şöyle sıralanabilir:

- Küresel grafitlerin şekli, küresellik azaldıkça yorulma mukavemeti düşer,
- Küresel grafitlerin şekli, küresellik azaldıkça yorulma mukavemeti düşer, matriks yapının mikrosertliğinin artmasıyla artar,
- Yapılan çalışmalar, ticari dökümlere göre, laboratuvar şartlarında yapılan dökümlerin yorulmaya karşı yaklaşık %10 daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle döküm işlemi denetim altında tutulmalı ve temiz olmalıdır,
- Grafitlerin büyüklüğü, küreselliği ve dağılımı yorulma mukavemetini etkilemektedir,

- Parça büyüklüğü yorulma mukavemetini etkilemektedir.

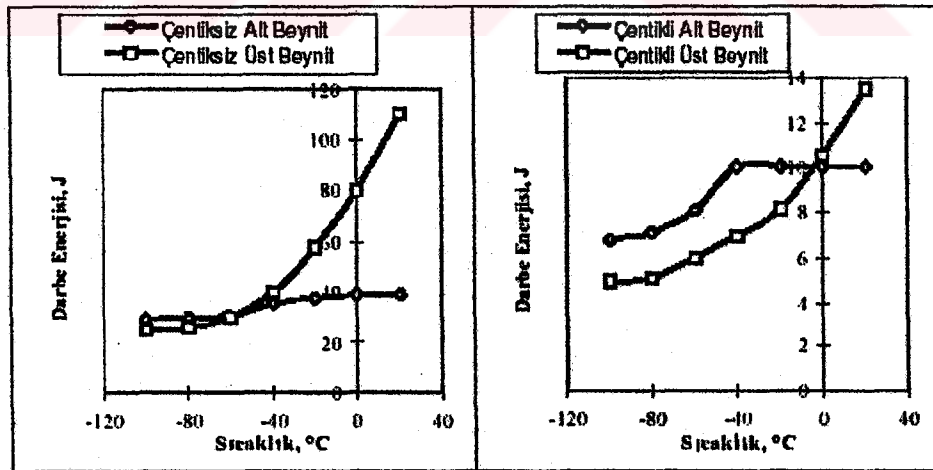
Bunların dışında, henüz uygulama örneği olmamakla beraber laboratuvar denemelerimizde, termal çevrimli östenitleme ısısal işlemine tabi tutulan KGDD'lerin östemperlenme ısısal işlemi sonunda yorulma ömürlerinin, normal yöntemle östenitlenen numunelerden 2-3 kat daha iyi olduğu gözlenmiştir (Komaç, v.d., 1996).

4.1.2 Darbe ve sertlik özellikleri

ÖKGDD'lerde temel ısısal işlem parametreleri olan östenitleme sıcaklığı, östenitleme süresi, östemperleme sıcaklığı ve östemperleme süresi, sertlik ve darbe özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir.

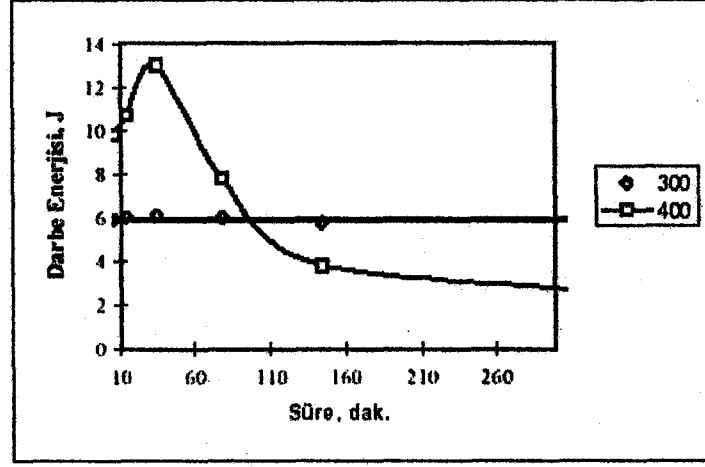
Alaşımli ve alaşımsız KGDD'lerin östemperlenmesinde, östenitleme sıcaklığı arttıkça hem sertlik hem de darbe direnci azalmaktadır. Östenitleme süresi arttıkça sertlik azalırken, darbe direncinde artış gözlenmektedir (Özel ve Kısakürek, 1991).

Çentikli ve çentiksiz darbe numuneleri üzerinde yapılan deneylerde -100, -40°C arasında alt ve üst beynitik yapıların hemen hemen aynı darbe direncine sahip oldukları, -40°C'den büyük sıcaklıklarda (oda sıcaklığında ve üzerinde) üst beynitik yapıların daha büyük darbe direnci değerleri verdiği görülmektedir (Şekil 4.4) (Dorazil, 1991).



Şekil 4.4 Darbe testi sıcaklığının darbe direncine etkisi (Dorazil, 1991).

Şekil 4.5’de alaşımsız KGDD’ler için Charpy V-çentikli numune ile oda sıcaklığında yapılan darbe deneyinde elde edilen darbe direnci değerlerinin östempereleme süresine bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 4.5 Oda sıcaklığında V-çentikli Charpy numunesinin darbe enerjisinin östempereleme süresine bağlı değişimi (Çelik, 1996).

Alaşımlı veya alaşımsız bütün KGDD’lerde östempereleme süresi arttıkça sertlik düşmektedir. Ayrıca alt beynitik yapıdan üst beynitik yapıya doğru sertlik azalma göstermektedir.

Yüksek Si içeren (>%2) çeliklerdeki gibi KGDD’lerde de beynit oluşumunun gerek karbür çökmesiyle desteklenmemiş, gerekse karbür oluşumu sınırlı olan beynitik ferritin çekirdekleşme ve büyümesinden ibaret olduğuna inanılmaktadır. Bu durumda ferrit büyürken, kalan östenit karbonca zenginleşir ve böylece kararlılığı artar. Silisyumun daha fazla olması karbür oluşumunu bastıracak ve bunun sonucunda östemperelanmış yapıda daha fazla östenit gözlenebilecektir (Şekil 4.6). Her durum için Si artışıyla darbe özelliklerinin iyileşmesi bu iki nedene bağlanabilir. Tavlanmış KGDD’lerde ise bunun tam aksine ferritin gevrekleşmesi nedeniyle darbe mukavemeti, artan Si ile düşmektedir. Bu durum 850°C’de östenitlemenin tamamlanmamasına ve yapının kalıntı ferrit içermesine bağlanabilir (Çelik, 1996).

4.2 ÖKGDD lerin Teknolojik Önemi ve Uygulama Alanları

ÖKGDD'lerin ilk uygulama örnekleri otomotiv sanayiinde verilmiştir. ÖKGDD'lerin ilk kullanım örneğini General Motors firması ürettiği Pontiac araçların bazı dişli aksamalarında kullanarak vermiştir. Bu örneği takiben, ağır hizmet şartlarında çalıştırılan kamyonlarda dişli olarak kullanım örnekleri yaygınlaşmıştır. ÖKGDD'lerin, aşınma ve yorulma mukavemetlerinin yüksek olması bu malzemelerin dişli imalatında kullanımını yaygınlaştırmıştır. ÖKGDD'lerle ilgili çalışmalar arttıkça kullanım alanları da artış göstermiştir. Özellikle büyük dişli çarklarda yüzeyleri sertleştirilmiş çelik malzemeler yerine,

ÖKGDD malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. General Motors firmasının 1976'da Pontiac otomobillerin arka aks hipoid pinyon ve fener dişlilerini yüzeyi sementasyonla sertleştirilmiş çelik yerine ÖKGDD'den imal etmesi bu malzemeye olan ilginin artmasına neden olmuştur. Oysa beynitlik yapıli KGDD'lerin ilk örneği 1947 yılında Millis, Gagnebin ve Pilling tarafından verilmiştir. General Motors'u takiben birçok firma ÖKGDD malzemeleri çeşitli alanlarda kullanmaya başlamıştır (Dorazil, 1991).

Fischer (İsviçre) ve Fiat (İtalya), Avrupa'da ÖKGDD malzemedен dişli kullanan öncü firmalar arasındadır. Amerika'da 30'u aşkın firma ÖKGDD kullanımı konusunda bir konsorsiyum yapmış bu konsorsiyuma ABD hükümeti 1.1 milyon dolarlık araştırma desteği vermiştir. Amerika'da Cummins Engine Co. Yüzeyi indüksiyonla sertleştirilmiş çelik malzemelerin ve dövme çelik malzemelerin yerine ÖKGDD malzemelerden yapılmış dişliler kullanmıştır.

ÖKGDD'lerin motor parçası olarak bir diğер kullanım alanı ise krank milleri olmuştur. Volvo, Mercedes, Daimler Benz ve General Motors ağır hizmet araçlarında dövme çelik krank milleri yerine, ÖKGDD krank millerini tercih etmektedirler. Amerikan Ford firması da ÖKGDD krank millerini, ağır hizmet kamyonları, çekiciler, tarım araçları ve süpersarjlı yarış araçlarında kullanmışlardır.

ÖKGDD'lerin otomotiv endüstrisi dışında da uygulama alanları vardır. Buzdolabı kompresörlerinin krank milleri, tarım makinalarında kullanılan saban, tırmık gibi kazıcılar, yükleyici ağır hizmet iş makinalarının kepçe dişleri sivil kullanım alanlarının diğер örnekleridir. Amerikan Abrams M1 tanklarının bu malzemedен imal edilmiş süspansiyon çubukları ve paletlerle donatıldığı ve kullanıldığı bilinmektedir.

Demiryollarında kullanılan vagonların ve maden arabalarının tekerleri, lokomotiflerde fren pabuçları olarak kullanımlara da rastlanmaktadır.

ÖKGDD malzemeler teknolojik önemleri ve kullanım yerleri giderek artan malzemelerdir. ÖKGDD malzemeleri bu denli önemli yapan avantajları şöyle sıralanabilir (Özel, 1991; Dorazil, 1991; Çelik, 1996):

- KGDD, çeliğe göre % 10 daha hafiftir ve KGDD dişliler, çelik dişlilerden daha sessiz çalışmaktadır. Çünkü, yapıdaki grafit sönüm kapasitesinin % 40 artmasını sağlar,
- KGDD' in çelikten daha az çentik duyarlılığı vardır. Bu yüzden yüzey işlemlerinin çelikteki kadar hassas yapılmasına gerek yoktur,
- ÖKGDD in yorulma ömrü püskürtmeli sertleştirme ve yüzey haddeleme işlemleri ile artırılabilir. Hatta dişlilerin çalışma esnasında dahi yüzeyleri sertleşebilir. 300 Brinell sertliğindeki ÖKGDD malzemenin aşınma direncinin 500 Brinell sertliğindeki dövme çeliğe eşdeğer olduğu görülmüştür. ÖKGDD in elastisite modülü çeliğinkinin yaklaşık % 70-80' i kadardır,
- Hammadde olarak dökme demir çelikten daha ucuzdur,
- Belirli dişliler nihai şeklini verecek şekilde dökülebilir. Örneğin, döküm işlemi sırasında dişler oluşturulabilir,
- Isıl işlem görmeden önce dahi, KGDD in işlenebilirliği tavlanmış çelikten oldukça iyidir. Bu nedenle pahalı işleme takımlarının sarfiyatı da az olmaktadır,
- KGDD dişlilerin üretiminde kullanılan enerji, çelik dişlilerin üretiminde kullanılan enerjiden daha az olmaktadır. Bu yüzden %50'ye varan enerji tasarrufu yapılabilmektedir,

Çizelge 4.2 ÖKGDD ve çelik dişlilerin üretiminde kullanılan enerji miktarları (Kısakürek, 1987).

HARCANAN ENERJİ (KWh/t)		
İŞLEM	KGDD	ÇELİK
Üretim	2500	4500
Tavlama	—	500
Östemperleme	600	—
Yüzey sertleştirme	—	800-1200
TOPLAM	3100	5800-6200

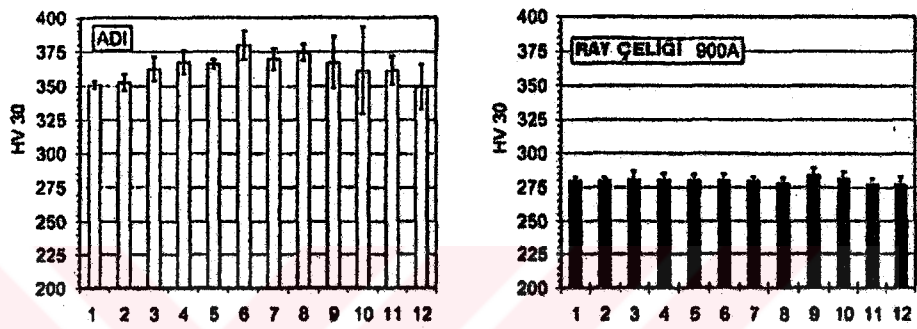
- KGDD, çeliğe göre üretimi ucuz olan ve üretim işlemi kolay olan bir malzemedir,
- Hassas kalıplama yöntemleri kullanıldığı zaman, yüzey işlemesi gerekmeksizin kullanıma alınabilir,
- Kolay işlenebilen ve işleme maliyeti düşük olan bir malzemedir,
- Östemperleme ısıt işlemi, hem ısıt işlem işlemi olarak kolay, hem de kısa süreli bir ısıt işlem olduğu için, sementasyonla yüzeyi sertleştirilmiş malzemelere alternatif olarak kullanılabilir,
- Dişli imalatında dövme çelik malzemeye göre, ÖKGDD malzemenin üretim maliyeti %50 daha düşüktür,

- Yağlama etkisinin zayıf olduğu kullanım yerlerinde bile aşınma ömürleri dövme çelik malzemeden yüksektir,
- KGDD malzemelerin çentik duyarlılığı daha azdır, bu nedenle yüzeylerinin çelikler kadar iyi işlenmesi gerekmez,
- ÖKGDD'lerin yorulma ömürleri yüksektir. Aşınma ömürleri ise kullanım sırasında kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi nedeniyle yüksektir (300 BSD sertlikteki ÖKGDD'lerin 500 BSD sertlikteki dövme çeliğe eşdeğer aşınma mukavemeti gösterdiği bilinmektedir),
- ÖKGDD'lerin elastisite modülü aynı matriks yapıdaki çeliğin elastisite modülünün %70-80'i kadardır,
- Otomotiv sanayiinde yaygın olarak kullanılan parçaların içinde en iyi mukavemet özelliklerini ÖKGDD'ler vermektedir.

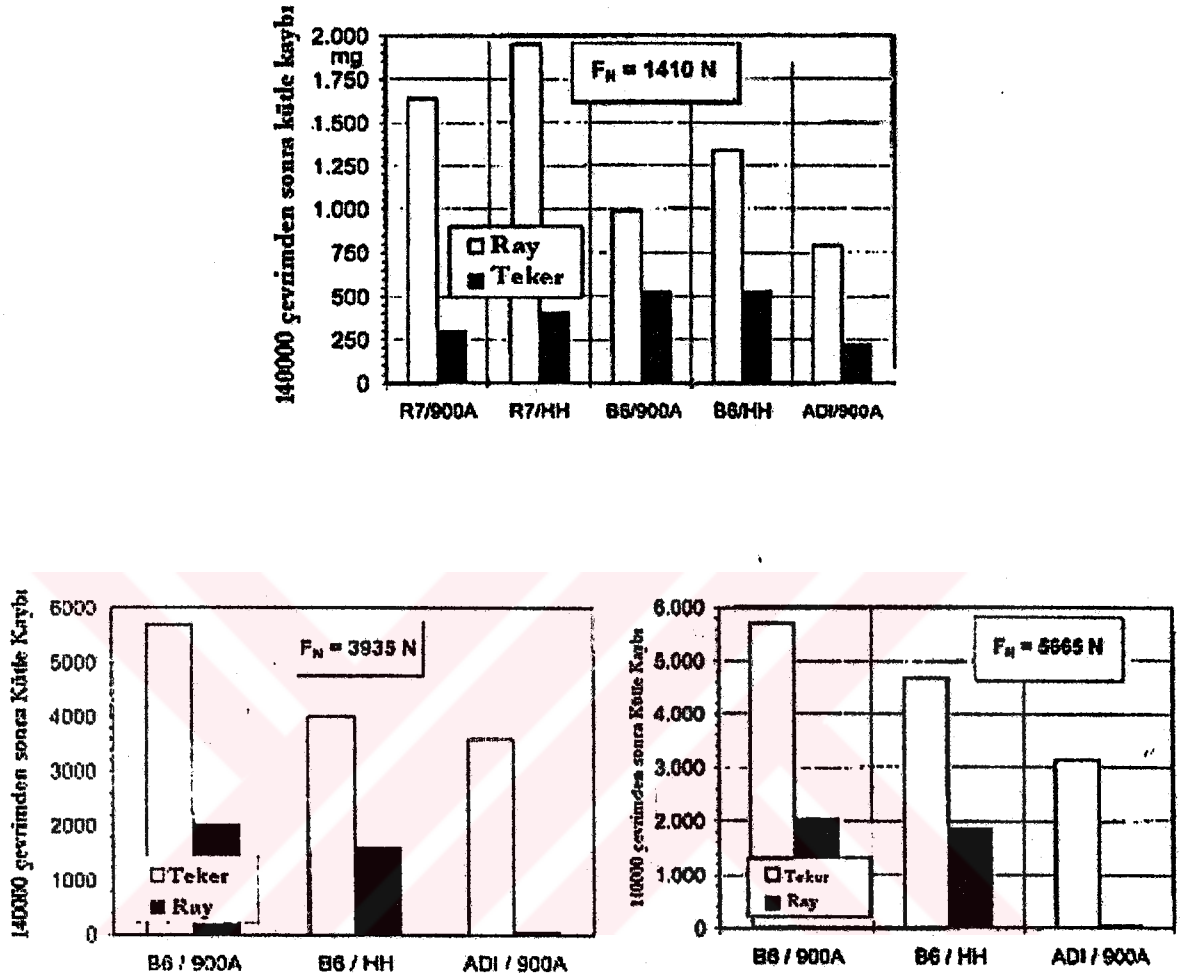
Çizelge 4.3 Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan malzemelerin mukavemet değerleri (Özel, 1994).

	DÖKME DEMİRLER				ÇELİKLER	
	ÖKGDD	LAMEL	TEMPER	KGDD	DÖKÜM	DÖVME
ASTM standardı	A897M-90	A48	A602	A536	A27	A290.A-Đ
Çekme Muk. kg/mm ²	85-160	14-40	35-70	40-70	40-50	55-118
Akma nıuk. kg/mm ²	55-130	-	22-60	27-50	20-30	31-100
% uzama	1-10	<1	1-10	3-18	22-24	10-22

ÖKGDD'ler daha iyi mekanik özellikler göstermelerinden dolayı birçok alanda kullanılmakta ve kullanılmaları da düşünülmektedir. Bugüne kadar dişli yapımında oldukça yaygın olarak kullanılan, dövme ya da yüzey sertleştirilmiş çeliklerin yerine bu yeni malzemenin kullanılması oldukça büyük ilgi uyandırmıştır. Örneğin; demiryolu taşıtlarındaki bağlantı elemanları bu malzemeden yapıldığı takdirde aşınma direncinin iki kat arttığı, ayrıca frenlerdeki fren pabuçlarının da bu malzemeden yapılması halinde aşınma direncinin normal dökme demirlere nazaran yaklaşık 6.5 kat arttığı gözlenmiştir. Aynı zamanda bu fren pabuçlarının tekerleri çok daha az aşındırdığı tesbit edilmiştir.



Şekil 4.7 ÖKGDD ve Ray Çeliği arasında mikrosertlik karşılaştırması (1).



Şekil 4.8 Çeşitli ray/teker malzemesi ve yük kombinasyonları için kütle kayıpları (1).

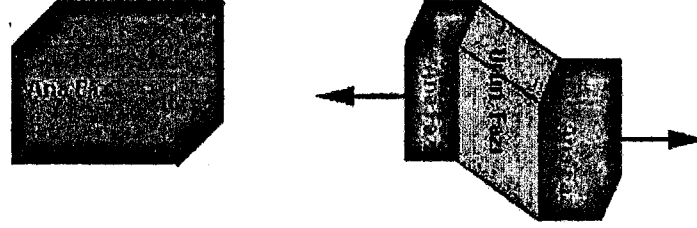
Çizelge 4.4 Alternatif malzeme olarak ÖKGDD kullanıldığında maliyetteki düşüşü gösteren çizelge (1).

Bileşen	Önceki Malzeme	Yerini Alan Malzeme	Maliyetteki Düşüş	Diğer Tasarım İyileştirmeleri
Off-road Kamyon Süspansiyon Silindiri	Kaynaklı Çelik	BS2789 420/12	>20%	İşleme masrafları azaldı. Envanter ve stok denetim giderleri düştü.
Saban Ayağı	Kaynaklı Çelik	ASTM A-536 80-55-06	49%	Döküldüğü gibi kullanıldı. İşleme maliyetleri ortadan kalktı.
İp Klemensi	Dövme çelik	ASTM A-536 80-55-06	82%	Daha dayanıklı. İyileştirilmiş görünüm.
Krank mili	Dövme Çelik	ASTM A-897 ADI	39%	Daha hafif,daha dayanıklı ve daha iyi aşınma direnci.İyileşmiş sönümleme.
Diesel Motor Zamanlama Dişlisi	Karbürize Dövme Çelik	ASTM A-897 ADI	30%	Talaşlı işleme prodüktivitesi yükseldi.Ağırlık ve gürültü azaldı.
Kanca	Kaynaklı Çelik	ASTM A-536 80-55-06	76%	Mekanik özellikler iyileşti. İşleme azaldı, görünüm iyileşti.
Vida Dişli	Bronz & Çelik	ASTM A-536 60-40-18	46%	Performans yükseldi,son birleştirme kolaylaştı.

5. ÖSTENİT-MARTENZİT DÖNÜŞÜMÜ

5.1 Martenzitik Dönüşüm

Yayınım olmaksızın gerçekleşen bir dönüşümdür (atomlar yer değiştirmez). Malzemenin kimyasal oluşumunda bir değişiklik olmaz. Şekil 5.1’de görülen makroskobik değişikliğe neden olan kristal ağda eğilmeyi işaret eder.



Şekil 5.1 Martenzit varyant görünüşüne bağlı olarak makroskobik şekil değişikliğinin basitleştirilmiş gösterilişi (3).

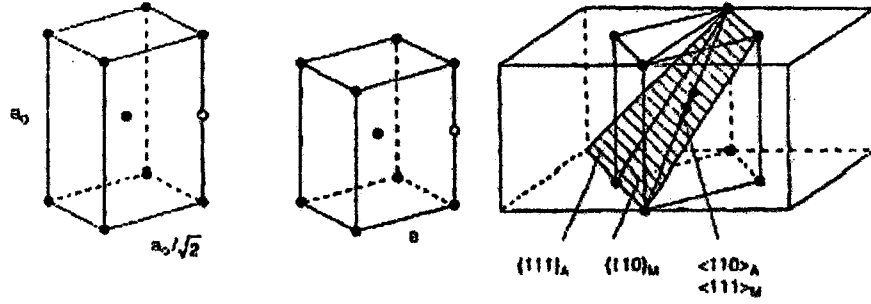
Oluşan martenzit ve kalan östenit arasındaki etkileşim enerjisini en aza indirmek için eşdeğer yönelimlerinin değişik varyantları oluşur (Şekil 5.2)



Şekil 5.2 Martenzit varyantlarının görünüşü (3).

Martenzitik dönüşümde histeresis olayı görülür (geri dönüşümsüzdür). Ayrıca bir ısı atımı (ekzotermik geçiş) ve ısı alımı (endotermik geçiş) söz konusudur (3).

5.2 Fe-C'de Martenzitik Dönüşümün Kristalçizisi



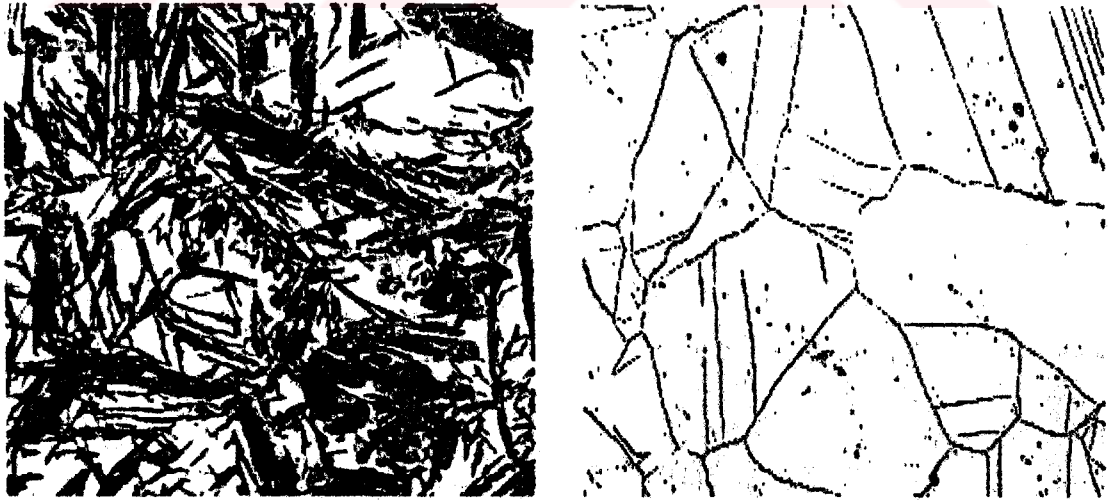
Şekil 5.3 Fe-C'de martenzitik dönüşümün Bain modeli ve östenit-martenzit Kurdjumov-Sachs'a göre yönelim ilişkileri. İçi boş yuvarlaklar C atomlarının muhtemel yerlerini göstermektedir (4).

Yüzey merkezli küpte hacim merkezli tetragonal hücre: $a = a_0/\sqrt{2}$, $c = a_0$

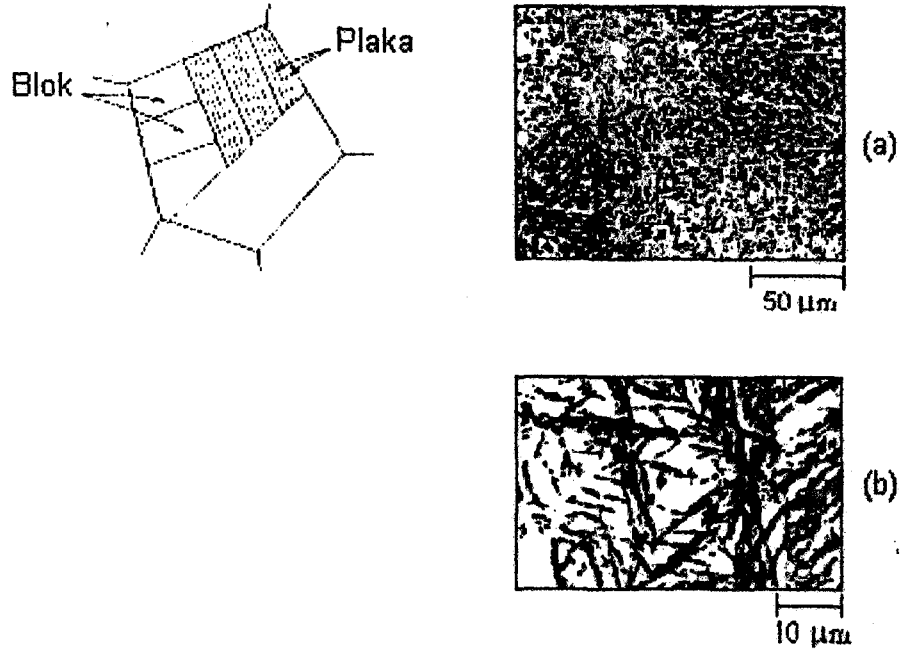
C-eksenindeki C atomları tetragonal bozunmaya sebep olarak dönüşümü kolaylaştırırlar (4).

5.3 Martenzit Çeşitleri

Tipik bir martenzit mikroyapısı Şekil 5.4'de verilmiştir. Şekilde koyu bölgeler Hacim Merkezli Küp martenzite, açık renkli bölgeler ise kalıntı östenite aittir.



Şekil 5.4 Tipik martenzit (500x) ve östenit mikroyapıları (150x) (4).



Şekil 5.5 (a) Tabaka tipi martenzit, (b) iğnesel martenzit (2).



Şekil 5.6 Martenzit ve östenit (150x) (4).

304 kalite paslanmaz çelikte plastik deformasyona bağlı olarak oluşan martenzitik dönüşüm çeşitli başlangıç koşullarında Ueda vd. tarafından incelenmiştir. Plastik deformasyonla, martenzitik dönüşüm sadece 1290 °C'de ısıtılma tabi tutulan numunedegözlenmiştir. Mikroskobik incelemelerde tane boyutunun 25 nm'den 100 nm'ye birçok defa arttığı görülmüştür (Ueda, Takasashi, Echigoya, Mümtaz, Okino ve Sasaki, 2001).

Küçük tanalarda aykırıyerleşimlerin hareketi engellenmiştir; tane boyutu küçüldükçe, aykırıyerleşim hareketini engelleyen engellerin sayısı artmaktadır. Aykırıyerleşimler tane sınırları boyunca birikirler. Tane sınırları martenzitik dönüşümü hızlandırır.

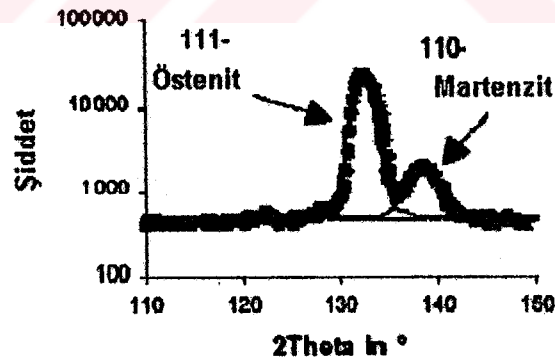
Tane sınırları için genel yaklaşım, geniş tane sınırlarının martenziti kararlı yaptığı şu anki sonuçlardan farklıdır (Ueda, Takasashi, Echigoya, Mümtaz, Okino ve Sasaki, 2001).

Östenitik çelik M_s ve M_d sıcaklıkları arasında plastik deformasyona uğratıldığında, metastabil östenit plastik deformasyon nedeniyle içsel zorlama enerjisini azaltmak amacıyla martenzite dönüşür (Shin, 1996).

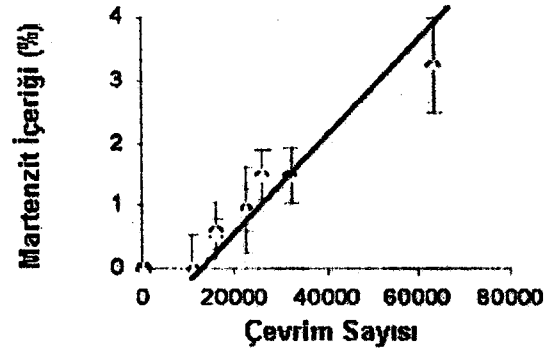
Metastabil östenitin zorlama sonucu oluşan martenzite dönüşümü 30 yıldan fazladır bilinmektedir. Bununla birlikte, bu etkinin teknik uygulamaları hakkında çok bilgi yoktur. Nükleer güç tesisi bileşenlerinin östenitik borularının yorulma dayanımının daha erken belirlenmesi için (Grosse, Niffenenger ve Keller, 1999) yapılan bir araştırmada, "saat camı" adıyla bilinen zorlamayla oluşan martenzitik dönüşümü etkileyen parametreler incelenmiştir. Yorulma deneyi farklı çevrim sayılarında durdurulmuş ve faz dönüşümünün yüke bağımlılığı belirlenmeye çalışılmıştır.

Östenit ve martenzitin iyi belirlenmiş yönelim ilişkilerinden dolayı (111) östenit (kym-Fe) ile (110) martenzit (bozunmuş tetragonal khm-Fe) arasındaki şiddet ilişkisi faz analizi yapmak için yeterlidir.

Şekil 5.7 ve 5.8 sırasıyla kırınım modelini ve çevrim sayısı kş martenzit içeriğini göstermektedir.



Şekil 5.7 Yorulma nedeniyle kırılmış örneğin kırınım modeli (Grosse vd., 1999).



Şekil 5.8 Martenzit miktarının çevrim sayısına bağılılığı (Grosse vd., 1999)

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar bölümünde deneyde kullanılan cihazlar, yöntemler ve elde edilen sonuçlar anlatılacaktır.

6.1 Deneyde Kullanılan Cihaz ve Teçhizatlar

Deneyde aşağıda kimyasal bileşimi verilmiş olan GGG60 çaplı teker numuneler kullanılmıştır:

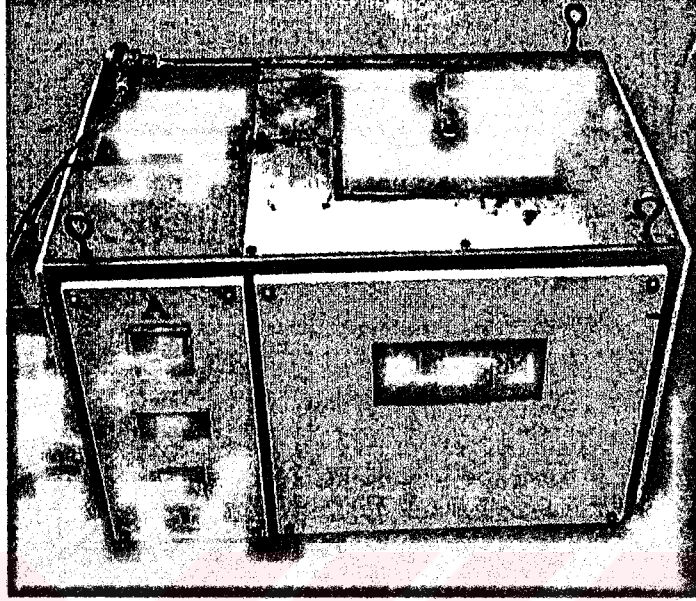
%3.67 C, %2.7 Si, 0.38 Mn, 0.51 P, 0.10 S, 0.084 Cr, 0.26 Cu.

Kullanılan cihazlar ise şöyledir:

- Elektrik dirençli tuz banyosu: 1200 °C
- Elektrik dirençli tuz banyosu: 600 °C
- Döner ezilme cihazı
- Metalografik numune hazırlama cihazı
- Ultrasonik temizleme cihazı
- Işık metal mikroskobu: 1000 büyütme
- Görüntü çözümleme cihazı
- X-ışını kırınım cihazı: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Östenitleme: 900 °C'de nitrür + nitrat karışımı HS760 (Petrofer) ticari isimli tuz banyosunda yapılmıştır. İlk deneyler, %50 NaCl + % 50 KCl karışımı ile yapılmıştır. Ancak karbonsuzlaşmaya neden olduğu için terkedilmiş ve HS760 ve Neutrosal (Pertröfer) kullanılmıştır. Neutrosal yüzeyde karbonsuzlaşmayı engelleyici bir tuz eklentisidir ve %5 ilave edilmiştir.

Östemperleme: 375 °C'de AS135 (Petrofer) ticari isimli ve KNO₃ esaslı tuz banyosunda yapılmıştır.



Şekil 6.1 Östenitleme ve östempereleme banyoları.

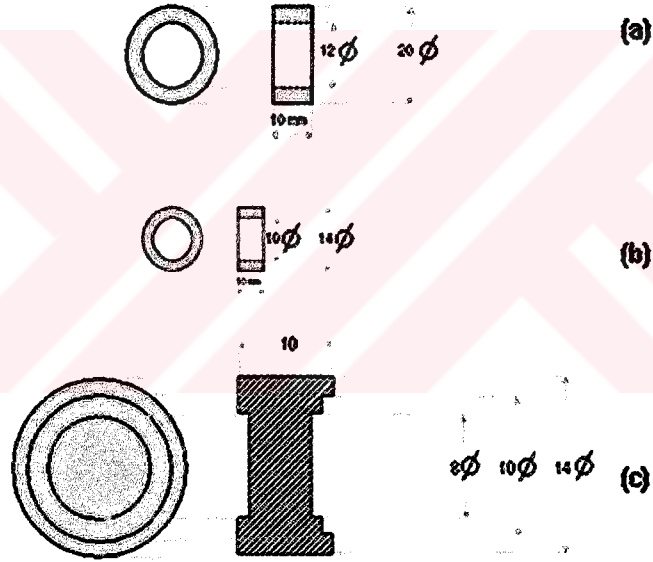
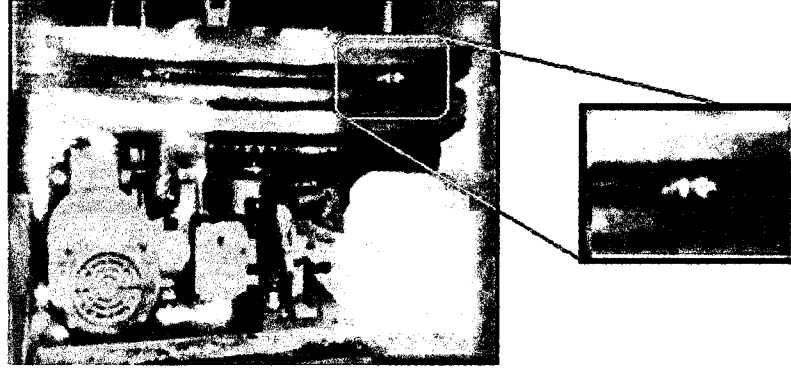
Ultrasonik temizleme cihazı: Tuz banyosundan çıkan numunelerin temizlenmesinde kullanıldı.



Şekil 6.2 Ultrasonik temizleme cihazı.

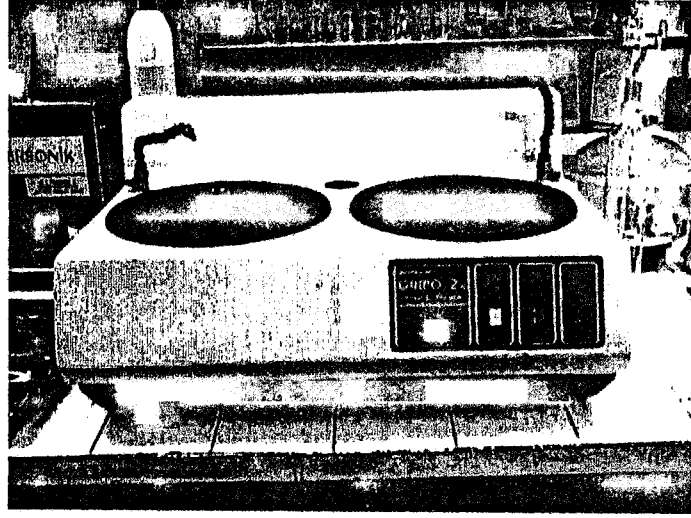
Döner Ezilme Cihazı:

Östemperleme işlemi uygulanan numunelerin döner bir ezilme hareketi yapmaları sağlanan deney düzeneğidir. Deneyde 3 adet numune kullanılmıştır ve numune başına yükleme 75 kg'dır.



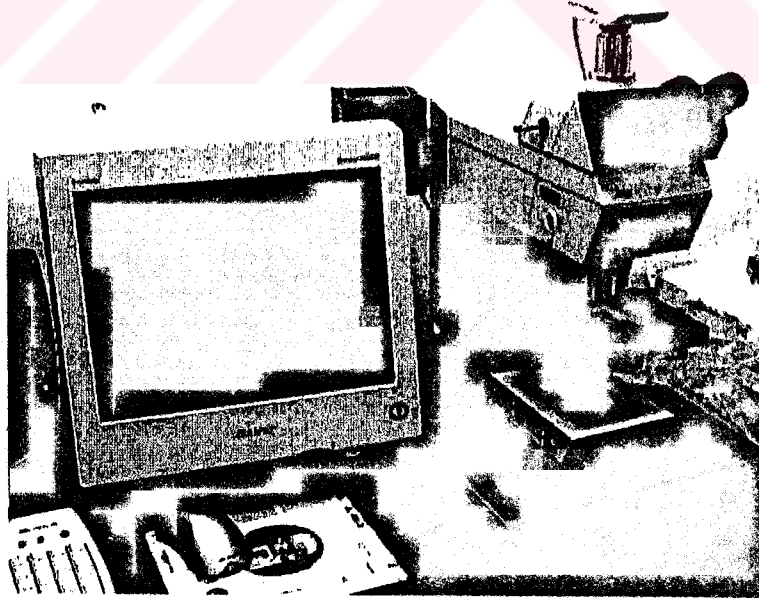
Şekil 6.3 Ezme deney düzeneği ve numuneler; (a) büyük ve içi boş, (b) küçük ve içi boş, (c) içi dolu.

Metalografik numune hazırlama cihazı: Zımparalama, parlatma işlemleri bu cihazda yapılmıştır.



Şekil 6.3 Metalografik numune hazırlama cihazı.

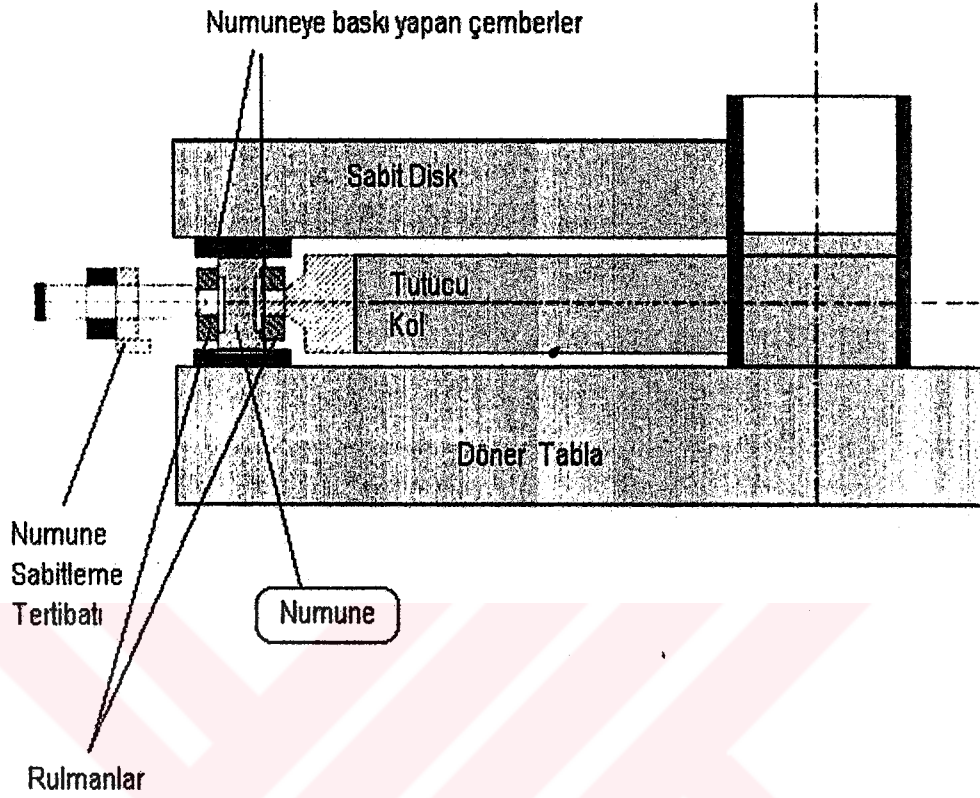
Işık Metal Mikroskobu: Mikroyapı incelemelerinde Leica DMRX kullanılmıştır. En çok 1000 büyütme yapabilen cihaz sayısal bir kamera ile bilgisayara bağlanmış ve mikroyapı fotoğrafları bu yöntemle alınmıştır.



Şekil 6.4 Mikroskop düzeneği.

Görüntü Çözümleme Cihazı: Kalıntı östenit fazının miktarının belirlenmesinde SEM laboratuvarında bulunan Leica görüntü çözümleme cihazı kullanılmıştır.

X-ışını Kırınım Cihazı: Martenzit fazının yapıda bulunduğu teyidi için Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ndeki x-ışını kırınım cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.6 Güncel kullanılan ezme cihazında numune tuturma tertibatı.

6.2 Yöntem

İlk seçilen östenitleme sıcaklığı 900 °C ve östemperleme sıcaklığı da 415 °C'dir. Ezilme öncesi ve sonrası yapılarda fark gözlenmemiş dahası her iki yapı da martenzitiktir. Nedeni araştırıldığında, 375 °C'nin üzerinde yapılan östemperleme kademesi sonucu yapıda % 11 civarında martenzit olduğu anlaşılmıştır. Bunun üzerinde en çok miktarda kalıntı östenit elde edecek ama ısıtılma sırasında martenzit oluşumuna izin vermeyecek sıcaklık olarak 375 °C seçildi.

Östenitleme süresi 30 dak ve östemperleme süresi de 55 dak'dır. Bu seçim, östemperleme kinetiği bilgileri doğrultusunda ve literatür incelemesi sonucunda yapılmıştır. Amaç en yüksek miktarda kalıntı östenit elde etmektir. Östemperleme sıcaklığını 400 °C civarına çekerek yapılacak ısıtılma işlemi kuşkusuz daha fazla kalıntı östenit elde etmemizi sağlayacaktır. Ancak 375 °C'ın üzerinde yapıda martenzit oluşturma riski daha önemlidir.

Numuneler ılık suyla ultrasonik temizleme cihazında tuzdan arındırıldıktan sonra metalografik hazırlama aşamasına geçildi. 1000 mesh'lik zımparaya kadar sulu zımparalama ve sonrasında kromoksit ile parlatma işleminden geçirildiler.

Dağlayıcı olarak Nital 2 (%2 Nitrik asit + %98 etil alkol) kullanıldı. Dağlama işlemi parlatma→dağlama→parlatma→dağlama, şeklinde yapıldı.

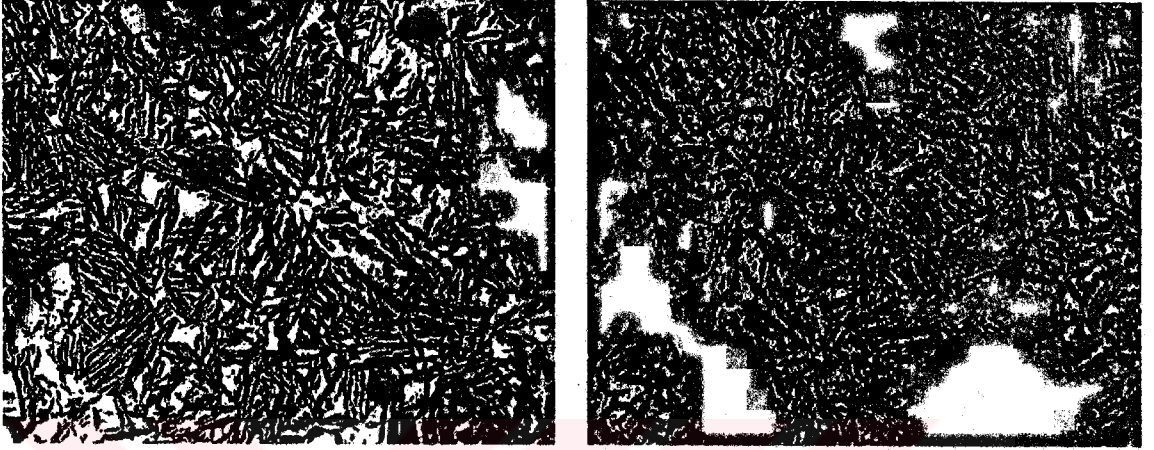
Görüntü çözümleyicide kalıntı östenit tayini yapıldı. Ezilme aşamasından sonra bu bulunan % değerleri son değerlerle karşılaştırıldı.

Deneylerin başından itibaren çeşitli yük ve süre kombinezonları denendi. Amaç en dönüşümün gözleneceği en düşük yük ve süreyi belirlemektir. Ancak dikkat edilecek nokta, süre seçiminde dayanım limitinini aşılmamasına dikkat edildi. ÖKGDD'lerin kırılma limiti yaklaşık bir değer olarak 10^{10} mertebesinde (Laub, 1991).

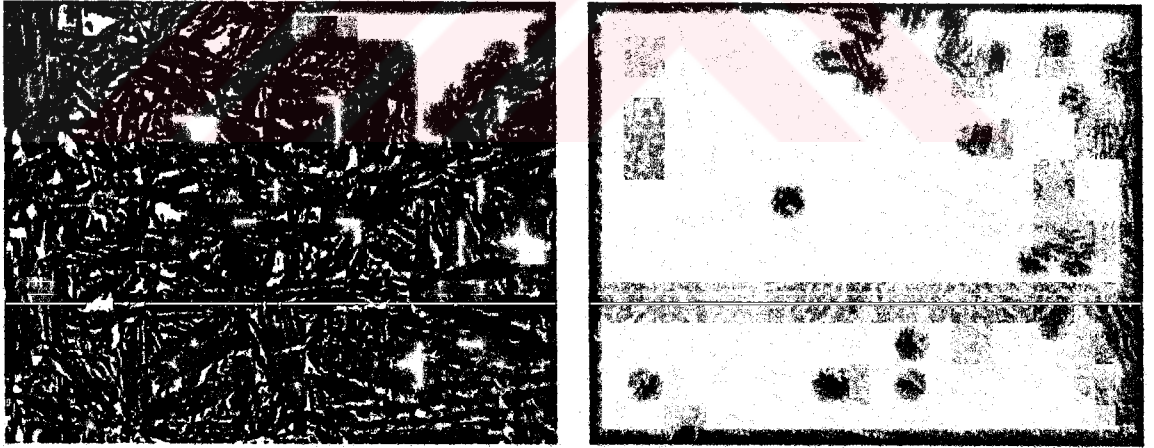
Metalografik olarak martenzit dönüşümünün belirlendiği numuneler x-ışını kırınımı yöntemiyle incelenmiştir. Birçok açıdan fazı yakalayabilmek amacıyla numune toz haline getirilmiş ve kırınım modeli bu şekilde alınmıştır. Toz haline getirilen numune amaca uygun bir mum ile birarada tutulmuştur.

7. SONUÇLAR

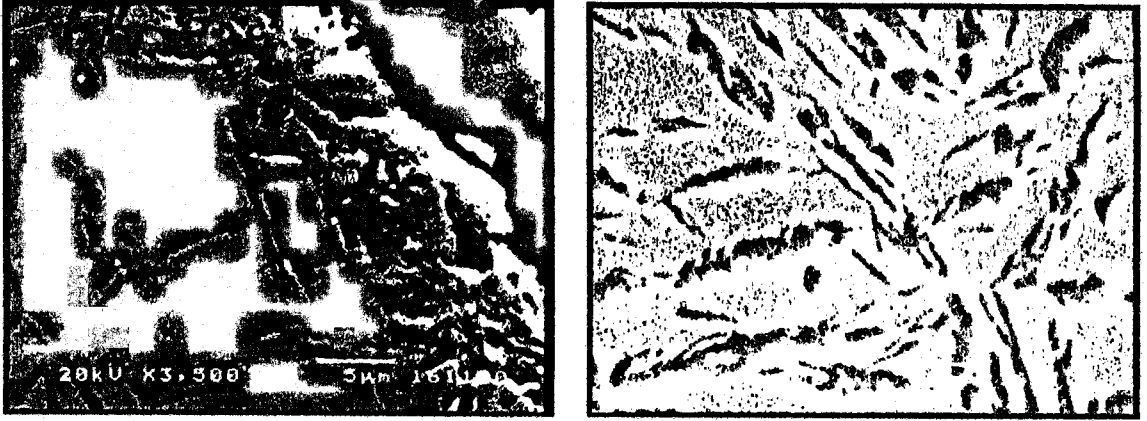
İlk yapılan deneylerden yüzeyde karbonsuzlaşma olduğu için ezilme sonunda mikroyapı değişimi tespit edilemedi. Sonuçlar kısmında ısıtıl işlem ve plastik deformasyon şartları karşılığında elde edilmiş olan mikroyapılar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Son olarak dönüşümün olduğu deney sonuçları ayrıntılı olarak verilmiştir.



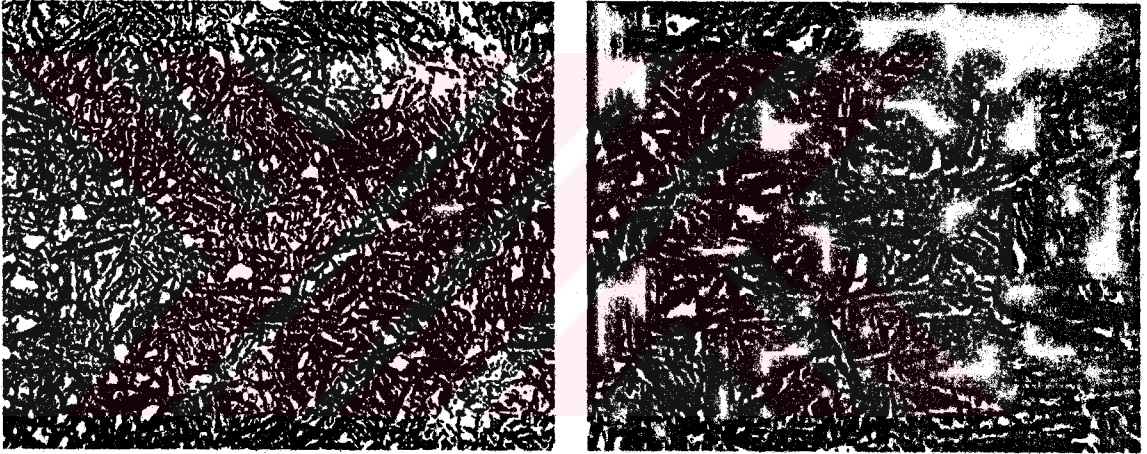
Şekil 7.1 900 °C östenitleme (30 dak) , 415 °C östemperleme (55 dak); 33,3 kg/numune, 44 saat (500x, Nital 2).



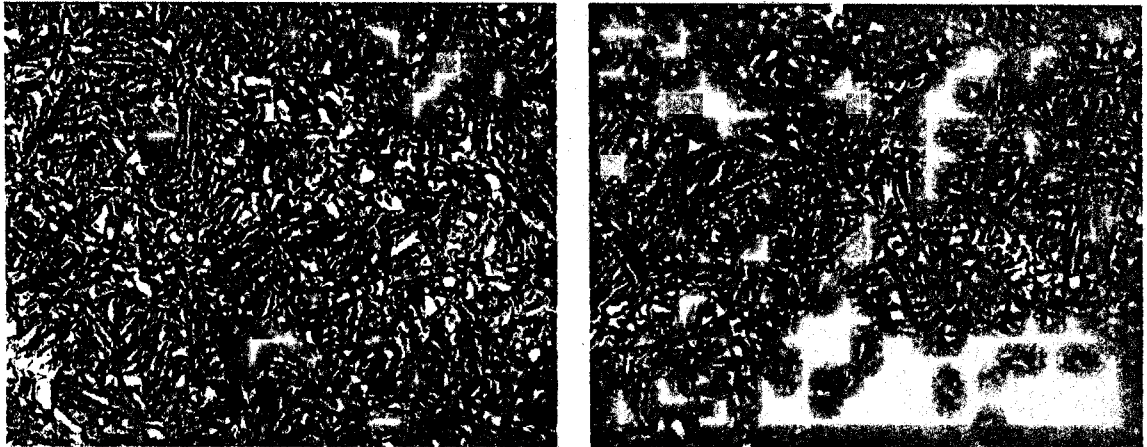
Şekil 7.2 900 °C östenitleme (30 dak) , 415 °C östemperleme (55 dak); 43 kg/numune, 65 saat (500x, Nital 2).



Şekil 7.3 Şekil 7.2'deki optik mikroskop görüntüleri bulunan numunelerin SEM fotoğrafları (3500x).

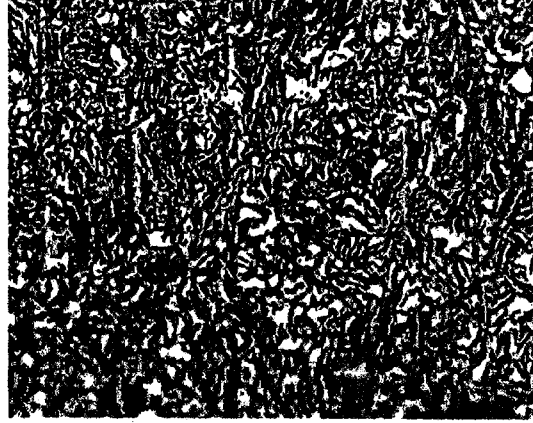


Şekil 7.4 900 °C östenitleme (30 dak) , 375 °C östemperleme (55 dak); 75 kg/numune, 72 saat (500x, Nital 2).

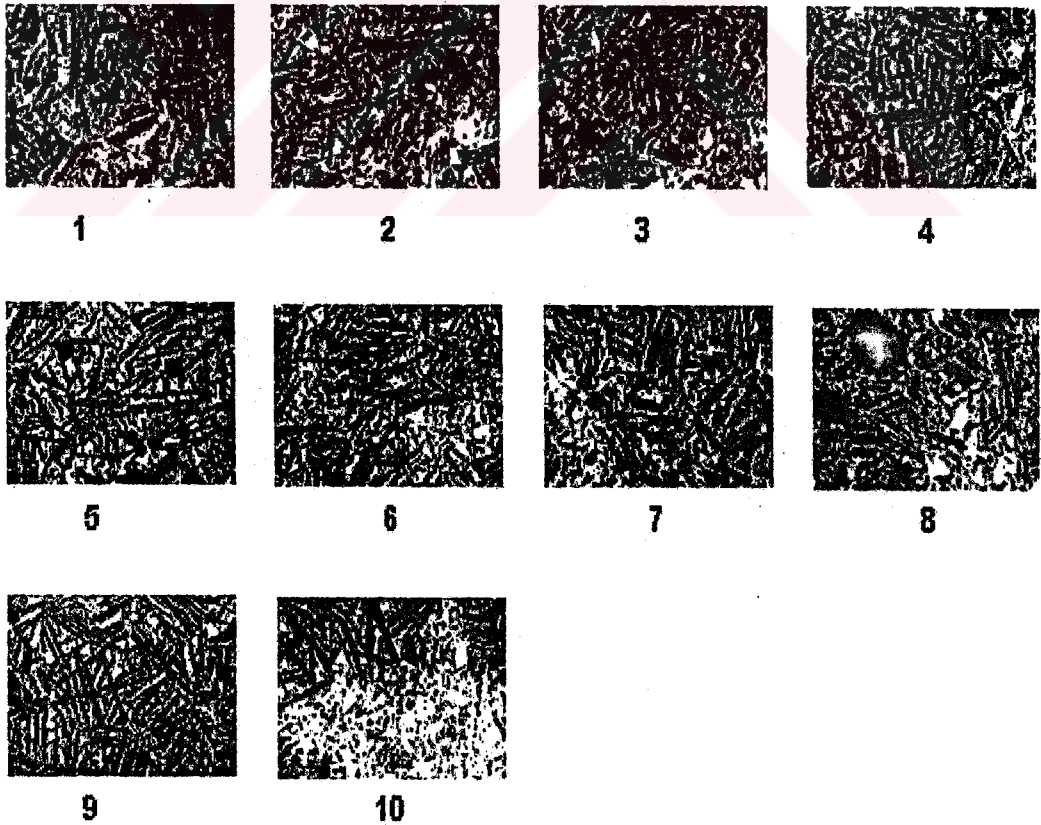


Şekil 7.5 900 °C östenitleme (21 dak) , 375 °C östemperleme (39 dak); 25 kg/numune, 6 saat (500x, Nital 2).

Östemperleme ısısal işlemi sonucu mikroyapıda perlit dönüşümüne izin verilmemiş ve martenzit oluşumu da önlenmiştir. Havada soğutma denetimli ve her deneyde aynı koşulları sağlayacak şekilde yapılmıştır. Sonuç yapı, üst beyrit ve kalıntı östenitten oluşmaktadır. Şekil 7.6'da beyritik mikroyapı fotoğrafı görülmektedir.



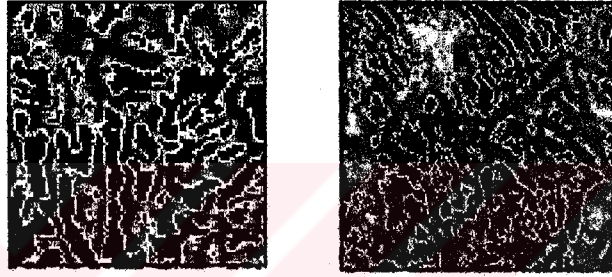
Şekil 7.6 900 °C östenitleme (21 dak) , 375 °C östemperleme (39 dak).



Şekil 7.7 25 kg/numune, 6 saat. Ezilme sonrası yüzeyden merkeze doğru eşit aralıklarla çekilmiş mikroyapı fotoğrafları. 1 no'lu, yüzeye en yakın, 10 no'lu merkeze en yakın bölgeyi ifade etmektedir (x500, Nital 2).

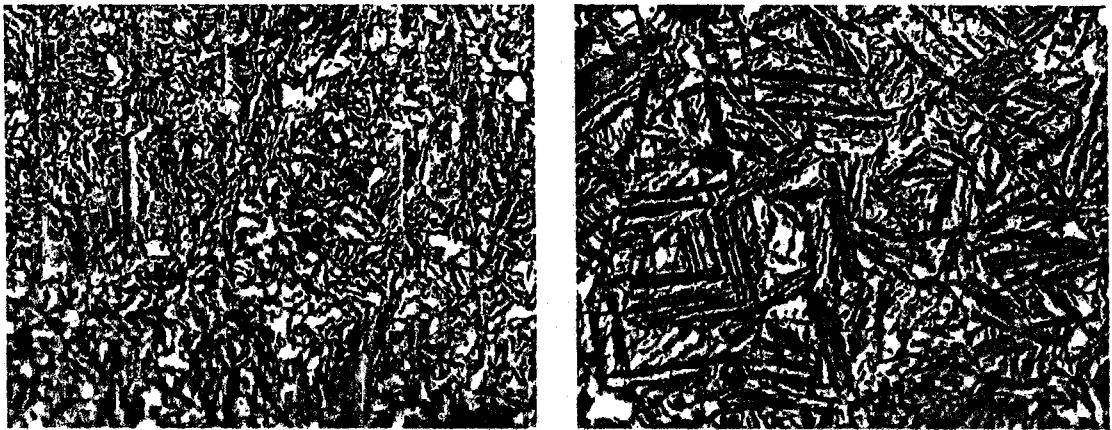
Çizelge 7.1 Ezilme öncesi ve sonrası kalıntı östenit miktarları karşılaştırması.

Ezilmeden önce ortalama % kalıntı östenit		39.88
Ezilmeden sonra eşit aralıklı 4 ortalama % kalıntı östenit	Merkez $\leftrightarrow$ Dış Yüzey	20.92
		32.18
		37.66
		40.01



Şekil 7.8 Görüntü çözümleyici çalışması sırasında numunelerin mikroyapı görüntüleri.

Ezilme işleminden önceki ve sonraki mikroyapı fotoğrafları aşağıda mukayese açısından yanyana verilmiştir.



(a)

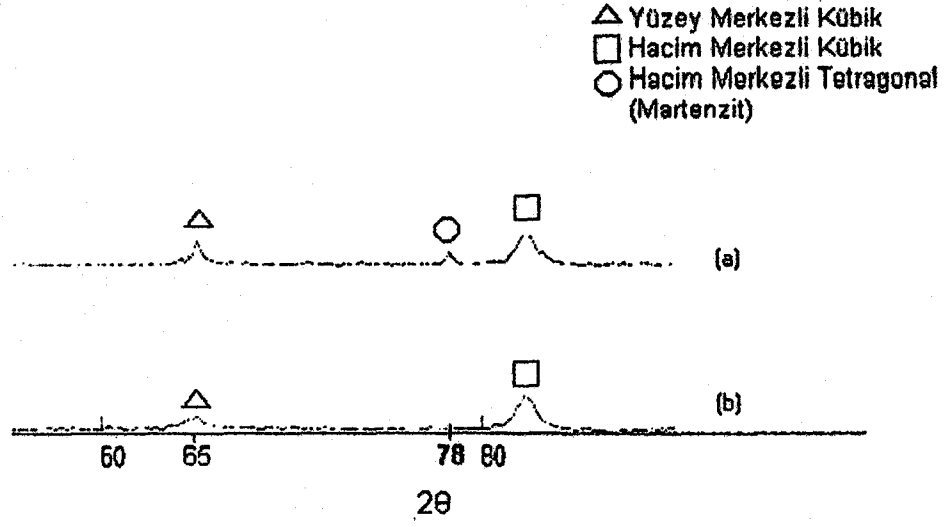
(b)

Şekil 7.9 Mikroyapı fotoğrafları (x500, Nital 2), (a) östemperlenmiş, (b) ezilme sonrası.

Şekil 7.10'da x-ışını sonucu ve Şekil 7.11'de de kırınım modelinin ilgili kısmı açıklamalı olarak görülmektedir.



Şekil 7.10 Deney numunesinin x-ışını kırınım modeli.



Şekil 7.11 Ezilmiş numunenin (a) dış ve (b) merkeze yakın bölümlerinden alınan modeller. 78 derecedeki, martenzit pikidir.

8. GENEL SONUÇLAR VE İRDELEME

Birçok çalışmada ve dahası rastlantı sonucu birçok işlemde oluşumu belirtilen kalıntı östenit martenzit dönüşümünün oluşumu bu çalışmada kanıtlanmıştır. Kalıntı östenit martenzit dönüşümünün olası (kabul görmüş) mekanizması da açıklanmıştır. Ancak hem bu dönüşümün hangi şartlar altında olduğu hem de oluşum mekanizması açıklık kazanmayan kısımlardır.

Bu çalışmada kimyasal bileşimi belirli GGG60 numunelerde hangi ısı işlem parametreleriyle hangi mekanik zorlamalar altında kalıntı östenit martenzit dönüşümünün olduğu açıklığa kavuşturulmuştur.

Kalıntı östenit martenzit dönüşümü küresel grafitli dökme demire, gerek kullanılan hammadde açısından gerekse işlem safhaları ve maliyetleri açısından çalışmada alternatif gösterildiği dövme çeliğe göre üstün bir malzemedir.

Maliyette yarattığı düşüşün yanında %10 civarındaki hafifliği de taşımacılık başta olmak üzere birçok endüstri kolunda avantaj sağlamaktadır.

Ni, Cu, Mo gibi alaşım elementlerinin etkilerinin kalıntı östenit martenzit dönüşümüne etkileri bir sonraki araştırma adımını oluşturacaktır. Alaşım elementleri eklenmesi ve miktarlarının kontrol edilmesi yoluyla dönüşümü hızlandırmak veya yavaşlatmak mümkün olabilecektir. Bu da kullanım alanını genişletecektir.

Sonuç olarak, kalıntı östenit martenzit dönüşümünün varlığının ispatlanması ve oluşum şartlarının belirlenmesi bitmiş bir araştırmayı değil birçok yeni araştırmanın kapısını aralayan bir araştırmayı göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Bahmani, M. ve Elliott, R. (1994) "Isothermal Transformation Diagrams for Alloyed Ductile Cast Iron", Materials Science and Technology Vol 10, 1050-1056
- Çelik, O. N. (1996) "Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Cu, Ni ve Mo Alaşım Elementlerinin Östemperleme Sonucu Oluşan Beynit Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi ve Sinirsel Ağ Modeli ile Değerlendirilmesi", Osmangazi Üniversitesi, Doktora Tezi
- Dodd, J. (1978) "High Strength High Ductility Ductile Irons", Cast Irons Climax Molydenum Company
- Dymski, S. ve Szykowny, T. (1996) "Investigation of Bainitic Isothermal Transformation Products in Unalloyed Cast Iron", Materials Science and Technology, Vol 12, 385-389
- Darwish, N. ve Elliott, R. (1993) "Austempering of Low Manganese Ductile Irons Part 1 Processing Window", Materials Science and Technology, Vol.9, 572-585
- Darwish, N. ve Elliott, R. (1993) "Austempering of Low Manganese Ductile Irons Part 2 Influence of Austenitising Temperature", Materials Science and Technology, Vol.9, 586-600
- Dorazil, E. (1991) "High Strength Austempered Ductile Cast Iron", Technical University, Brno, Czechoslovakia
- Grench, M., Young, J. M. (1990) "Influence of Austempering Temperature on The Characteristics of Austempered Ductile Iron Alloyed with Cu and Ni", AFS Transactions, Vol.90, 345-352
- Grosse, M., Niffenegger, M., Keller, L. (1999) "Strain-Induced Martensitic Transformation of Metastable Austenite During The Low Cycle Fatigue Process", PSI Villigen
- Shin, H. C. (1996) "Deformation Induced Martensitic Transformation of 304 Stainless Steel", Postech Materials Science and Engineering Dept.
- Johansson, M. (1977) "Austenitic-Bainitic Ductile Iron", Kymi Kymmene Engineering, AFS Transactions, Vol 77, 117-121
- Komaç, O. Ş. ve Çelik, O. N., Özsoy, A. (1993) "%1.5 Cu Alaşımlı Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Termal Çevrimli Östenitlemenin Östemperleme Sonucu Beynit Oluşumuna Etkisi", Osmangazi Üniversitesi, 221-228
- Komaç, O. Ş. (1993) "Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Östemperleme Isıl İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi", Osmangazi Üniversitesi, 211-219
- Koyabashi, T. ve Yamada, S. (1996) "Effect of Holding Time in The (α + γ) Temperature Range on Toughness of Specially Austempered Ductile Iron", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 27A, 1961-1971
- Kısakürek, Ş. E. (1987) "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir Teknolojisi:Sfero Döküm için Meydan Okumalar ve Fırsatlar", İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi
- Laub, J. (1991) "Transportation Takes Advantage of Austempered Ductile Iron", Future Transportation Technology Conference and Exposition, Oregon, USA

Lin, B. Y., Chen E. T., Lei, T. S. (1994) "The Effect of Alloy Elements on The Microstructure and Properties of Austempered Ductile Irons", National Taiwan Institute of echnology

Mi, Y. (1994) "Effect of Cu, Mo, Si, on The Content of Retained Austenite of Austempered Ductile Iron", Zhejiang University, Hangzhou

Özel, A. (1994) "GGG40-80 Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Östemperleme Şartlarının Yorulma Dayanımına Etkisi", İTÜ Doktora Tezi

MIT Materials Science and Engineering Dept., Lecture 18, 6 Nov 2001

Internet Kaynakları

1. www.ductile.org
2. http://www.austemper.com/html/what_is.html
3. <http://www.engr.ku.edu/~rhale/ae510/heattreat/sld018.htm>
4. <http://www.a2im.com/english/tech.html>

**TC. YÜSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 23.03.1978

Doğum Yeri İstanbul

Lise 1991-1993

Sarıyer Vehbi Koç Vakfı Lisesi

Lisans 1995-1999

Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fak.

Metalurji Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurumlar

1999-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi

