

**AZ ALAŞIMLI KARBON ÇELİĞİ BETON
ÇUBUKLARININ SÜRÜNME DAVRANIŞLARI ve
MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU**

101263

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Metalurji Müh. İlksen COŞAR
506970129

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Ağustos 2000
Tezin Savunulduğu Tarih : 8 Eylül 2000

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. M. Lütfi ÖVEÇOĞLU

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. E. Sabri KAYALI

Doç. Dr. Adem BAKKALOĞLU (Y.T.Ü.)

EYLÜL 2000

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. M. Lütfi Öveçoğlu'na, Prof. Dr. H. Erman Tulgar başta olmak üzere tüm saygıdeğer bölüm hocalarıma, yerinde eleştirileri ile bana yol gösteren Prof. Dr. E. Sabri Kayalı ve Doç. Dr. Adem Bakkaloğlu'na, deneylerim sırasında her türlü fedakarlığı göstermekten kaçınmayan Araş. Gör. Met. Yük. Müh. Murat Baydoğan' a, Araş. Gör. Met. Müh. M. Ali Akoy' a, Araş. Gör. Met. Yük. Müh. Arda Genç ile Müh. Nurten Dinçer' e, değerli müdürüm Sayın Ali Çoban, şefim Sayın Sezgin Karabağ ve Suat Çiğdem' e, yardımlarından ötürü teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez yazımında ofislerini kullanımına açan değerli mimarlar Tansu-Şamil Atan'lar ile tüm çalışanlarına, sonsuz sevgi ve desteği ile tüm kırtasiye ihtiyaçlarım için sevgili Pınar' a çok teşekkür ederim.

Ayrıca, hayatımda bana her konuda destek olan çok sevgili aileme, çok teşekkürler...

Göztepe, Mayıs 2000

İlksen COŞAR

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
1. GİRİŞ ve AMAÇLAR	1
2. DÜŞÜK ALAŞIMLI KARBON ÇELİKLERİNİN ÜRETİMİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİ, KULLANIM YERLERİ ve SÜRÜNME DAVRANIŞLARI	3
2.1. Giriş	
2.2. Düşük alaşımlı karbon çeliklerinin üretimi, mekanik özellikleri ve kullanım yerleri	4
2.2.1. Sıvı çelik üretimi	4
2.2.1.1. Elektrik ark ocağı teknolojisi	4
2.2.2.2. Pota ocağı metalurjisi	9
2.2.2.3. Sürekli döküm makinası	10
2.2.2. Çubuk üretimi	13
2.2.3. Kontrollü soğutma yöntemi (Tempcore)	14
2.2.4. Beton çelik çubuklarında nervür uygulaması	16
2.3. Metalik malzemelerin sürünme davranışı	18
2.3.1. Sürünme davranışı	18
2.3.2. Sürünme mekanizmaları	20
2.3.3. Sürünme olayında tane sınırlarının etkisi	22
2.3.4. İkincil sürünme bölgesi	23
2.3.5. Çelik malzemelerin sürünme davranışları	23

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
3.1. Kimyasal analiz	26
3.1.1. Kimyasal spektrometre cihazı	26
3.2. Mekanik test cihazları	27
3.2.1. Çekme deneyleri	27
3.2.2. Sertlik ölçme deneyleri	28
3.3. Sürünme deneyleri	28
3.4. Metalografik çalışmalar - Optik mikroskop	30
3.5. Taramalı elektron mikroskopisi çalışmaları	30
4. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR	32
4.1. Oda sıcaklığı deneyleri	32
4.2. Yüksek sıcaklık deneyleri	48
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
6. EKLER	69
ÖZGEÇMİŞ	81

TABLO LİSTESİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1.	DIN BSt 500S Alman Standardına göre nervür özellikleri.....	16
Tablo 3.1.	Deney numunelerinin kimyasal bileşimi.....	26
Tablo 4.1.	Oda sıcaklığı çekme deneyi sonuçları (çubuk).....	32
Tablo 4.2.	Üç farklı çubuk yüzeyinden alınan sertlik ölçümleri.....	40
Tablo 4.3.	8 mm. çaplı çekme numunelerinin çekme deneyi sonuçları.....	41
Tablo 4.4.	8 mm. çaplı sürünme numunelerinin kesit mikrosertlik ölçümleri	41
Tablo 4.5.	Şekil 4.8(c) A bölgesi EDS analiz değerleri.....	46
Tablo 4.6.	Sürünme deneylerinin sonuçları.....	49
Tablo 4.7.	Farklı numunelerin sürünme hızları.....	61

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : (a)Elektrik ark ocağı. (b)Elektrik ark ocağı (DC).....	4
Şekil 2.2 : Sıvı çelik potası.....	8
Şekil 2.3 : Sürekli döküm makinasından çıkan kütükler.....	10
Şekil 2.4 : Haddehane merdanelerinden geçirilerek üretilmiş çubuk.....	10
Şekil 2.5 : Tempcore 1. Aşama süresinin ürün mukavemetine etkisi.....	12
Şekil 2.6 : Tempcore yöntemiyle üretilmiş çubuk kesidindeki tabakalar.....	15
Şekil 2.7 : Alman Standardına göre üretilmiş çubukta nervür ölçüleri.....	17
Şekil 2.8 : Metalik malzemelerin tipik sürünme eğrisi.....	19
Şekil 2.9 : (a)Gerilmenin sürünmeye etkisi. (b)Sıcaklığın sürünmeye etkisi..	16
Şekil 2.10 : Tanelerin üçlü kesişme noktalarında boşluk oluşumu.....	19
Şekil 3.1 : ARL 3360 Kimyasal spektrometrik analiz cihazı.....	27
Şekil 3.2 : Dartec çekme cihazı.....	27
Şekil 3.3 : Misawa Seiki sertlik ölçme cihazı.....	29
Şekil 3.4 : Mayes Model TC sürünme cihazı deneyi cihazı.....	29
Şekil 3.5 : Jeol JSM T330 taramalı elektron mikroskobu.....	30
Şekil 3.6 : Trocor Northern enerji dağılım X-ışını spektrografi cihazı.....	31
Şekil 4.1 : Deney numunelerinin çekme deney sonuçları, toplu halde.....	34
Şekil 4.2 : (a) Tempcore halka resmi, (b) aynı resmin kontrast görüntüsü..	32
Şekil 4.3 : (a) Düşük karbonlu çubuk kenarından optik mikroskop resmi, (b) Düşük karbonlu çubuk ortasından optik mikroskop resmi.....	35
Şekil 4.4 : (a) Orta karbonlu çubuk kenarından optik mikroskop resmi, (b) Orta karbonlu çubuk ortasından optik mikroskop resmi.....	36
Şekil 4.5 : (a) Düşük karbonlu çubuk kenarından optik mikroskop resmi, (b) Düşük karbonlu çubuk ortasından optik mikroskop resmi.....	36
Şekil 4.6 : (a) Düşük karbonlu çubuk yan yüzeyden optik mikroskop resmi, (b) Düşük karbonlu çubuk yan yüzeyinden optik mikroskop resmi	39
Şekil 4.7 : 8 mm numunenin Kesit boyunca mikrosertlik profili	42
Şekil 4.8 : (a)Düşük C'lu çekme numunesi kopma yüzeyi SEM resmi,(b)Düşük C'lu çekme numunesinden kopma yüzeyi SEM resmi,(c)Düşük C'lu çekme numunesinden kopma yüzeyi SEM resmi,	43
Şekil 4.9 : A bölgesinden EDS analiz grafiği.....	44
Şekil 4.10 : (a) Orta C'lu çekme numunesi kopma yüzeyi SEM resmi, (b) Orta C'lu çekme numunesi kopma yüzeyi SEM resmi,	45
Şekil 4.11 : 4.9(b) A bölgesi EDS analiz grafiği.....	47
Şekil 4.12 : (a) Yüksek C' lu çekme numunesi kopma yüzeyi SEM resmi, (b) Yüksek C' lu çekme numunesi kopma yüzeyi SEM resmi.....	47
Şekil 4.13 : (a) Düşük C'lu numune sürünme eğrisi, 500°C, 250 MPa ,	50

	(b) Düşük C'lu numune sürünme eğrisi, 500°C, 325 Mpa.....	50
Şekil 4.14	: Düşük ve orta C'lu malzemelerin metalografi numuneleri.....	50
Şekil 4.15	: Düşük C'lu sürünme numunesi, boyun bölgesi optik mik. resmi	51
Şekil 4.16	: Orta C' lu malzeme sürünme eğrileri.....	52
Şekil 4.17	: Orta karbonlu kopan numunenin kopma bölgesi resmi.....	52
Şekil 4.18	: Orta karbonlu kopan numune metalografik numune resmi.....	53
Şekil 4.19	: (a) Orta karbonlu numune kopma bölgesi optik mik. resmi,	54
	(b) Orta karbonlu numune boyun bölgesi optik mik. resmi, (c)	53
Şekil 4.20	Orta karbonlu numune boyun bölgesi optik mik. resmi.....	55
Şekil 4.21	: Yüksek karbonlu malzeme sürünme eğrileri.....	56
Şekil 4.22	: (a),(b),(c),(d) Orta C'lu kopan numune kopma bölgesinde SEM	57
	resimleri (farklı büyütme ölçeklerinde).....	
Şekil 4.23	: Sürünme numuneleri, uzamayı gösteren resim.....	58
Şekil 4.24	: Aynı sıcaklık ve gerilme şartlarında üç farklı malzemenin	57
	sürünme eğrileri.....	
Şekil 4.25	: Orta ve yüksek karbonlu numuneler için sürünme hızı-gerilme	61
	diyagramı	61
Şekil 6.1	: Düşük C'lu numune oda sıcaklığı çekme deneyi ham grafiği.....	70
Şekil 6.2	: Orta C'lu numune oda sıcaklığı çekme deneyi ham grafiği.....	71
Şekil 6.3	:Yüksek C'lu numune oda sıcaklığı çekme deneyi ham	72
	grafiği.....	
Şekil 6.4	: (a), (b), (c) Düşük C'lu numune sürünme deneyi ham grafiği...	73
Şekil 6.5	: (a), (b), (c) Orta C'lu numune sürünme deneyi ham grafiği.....	76
Şekil 6.6	: (a), (b) Yüksek C'lu numune sürünme deneyi ham grafiği.....	79

AZ ALAŞIMLI KARBON ÇELİĞİ İNŞAAT ÇUBUKLARININ SÜRÜNME DAVRANIŞLARI VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Sürünme özelliği, malzemelerin yüksek sıcaklık ortamlarında, sabit yük altında zamanla deformasyona uğraması olarak tanımlanıp, özellikle metalik malzemelerin son yıllarda en çok incelenen konusu olmuştur. Literatürde spesifik olarak paslanmaz çelikler ve süperalaşımların sürünme özelliği, kullanım şartları da gözönüne alınarak detaylı şekilde incelenmiştir. Ancak az karbonlu – az alaşımlı beton çelik çubuklarında, belki de servis koşullarında yüksek sıcaklık etkisinin sıkça görülmediği düşünülerek, malzeme bilimi dalında aynı yoğun çalışma yapılmamıştır.

Ne var ki, özellikle 17 Ağustos 1999 Marmara Depreminden sonra, ülkemizde üretilen ve kullanılan beton çelik çubukların kaliteleri, mekanik özellikleri ve yorulma dirençleri üzerinde çok daha önemle durulmaktadır. Sözkonusu çelik türünde şu ana kadar yorulma dayanımı üzerine birçok çalışma yapılmış, ancak yüksek sıcaklık davranışları üzerinde ülkemizde yapılmış yeterli inceleme bulunamamıştır. Keza sürünme davranışı üzerine, diğer metalik malzemeler üzerine de yapılmış fazla bir tez çalışmasına rastlanmaması, bu özelliğin çalışılması için itici bir güç olmuştur.

Bu çalışmanın amacı, inşaatlarda kullanılan beton çelik çubukların, yüksek sıcaklıklarda, sabit gerilmeler altında zamanla uğradıkları deformasyonu deneysel olarak inceleyerek optik mikroskop ve elektron mikroskopisi gibi mikroyapısal karakterizasyon teknikleriyle de sonuçları desteklemektir. Bu şekilde, yüksek sıcaklık kaynağı bulunan (fırın, ocak vb.) yada uzun süreli yangına maruz kalmış binalardaki çelik yapıdaki olası zamana bağlı hasarlar değerlendirilmeye ve öngörülmeye çalışılmıştır.

Aynı zamanda, metalik malzemelerin ülkemizde pek fazla araştırılmamış ve dolayısıyla bilinmeyen sürünme özelliği hakkında temel bir kaynak sağlanmaya çalışılmıştır.

CREEP BEHAVIOUR AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF LOW-ALLOYED CARBON STEEL REINFORCING BARS

SUMMARY

Creep Behaviour, defined by the deformation of materials with time under high temperatures and constant stresses, is one of the most examined subjects of metallic materials during the recent years. Specifically, because of their service conditions, creep resistance of stainless steels and superalloys is studied very detailed. However, considering there is not much high temperature effect on them, low-carbon and low-alloyed reinforcing steels bars are not examined about creep deformation, in a materials science manner.

On the other hand, especially after the Marmara Earthquake on August 17th of 1999, the qualities, mechanical properties and the fatigue behaviours of reinforcing steel bars, produced and used in our country, are being studied more sensitively. Many studies were performed, related with the fatigue behaviour of this kind of material, but almost no study on the creep deformation of this kind of material is found. Additionally; only a few thesis study on the creep behaviour of metallic materials were found, and this was another motivating power, in choosing this as a thesis subject.

The main reason of this study is, defining the deformation of this material under high temperature – constant stress conditions experimentally, supporting the results with the microstructural characterisation techniques such as optical and electron microscopy. By these; the time – dependent deformation of the steel structures used in the buildings equipped with furnaces, bakery ovens etc. or after having a long – time fire is tried to be evaluated and foreseeing.

Meanwhile, a basic source about the creep behaviour of metallic materials is tried to be presented, that is not so examined and known in our country.

1. GİRİŞ ve AMAÇLAR

Az alaşımlı karbon çelikleri, inşaat sektöründe, beton içerisinde bir iskelet görevi görerek yapıya mukavemet sağlar. Bu tip malzemeler, çoğunlukla Elektrik Ark Ocağı'nda hurda ergitilmesi ve elde edilen sıvı çeliğin sürekli döküm tekniğiyle kütük haline getirilip haddehanelerde merdaneler yardımıyla şekil verilmesi şeklinde özetlenebilir[7]. En temel alaşım elementi C, diğer alaşım elementleri ise Mn ve Si'dur[1,6]. Malzemeye mukavemet kazandıran en önemli element C'dur, ancak bu elementin fazlası, malzemede kırılganlık verir, eğme testinde sorun yaratır ve karbon eşdeğerini yükselterek kaynaklanabilme kabiliyetini kötü yönde etkiler[6,9]. Çok ender olarak, C yerine, mukavemeti yükseltmek için az oranlarda V ilavesi yapılır, ancak bu elementin maliyetinin çok yüksek olması, üreticileri yeni arayışlara itmiş, bunun bir sonucu olarak da adını mekanizmasından (Core-tempering, çekirdek temperlemesi) alan bir yöntem, Tempcore yöntemi (Kontrollü Soğutma – Termomekanik işlem) ortaya çıkarılmış, zaman içerisinde de farklı firmaların yöntemi geliştirmesiyle (Termasit, Thermex, Temperit vb.) beton çelik çubuk üretiminde tercih edilen bir teknik olmuştur[10-13]. Ürün çubuğa son pasonun ardından belirli süre, debi ve basınçta su püskürtülmesiyle dış yüzeyinde martenzit oluşturulması, daha sonra havada soğuma sırasında çubuğun içindeki sıcak çekirdeğin dışındaki sertleşmiş, kırılgan katmanı tavlayarak yumuşak ve yüksek mukavemetli bir yapı meydana getirilmesi esasına dayanan bu yöntem, çubuktaki C oranını düşük tutarak, V gibi mukavemet artırıcı element katkısı gerektirmeden, yüksek mukavemetli, sünek ve kaynaklanabilme özelliği iyi bir ürün sunmaktadır[9-13].

Endüstride konstrüksiyon malzemesi olarak en sık kullanılan malzeme, şüphesiz çeliklerdir. Kullanım yeri ve servis koşullarına göre de, keza yüksek sıcaklık koşullarında, sabit gerilmeler altında çalışan makina parçaları, kazanlar, türbinler vb. malzemeler, oda sıcaklığındaki mekanik davranışlarından farklı olarak, sürünme adı verilen bir içyapısal mekanizmaya maruz kalır ve deforme olurlar[23,47]. Sürünme, sabit bir gerilme ve yüksek sıcaklıkta (gerilme, malzemenin oda sıcaklığındaki akma mukavemetinin altında ve sıcaklık da ergime sıcaklığının 0,3 – 0,4 katında olmak üzere), malzemenin zamana bağlı olarak gösterdiği deformasyondur[16,20,21]. Bu deformasyonun sonucunda, kullanım yerinin toleranslarına bağlı olarak %1-2

deformasyona uğrayan parça ya da malzeme değiştirilmelidir, aksi halde sonuç malzemenin hasara uğramasına kadar gider. Anlaşılabileceği üzere, malzemeler yüksek sıcaklıklarda, oda sıcaklığındakinin aksine, zamana bağlı olarak da plastik şekil değişimi gösterirler. Bu plastik şekil değişiminin, oda sıcaklığındaki akma mukavemetinin altındaki bir gerilme değeri sonucu meydana gelmesi, sürünme olayının önemini vurgulamaktadır. Bu yüzden, yukarıda belirtilen şartlarda kullanılan malzemelerin, sürünme davranışları incelenerek tahmini güvenli servis süreleri hesaplanmaktadır[16]. Çok ciddi hasarlar ve bunların sonucunda ortaya çıkabilecek kazalar bu şekilde önlenabilmektedir. Sürünme davranışını detaylı şekilde incelemenin önemi, yüksek sıcaklıklarda yapılan sürünme deneyleri sonucunda, literatürde yapılan çalışmaların sonucunda ortaya konmuş bazı ekstrapolasyon teknikleri ve formüllerle, aynı malzemenin, aynı gerilme altında, daha düşük sıcaklıklardaki kullanım ömürlerini hesaplama imkanı vermesidir[16,27-29,32,34-40]. Bu şekilde, bir malzemenin çok daha düşük sıcaklıklarda, yıllar sonra göstereceği plastik şekil değişimi, ya da servis ömrünü, sıcaklığı yükselterek yapılan deneylerle çok daha az sürede tahmin eder hale gelebilmek mümkündür.

Bölümün başında tanıtılmaya çalışılan beton çelik çubukları, beton binalar içerisinde kullanılmakta, dolayısıyla bina içerisinde bir yüksek sıcaklık kaynağı bulunduğunda, betonun ısıl geçirgenliği, beton kalınlığı vb. parametrelere bağlı olarak, oda sıcaklığının üzerinde çalışma koşullarına maruz kalmaktadırlar. Bu sıcaklık, çok yüksek olmasa bile, sonuçta malzeme üzerinde, zamana bağlı sabit bir gerilme söz konusudur ve sürünme çok yavaş da olsa gündeme gelecektir. Dolayısıyla, mimarisinde fırın, ocak vb. yüksek ısı kaynağı bulunduran binalarda, en azından bu ısı kaynağının etkileyebileceği mesafelerde kullanılacak beton çelik çubukların sürünme davranışları, bir binanın kullanım ömrünün 20 – 30 yıl olduğu düşünülürse, büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, yüksek karbonlu – sıcak çekilmiş çubuklarla, düşük karbonlu – Tempcore yöntemiyle üretilmiş çubukların sürünme davranışları incelenmiş ve deney sonuçları, içyapısal karakterizasyon teknikleriyle desteklenmiştir. Böylece, farklı kimyasal bileşim ve üretim yöntemleri karşılaştırılabilmiş, sürünme hızları saptanarak buradan malzemelerin kullanım ömürleri hakkında tahminler yapılmıştır. Malzemelerin ürün çubuk, çekme numunesi ve sürünme numunesi olarak, deneysel çalışmanın her aşamasında gerek optik mikroskop, gerekse taramalı elektron mikroskobu ile karakterizasyonunun yapılması, bu tip malzemeler hakkında merak edilen, üretim koşullarıyla ilgili bir çok soruya da ışık tutmaktadır.

2. DÜŞÜK ALAŞIMLI KARBON ÇELİKLERİNİN ÜRETİMİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİ, KULLANIM YERLERİ VE SÜRÜNME DAVRANIŞLARI

2.1. Giriş

Bu bölümde, inşaatlarda kullanılan az alaşımlı karbon çeliğinin (C %50 max.) üretim safhaları ve proses parametreleri basitçe anlatılmış; sıvı çelik eldesinden, haddehanede merdaneler vasıtasıyla çubuk üretimi ve son ürünün mukavemetini artırmakta kullanılan teknikler kısaca özetlenmiştir.

Daha sonra, metalik malzemelerin sürünme davranışı ile ilgili mekanizmalar tanıtılmış, literatürde bulunan ve çelik malzemelerin (paslanmaz) sürünme davranışları üzerine yapılmış çalışmalar hakkında kısa bir derleme sunulmuştur.

Böylece, tez çalışmasının ana konusu olan ve inşaat malzemesi olarak kullanılan az alaşımlı karbon çelikleri, üretiminden, mekanik özelliklerine kadar tanıtılmış, çalışmanın amacı olan sürünme davranışı hakkında teorik bilgi ve literatürde çelik malzemelerin sürünme davranışı hakkında yapılmış çalışmalar sunularak, ileriki deneysel bölümün daha iyi anlaşılması için bir teorik hazırlık yapılmıştır.

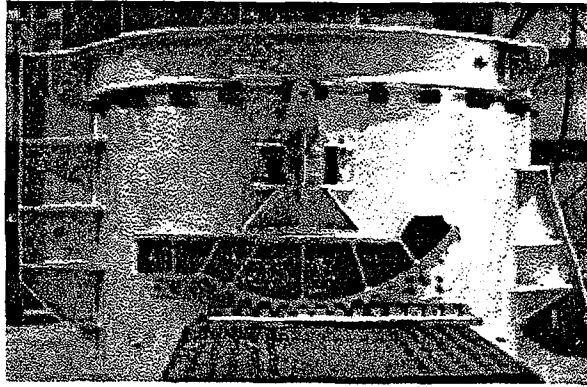
2.2. Düşük alaşımlı karbon çeliklerinin üretimi ve kullanım yerleri

Bu bölümde, endüstride çoğunlukla yapı malzemesi olarak kullanılmakta olan az karbonlu ($\%C < 0,60$) ve az alaşımlı beton çelik çubukların üretimi ayrıntılı bir şekilde açıklanmış, karbon ve diğer alaşım elementlerinin (Mn, Si) özelliklere olan etkisi ortaya konmuş ve su ile kontrollü soğutma uygulamasından (Tempcore Prosesi) [10,11,12,13] bahsedilmiştir. Günümüzde gerek yüksek fırın, gerekse elektrik ark ocağı teknolojisi [1,4,6,7,8] ile üretilen sıvı çeliği takiben haddeleme yoluyla ile uzun ürün şeklinde inşaat demiri olarak tabir edilen beton çelik çubukları üretilmektedir.

2.2.1. Sıvı çelik üretimi

2.2.1.1. Elektrik Ark Ocağı Teknolojisi

Türkiye’ de Elektrik Ark Ocağı teknolojisi ile beton çelik çubuk (ya da gerekli ara ürün olarak çelik kütük) üreten irili ufaklı yaklaşık 15 firma bulunmaktadır, yıllık üretim toplamı ise yaklaşık 16 milyon ton’ dur [2]. Şekil 2.1(a)’ da alttan döküm alma sistemli (EBT) bir elektrik ark ocağının zarf konrüksyonu görülmektedir.



Şekil 2.1(a). Elektrik Ark Ocağı – 80 tonluk, alttan döküm alma sistemli [5].

Elektrik ark ocaklarındaki prensip, elektrodlarla hurda arasında ark yaratmak ve ortaya çıkan ısı enerjisinin sıcaklığıyla hurdayı eritmektir. Kullanılan elektrodlar grafitir (sıkıştırılmış pasta halinde kömür tozu), bakır kafalarla tutturulur. Ocağın eritme gücüne; kullanılan elektrik trafosunun kapasitesine göre yüksek güç (HP), ocağın sıvı çelik hacmine yakın değerlerde (MW cinsinden) elektrik enerjisi kullanıldığında ultra yüksek güç (UHP), daha yüksek değerlere ise süper ultra yüksek güç (SUHP) isimleri verilir. Üç grafit elektrot kullanılan sistemlere alternatif akımlı (AC) ark ocağı, tek grafit elektrodlu (ve tabanda) sistemlere ise doğru akımlı (DC) ark ocağı adı verilir. İki sistemin birbirine karşı avantaj ve dezavantajları vardır. (Şekil 2.1(a), Tek elektrod DC elektrik ark ocağı kesidi) [1,7].

Kullanılan hurdanın şekli, boyutları, temizliği, alaşım elementi ve istenmeyen elementlerin oranı ve şüphesiz maliyeti, yapılacak üretimin parametrelerini doğrudan etkiler. Hurda verimini yükseltmek için harmanlama yapılır. Genellikle kullanılan hurdalar; ağır metal hurdası yada zor eriyen hurda denilen (HMS I-II; Heavy Metal Scrap / Hard Melting Scrap), belirli bir et kalınlığındaki ve yoğunluğu yüksek hurdalar, değirmen hurda (Shredded) adı verilen, genellikle otomobil hurdalarının öğütücülerde parçalanması ile elde edilen, küçük boyutlu (insan yumruğundan biraz daha büyük) hurdalar ve iç piyasa hurda denilen ve her türlü demir-çelik hurdasından oluşan yoğunluğu ile kalitesi düşük hurdalardır. Bilindiği üzere, bu hurda cinslerinin maliyeti farklıdır ve ark ocağıyla üretim sektörünün en önemli girdisi olduğundan, son derece önemlidir. İç piyasa tipi hurdalar ise kalitesiz, kirli ve yoğunluğu düşük olduğundan genellikle tercih edilmez [1,3,7]. Ocağa şarj edilirken, sepet içerisindeki hurda belirli bir düzene ve miktara göre yığılır. Klasik ark ocaklarında, taban refrakterinin zarar görmemesi için alt kısma değirmen hurdası ve diğer küçük boyutlu hurdalar, orta kısma daha ağır ve büyük boyutlu HMS I-II ve üst kısma da gaz geçişini sağlamak ve elektrot kırılmasını önlemek amacıyla yine değirmen ve bunun gibi küçük boyutlu hurdalar yerleştirilir. Yeni nesil finger tip ocaklarda ise küçük boyutlu hurdalar fingerların arasından kayıp ocağa erken düşeceğinden ve yığılma yapacağından tercih edilmez, diğer yandan çok büyük hurda parçaları, ocağa sığmama tehlikesinin yanısıra, fingerlara ve su soğutma kanallarına zarar verebilir. Sonuçta, ark ocağı teknolojinin gelişmesi, kullanılacak hurdanın önemini artırmıştır [4].

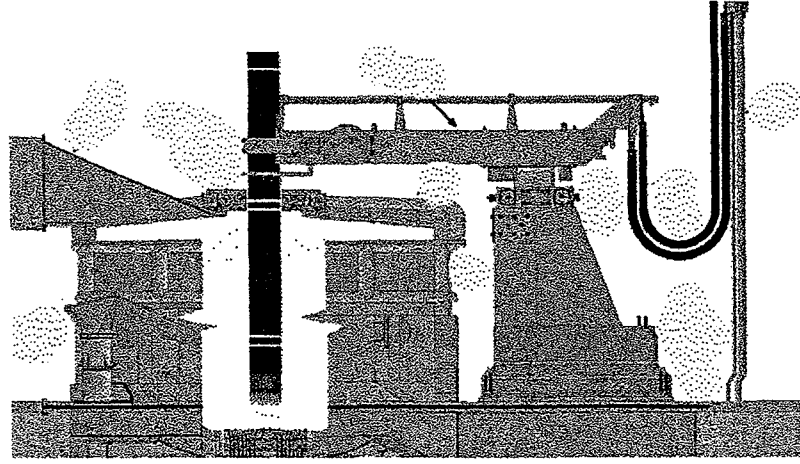
Elektrik ark ocaklarında kullanılacak hurdanın şarj edilmeden önce ısıtılması, gerek ocaktaki elektrik enerjisinden, gerekse zamandan tasarruf sağlayan ve üretimi hızlandıran, verimi artıran bir tekniktir. Yukarıda adı geçen finger shaft tipi ark

ocaklarının çelik üretimine getirdiği yenilik budur. Ayrıca daha etkin toz toplama sistemleri, üretim sırasında ortaya çıkan CO, SO₂, NO_x gibi zararlı gazların ve metal tozlarının havaya karışmasını önler. Dolayısıyla hurdaları ısıtmada kullanılan baca gazı, hurda ön ısıtma kısmından çıkar çıkmaz çok iyi bir fan sistemiyle yanma odasına alınmalı, burada yukarıda belirtilen zehirli gazlar yakılmalı ve zararsız hale getirilirken, yine zararlı metal tozları da çöktürülmelidir [4,6].

Elektrik ark ocağında, ergitme ve izabe adı verilen iki aşamada çalışılır. İlk aşamada, hurdalar elektrodlarla oluşturulan arkın verdiği ısı enerjisiyle ergitilir ve sıvı hale getirilir. İkinci aşamada ise, sıvı çeliğin C ve oksijen oranı ayarlanır, P gibi zararlı elementlerden mümkün olduğunca kurtulunmaya çalışılır. Burada yapılması gereken en önemli işlem, C – enjeksiyonu ile cürufun köpürtülmesidir. Bu sayede ocak içerisindeki refrakter malzeme de korunmuş olur [1,4,6,7].

Beton çelik çubuğu olarak üretilecek çeliğin kimyasal yapısında standarda bağlı oranlarda C, Mn ve Si bulunur, kimi zaman mukavemeti artırmak amacıyla V ilavesi de yapılmaktadır. Bu ana alaşım elementlerinin dışında, kullanılan hurdadan gelen Cu, Ni, Cr, Pb gibi gang elementleri ve yine gerek hurdadan, gerekse üretimde kullanılan kok, kireç ve ferroalaşım katkı malzemelerinden gelen P ve S de çelik bünyesinde bulunmaktadır. Kükürt ve fosfor, üretim sırasında cürufa çekilerek mümkün olan en düşük düzeye indirilirken, gang metallerini çelikten uzaklaştırmak mümkün olmamakta, standartların üzerinde değerlerle karşılaşıldığında, Sürekli Döküme verilmeden önce, daha temiz bir dökümle karıştırılmaktadır (döküm bölünmesi), bu da enerji ve üretim kaybına yol açar [1,6,7].

Fosfor, çelikler için genelde zararlı sayılan bir elementtir ve çoğu standarda göre % 0,060 değerini aşmamalıdır. Çelik içinde demirfosfit (Fe₃P) bileşiğini meydana getirir ve bu da çeliğe kırılganlık verir. Malzemenin tane yapısını kabalaştırıcı etkisi vardır. Kükürt çeliği gevrek ve yüksek sıcaklıklarda kırılgan hale getirir. Çoğu standardda, P gibi % 0,060 değerinin altında olması istenir. Kükürdün demirle yaptığı FeS ve manganle yaptığı MnS bileşikler katı çelikte zararlı yapılardır, FeS bileşiği çeliğin ergime sıcaklığını, yaptığı ötektikle 998°C ye kadar düşürür ve ileriki haddeleme aşamasında sıcak kırılganlık yaratır. MnS ise çelikte inklüzyon olarak kalır ve bu inklüzyonların yapı içerisinde mümkün olduğunca küçük taneli ve homojen dağılmış olması gerekir. Bu tür metal dışı inklüzyonların ise genel olarak yapı üzerinde süneklik ve tokluğu düşürücü etkisi vardır. Kükürt ayrıca çeliğin kaynaklanabilme özelliğini de kötü yönde etkiler.



Şekil 2.1(b). DC elektrik ark ocağı kesidi – tek grafit elektrod. Diğer elektrod, ocağın tabanındadır ve bu yüzden o bölgede iletken refrakter malzeme kullanılır. AC elektrikle çalışma ark ocaklarında ise üç elektrod bulunur. Elektrik arkı, bu üç elektrod arasında meydana getirilir. Bu üç elektrodla çalışırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, üç elektrodun da hurdaya yaklaşık aynı mesafede ark vermesidir, tek elektrod hurdaya temas ettiğinde ark oluşmaz, iki elektrodla temas halinde ise çok fazla enerji harcanır [5].

2.2.1.2. Pota Ocağı metalurjisi

Elektrik ark ocağından sıvı çelik dökümünün içine aktarıldığı pota (Şekil 2.2), pota ocağı denen platforma gelir. Burada, bir kapak ve elektrod sistemi bulunmaktadır. Dolu pota, bir araba vasıtasıyla elektrodların pota içine girip kapatılacak kapağın altına gelir.

Pota ocağı teknolojisinin çelik üretimine sağladığı faydalar şunlardır [1,6] :

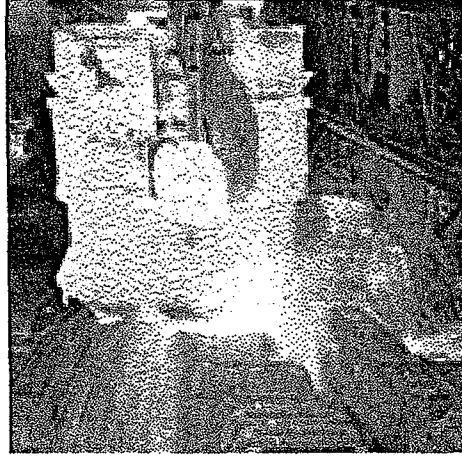
- a) EAO ile SDM arasında daha verimli, hızlı ve kalite üretim sağlar.
- b) Bazik indirgeyici cüruf ve dipten karıştırma sayesinde daha verimli bir oksidasyon ve kükürt gidermeye imkan verir.
- c) Dipten asal gazla karıştırmanın sonucu; kimyasal ve ısıl yönlerden homojen bir çelik banyosu elde edilir.
- d) Dipten karıştırmanın yeterli süre ve basınçla yapılması sonucunda, istenmeyen metaldışı kalıntılar yüzdürülerek cürufa geçirilir.
- e) Homojen banyo sayesinde daha dar analiz aralıklarında üretime imkan verir.
- f) Bu şekilde ferroalyaj tasarrufu da sağlar.
- g) Üretim senkronizasyonunun düzenli yürümesine destek verir.

Kullanılan katkı malzemeleri; ferroalyajlar (Fe-Si-Mn, Fe-Si, Fe-Mn), belirli tane boyutunda kok kömürü (karbon verici), deoksidan olarak alüminyum külçeler, cüruflaştırıcı (flaks) olarak da kireç'tir (CaO). Silisyum ve manganez de alaşım elementi olarak ilave edilmelerinin yanısıra deoksidan olarak işlev görürler.



Karıştırıcı gaz seçiminde, teknolojik faktörlerin yanı sıra, maliyet de hesaba katılır. Asal bir gaz olan Ar, malzemeye hiçbir zararı olmadığından, çok daha avantajlıdır, bazı standartlarda çelikteki çözünmüş N (ppm cinsinden), katı bir şekilde sınırlandırılmıştır. Ancak tahmin edilebileceği üzere, fiyat açısından aralarında büyük bir fark vardır. Bu nedenle, malzemeye zarar vermeyecek oranda N ile karıştırma

yapılır, fakat özellikle çeliğin mukavemetini son derece düşük oranlarda bile (% 0,05) gözle görülür şekilde yükselten V ilavesi söz konusuysa, belirli bir sıcaklığa kadar N ile karıştırılır, bu değerden sonra (1570°C) çeliğin içerisindeki N çözünürlüğü eksponansiyel olarak arttığından, bu sıcaklığın üzerinde sadece Ar ile karıştırılmaya başlanır [1,6].



Şekil 2.2. Sıvı çelik potası–dış zarf içerisinde döşeli refrakter tuğla bulunmaktadır [5].

Uygun döküm sıcaklığına getirilen ve kimyasal yapısı istenen değerlere getirilen sıvı çelik, sürekli döküm makinasına gider ve tandişler vasıtasıyla bakır kalıplara dökülür.

2.2.1.3. Sürekli Döküm Makinası

Pota ocağında uygun döküm sıcaklığına getirilmiş, gerekli alaşımlama yapılmış ve bileşimi ayarlanmış olan sıvı çelik, yine pota ile Pota Taret'i' ne getirilir. Sürekli döküm ünitesinde kullanılan ilk ekipman taret olup iki adet çatalımsı yapının dairesel bir yapı üzerine montajı ve temele bağlanması şeklinde oluşturulur. Temel amacı potayı taşımak olan taret, 180° dönüş sağlayarak bindirme döküm pratiğinin kolaylaştırılmasını sağlar. Döküm hızı yüksek olan makinalarda pota değişim zamanının kısa olması gerektiğinden pota taret'i kullanılmaktadır. Taret dönerek dolu potayı sürekli döküm makinası' nın üzerinde kurulu bulunan platformdaki tandiş' e getirerek boşaltır. Tandişlerin kullanım amacı; sürekli döküm makinasındaki bakır kalıplara sürekli sıvı çelik akışı sağlamaktır, potadaki çelik bittiğinde, diğer dolu pota gelene kadar tandiş içerisindeki sıvı çelik akmaya devam eder. Ayrıca tandişlerin sürekli dökümdeki bakır kalıp yol kadar nozülü vardır, böylece sıvı çelik aynı anda tüm kalıplara dağılır [6,8].

Osilasyon sehпасı kokilleri taşıyan ve ana çelik konstrüksyon üzerine bağlanmış, aşağı yukarı hareket ederek çeliğin kalıba yapışmasını engelleyen, kütüğün yol boyunca ilerleme hareketini kolaylaştıran mekanizmadır (Şekil 2.3, kalıplardan çıkan çelik kütükler).

Kokilin görevi, tandiştен akan sıvı çeliği endirekt soğutma ile soğutarak kütük yüzeyindeki ince tabakanın oluşmasını sağlamaktadır. Bu soğutma ve kütük oluşturma safhasında kokil osilasyon hareketine maruz kalır. Bakır kalıp kokilin en önemli parçası olup saf bakırdan imal edilmiştir. Bakır, ısı iletkenliği en iyi malzeme olduğundan sıvı çelikten aldığı ısıyı suya kolaylıkla iletir. Kalıp kokil içerisine yerleştirildiğinde aralarında bir su zarfı oluşur ve beslenen su aşağıdan yukarı doğru hareket eder. Bakır kalıp içerisinde aşağı doğru hareket eden çeliğin bakır kalıpla olan sürtünme etkisini azaltmak amacıyla kalıp içinde yağlama yapılır.

Klasik ingot kalıplarına yapılan dökümlere nazaran sürekli döküm sisteminde daha büyük yüzey alanı/hacim oranı elde edildiğinden, su soğutmalı döküm kalıbı içinde sekonder soğutma bölgesinde de su püskürtme sayesinde çok daha şiddetli bir soğutma gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca sıvı çeliğin kristalleşmesi, daha yüksek ferrostatik basınç altında meydana gelmektedir. Katılaşmadaki bu koşullar, sürekli dökümde mikro düzeydeki homojensizlikleri azaltmaktadır. Aynı şekilde, klasik usulle yapılan dökümlere kıyasla dentritik içyapı %30 oranında daha az meydana gelmekte, dolayısıyla da dentritlerarası segregasyona daha az rastlanmaktadır, bu da mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemektedir [6,8].

Sürekli döküm teknolojisinin diğer avantajları ise [6,10] :

- a) yüksek verim,
- b) enerji tasarrufu,
- c) insangücü tasarrufu,
- d) üretilen malzeme kalitesindeki artış,
- e) daha az stok ve daha kısa termin süresi,
- f) çevre ve çalışanlar açısından daha uygun çalışma şartları olarak belirtilebilir[6,10].

Yukarıda bahsedilen tandişlerdeki sıvı çeliğin sıcaklığı ise, çeliğin ergime sıcaklığının çok az üzerinde olup (yaklaşık 30°C) çelikteki karbon oranı yükseldikçe tandişteki çeliğin sıcaklığı düşürülür (min. ergime sıcaklığı +15°C). aynı şekilde, potadan tandişe beslenen çeliğin sıcaklığı da ergime sıcaklığından 65-75°C yüksektir [6].

Burada önemli bir husus, sıvı çelik içinde bulunan gazların çeliğin katılaşması esnasında yüzeye çıkamayıp malzeme içerisinde gaz boşluğu ve gözenek meydana getirmesidir. Bu gazların çelikte bulunma sebepleri; çeliğin yeterli deokside edilmemesi, reoksidasyon oluşması ve uygun olmayan kalıp yağı yada nemli malzeme kullanılmasıdır [6,8].

Sürekli Dökümü takiben, çelik kütükler haddelemeye uygun sıcaklığa getirilmek amacı ile tav fırınına verilmektedir, burada kütükler kalitelerine bağlı olarak seçilen süre ve sıcaklıkta tavlınmakta, daha sonra da haddehaneye verilerek çubuk üretimi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.3. Sürekli döküm makinasındaki kalıplardan çıkan çelik kütükler [8].

2.2.2. Çubuk üretimi

Sürekli döküm makinasından çıkan çubuklar, sıcak şekillenebilme sıcaklığına (haddeleme sıcaklığı) çıkarılıp kütüğün tümü tavlanana kadar tav fırınında bekletilir. Bu bekleme süresi, birkaç saat bazındadır. Tav fırını uygulamasında son derece önemli olan bir nokta, malzemenin oksitlenmemesidir. Bu amaçla, fırının iç basıncı, dış atmosferdeki oksijen basıncından yüksek tutulmalıdır. Fırının boyutları burada hayati önem taşımaktadır[9].

Yakıt olarak temizliğinden ve ekonomikliğinden dolayı doğalgaz tercih edilir, aksi halde fuel-oil yada LPG kullanılabilir. Fırının içesine brülörlerle alev püskürtülerek ısıtma sağlanırken, oksitlenmeden kaynaklanan tufalleşmeye tekrar dikkat çekmekte fayda vardır. Kütüklerin yüzeyinde oluşan tufal tabakası, büyük malzeme kayıplarına yol açabilir. Yeterince tavlanmadan haddeye kütük verilmesi, şüphesiz ki şekil verme aşamasında sorun yaratacaktır[9].

Fırın tabanının hareketli olması, kütük şarjı ve dışarı verilebilmesi açısından avantaj sağlarken, fırın içi atmosfer basıncını ayarlamayı güçleştirir. İtmeli tabanlı fırınlarda taban refrakteri sarfiyatı ve kütüklerin fırın içerisinde birbiri üzerine yığılması gibi sorunlar meydana gelebilir. İki tipin de birbirine kıyasla avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır, işletme koşullarına göre seçim yapılmalıdır[9].

Tav fırınında belirli süre bekletilerek tavlanan kütükler, merdanelere sokularak şekillendirilir. Merdaneler çelik yada kompozit (SiC) olabilir. Yüzeylerinde, kalibrasyon hesaplarına göre açılmış belirli çaplarda oyuklar vardır. Malzeme bu oyuklarda ezilerek ve incelendiği için hızlanarak ilerler. Uygun çapı daha kolay elde etmek ve malzemeye uygulanan basma gerilmelerini homojen hale getirmek için kütükler bir merdaneden çıktığında, çevirici yolluklar vasıtasıyla diğerine 90° döndürülerek sokulur. Malzemenin kaç merdaneden geçeceği, üretilcek son ürünün çapına bağlıdır, en ince çubuklar, tüm merdanelerden geçerken, daha kalın çaplarda çubuk üretiminde malzeme her merdaneye girmeden son aşamaya ulaşır (Şekil 2.4, ürün halde beton çelik çubuğu).



Şekil 2.4. Haddehanedeki merdanelerden geçirilerek elde edilmiş çelik çubuk [13].

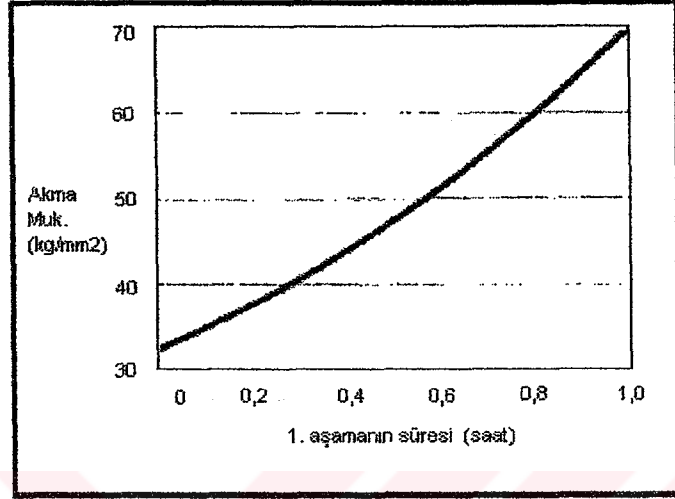
Son çubuğun nervürlü ya da düz olması, üretilmek istenen standarda bağlıdır. Nervürlü çubuk üretiminde nervürler, çubuğun girdiği son merdanede meydana gelir ve bu aşamadan sonra çubuğa herhangi başka bir şekillendirme işlemi uygulanmaz, malzeme soğutma ızgarasına alınır ve soğuyarak ilerler, paketlemeye verilir [9].

2.2.3. Kontrollü soğutma yöntemi (Tempcore)

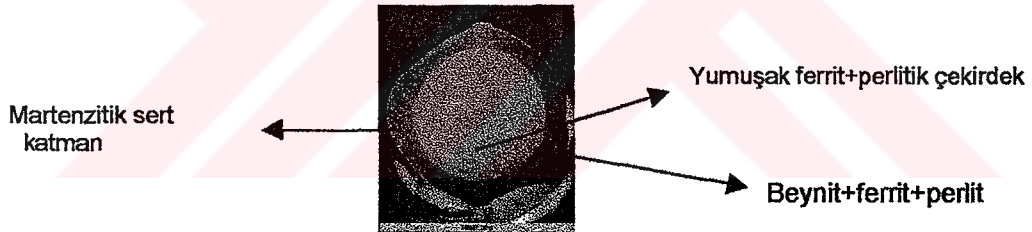
Çubuk üretiminde, ürün, istenen standardın şartlarına bağlı olarak (karbon içeriği, akma-çekme mukavemeti, sertlik-eğme dayanımı) sıcak ya da kontrollü soğutma yöntemiyle (Tempcore Prosesi) çekilmektedir. Sıcak çekilen malzemelerde mukavemet değerini nisbeten yüksek (max. %0,40) karbon ve buna bağlı manganez ve silisyum sağlarken, daha düşük karbon – daha yüksek mukavemet şartı bulunan standartlar için kontrollü soğutma yöntemi tercih edilir. Bu yöntemde çubuklar, son merdaneden çıktıktan sonra, soğutma ızgarasına varmadan önce bir kabinden geçirilir ve bu kabin içerisindeki nozüllerden çubuğa su püskürtülür. Bu yöntemde, çekirdeğin kendi dış kabuğunu temperlemesi şeklinde bir mekanizma meydana geldiğinden, bu işleme Tempcore Prosesi adı verilmiştir (Çekirdek Temperlemesi – Core Tempering). Püskürtülen su sıcaklığı, miktarı, son haddeleme sıcaklığı, bekletme sıcaklığı, su verme süresi ve kimyasal bileşim, prosesi direkt olarak etkileyen faktörlerdir. Ayrıca işlemin verimini etkileyen su verme yüzeyi; çubuk çapı ve suyun çubuğa çarpma açısı gibi parametrelere doğrudan bağlıdır. Şekil 2.5’ de, ürüne su püskürtülen ve prosesin temeli olan 1. aşamanın çubuğun mukavemetine olan etkisi görülmektedir [9,10,11,12,13].

Kontrollü soğutma prosesine giren çubuk, suyun çarpmasıyla birlikte yüzeyden içeriye doğru ani soğutmaya uğrar. Böylece dış yüzeyde sertleştirilmiş bir katman (martensitik), daha içerilerde daha yavaş soğumuş beynitik+ferrit+perlit ve en içeride ise çekirdek olarak tabir edilen ferritik+perlitik bölge bulunur (Şekil 2.6, Tempcore prosesiyle üretilmiş çelik çubuğun enine kesidindeki tabakalar).

Prosesin devamında çubuğun suyla temasının kesilmesinden itibaren, içeri kısımdaki sıcak çekirdek, yüzeye doğru kendi kendini tavlama başlar ve malzemeye yumuşaklık sağlar, martensitin aşırı sert ve kırılgan yapısı bu şekilde ortadan kaldırılırken; mukavemeti yüksek ve uygun sertlikte bir ürün elde edilir.



Şekil 2.5. 1. Aşama süresinin ürünün mukavemetine olan etkisi [11,12].



Şekil 2.6. Tempcore yöntemiyle üretilmiş çubuk kesidindeki tabakalar [13]

Bu şekilde üretilen çubuklar, yüzeylerindeki temperlenmiş martenzit yapısından dolayı, sıcak çekilmiş ürünlere kıyasla daha üstün yorulma dayanımı gösterirler. Kimyasal yapılarının daha sade oluşu ve buna bağlı olarak daha düşük karbon seviyeleri, kaynaklanabilme özelliğini de olumlu yönde etkiler [9,10,11,12,13].

Malzemenin sertliği, üretilen standardda, çapa bağlı olarak şart koşulan belirli çaptaki bir mandrel çevresinde 180°C bükülerek çubuğun büküm yerinin iç ve dış yüzeyine bakılarak kontrol edilir, malzemede herhangi bir çatlak yada belirgin çizgi bulunmamalıdır. Bu şekilde kontrollü soğutma yöntemiyle üretilmiş malzemeler, eşdeğer kimyasal bileşimdeki sıcak çekilmiş malzemeye oranla 100-150 N/mm² daha yüksek akma ve çekme mukavemetine sahiptir. Ancak yukarıda belirtildiği üzere, aşırı sertlikten kaynaklanan kırılganlığa çok dikkat edilmelidir [9].

2.2.4. Beton elik çubuklarda nervür uygulaması

Bilindiği üzere, beton elik çubuklar, binaların inşaat safhasında, beton içerisine gömülmektedir. Çubuğun beton içinde yük uygulandığında kaymaması, bu iki farklı malzemenin kompakt bir tür kompozit malzeme halinde çalışması için, birbirine tam yapışması gerekir. ubukların yüzeyleri, bu amaçla, nervrlerle profilendirilir. Burada aderans faktörü devreye girer, bu faktör, betonarme yapı içerisinde beton ile elik çubuğun kaynaşabilme özelliği olarak bilinir. elik ubuėa uygulanan gerilme arttığa, kaynaşabilme, yani aderans faktörü de önemli hale gelir.

Nervürlerin yüksekliliği ve aralığı çubuk boyunca fazla farketmez ve birim nervür alanı sabit tutulursa, aderans faktörü tam değerle uygulanır. Ayrıca enine nervr boyuna nervre (fital) temas etmeden çubuk yüzeyinde sona erdirmek, bükme – geri bükme ve yorulma mukavemetini artırmaktadır [15].

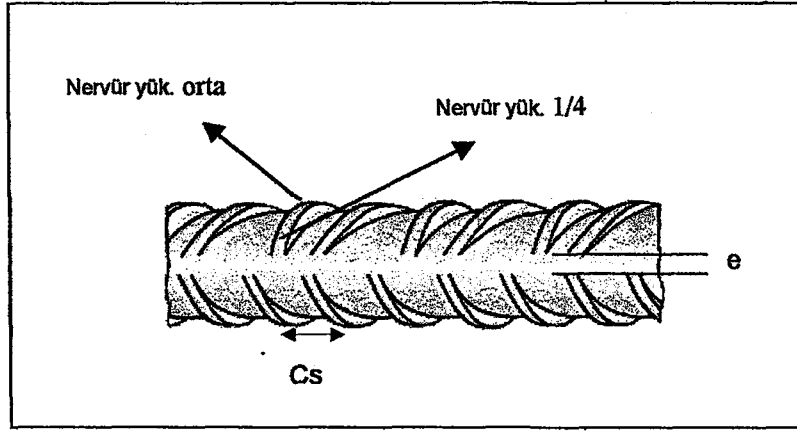
Birçok ülkenin standardında, nervür özellikleri ile ilgili şartlar öngörülmektedir. Tablo 2.1' de, en geniş standardlardan biri olan Alman standardının nervür fiğr özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.1. DIN 488 BSt 500S Alman Standardına göre nervür özellikleri [14].

<u>ap (mm)</u>	<u>Nervür</u> <u>Yksekliliėi (mm)</u>		<u>Cs</u>		<u>Boyuna Nervür (mm)</u>		<u>e</u>
	<u>orta</u>	<u>1/4</u>	<u>min</u>	<u>max</u>	<u>Geniřlik</u>	<u>Yüksek.(max)</u>	
10	0.65	0.45	5.53	7.47	1,0	1,0	2,0
12	0.78	0.54	6.12	8.28	1,2	1,2	2,4
14	0.91	0.63	7.14	9.66	1,4	1,4	2,8
16	1.04	0.72	8.16	11.04	1,6	1,6	3,2
18	1.17	0.81	9.18	12.42	1,8	1,8	3,6
20	1.30	0.90	10.2	13.80	2,0	2,0	4,0

Buradaki Cs; nervürler arası mesafe, e ise iki ters yüzdeki enine nervürlerin uçları arasındaki mesafedir.

Şekil 2.7' de, Tablo 2.1' de standardda verilen değerler, bir nervürlü çubuk örneği üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Alman standardında çubuk örneği üzerinde nervür özellikleri [9].

Bu tür malzemeler, inşaatlarda, beton içerisinde bir tür iskelet yapısı olarak kullanılır. Çimentoya mukavemet veren malzemedir. Bu özelliğiyle beton için kompozit malzeme demek yanlış olmaz.

2.3. Metalik malzemelerin sürünme davranışları

Bu bölümde, genel olarak sürünme olayının tanımı ve ilgili mekanizmalar sunulacak, daha sonra da çelikler başta olmak üzere, metalik malzemelerin sürünme özellikleri hakkında literatürde bulunan çalışmalar özetlenecektir. Tez çalışmasının konusu olduğundan doğal olarak çelik malzemeler üzerinde, daha detaylı durulacaktır.

2.3.1. Sürünme davranışı

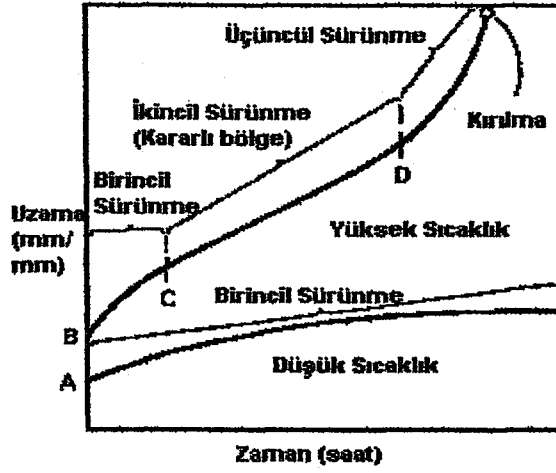
Metalik malzemeler, oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda, akma mukavemetlerinin altında bir gerilmeye maruz bırakılırsa, bir miktar elastik uzama gösterir. Gerilme kaldırıldığında da, malzeme eski haline geri döner. Ancak daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında, malzeme akma mukavemetinin altındaki gerilmelerde de plastik uzama davranışı gösterir. Bu türden kalıcı deformasyona, sürünme adı verilir. Genel bir kural olarak; metalik malzemelerde ergime sıcaklığının ($^{\circ}\text{K}$ cinsinden) yaklaşık 0,3 – 0,4 katında sürünme olayı görülmeye başlanır[16,19-23].

Metalik malzemeler, yük verildiği zaman mekanik özelliklerine göre, geçici yada kalıcı (elastik – plastik) şekil değişimi gösterirler; buna deformasyon adı verilir. Oda sıcaklığında metalik bir malzemeye yük uygulandığında, malzemenin gösterdiği deformasyon, yalnızca uygulanan gerilmeye bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda ve zamana bağlı bir deformasyon söz konusu olduğunda ise, deformasyon doğal olarak gerilme değerinin yanısıra; sıcaklık ve zamana da bağımlı bir davranış gösterir. Bu anlatılanlar, deformasyonun bir fonksiyonu olarak gösterilirse[16-21];

$$\text{Oda sıcaklığında plastik deformasyon} \quad \epsilon = f(N) \quad (2.4)$$

$$\text{Yüksek sıcaklıkta ve zamana bağlı} \quad \epsilon = f(N, T, t) \quad (2.5)$$

Burada ϵ : deformasyon (mm/mm), σ : gerilme (N/mm^2), T : mutlak sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$), t ise zaman (dakika – saat) olarak ifade edilmektedir[16,23]. Genel olarak tüm metalik malzemeler, Şekil 2.8' de gösterilen zaman – deformasyon eğrisini gösterirler. Burada sürünme hesaplarının ve kullanım ömrü tayininin yapıldığı kararlı hal (steady state) sürünme bölgesi, yani ikincil sürünme bölgesidir[16-40]. İkinci sürünme bölgesine, ileriki 2.3.4 numaralı bölümde tekrar detaylı olarak değinilecektir.



Şekil 2.8. Metalik malzemelerin tipik sürünme eğrisi (uzama – zaman)

Burada, malzemeye gerilme uygulandığı ilk anda zamandan bağımsız bir elastik uzama görülmektedir. Burada önemli bir nokta, uygulanan gerilmenin malzemenin oda sıcaklığındaki akma mukavemetinden düşük (genel olarak akma mukavemetinin 2/3 katı) olmasıdır. Akma mukavemetinden daha yüksek gerilmelerde, malzemenin zamanın yada sıcaklığın etkisini belirleyemeden kopacağı aşikardır. Ancak oda sıcaklığında uygulanan çekme yükü, yüksek sıcaklıkta uygulandığında, elastisite modülünün sıcaklıktaki artışla düşmesinden ötürü, ilk anda daha fazla elastik uzama meydana gelir. Daha sonra; zamana bağlı olarak malzeme birinci bölge davranışı göstermektedir[16,20,21].

Buradan hareketle; Yüksek sıcaklıkta, gerilme altında metalik malzemelerin uğradığı deformasyon, 4 kısma ayrılabilir;

- 1) Elastik deformasyon,
- 2) Zamandan bağımsız plastik deformasyon,
- 3) Zamana bağlı plastik deformasyon (sürünme),
- 4) Isıl deformasyon.

Plastik deformasyon ve sürünme, deformasyonun devamında malzemede hasar görülmesine yol açar[16,20,21,52].

Malzeme biliminde, tam bir "malzeme hasarı" tanımı bulunmamaktadır. Mekaniksel anlamda; parçanın belirlenmiş servis koşulları altındaki kullanım süresinin, kırılma-kopma süresine olan oranı olarak tanımlanırken, yapısal anlamda malzemede boşlukların ve plastik deformasyona bağlı sürünme çatlaklarının oluşma sınırıdır.

Bununla ilgili olarak yapılan çalışmalarda; kimi deney numunede %1-2 deformasyonun gözlenmesine kadarki ölçüm ve gözlemlerle sona erdirilirken (creep test), kimi deneyde numune kopana kadar deney sürdürülmüş ve kopma süresi saptanmıştır (rupture test). Buradaki mantık şudur; çoğu mekanik aksam parçası için malzemede %1-2 deformasyon, kabul edilebilir çalışma toleransının üst sınırıdır, bu deformasyondan sonra parça daha fazla kullanılmamalıdır. Öte yandan, numunenin kopma süresinin bilinmesi, ileride değinilecek Larson – Miller bağıntısı yardımıyla, herhangi bir metalik malzemenin sürünme sonucu kopma süresinin bilinmesi durumunda, aynı malzeme ve aynı gerilme değeri koşullarında, farklı sıcaklıklardaki kopma süresinin yaklaşık olarak elde edilebilmesidir. Bunun sağladığı fayda da; sürünme deneylerini malzemenin normal kullanım koşullarından daha yüksek sıcaklıklarda deneye tabi tutarak ve dolayısıyla daha kısa sürede kopararak, buradan edinilen veriler ışığında malzemenin daha düşük sıcaklıklardaki sürünme kopması süresinin çok daha uzun sürecek deneyler yapmadan tespit edebilme avantajıdır. Ancak bu ekstrapolasyon işleminin mantıklı olması ve doğru sonuçlar elde edilebilmesi için, numunenin normal servis koşullarındaki kullanım ömrünün en az 1/3 süresi kadarlık bir sürünme deneyi yapılması gerekmektedir. Çoğu özel çelik alaşımının normal servis koşullarını simüle eden deneylerinin 10,000 ila 100,000 saat gibi süreler aldığı belirtildiğinde, bu türde bir ekstrapolasyonun sağladığı deney süresi avantajı açıkça göze çarpmaktadır[16,29].

2.3.2. Sürünme mekanizmaları

Sürünme olayında etkin olan üç tür mekanizmadan bahsedilmektedir. Bunlar, 1) Dislokasyon Sürünmesi, 2) Yayınma Sürünmesi ve 3) İki mekanizma beraber olarak tanımlanır. Uygulanan gerilmeye ve ortam sıcaklığına göre, bu mekanizmalardan biri etkin hale gelir, ancak bu, bir mekanizma etkin iken diğer parametrenin hiç etkisi olmadığını ifade etmez. Yalnız sürünme hızında etkin olan mekanizmanın daha baskın olduğunu söylemek yanlış olmaz[16,23].

Sürünme hızı gerilmeye, dolayısıyla dislokasyon hareketlerine bağlı olduğu zaman, aşağıdaki şekilde bağlantılıdır (Güç Kanunu Sürünmesi – Power Law Creep)[16,23];

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = c \cdot \sigma^n \quad (2.4)$$

Buradaki n , gerinim üst sabiti, c , malzeme ile ilgili bir sabit ve t zaman, ε deformasyon, σ ise gerilmedir. Sürünme hızında dislokasyon hareketleri

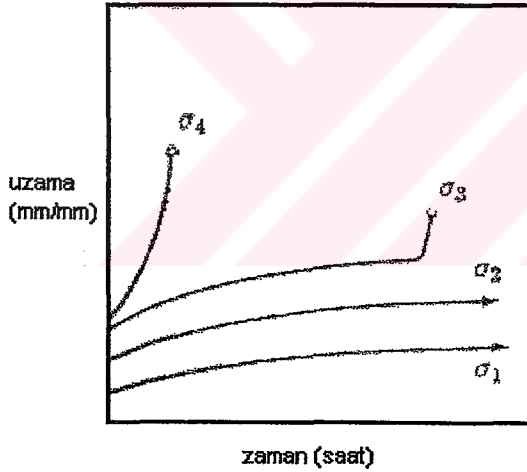
mekanizması etkin olduğunda, görüleceği gibi sürünme hızı, gerilme değeri ile üssel bir ilişki içerisindedir. Sürünme hızının sıcaklığa, dolayısıyla yayınma mekanizmasına bağlı olduğu durumda ise, aşağıdaki bağıntı geçerlidir[16,23]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A' \cdot e^{(-Q/RT)} \quad (2.5)$$

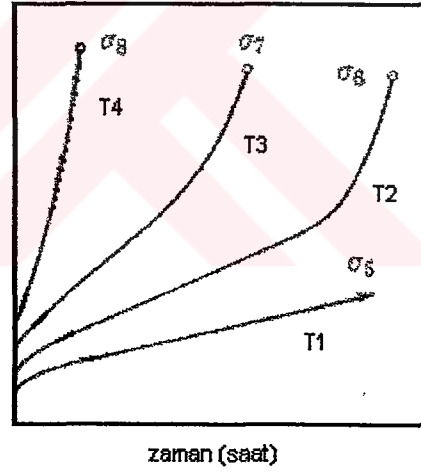
Buradaki A', malzeme sabiti, Q ise aktivasyon enerjisidir. Dislokasyon hareketleri ve yayınma mekanizmaları, yani gerilme ile sıcaklık malzemeye beraberce etki ettiği zaman ise, sürünme hızı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir[16,23]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A' \cdot \sigma^n \cdot e^{(-Q/RT)} \quad (2.6)$$

Gerilme ve sıcaklık, sürünme davranışını temelde aynı şekilde etkiler. Bu etki, Şekil 2.9 (a) ve 2.9 (b) de daha net olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9 (a) $\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$, sıcaklık sabit.



Şekil 2.9 (b) $\sigma_8 > \sigma_7 > \sigma_6 > \sigma_5$ ve $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ [23]

2.3.3. Sürünme olayında tane sınırlarının etkisi

Tane sınırlarının kayması, malzemelerin yüksek sıcaklıktaki deformasyonu konusunda bilinen bir mekanizmadır. Elastik destek, dislokasyonların kayması ve tırmanması, yayınma desteği, tane sınırlarının kayması mekanizmasını açıklamak üzere geliştirilmiştir. Tane sınırlarındaki ikinci faz partikülleri, tane sınırlarının dalgalanmasını yükseltmesi yada partiküllerin meydana getirdiği iç gerilmeler sonucu kaymayı bloke etmesiyle, tane sınırı kayması olayını engellerler[16].

Kama tipi çatlaklar, malzeme, tane sınırlarında düşük partikül yoğunluğuna sahipken üçlü kesişme noktalarında meydana gelir. Sürünme boşlukları ise; tane sınırlarındaki partikül yoğunluğu yüksek olduğu hallerde, normal tane sınırlarında gerçekleşir. Metalik malzemelerde oda sıcaklığında yada düşük sıcaklıklarda kırılma, tane üzerinden (transgranüler) şekilde meydana gelirken, yüksek sıcaklıklarda ise taneler arasından (intergranüler) kırılma olarak ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıklarda taneler, hareket etme eğiliminde olduğundan, sınırlarda kayma meydana gelir. Bu şekilde, tane sınırları arasındaki boşluklar büyüyerek birbiriyle birleşir ve sonuçta çatlak oluşumu ortaya çıkar. Sabit yük altında, taneler arasında meydana gelen dislokasyon kayması olayı, buralardaki karbür partikülleri tarafından engellendiği için, partikül yoğunluğunun yüksek olduğu, başka bir deyişle; karbon oranı yüksek malzemelerde, sürünme hızı düşük, dolayısıyla kırılma süresi de uzundur. Sürünme olayında hasar, iç boşlukların oluşumu ile çoğalır. Hasar öncelikle sürünme eğrisinin üçüncü bölgesinde başlar ve artan bir hızla ilerler[16].



Şekil 2.10. Tanelerin 3lü kesişme noktalarındaki gerilme bölgesinde boşluk oluşumu[16].

Nitekim, tane sınırlarındaki kama çatlakların çekirdeklenmesi ve büyümesi, komşu tanelerin sınırlar boyunca kayması ile meydana gelir[16].

2.3.4. İkincil sürünme bölgesi

İkincil sürünme bölgesi, yani kararlı sürünme bölgesi (steady-state creep), eğrideki en önemli kısımdır. Burada, malzeme içerisindeki dislokasyon hareketi, tane sınırlarındaki kalıntı fazlar ve parçacıklar tarafından engellenir, dolayısıyla sürünme hızı yavaşlar ve bir denge oluşur. Burada sürünme hızı sabit ya da sabite çok yakındır, nitekim bu bölgedeki doğrusala yakın eğri eğimi, sürünme hızını verir. Malzemelerde kullanım ömürleri hesabında, bu bölgeden sağlanan verilerden faydalanılır. Bu eğrinin bu bölgesinin hesaplanan eğimi, hızı verdiği gibi, 2.6 denkleminde görüleceği üzere, sürünme olayının aktivasyon enerjisi hakkında da bilgi sağlar[16,23-41].

2.3.5. Çelik malzemelerin sürünme davranışları

Özellikle kimya sanayinde, konstrüksiyon malzemeleri ve makina yapı elemanları çok yüksek sıcaklıklara maruz kalabilirler. Bu sıcaklıkta, malzemenin cinsi ve tasarımı hayati önem taşır. Çoğunlukla özetlenen sektör ve şartlarda, paslanmaz ya da diğer alaşımlı çelik malzemeler kullanıldığından, bu tür çeliklerin sürünme davranışı hakkında pek çok çalışma yapılmıştır[16,23].

Literatürde, daha önce paslanmaz çelik malzemelerde sürünme davranışı konusunda yapılan çalışmalarda, 304 – 304L cinsi çeliklerde 550°C (823°K), 12 Cr-Mo-V çeliğinde 600°C (873°K), 2-25Cr-1Mo çeliğinde ise 450 - 650°C (723 - 923°K) gibi sıcaklık değerleri uygulandığı görülmüştür[23,41].

Çok ender de olsa, beton – çelik kompozit malzemesinin zamana bağlı deformasyonunu saptamak amacıyla da beton çeliği malzemelerde sürünme özelliği incelenmiş, ancak bu çalışmalarda genellikle beton ile çeliğin ortak davranışı incelenmiş, bu yapılırken de sıcaklık yada gerilme yerine, yukarıda gösterilen deformasyon fonksiyonunun zaman parametresi üzerinde durulmuş, bu konuda da deney ya da gözlemlerden ziyade çeşitli matematiksel modellerle sonuca gidilmiştir[41-46].

Daha önce de belirtildiği üzere, paslanmaz çeliklerde yapılan bir incelemede, 304 ve 304L tipi çelikler, sürünme davranışları açısından incelenmiş ve daha az karbon içeriği bulunan 304L çeliğinin bu açıdan nispeten en zayıf malzeme olduğu görülmüştür. Çelik içerisinde, tane sınırlarına yerleşmiş karbür partikülleri hakkında çeşitli çalışmalar yapılmış, buradan yola çıkılarak yapılan 304 çeliği çalışmasında ise tane sınırlarındaki bu partiküllerin yüksek sıcaklıkta malzemenin sürünmesini önleyici bir etki yarattığı görülmüştür[24,36].

İleride sunulacak deney sonuçları da bu teoriyi destekler niteliktedir. Ayrıca, 304 çeliğinde yapılan çalışmalarda da aynı sonuca varılmıştır. 304L çeliğinin düşük karbon içeriğinden ötürü, tane sınırı mukavemeti de zayıftır. Bu sonuç, ileriki deney sonuçlarında da görüleceği üzere, tez çalışmasının sonucunu desteklemektedir.

Literatürde, dislokasyon hareketi ile yüksek sıcaklık etkisi altındaki yayınma mekanizması arasında ilişki kurmayı hedefleyen bir çok çalışma vardır. Bunlardaki ortak görüş, yüksek sıcaklığın taneleri hareketli hale getirerek tane sınırlarında gerilme meydana getirmesi ve buralarda oluşan boşlukların tanelerarası çatlak oluşturmalarının yanı sıra, sıcaklığın malzemenin tane büyümesi mekanizmasını da harekete geçirmesidir. Bunun sonucunda, malzemenin tane sınırlarında ilave gerilmeler meydana gelecektir. Tüm bu etkenlerin bir sonucu olarak da, malzeme yüksek sıcaklıkta taneler arası kırılma davranışı göstermektedir[37-40].

Özellikle C elementinin ana alaşım elementlerinden biri olduğu çeliklerde, tane sınırları çok daha fazla önem kazanır. Tanelerarasına yerleşmiş durumdaki karbon, dislokasyon hareketini kilitler ve sürünme hızını yavaşlatır. Yukarıda anlatılan 304 / 304L çeliklerinin sürünme davranışlarındaki fark da işte buradan kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere 304L çeliği, mükemmel kaynaklanabilme özelliği kazandırmak amacıyla son derece düşük C içeriğine sahiptir. Tane sınırlarında, dislokasyon hareketini yavaşlatacak karbür oranı düşük olduğu için de, sürünme hızı yükselmektedir. Böylece de kopma süresi, dolayısıyla kullanım ömrü kısalmaktadır[24,36].

Yüksek sıcaklıkta, sürünme hareketinin aktivasyon enerjisi de önemli hale gelmektedir. Zira 2.6 denkleminde, sıcaklıktaki artışın sürünme hızını doğrudan etkilediği görülmektedir.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \cdot \sigma^n \cdot e^{(-Q/RT)} \quad (2.6)$$

Sherby – Dom parametresi yardımıyla, kopma ömrü (log) – 1/sıcaklık grafiği çizilebilen bir malzemenin aktivasyon enerjisi de hesaplanabilir. Grafikteki eğrilerin eğimi, malzemenin verilen sıcaklıktaki sürünme davranışının aktivasyon enerjisi / R sabiti olacaktır[16,20,21].

Ayrıca, aktivasyon enerjisi ile kopma süresi arasında 2.7 denklemi türünden bir ilişki vardır. Aynı şekilde, sürünme davranışıyla ilgili diğer bir teori de, Larson – Miller tarafından ileri sürülen bağıntıdır[16,20,21]:

$$\text{Log } t_s - Q_s / RT = P_p \quad (2.7)$$

$$T \cdot (\log t_s + C) = P_{LM} \quad (2.8)$$

2.8 denkleminde T, Rankine cinsinden sıcaklık ($^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460$), C malzemeye bağlı bir sabit ve P_{LM} de Larson – Miller parametresidir. Yukarıda da değinildiği gibi, bu indeks yardımıyla, malzemelerin farklı sıcaklıklardaki sürünmeye bağlı kopma süreleri, laboratuvar ortamında çok daha kısa sürede yapılacak deneylerle hesaplanabilir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, tez çalışmasının deneylerinde kullanılan numuneler ve deney cihazları ile araştırma teknikleri tanıtılacaktır. Bu cihazların büyük çoğunluğu, görüleceği üzere İ.T.Ü. Kimya – Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunmaktadır, ancak çubuk ürün üzerinde yapılan kimyasal ve mekanik testler, tez çalışmasını yapan yazarın çalıştığı fabrikada bulunan cihazlarla gerçekleştirilmiştir.

3.1. Kimyasal analiz

3.1.1. Kimyasal spektrometre cihazı

Tez çalışmasında kullanılan kimyasal spektrometre cihazı, yazarın Kalite Güvence ve Kontrol Mühendisi olarak çalıştığı demir çelik fabrikasının Çelikhane Kalite Kontrol laboratuvarında bulunan, ARL 3360 model cihazdır (Şekil 3.1). Deney numunesi olarak alınacak üç farklı karbon içeriğine sahip çubuğun kimyasal analizi, yukarıda tanıtılan cihaz kullanılarak elde edilmiştir ve Tablo 3.1' de gösterilmektedir. Deneylerde kullanılan çubuklar, DIN 488 BSt 500 S ve TS 708 IIIA standardlarında üretilmiş olup, çekme/akma testlerinde gerekli değerleri sağladıkları gibi, eğme testlerinin sonuçlarında da herhangi bir çatlak yada çizgi görülmemiştir.

Tablo 3.1. Deney numunelerinin kimyasal bileşimi.

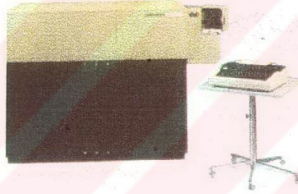
Numune No.	% C	% Mn	% Si	% Cu	% Ni	% Cr	% V	% Mo	C Eq.
1	0,18	0,63	0,22	0,21	0,11	0,06	0,000	0,006	0,32
2	0,22	0,74	0,23	0,20	0,11	0,05	0,001	0,006	0,37
3	0,36	0,95	0,25	0,25	0,15	0,10	0,001	0,010	0,55

Görüleceği gibi, üç malzemenin karbon değerleri birbirinden farklı olmakla beraber, diğer alaşım elementlerinin içerikleri arasındaki fark, yapıyı ya da mekanik özellikleri en az şekilde etkileyecek düzeyde seçilmiştir. Sadece üçünü numunenin Mn içeriği diğerlerine kıyasla yüksektir; bunun sebebi de yüksek C değerleri kullanıldığında malzemenin sünekliğini artırmak amacıyla Mn ilave edilmesinin şart oluşudur[6].

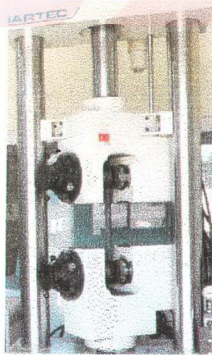
3.2. Mekanik test cihazları

3.2.1. Çekme deneyleri

Çekme testleri, yazarın çalıştığı fabrikanın Haddehane Kalite Kontrol laboratuvarında bulunan Dartec çekme cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). bu cihaza bağlı bilgisayarda kurulu bulunan yazılım sayesinde de, testlerin grafikleri elde edilmiştir. Kopmadaki yüzde uzama değerlerinden emin olmak amacıyla, deney numunesi olan çubuklar üzerinde mürekkepli kalemle mesafe ara işaretleri konulmuş, test sonundaki uzama buradan net bir şekilde okunabilmektedir.



Şekil 3.1. ARL 3360 Spektrometrik Kimyasal Analiz cihazı.



Şekil 3.2. Dartec Çekme test cihazı.

Çekme deneyleri, öncelikle 16 mm. çapındaki ürün çubuklara yapılmıştır. Buradaki amaç, daha önce tanımlanan Kontrollü Soğutma (Tempcore) yönteminin etkisini görmektir. Daha sonra bu çubuklardan, sürünme deney numunesi çapında (8 mm) çekme test numuneleri hazırlanarak tekrar oda sıcaklığında çekme testi uygulanmıştır. Bu iki deneyin sonuçları, sonraki bölümde sunulacaktır.

3.2.2. Sertlik ölçme deneyleri

Sertlik ölçme deneyleri, İ.T.Ü. Kimya – Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan Misawa Seiki Sertlik Ölçme cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3). Cihazda, 100 kg. yük asılan Rockwell B uç kullanılmıştır. Numunelerin gerek çubuk ürün halinde, gerek 8 mm. çapındaki çekme test numunesi halinde, gerekse sürünme numunesinde deney sonrası sertlik ölçümü yapılmıştır. Bu değerler sonuçların açıklandığı bölümde sunulmuştur.

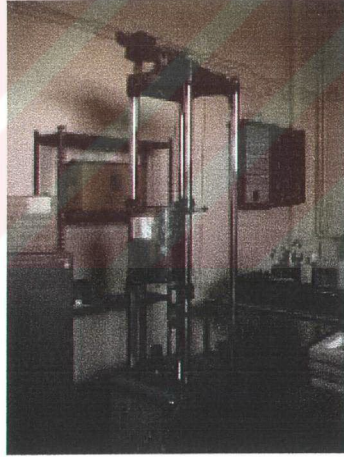
3.3. Sürünme deneyleri

Sürünme deneyleri, İ.T.Ü. Kimya – Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan Mayes Model TC sürünme cihazında yapılmıştır (Şekil 3.4). Söz konusu cihaz, maksimum 1200°C sıcaklık ve 30 kN yük kapasiteli, 1/15 oranında manivela sistemi ile numuneye gerilme uygulamaktadır. Sürünme deneylerinde, Şekil 4.1-a' da gösterilen standart sürünme numunesi kullanılmıştır. İki adet ekstansometre, numune üzerine monte edilerek, transduserler yardımıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deney boyunca numunede meydana gelen uzamalar, transduserler yardımıyla grafik çizebilen hassas bir kayıt cihazına aktarılmıştır. Her iki ekstansometreden gelen uzama değerleri, aynı grafik üzerinde zaman – uzama eğrileri şeklinde elde edilmiştir.

Sürünme deneylerinde en önemli parametrelerden biri olan sıcaklık kontrolü, üç bölgeden ısıtma yapabilen bir fırın içerisinde, Eurotherm sıcaklık kontrol ünitesi ve Pt-PtRh termokupl kullanılarak sağlanmıştır. Deneylerde, tez çalışmasında incelenen malzeme çelik olduğundan, ergime sıcaklığının (yaklaşık 1573°C – 1846 K) 0,4 katı (465 °C – 738 K) sıcaklık değerine yakın bir deney sıcaklığı (500°C – 773 K) kullanılmıştır, genelde sıcaklık sabit tutulup gerilme değerleri değiştirilmiştir (250 MPa – 325 MPa değerleri arasında).



Şekil 3.3. Misawa Seiki Sertlik Ölçme cihazı.



Şekil 3.4. Mayes Model TC Sürünme Cihazı.

3.4. Metalografik çalışmalar – Optik mikroskop

Metalografi çalışmalarında incelenmek üzere, üç ürün çubuğunun enine ve boyuna kesidinden, 8 mm. çapında hazırlanmış çekme deneyi numunelerinin enine kesidinden ve sürünme deneylerinde kopan numunenin kopma yerine yakın enine ve boyuna kesidiyle, boyun vermiş numunelerin boyun bölgesinden enine ve boyuna kesidinden metalografik inceleme numunesi hazırlanmıştır. Tüm metalografi çalışmaları, İ.T.Ü. Kimya – Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Numuneleri kesmede Buehler Sampliment 2 model disk kesme cihazı, bakalit kalıba almada Struers Prestopress model, maksimum 2 ton tek yönlü yük kapasiteli kalıba alma cihazı kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler, sırasıyla 80, 120, 240, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı zımpara kağıtlarında, su altında aşındırılarak kaba parlatıldıktan sonra, iki devir seçenekli dönen çuha üzerinde, 2 µm alümina pasta aşındırıcı ve su karışımı kullanılarak ince parlatılmış ve standart nital (%10 HNO₃ + metanol) ile dağlandıktan sonra optik mikroskop altında incelemeye hazır hale gelmiştir [47,48]

Optik mikroskopta malzemenin iç yapısı hakkında daha fazla bilgi sahibi olmak hedeflenmiş, bu amaçla X200, X320 ve X500 büyütmelere çıkılmıştır. Mercek sisteminde meydana gelen bir astigmatizm sebebiyle daha yüksek büyütmelerde görüntülerin bulanık çıkması durumuyla karşılaşılmıştır. İncelemelerin gerçekleştirildiği optik mikroskop, Zeiss marka mercek ve Sony Trinicon fotoğraf kamerası donatılıdır. Fotoğraf çekimlerinde, Ilford marka siyah-beyaz film kullanılmıştır.

3.5. Taramalı elektron mikroskopisi çalışmaları

Gerek ürün çubuklarda, gerekse 8 mm. çaplı çekme testi numuneleriyle yapılan çekme testleri ile sürünme deneyleri sonucunda elde edilen kopma yüzeyleri, malzemelerin kopma şekline göre iç yapısı hakkında daha fazla bilgi elde etmek ve özellikle sürünme davranışını gözlemlemek amacıyla, İ.T.Ü. Kimya – Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarındaki JEOL JSM T330 model taramalı elektron mikroskopunda incelemeler gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.5). Görülmek istenen yapıya ve film netliğine bağlı olarak, X350' den X15000' e

kadar büyütme değerleri kullanılmıştır. Ayrıca seçilen bölgeler üzerinde elementel dağılımı gözlemek amacıyla Trocor Northern marka EDS (Enerji Dağılım X – Işını Spektrografisi) cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.5. Jeol JSM T330 Taramalı Elektron Mikroskop cihazı.



Şekil 3.6. Trocor Northern EDS (Enerji Dağılım X – Işını Spektrografisi) cihazı.

4. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar sunulacak ve ilgili yorumlar yapılarak malzemeler arasında karşılaştırmalar yapılacaktır. İlk aşamada ürün çubuklar üzerinde, oda sıcaklığında yapılan deneyler ve sonuçları, ikinci aşamada ise, yüksek sıcaklık ortamında yapılan sürünme deneyleri sonuçları verilecektir. Ayrıca her iki aşamada da, mekanik deneyler sonrası gerçekleştirilen mikroyapısal karakterizasyon çalışmalarının (optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu) sonuçlarında elde edilen fotoğraflar sunularak, malzeme özellikleri hakkında daha fazla bilgi ve karşılaştırma imkanı sağlanacaktır.

4.1. Oda sıcaklığı mekanik deneyleri

Deneylerde kullanılacak malzemelerin kimyasal bileşimi, Tablo 3.1' de verilmişti. Bu ürün çubuklara ait, oda sıcaklığında yapılan çekme deneyi sonuçları, Tablo 4.1' de verilmektedir.

Tablo 4.1. Oda sıcaklığında ürün çubuklar üzerindeki çekme deneyi sonuçları.

Numune No.	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	% Uzama
1(Düşük C)	560	661	18
2 (Orta C)	519	639	18
3 (Yüksek C)	416	692	18

Tabloda görülebileceği üzere, Tempcore yöntemiyle üretilmiş 1 ve 2 numaralı çubukların akma mukavemetleri, 3 numaralı sıcak çekilmiş yüksek karbonlu malzemeye nazaran son derece yüksektir; bu nisbeten düşük C değerleri ve Tempcore yöntemi sonucunda oluşturulan yumuşak beynitlik – perlitik ve tavlanmış kısmi martenitik yapının etkisidir. Ayrıca üç numunede de C içeriği yükseldikçe akma mukavemetinin düşmesi, yapının sünekliğinin söz konusu alaşım elementinin varlığından olumsuz yönde etkilendiğini göstermektedir, ki bu da beklenen bir sonuçtur.

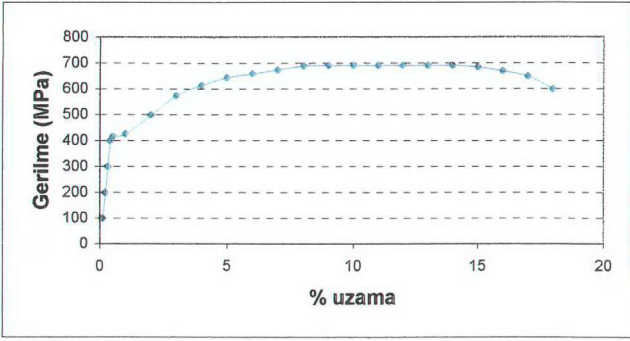
Tablo 4.1' de gösterilen çekme deneylerinin Dartec çekme cihazı ve kurulu yazılımından elde edilen deney verileri ve grafikleri, Ekler kısmında, Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3' te verilmektedir. Cihaz çıktısında verilen grafik, görülebileceği üzere Gerilme (N/mm^2) – Uzama (mm, deplasman burada uzama anlamında kullanılmaktadır) grafiğidir, bu grafikler, mühendislik formatına uygun olması için Microsoft Excel programında Gerilme (N/mm^2) – Yüzde uzama (mm/mm) grafiği haline getirilmiştir. Şekil 4.1' de, karşılaştırma kolaylığı sağlanması için üç numunenin söz konusu grafikleri bir arada sunulmuştur. Bu grafiklerden görüleceği üzere, malzemelerin çekme mukavemetleri fazla bir değişiklik göstermezken, akma mukavemetleri açık farklar sergilemiştir. Bu davranışların açıklaması yukarıda yapılmıştır.

Çekme deneyi numunelerinin enine kesitleri ve kopma yüzeyleri, sırasıyla optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Şekil 4.2' te, düşük karbonlu çubuğun enine kesidinden, makro dağlama sonucunda elde edilen, Tempcore yönteminin tipik davranışı olan tabakalar gösterilmektedir. Bu şekil ile ilgili olarak, çubukların orijinal çapının 16 mm., tabakaların gösterildiği numune çapının ise 10 mm olduğu önemle ifade edilmelidir. Zira 16 mm. çapından alınan numune kesidinde, en dıştaki martenzitik tabaka daha kalın olarak ortaya çıkacaktır. Fakat 16 mm. çaptan 10 mm. çapa inildiğinde bile en dış halkanın ince de olsa görülmesi ve daha içerideki ikinci halkanın yaklaşık 8 mm. çapında görülmesi, bu ürünlerin Tempcore yöntemi nüfuziyetinin çok yüksek olduğunu göstermektedir.

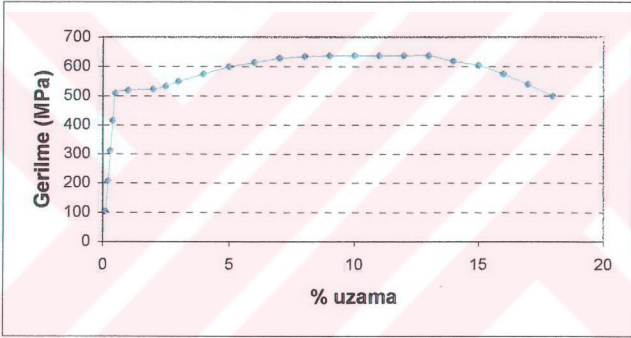


Şekil 4.2(a) ve (b). Tempcore tabakaları. İlk şekil normal fotoğraf görüntüsü, ikincisi ise halka yapısının daha net görülebilmesi için resim üzerinde, Paint Shop Pro 5 programında yapılan histogram – kontrast ayarları sonucunda elde edilen görüntüdür. En dışta koyu martenzitik yapı, daha içeride beynitik-perlitik yapı ve en içeride de perlitik-ferritik yapı halkaları görülmektedir.

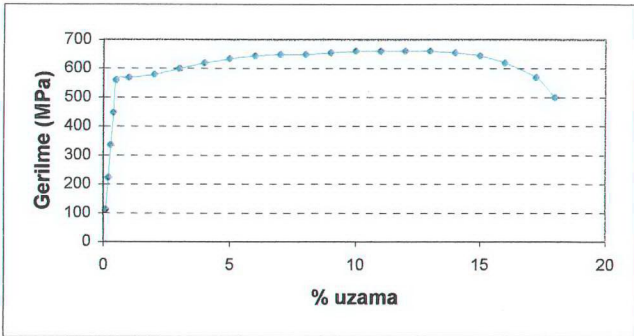
Düşük karbonlu çubuğa ait enine kesit optik mikroskop resimleri, Şekil 4.3' te görülmektedir. Karbon oranının düşük olması, resimde beyaz görülen perlit fazının diğer malzemelere kıyasla daha az yer tutmasına yol açmaktadır. Tanelerin diğer malzemelerin tanelerine oranla daha koyu renk olmasının sebebi de aynı şekilde,



Şekil 4.1(a). Yüksek karbonlu çelik çubuk, oda sıcaklığı.

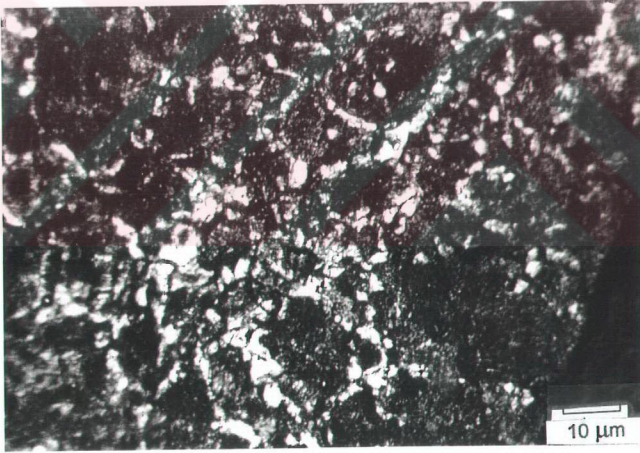


Şekil 4.1(b). Orta karbonlu çelik çubuk, oda sıcaklığı.

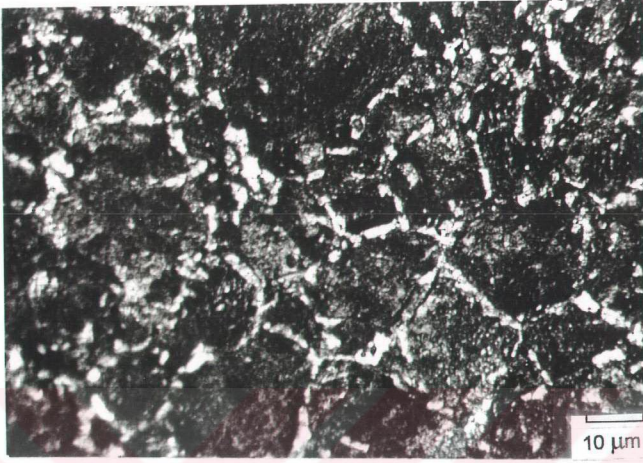


Şekil 4.1(c). Düşük karbonlu çelik çubuk, oda sıcaklığı.

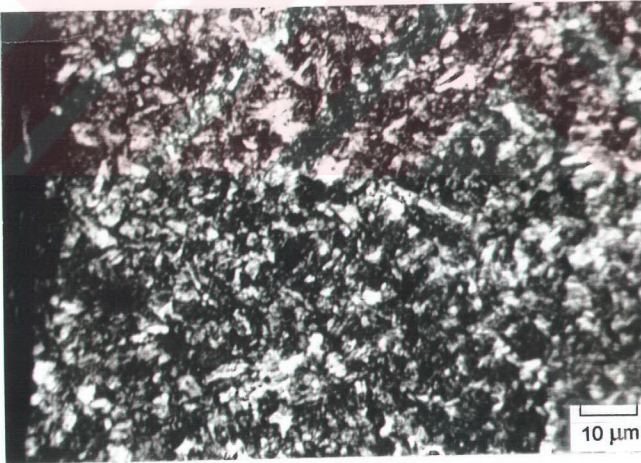
karbon oranının en düşük malzeme olması, yani en yoğun ferrit fazına sahip olmasıdır. Ayrıca dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da, çubuğun kenarından alınan fotoğrafta (Şekil 4.3(a)) görüleceği üzere, tanelerin daha küçük ve yapısının bozulmuş olmasıdır. Bu da şüphesiz Tempcore işleminin bir sonucudur. En dıştaki martenzitik katman, içerideki perlitik-ferritik içyapıdan ayırdedilebilmektedir. Nitekim Şekil 4.4' te de orta karbonlu çubuğa ait enine kesit optik mikroskop resmi sunulmaktadır ve çubuk kenarında aynı küçülmüş tane şekli görülebilmektedir. Şekil 4.4(b)' de, çubuğun ortalarından alınan resimde, aynı yapının daha az olmakla beraber devam ettiği görülmektedir. Bunun sebebi, Tempcore prosesinde hakim olan su sıcaklığı, basıncı, debisi, süresi, hadde hızı gibi parametrelerdir. Düşük ve orta karbonlu malzemeler arasındaki C içeriği farkı çok azdır, ferrit taneleri arasındaki perlit fazının (beyaz tane araları) ve tane içindeki çözünmüş karbonun verdiği renk farkı açıkça seçilebilmektedir. Tüm optik fotoğraflarındaki büyütme değerleri, mercek büyütmesi, fotoğraf baskı büyütmesi ile çarpılarak, reel büyütme olarak hesaplanmış ve bu şekilde verilmiştir.



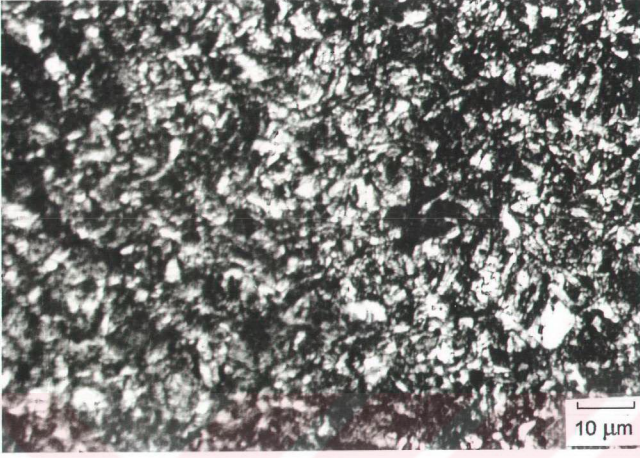
Şekil 4.3(a). Düşük karbonlu çubuk kesidinin kenara yakın bölgesinden alınan optik mikroskop görüntüsü, X1120 büyütme.



Şekil 4.3(b). Düşük karbonlu çubuk kesidinin orta bölgesinden alınan optik mikroskop görüntüsü, X1120 büyütme.



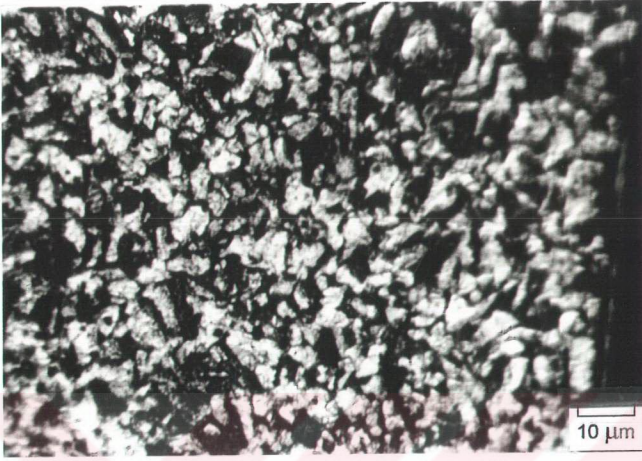
Şekil 4.4(a). Orta karbonlu çubuk kesidinin kenara yakın bölgesinden alınan optik mikroskop görüntüsü, X1120 büyütme.



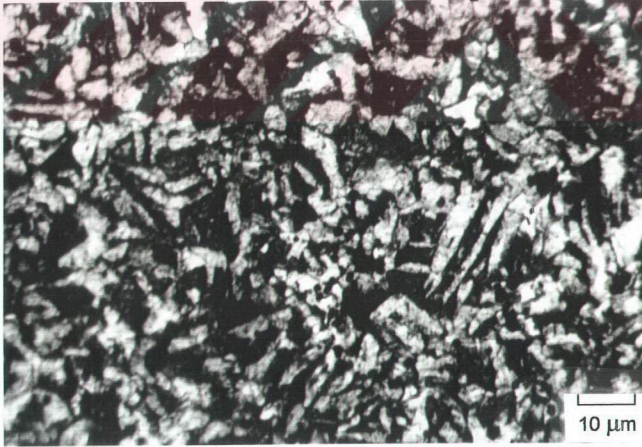
Şekil 4.4(b). Orta karbonlu çubuk kesidinin orta bölgesinden alınan optik mikroskop görüntüsü, X1120 büyütme.

Yüksek karbonlu çubuğun kenar ve ortasından alınan optik mikroskop görüntüleri, Şekil 4.5' te sunulmaktadır. Gerçekten de, yüksek karbonun farkı hemen seçilebilmektedir, tanelerarasındaki perlit fazının yoğunluğu, fotoğrafın bütünündeki beyaz bölgelerin neredeyse yarı yarıya olmasına sebep olmaktadır. Görülebilecek diğer bir husus da, tane yapısının çubuk kenarı ile ortasında hemen hemen aynı olmasıdır; yalnızca çubuğun içlerine doğru perlit fazı, dentritik şekil de göstermeye başlamıştır. Malzemenin kenarı ile ortası arasında soğuma süresi farkından kaynaklanan bu değişikliğin dışında bir değişiklik görülmemesi, şüphesiz bu ürünün Tempcore benzeri bir işlem görmeden, sıcak çekilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

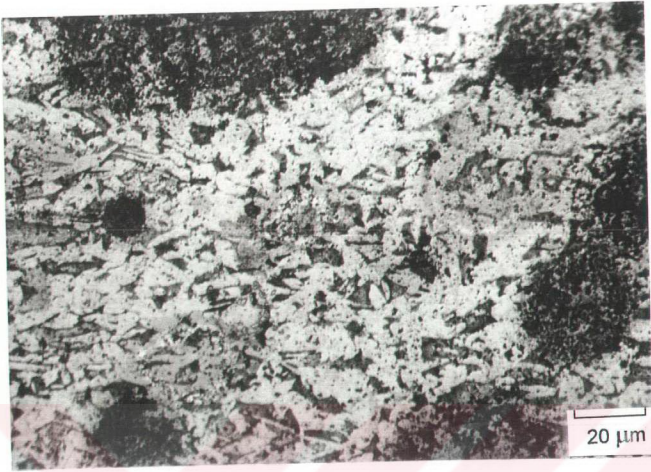
Şekil 4.6' da ise, düşük karbonlu çubuğun yan yüzeyinin kesidinden alınan optik mikroskop görüntüleri sunulmaktadır. Martenzit fazı, daha net görülebilmesi için, X700 ve X1750 büyütmelerde incelenmiştir.



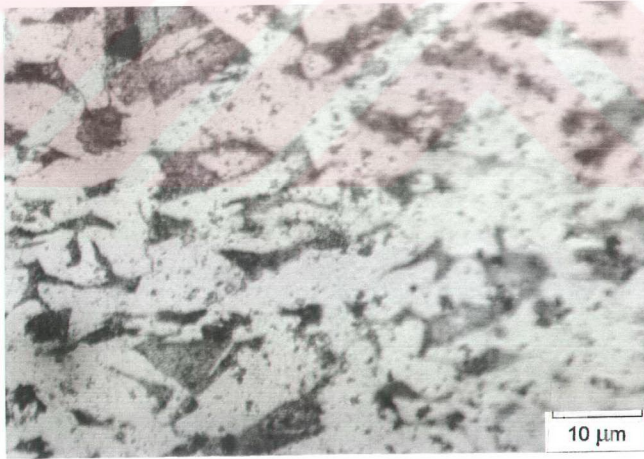
Şekil 4.5(a). Yüksek karbonlu çubuk kesidinin kenara yakın bölgesinden alınan optik mikroskop görüntüsü, X1120 büyütmede.



Şekil 4.5(b). Yüksek karbonlu çubuk kesidinin orta bölgesinden alınan optik mikroskop görüntüsü, X1120 büyütmede.



Şekil 4.6(a). Düşük karbonlu çubuk yanal yüzeyinden alınan optik mikroskop görüntüsü, X700 büyütmede.



Şekil 4.6(b). Düşük karbonlu çubuk yanal yüzeyinden alınan optik mikroskop görüntüsü, X1750 büyütmede.

Çubuk ürünlerin üretim şekillerinin mekanik özelliklerine olan etkisini daha detaylı vurgulamak amacıyla çubuk yan yüzeylerine sertlik ölçme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları, Tablo 4.2' de sunulmaktadır.

Tablo 4.2. Üç farklı malzemenin yanal yüzeyinden alınan sertlik ölçümleri, H_{RB}

Numune / Ölçüm no.	Yüksek karbon	Orta karbon	Düşük karbon
1	85	100	95
2	86,5	98,5	91,5
3	85	99	92,5
4	88,5	101	90
5	90	99	95
Ortalama Sertlik	87	99,5	93
Standart sapma	2,02	1,00	2,20

Görülebileceği üzere, yüksek karbonlu malzemenin sertliği en düşük iken, Tempcore yönteminin sonucunda meydana gelen martenzitik dış kabuk sebebiyle, düşük ve orta karbon malzemelerin sertlikleri daha fazladır. İkisini kendi arasında kıyasladığımızda da, karbon oranı daha yüksek olan orta karbonlu çubuğun sertliğinin daha yüksek çıkması, beklenen bir sonuçtur.

Çubuk haldeki numunelerin üretim şartlarının ve kimyasal bileşimlerinin faz yapılarına olan etkilerini göstermek amacıyla yapılan çalışmalardan sonra, çubuklar, 8 mm çapına kadar tomalanarak çekme deneyi numuneleri hazırlanmıştır. Bunun sebebi, ileride sonuçları sunulacak olan sürünme deneyinde kullanılan standart sürünme numunesinin çapının 8 mm. olmasıdır. Dolayısıyla bu çapa inildiğinde, ürün çubukların Tempcore yönteminden kaynaklanan mukavemet artırıcı özelliği azalmakta, ya da tamamen kaybolmaktadır. Sürünme deneylerinde, malzemelerin oda sıcaklığındaki akma mukavemetinin yaklaşık 2/3 oranında gerilme uygulanması gerektiğinden, malzemelerin bu çaptaki ve çubuk hallerinden farklı akma mukavemetleri bilinmelidir.

Bu amaçla hazırlanarak teste tabi tutulan 8 mm. çaplı numunelerinin çekme deneyi sonuçları, Tablo 4.3' de sunulmaktadır.

Tablo 4.3. 8 mm. çaplı çekme numunelerinin deney sonuçları.

Numune No.	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	% Uzama
1 (Düşük C)	520	539	22
2 (Orta C)	503	582	19
3 (Yüksek C)	426	685	22

Tablo 4.3' ten de görülebileceği üzere, Tempcore ürünü çubukları 16 mm'den 8 mm. çaplı çekme deneyi numunelerine indirdiğimizde, akma ve çekme mukavemetleri kayda değer bir fark göstermiştir. Bunun sebebi, yapıya mukavemet kazandıran martenzitik dış kabuk, beynitik-perlitik halka gibi katmanların, torna ile kaldırılmış olmasıdır. Fakat yine de, bu malzemeler sadece nisbeten düşük karbon içerikleriyle bu mukavemetleri de sağlayamazlar, dolayısıyla, bu çapa indirildiğinde bile yapıda hızlı soğutmanın etkisinin kaldığı söylenebilir, ancak bu etki martenzitik yapıdan değil, hızlı soğutmanın tane boyutu küçültücü etkisinden kaynaklanmaktadır.

Diğer yandan, 8 mm çaplı sürünme deneyi numunelerinde Tempcore etkisinin ortadan kalktığını göstermenin en açık yollarından biri olarak, üç farklı çubuğun kesidi boyunca, 0,5 mm'de bir mikrosertlik ölçümleri, 200 gr yükü alınmıştır (Tablo 4.4). Burada net bir şekilde görülmektedir ki kesidin kenarından merkezine kadar mikrosertlik değerleri, beklenildiği gibi yüksek karbonlu sıcak çekilmiş malzemenin yanı sıra, Tempcore ürünü numuneler için de değişmemektedir, bu da en dıştaki martenzitik sertleştirilmiş tabakanın yok edildiğini gösterir (Şekil 4.7). Dolayısıyla üç malzemenin sürünme özelliklerine sadece kimyasal yapılar etki etmektedir.

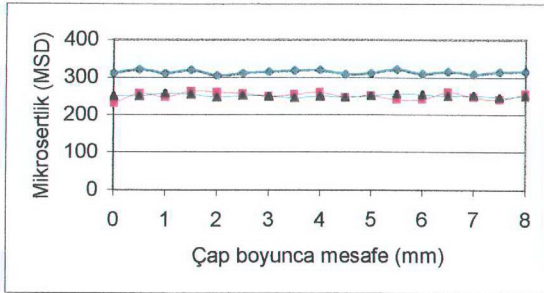
Tablo 4.4. 8 mm çaplı sürünme numuneleri kesidinde mikrosertlik profili.

Çubuk kesidi boyunca mesafe (mm)	Yüksek C (HR _v)	Orta C (HR _v)	Düşük C (HR _v)
0	312	230	250
0,5	321	257	250
1,0	312	248	257
1,5	320	264	254
2,0	305	260	248
2,5	311	258	252
3,0	315	250	250
3,5	318	254	246
4,0	320	260	250
4,5	308	248	248
5,0	312	252	252
5,5	321	240	256
6,0	310	242	254
6,5	316	260	250
7,0	309	248	252
7,5	314	240	246
8,0	316	256	250

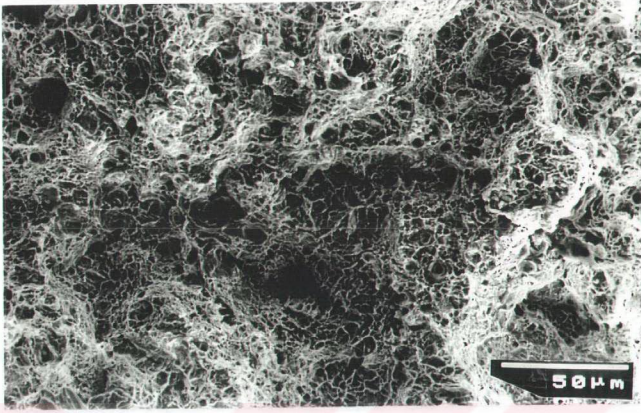
Daha önce çubuk halde yapılan kesit incelemesinde ise, Tempcore ürünlerinde halka yapısının yaklaşık 1–1,5 mm içeriye kadar nüfuz ettiği görülmüş, bu tabakanın mikrosertliği ise orta karbonlu Tempcore ürünü malzeme için 840 HRV, düşük karbonlu malzeme için 670 HRV olarak belirlenmiştir. Bu çok yüksek sertlik değerlerine 8 mm çapa indirilmiş sürünme numunelerinde rastlanmaması ve sertlik değerinin tüm kesit boyunca homojen olması, Tempcore tabakasının ortadan kaldırıldığını ve sürünme deneylerine etki etmediğini göstermektedir.

Ayrıca, tüm 8 mm. çekme deneyi numunelerinin yüzeylerine, SEM (taramalı elektron mikroskopisi) uygulanmıştır. Bu şekilde, malzemedeki inklüzyonlar ve kırılma tipini belirleyen iç yapı özellikleri net bir şekilde tespit edilebilmiştir. Gerekli görülen yerlerden, EDS (enerji dağılımı X-ışını spektroskopisi) analizi de alınarak mikroyapısal karakterizasyon tamamlanmıştır.

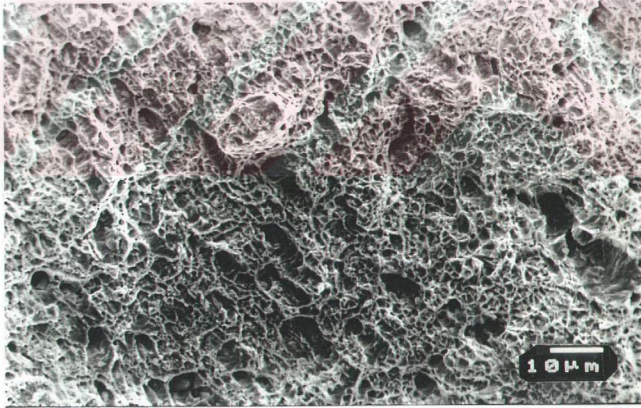
Şekil 4.8’ de, düşük karbonlu çekme deneyi numunesinin kopma yüzeyinin SEM altındaki görüntüsü verilmiştir. Sünek kırılma davranışının tipik göstergesi olan ağ yapılı oyuklar (dimples), net bir şekilde seçilmektedir. Bu davranışın daha iyi görülebilmesi amacıyla, X500, X1000 ve X5000 büyütmelerinde fotoğraflar çekilmiş ve sunulmuştur. Şekil 4.8(a)’ da, kopma oyuklarının ağ yapısı net bir şekilde görülebilir. Şekil 4.8(b)’ de ise, daha büyük büyütmelerde, sünek kırılma şekilleri arasında deformasyon izleri de açıkça seçilebilmektedir. Aynı bölgeden alınan daha da büyük büyütmedeki resimde ise (Şekil 4.8(c)) sünek kırılma davranış karakteristiği olan oyuklanmanın yanısıra, az sayıdaki inklüzyonun yuvarlak taneli, küçük yapısı ve homojen dağılımı net şekilde gözlemlenebilmektedir.



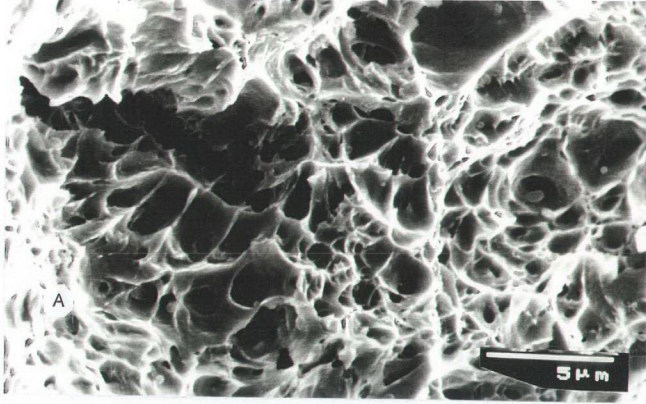
Şekil 4.7. 8 mm numunelerin enine kesitleri boyunca mikrosertlik ölçüm sonuçları.



Şekil 4.8(a). Düşük karbonlu (8 mm çaplı) çekme numunesinin kopma yüzeyi, SEM fotoğrafı, X500 büyütmede.

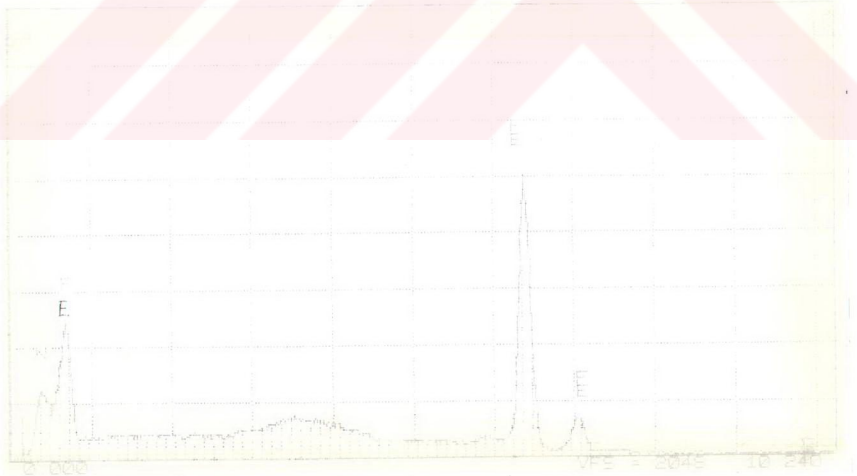


Şekil 4.8(b). Düşük karbonlu (8 mm çaplı) çekme numunesinin kopma yüzeyi, SEM fotoğrafı, X1000 büyütmede.



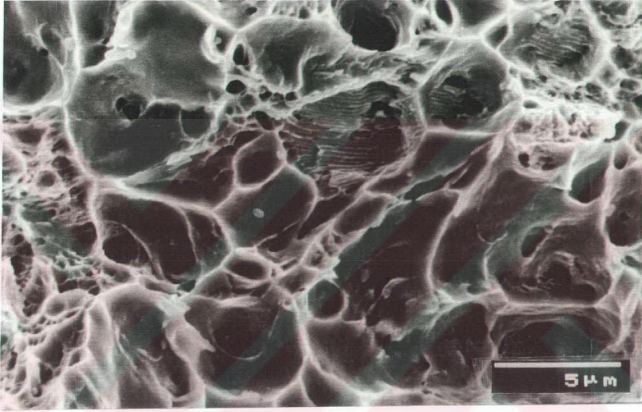
Şekil 4.8(c). Düşük karbonlu (8 mm çaplı) çekme numunesinin kopma yüzeyi, SEM fotoğrafı, X5000 büyütmede.

Tüm bu SEM resimleri, düşük karbonlu çekme numunesinin sünek davranışını net bir şekilde göstermektedir. Ayrıca, Şekil 4.8(c)' de, A ile gösterilen bölgeden alınan EDS analizinin grafiğinde de (Şekil 4.9), demirce zengin bir sonuç alınmıştır. Ayrıca bu grafikte, pota ocağındaki gazla karıştırma aşamasından kalan çözünmüş azot gazı da görülmektedir.



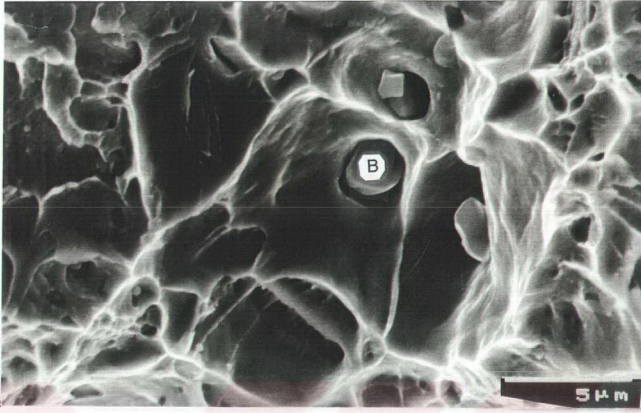
Şekil 4.9. Düşük karbonlu numunenin Şk. 4.8(c)' deki A bölgesi kalitatif EDS analizi

Orta karbonlu çekme numunesinin kopma yüzeyi de aynı şekilde SEM çalışmasına tabi tutulmuştur. Yüksek karbonlu malzemeye nazaran daha düşük karbonlu olan bu malzemede, yukarıda incelenen düşük karbonlu malzemeden % 0,04 daha fazla karbon bulunması (Tablo 3.1), yine ağırlıklı olarak sünek davranış göstergesi olan kopma yüzeyindeki oyukların (dimples) yanısıra, gevrek kırılma davranışı olan kayma izlerinin de görülmesine sebep olmuştur. Şekil 4.10(a) ve (b)' de, bu davranış görülebilir.



Şekil 4.10(a). Orta karbonlu çekme numunesinin kopma yüzeyi, SEM fotoğrafı, X5000 büyütmede. Sünek davranışın karakteristiği olan oyukların (dimples) yanısıra, gevrek kırılma davranışı olarak bilinen kayma izleri de seyrek olarak görülmektedir. Bunun nedeni de, nisbeten daha yüksek bir karbon içeriği bulundurması olarak açıklanabilir.

Şekil 4.10(b)' de ise, yapıda bulunan inklüzyonlar ve dağılımı gösterilmiştir. Kayma izlerinin de seçilebildiği bu resimde B harfiyle işaretlenmiş inklüzyona ait EDS analizi grafiği, Şekil 4.11' de sunulmaktadır. Burada, Fe piklerinin arasında, yüksek Mn ve S pikleri de görülmektedir. Bu da zaten beklenen bir olaydır, zira bu grafik, ilgili inklüzyonun MnS (Mangan-kükürt) inklüzyonu olduğunu göstererek, 2.2.1.1 kısmında, Mn ilavesinin amaçları olarak anlatılanları desteklemektedir. Mn, kükürdü inklüzyon şeklinde bağlayarak, küçük yapı ve homojen dağılımlı olduğu sürece malzemenin mekanik özelliklerine olacak zararını minimum hale getirmektedir, aksi halde S tane sınırında birikirse son derece kötü etkiler yapmaktadır.



Şekil 4.10(b). Orta karbonlu çekme numunesinin kopma yüzeyi, SEM fotoğrafı, X5000 büyütmede. B harfiyle işaretli olan, MnS inklüzyonudur, buradan alınmış EDS analiz grafiği Şekil 4.11' de verilmektedir.

Şekil 4.11' deki EDS piklerine ait atomik ve ağırlıkça yüzde değer analiz sonuçları, Tablo 4.5' te sunulmaktadır. Görüldüğü gibi, Fe yanında, çok yüksek Mn ve S yüzdeleri de görülmektedir.

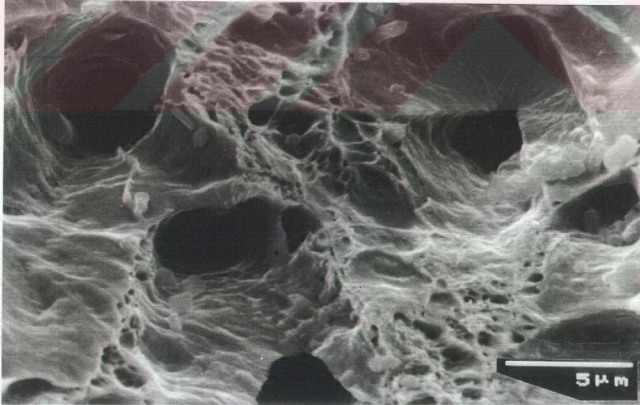
Tablo 4.5. Şekil 4.11' deki EDS piklerinin kantitatif % analiz değerleri.

Element	Atomik %	Ağırlıkça %
Fe	21,87	27,19
Mn	33,42	40,88
S	44,71	31,92

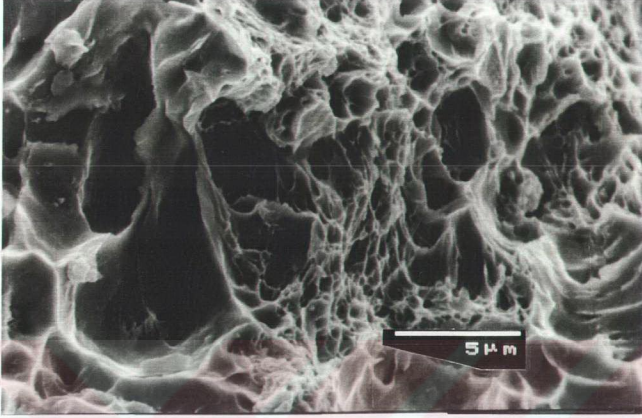
Son olarak da, yüksek karbonlu çekme numunesinin kopma yüzeyinin SEM incelemesi yapılmıştır. Yüksek karbon içeriğinin doğal sonucu olarak, gevrek kırılmanın tipik özelliği olan kayma izleri çok büyük orandadır. Aynı şekilde, sünek davranış karakteristiği olan oyuk (dimple) oluşumu son derece azdır. Şekil 4.12' de, bu yapılar sunulmaktadır. 4.12(a), gevrek kırılma davranışı ile aralarda düzensiz şekilde yerleşmiş inklüzyonları göstermektedir. 4.12(b) ise, yine ağırlıklı olarak gevrek kırılma – kayma izleri ile beraber, daha az oranda oyuk (dimple – sünek davranış) oluşumu göstermektedir.



Şekil 4.11. Şekil 4.10(b)' de, B harfi ile işaretli inklüzyonun EDS analiz grafiği.



Şekil 4.12(a). Yüksek karbonlu çekme numunesinin kopma yüzeyi, SEM fotoğrafı, X5000 büyütmede. Gevrek kırılma işareti kayma izleri ve düzensiz dağılımda inklüzyonlar görülmektedir.



Şekil 4.12(b). Yüksek karbonlu çekme numunesinin kopma yüzeyi, SEM fotoğrafı, X5000 büyütmede.

4.2. Yüksek sıcaklık mekanik deneyi (sürünme deneyi)

Sürünme deneyleri, Bölüm 2.3' te de ifade edildiği üzere literatürdeki çalışmalarda, malzemenin ergime sıcaklığının 0,3 – 0,4 katı aralığında (°K) ve oda sıcaklığındaki akma mukavemetinin yaklaşık 2/3 oranına kadar gerilmelerle gerçekleştirilmiştir. Karbon çelikleri için ergime sıcaklığı, 1573°C - 1846°K olarak alınmış, bunun 0,4 katı yaklaşık 740°K olarak hesaplanmıştır. Deneylerin süresi ve cihazın kullanım şartları gözönüne alınarak, deney sıcaklığı 773°K (500°C) olarak alınmıştır. Gerilme değerleri de, numunenin 8 mm. çapındaki çekme numunesinin oda sıcaklığındaki akma mukavemetinin yaklaşık 2/3 katı ve yaklaşık değerlerde seçilmiştir.

Düşük karbonlu malzemeye uygulanan 3 adet sürünme deneyi sonunda, deney süresi içinde Tablo 4.6' da gösterilen % uzama değerleri elde edilmiştir. Bu malzemenin oda sıcaklığındaki akma mukavemeti 520 MPa' dır (2/3 katı yaklaşık 350 MPa), deneylerde de 250-300-375 MPa gerilmeler uygulanmıştır (500°C). Malzeme, beklenildiği gibi, gerilme artırıldıkça daha hızlı uzamıştır, ne var ki deney cihazının konstrüksiyonundan kaynaklanan sebeplerden dolayı, kopmaya kadar uzatılamamıştır. Ancak % uzama verileri de şüphesiz yeterli bilgi sağlamaktadır.

Tablo 4.6. Sürünme deneyleri sonuçları. (* işaretli deneyde kopma gözlenmiştir. ** işaretli deneylerde ağırlıklar cihaz kasasına oturduğu için deney sonlandırılmıştır).

Tablo 4.6(a). Malzeme : düşük karbonlu çelik

SICAKLIK (C)	GERİLME (MPa)	SÜRE (Dk)	UZAMA (%)
500	375	1,5	22
** 500	300	50	22
500	250	360	11

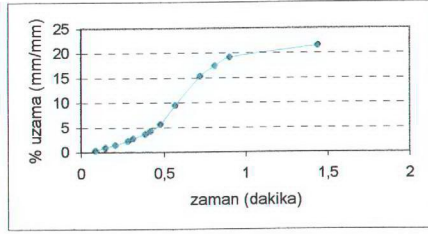
Tablo 4.6(b). Malzeme : orta karbonlu çelik

SICAKLIK (C)	GERİLME (MPa)	SÜRE (Dk)	UZAMA (%)
* 500	325	120	11
500	300	400	11
500	250	450	2,5

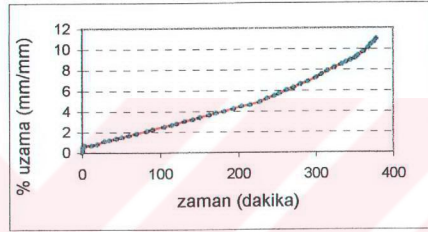
Tablo 4.6(c). Malzeme : yüksek karbonlu çelik

SICAKLIK (C)	GERİLME (MPa)	SÜRE (Dk)	UZAMA (%)
500	225	700	1
500	250	672	1,5
** 600	250	3	22

Düşük karbonlu malzemenin sürünme deneyi sırasında, ekstansometrenin bağlı olduğu kayıt cihazının çizdiği ham grafikler, Ekler kısmındaki 6.4(a), 6.4(b) ve 6.4(c) şekilleridir. Bu şekiller, zaman (t) – uzama (mm) grafikleridir, dolayısıyla bunlar Microsoft Excel programında, gerekli hesaplar yapılarak zaman (dt-dakika) - % uzama (mm/mm) grafiği haline getirilmiştir. Buradan düşük karbonlu çelik malzemenin sürünme eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.13). Sürünme eğrisinin ikinci bölgesindeki eğimin yüksekliğinden, sürünme hızının son derece fazla olduğu anlaşılmaktadır. Düşük karbonlu malzemenin 250 MPa gerilme ile 500 °C sıcaklıkta yapılan sürünme deneyinde uzama gösteren numunenin boyun bölgesinden alınan enine kesit metalografi numunesinin (Şekil 4.14) optik mikroskop görüntüsünde (Şekil 4.15), tane uzaması ve oluşan sürünme boşlukları (creep voids) görülmektedir, bu da beklenmelidir, çünkü numunenin sürünme eğrisinde üçüncü bölgeye girildiği gözlemlenmektedir ki bu da numune içerisinde çatlak oluşumunun başladığını gösterir.



Şekil 4.13(a). Düşük Karbonlu numune sürünme eğrisi, 500°C, 325 MPa.



Şekil 4.13(b). Düşük Karbonlu numune sürünme eğrisi, 500°C, 250 MPa.



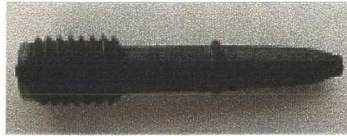
Şekil 4.14. Düşük ve orta C'lu, uzama gösteren numunelerin metalografik inceleme için hazırlanan bakalit kalıpları.

Orta karbonlu çelik malzemesinin sürünme deneyleri, yine 500°C' de (773 K) sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir, uygulanan gerilmeler ise 250-300-325 MPa olarak seçilmiştir (Oda sıcaklığı mukavemeti 503 MPa, 2/3 katı yaklaşık 335 MPa). Bu malzemede yapılan sürünme deneylerinin cihazdan alınan ham grafikleri, Ekler kısmında, Şekil 6.5 (a,b,c) ile gösterilmektedir.

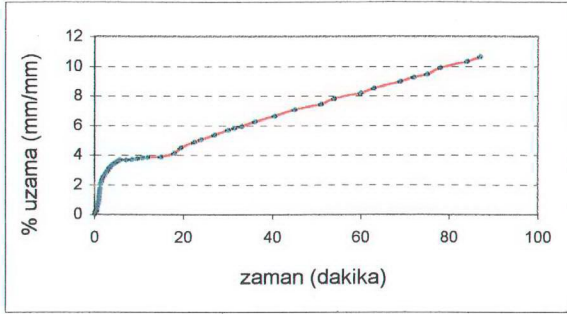


Şekil 4.15. Düşük karbonlu sürünme malzemesinin boyun bölgesinde görülen tane uzaması ve sürünme çatlakları (creep voids), X1750 reel büyütme.

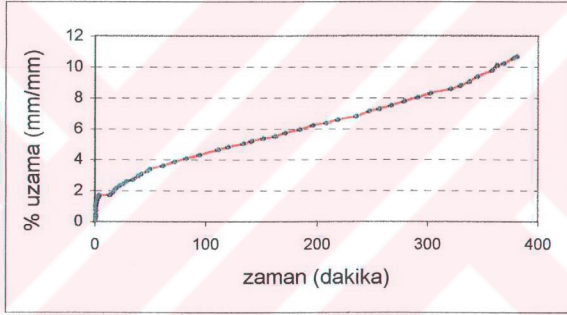
Yukarıda açıklanan düşük karbonlu malzemeyle aynı şekilde, orta karbonlu malzemenin ham grafikleri de zaman (dt -dakika) - % uzama (mm/mm) grafiği haline getirilmiş ve Şekil 4.17' de sunulmuştur. Görülebileceği üzere, yine beklenildiği gibi gerilme artırdıkça sürünme hızı da yükselmektedir (sürünme grafiklerin ikinci bölgesinin eğimi). Ayrıca, Tablo 4.6' da süre - % uzama değerleri görülmektedir. Ayrıca 325 MPa gerilme uygulanan numune kopma göstermiştir (Şekil 4.16). Sadece uzayıp kopmayan 300 MPa gerilmeye maruz kalan numunenin boyun bölgesinden ve kopan numunenin kopma yerine yakın enine kesidinden alınan metalografik inceleme numunelerinin (Şekil 4.18) optik mikroskop çalışmasının sonucunda elde edilen resimler Şekil 4.19' da sunulmaktadır.



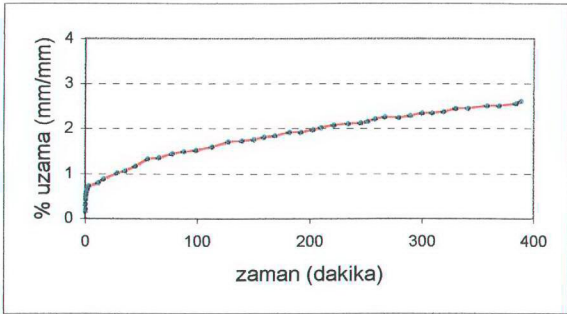
Şekil 4.16. Orta karbonlu, kopma gösteren sürünme numunesi (325 MPa, 500°C).



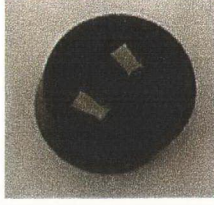
Şekil 4.17(a). Orta karbonlu malzeme, 500°C, 325 MPa.



Şekil 4.17(b). Orta karbonlu malzeme, 500°C, 300 MPa.

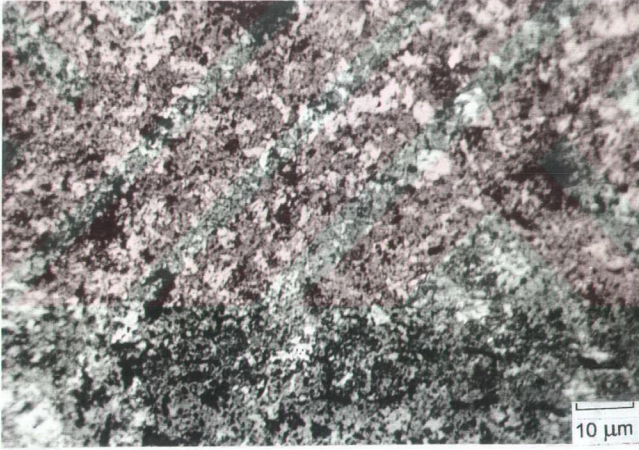


Şekil 4.17(c). Orta karbonlu malzeme, 500°C, 250 MPa.



Şekil 4.18. Kopma gösteren orta karbonlu sürünme numunesi, 325 MPa, 500°C.

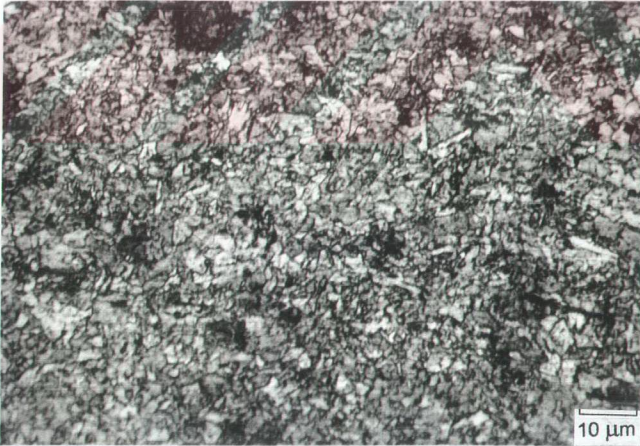
Şekil 4.19' da gösterilen optik mikroskop resimlerinde, orta karbonlu kopan sürünme numunesindeki sürünme çatlakları net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.19(a)). Orta karbonlu, uzama gösteren numunenin optik mikroskop resimlerinde ise (Şekil 4.19(b),(c) sürünme çatlaklarının başlangıcı ya da ilerlemesi gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.19(a). Orta karbonlu, kopma gösteren sürünme malzemesinin kopma bölgesinde görülen sürünme çatlakları (creep voids), X1120 reel büyütme.



Şekil 4.19(b). Düşük karbonlu, uzama gösteren sürünme malzemesinin boyun bölgesinde (boyuna kesit) görülen sürünme çatlakları (creep voids) oluşumları ve ilerlemesi, X1750 reel büyütme.

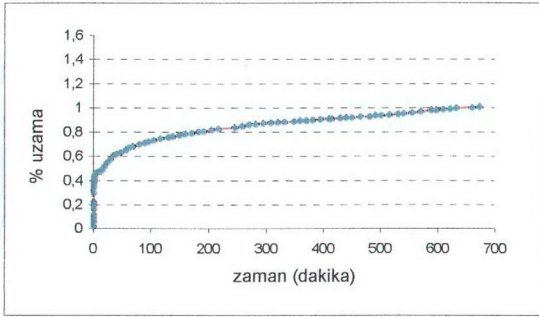


Şekil 4.19(c). Düşük karbonlu sürünme malzemesinin boyun bölgesinde (boyuna kesit) görülen sürünme çatlakları (creep voids) başlangıç ve ilerlemesi, X1750 reel büyütme.

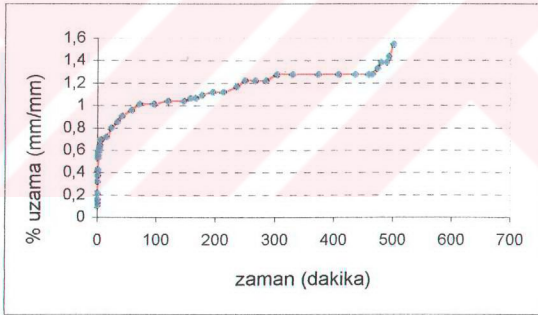
Yine aynı şekilde, yüksek karbonlu çelik numunelerin sürünme deneyleri yapılmıştır. 500°C sıcaklık ortamında, 225-250 MPa, 600°C sıcaklıkta ise 250 MPa gerilme uygulanarak yapılan deneylerin ham grafikleri Ekler bölümü, Şekil 6.6' da gösterilmektedir. Bu numunenin boyun yerinden alınan enine kesit metalografik numunesinin optik mikroskop altındaki incelemesinin sonucu, Şekil 4.20' de sunulmaktadır. Bunların üzerinden hazırlanan zaman (dt -dakika) - % uzama (mm/mm) grafikleri, Şekil 4.21' de gösterilmektedir. 600°C sıcaklıkta yapılan deneye ait ham grafik elde edilememiştir, çünkü numune daha yük verilir verilmez, daha ekstansometre ayarını yapmadan hızla (yaklaşık 2 dakika içinde) uzamıştır. Bu çok ilginç bir olaydır; şöyle ki, 500°C' de, 500 dakika gibi bir sürede yaklaşık % 1,5 uzama gösterirken, 600°C' de aynı gerilme altında (250 MPa) 2 dakika gibi bir sürede kopma göstermesi, ancak difüzyon sürünmesinin etkisiyle açıklanabilir. Tane büyümesinin başlaması sonucu, tane sınırlarındaki gerilmenin artması ve uygulanan gerilmeyle beraber, bu olay meydana gelmiştir. Burada görülen sürünme çatlakları ve boşluklar, numunenin üçüncü bölgede olduğunu göstermektedir ki bu da zaten numunenin uzamasından ötürü beklenen bir olgudur.



Şekil 4.20. Yüksek karbonlu, uzama gösteren sürünme malzemesinin boyun bölgesinde (boyuna kesit) görülen sürünme çatlakları (creep voids) başlangıç ve ilerlemesi, X1120 reel büyütme.



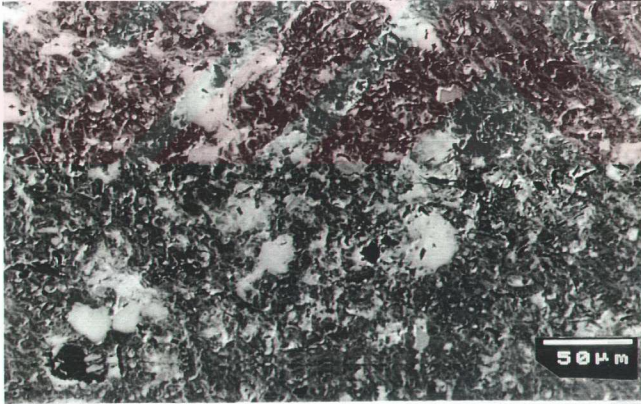
Şekil 4.21(a). Yüksek karbonlu malzeme, 500°C, 225 MPa.



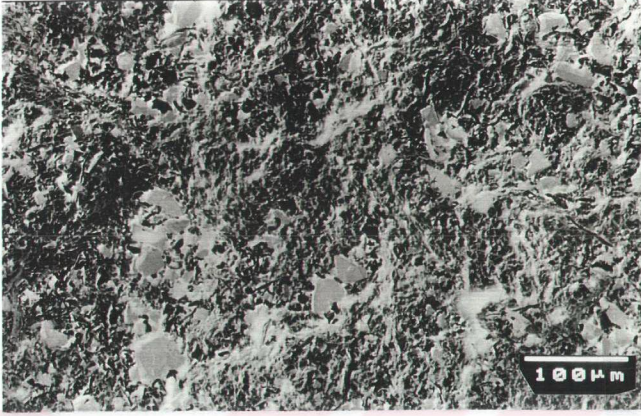
Şekil 4.21(b). Yüksek karbonlu malzeme, 500°C, 250 MPa.

Yukarıda da belirtildiği gibi, tüm bu deneyler sonucunda, cihazın ağırlık asılı olan askısının, numunenin uzaması sonucu cihaz kasasına yaslanması ile deneylerin durdurulmasından ötürü, yalnız bir tek numune koparılabilmektedir. Bu da, 500°C ve 325 MPa parametrelerine maruz bırakılan orta karbonlu çelik numunesidir. Bu numunenin kopma yüzeyinin SEM incelemesinin resimleri, Şekil 4.22’ de sunulmaktadır. Şekil 4.22(a) ve (b), SEM cihazında, back – scatter tekniğiyle çekilmiştir ve düşük büyütme, bu resimlerde, malzemedeki sürünme boşlukları ve çatlak oluşumları görülmektedir. Şekil 4.22(c) ve (d), sırasıyla çok daha yüksek büyütme, söz konusu sürünme boşluklarını çok daha yakından göstermektedir. İşte bu tür boşluklar, sürünme eğrisinin üçüncü safhasında, tane sınırlarında ortaya çıkar ve ilerleyerek tanelerarası kırılmaya yol açar.

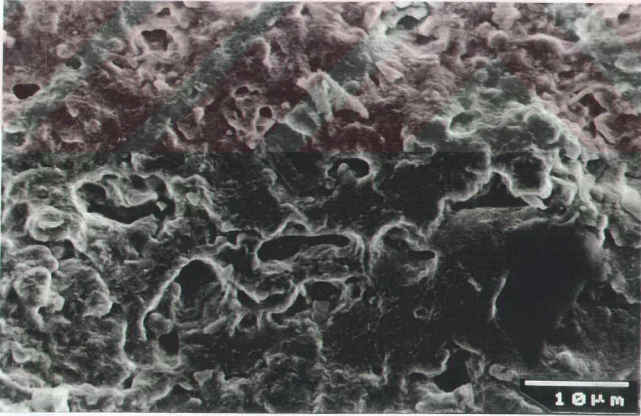
Şekil 4.23’ de, uzama gösteren yüksek karbonlu numuneler toplu halde sunulmaktadır, uzamanın daha kolay görülebilmesi için deneye sokulmamış bir numune de aynı resim karesine yerleştirilmiştir. Şekil 4.24’ de ise, 500°C / 250 MPa şartları altında, üç farklı numunenin sürünme eğrileri birarada verilerek, karbon içeriğindeki farkın sürünme özelliği üzerine olan etkisi daha net gösterilmiştir.



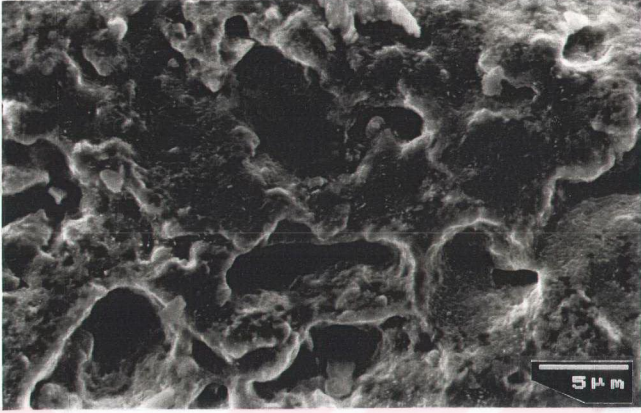
Şekil 4.22(a). Orta karbonlu, kopma gösteren sürünme numunesinin kopma yüzeyindeki sürünme çatlakları (creep voids), başlangıç ve ilerlemesi (SEM fotoğrafı, X200 büyütme).



Şekil 4.22(b). Orta karbonlu, kopma gösteren sürünme numunesinin kopma yüzeyindeki sürünme çatlakları (creep voids), başlangıç ve ilerlemesi (SEM fotoğrafı, X350 büyütme).



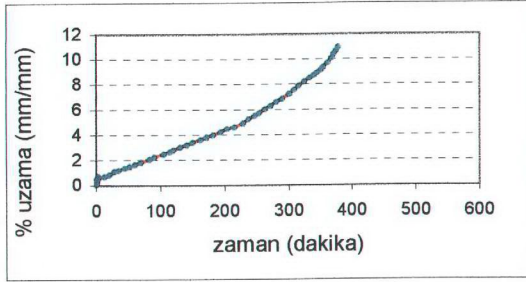
Şekil 4.22(c). Orta karbonlu, kopma gösteren sürünme numunesinin kopma yüzeyindeki sürünme çatlakları (creep voids, SEM fotoğrafı, X2000 büyütme).



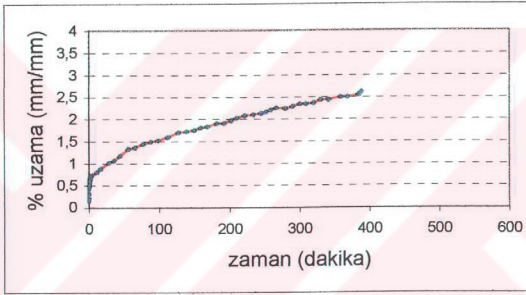
Şekil 4.22(d). Orta karbonlu, kopma gösteren sürünme numunesinin kopma yüzeyindeki sürünme çatlakları (creep voids, SEM fotoğrafı, X3500 büyütme).



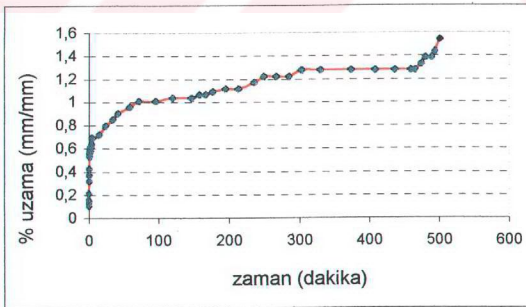
Şekil 4.23. Düşük, orta ve yüksek karbonlu sürünme numunelerindeki uzama miktarları, 500°C, 250 MPa. a) deneye sokulmamış numune, b) yüksek karbonlu, c) orta karbonlu, d) düşük karbonlu numune.



Şekil 4.24(a). Düşük karbonlu malzeme, 500 °C, 250 MPa



Şekil 4.24(b). Orta karbonlu malzeme, 500 °C, 250 MPa



Şekil 4.24(c). Yüksek karbonlu malzeme, 500 °C, 250 MPa

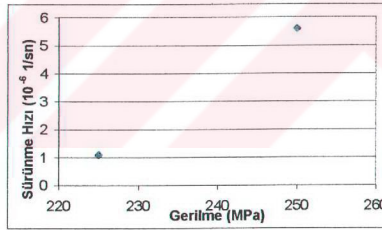
Aynı deney koşullarında, farklı karbon içeriğine sahip numunelerin deneylerinin sonucunda elde edilen bu üç eğri çok önemlidir. Bu eğrilerin ikinci bölgedeki, yani kararlı sürünme bölgesindeki hızları, eğimlerden hesaplanabilir. Bu aynı deney koşulları altında karbon oranına bağlı olarak değişen hız değerleri, Tablo 4.7' de sunulmaktadır.

Tablo 4.7. 500°C / 250 MPa koşullarında üç farklı malzemenin sürünme hızları.

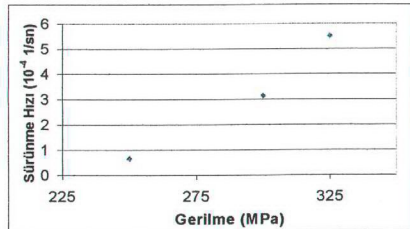
Malzeme	Düşük C' lu	Orta C' lu	Yüksek C' lu
Sürünme hızı (1/sn)	$3,2 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{-6}$

Çok açıkça görülmektedir ki, karbon oranı yükseldikçe sürünme hızı yavaşlamaktadır, ki bu da literatürdeki bilgilerle de tam bir uyum içerisinde.

Ayrıca, deney sonuçlarından yola çıkarak sürünme hızı – gerilme grafiklerini de elde etmek mümkündür. Farklı gerilme değerleriyle gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen eğrilerin eğimlerinden yola çıkarak her malzeme için sürünme hızlarının gerilme değerleriyle olan ilişkisi, Şekil 4.25' de sunulmaktadır. Daha çok sayıda deney verisi ile daha anlamlı olacak bu grafik, beklenildiği gibi sürünme hızı ile gerilme arasında doğrusal bir bağlantı göstermektedir.



Şekil 4.25(a). Yüksek C' lu malzemenin kararlı sürünme hızı – gerilme grafiği.



Şekil 4.25(b). Orta C' lu numunenin kararlı sürünme hızı – gerilme grafiği.

Düşük karbonlu malzeme, çok yüksek bir hızla deforme olduğundan, net bir ikinci bölge davranışı yalnız bir deneyde gözlemlenebilmiştir. Yalnız bir kararlı sürünme hızı da bir grafik ya da gerinim üst sabiti hesabı için yeterli değildir. Ancak eldeki verilerle orta ve yüksek karbonlu malzemelerin gerinim üst sabiti (n) değerini hesaplamak mümkündür. Bölüm 2' deki 2.4 eşitliğinde;

$$\frac{d\epsilon}{dt} = c \cdot \sigma^n ,$$

iki malzemenin farklı gerilme değerleri için yerlerine konarak gerekli matematiksel işlemler yapıldığında, orta karbon için n değeri 8, yüksek karbonlu malzeme için ise yine aynı şekilde hesaplanan n değeri yine 8 olarak hesaplanmıştır. Gerinim üst sabiti değerlerinin yüksek çıkması, dislokasyon sürünmesi mekanizmasının etkin olduğunu göstermektedir. Ancak deneylerin sabit sıcaklıkta yapıldığı da gözönüne alınmalıdır, değişken sıcaklıklarda yapılan deneylerde, sıcaklığa bağlı olarak yayınma sürünmesi mekanizması da etkin hale gelebilir. Kaldı ki sabit sıcaklıkta yapılan deneylerde de dislokasyon sürünmesi etkin olmakla beraber yayınma sürünmesi de söz konusudur, malzemeye tamamen tek bir mekanizmanın etki ettiğini söylemek doğru olmaz.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan tüm çalışmalarda, açıkça görülen, karbon oranı yükseldikçe, az alaşımlı karbon çeliklerinin sürünme dayanımının arttığıdır. Bu, literatürde paslanmaz ya da diğer özel alaşım çelikleri üzerine yapılan çalışmaları da desteklemektedir[24-30]. Ayrıca her C içeriği için, numunelerin aynı gerilme ve sıcaklık altındaki davranışlarını gösteren Şekil 4.24' de birbiriyle karşılaştırıldığı sürünme eğrilerinde bu durum açıkça görülebilir. Sürünme hızı üzerinde karbonun düşürücü etkisi hemen sezilmektedir, ki bu da beklenen bir durumdur[24,36]. Öte yandan, her karbon bileşiminin kendi arasında, gerilme ya da (yüksek karbonlu numunede) sıcaklık değerleri değiştirildiğinde, sürünme hızının da bundan etkilendiği görülmektedir. Bu değişiklik, zaten sürünme mekanizmalarıyla ilgilidir ve Bölüm 2.3' te açıklanmıştır.

Görülmektedir ki, düşük karbon içeriğine sahip malzemeler, sürünme olayına karşı mukavemet gösterememekte ve kararlı sürünme hızları yüksek bir şekilde deforme olmaktadır. Bu olay, şüphesiz ki binalarda kullanılan bu tip malzemeler için çok büyük önem taşır, zira bünyesinde fırın, endüstriyel ocak vb. yüksek sıcaklık kaynağı barındıran binaların, özellikle kaynağa yakın giriş ve kolonlarında bu malzemenin kullanılması, uzun sürelerde zararlı olabilir, kaldı ki bir binanın yaklaşık 20 – 30 yıl oturulabilir durumda olması beklenir. Literatür taramasında rastlanan bazı çalışmalarda, betonun içindeki çelik malzemeyle beraber nasıl bir sürünme davranışı göstereceği incelenmiş [41-46], ancak bu çalışmalar, doğrudan çelik çubuğun sürünme davranışını deneysel olarak incelememiş, bazı matematiksel modelleme yöntemleriyle sonuca gitmiştir. Söz konusu malzeme, beton olduğunda, tabidir ki, çimento – çelik çubuk kompozit malzemesinden bahsedilmeli ve bu malzemelerin sürünme davranışları ayrı ayrı irdelendikten sonra, model üzerine, birlikte gösterecekleri sürünme davranışı oturtulmalıdır. Bu açıdan, bu çalışma sonunda elde edilen değerlerin, ileriki bazı çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Tempcore ürünü malzemelerdeki farklılaştırılmış içyapıya sahip katmanın 8 mm çapına kadar tornalama işe ortadan kaldırıldığı tespit edilmiştir. Kaldı ki, bu yapının çok az kalma ihtimali de olsa, sıcaklığa bağlı olarak gerçekleşecek tane büyümesi bu

etkiyi tamamen ortadan kaldıracaktır. Yüksek karbonlu numunede, 600°C sıcaklıkta yapılan deneyde görülen davranış, tane büyümesi ile açıklanabilir[16,36], diğer numunelerle de bu sıcaklıkta deney yapıldığında, ince taneli beynitik-perlitik yapının bozulacağı ve malzemenin sürünme olayına karşı çok daha zayıf kalacağı beklenir.

Sonuç olarak görülen, az alaşımlı karbon çeliklerinde sürünme dayanımının doğrudan karbon içeriğine bağlı olduğudur, bu zaten literatür özetinden beklenen bir sonuçtur, ancak daha farklı deney sıcaklıklarında, daha fazla sayıda deney yapılması, Larson – Miller denkleminin (2.8) uygulanmasına imkan sağlayacaktır. Şu an eldeki verilerle bu şekilde bir ekstrapolasyon yapmak yanlış olacaktır[16], ne var ki genel davranış tespit edilmiştir ve ilerideki çalışmalara ışık tutacak sonuçlar elde edilmiştir.

Yine de, bu verilerin de ışığında varılması yanlış olmayacak bir sonuç önerisi, bünyesinde yüksek ısı kaynağı bulunduran binaların özellikle bu bölgelerinde, mümkün olduğunca yüksek karbonlu malzeme kullanılması gerektiridir. Tempcore ürünü malzeme de kullanılacak olsa, sürünme dayanımını güçlendirecek oranda karbür içermesine dikkat edilmelidir. Ayrıca sürünme olayının yıllar söz konusu olduğunda, oda sıcaklığının çok az daha üstünde sıcaklıklarda meydana gelebileceği ve binaların ömrünü kısaltabileceği düşünülmelidir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Taylor, C., Ed., Electric Arc Furnace Steelmaking, Iron and Steel Society, 1985.
- [2] Gezici, R., Türkiye Demir çelik Sektörü ve Dünyadaki yeri, Uluslararası Met. ve Malz. Kongresi Bildirisi, 1997, İstanbul.
- [3] Atalay, Y., Hurda el Kitabı, 1994
- [4] Fuchs Finger Shaft Furnace Technical Document.
- [5] www.fuchs.co.de , internet ana sayfası.
- [6] Diler Demir Çelik Çelikhane Eğitim Notları, Mart 2000.
- [7] Dikeç, F. Prof. Dr., Demir Çelik Üretimi Ders Notları, İ.T.Ü. Metalurji Müh. Fak., 1987.
- [8] Danielli Continuous Casting Technical Document.
- [9] Diler Demir Çelik Haddehane Eğitim Notları, Mart 2000
- [10] Tankut, M. K., Tempcore Prosesi ile Üretilen Düşük Alaşımlı Beton Çeliklerinin Karakteristliği, İ.T.Ü. Fen Bilimleri, Yüksek Lisans Tezi, Ekim 1995.
- [11] Kiğılı, E., Üretim Parametrelerinin Beton Çeliklerinin Özelliklerine Etkisi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri, Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2000.
- [12] The Tempcore Process, Process Technology and Operating Instructions.
- [13] www.thermex.com , internet ana sayfası
- [14] DIN 488 BSt 500 S, Alman standardı.
- [15] Tekin, E., Prof. Dr., Rusting and Its Effect on the Mechanical Properties of Concrete Reinforcing Steel Bars, ODTÜ Metalurji Müh., Ocak 1999.
- [16] Kayalı, E. S., Prof. Dr., ve Çimenöğlu, H., Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İ.T.Ü. Yayınları, 1986.
- [17] ASTM E 6 – 89, Mekanik Test Metodlarıyla ilgili Standart Terminoloji, 1989
- [18] ASTM E 139 – 83, Metalik Malzemelerin Sürünme, Sürünme – Kopma, Gerilme – Kopma Testleriyle ilgili Uygulama Standardı.
- [19] Gül, V., Creep Damage - Failure Analysis Term Paper, 1997.
- [20] Greenfield, P., Creep of Metals at High Temperature, London and Boon Ltd., 1972.
- [21] R. W. Ewans ve B. Wilshire, Introduction to Creep, The Institute of Materials, Londra 1993.

- [22] Dieter, G. E., Mechanical Metallurgy, 1982.
- [23] Bakkaloğlu, A., 304 Kalite Paslanmaz Çeliğin Sürünme Davranışı, Y.T.Ü., 10. Metalurji ve Malzeme Kongresi, Mayıs 2000.
- [24] J. He, G. Han ve diğerleri, Influence of Carbide on Intergranular Creep Rupture of Type 304 Stainless Steel, Materials Science and Technology, Aralık 1998, V. 14.
- [25] Wu, R., Sandström, R., Creep Cavity Nucleation and Growth in 12Cr-Mo-V Steel, Materials Science and Technology, Haziran 1995, V. 11.
- [26] Parker, J. D. ve Stratford, G. C., Effect of Heat Treatment on Creep and Fracture Behaviour of 1,25Cr-0,5Mo Steel, Materials Science and Technology, Aralık 1995, V. 11.
- [27] Evans, M., Method for Improving Parametric Creep Rupture Life of 2,25Cr-1Mo Steel Using Artificial Neural Networks, Materials Science and Technology, Haziran 1999, V. 15.
- [28] Evans, M., Further Analysis of the Monkman – Grant Relationship for 2,25Cr-1Mo Steel Using Creep Data from The National Research Institute for Materials, Materials Science and Technology, Ocak 1999, V. 15.
- [29] Penkalla, H. J. ve diğerleri, Constitutive Equations for the Description of Creep and Creep Rupture Behaviour of Metallic Materials at Temperatures above 800°C, Nuclear Technology, Eylül 1984, V. 66
- [30] Lundin, L., Fallman S., ve diğerleri, Microstructure and Mechanical Properties of a 10% Chromium Steel with Improved Creep Resistance at 600°C, Materials Science and Technology, Mart 1997, V. 13.
- [31] Sandström, R., ve Wu, R., Strain Dependence of Creep Cavity Nucleation in Low Alloy and 12%Cr Steels, Materials Science and Technology, Mayıs 1996, V. 12.
- [32] Sha, W., Kelly, F. ve diğerleri, Microstructure and Properties of Nippon Fire – Resistant Steels, Journal of Materials Engineering and Performance, Ekim 1999, V. 8.
- [33] Y. Lee, S. Lee ve diğerleri, Effect of Matrix Hardness on the Creep Properties of a 12CrMoVNb Steel, Metallurgical and Materials Transactions Part A, Aralık 1999, V. 30 A.

- [34] **Gonzales J.- Rodriguez ve diğeri**, Effect of Hot Corrosion on the Creep Properties of Types 321 and 347 Stainless Steels, Journal of Materials Engineering and Performance, Şubat 1999, V. 8.
- [35] **Ryu, S. ve diğeri**, Quasi-steady-state Creep Crack Growth in a 3,5NiCrMoV Steel, Metallurgical and Materials Transactions Part A, V. 28 A.
- [36] **Wu, R., Sandström, R.**, Carbide Coarsening during Creep in 12 percent CrMoV Steel, Journal of Engineering Materials and Technology, Ekim 1996, V. 118.
- [37] **Choi, B. G., Nam, S. W. ve diğeri**, Characterization of the Cavity Nucleation Factor for Life Prediction under Creep-Fatigue Interaction, Journal of Materials Science, Aralık 1996, V. 31.
- [38] **Sakumoto, Y. ve diğeri**, High – Temperature Properties of Stainless Steel for Building Structures, Journal of Structural Engineering, Nisan 1996, V. 122.
- [39] **Aktaa, J., Schinke, B.**, Creep Lifetime under Constant Load and Constant Stress: Theory and Experiment, Journal of Testing and Evaluation, Temmuz 1996, V. 24.
- [40] **Aghion E., Molaba,C.**, Creep – Fatigue Failure of SAF 2205 and 316 Stainless Steels in Ar + 3% SO₂ Environment at 700°C, Journal of Materials Science, Nisan 1994, V. 29.
- [41] **Sharif A. ve diğeri**, Time – Dependent Losses in Prestressed, Continuous Composite Beams, Journal of Structural Engineering, Kasım 1993, V. 119.
- [42] **Rao, S. ve diğeri**, Time – Dependent Analysis of Cracked Partially Prestressed Concrete Members, Journal of Structural Engineering, Ekim 1993, V. 119.
- [43] **Kawakami M. ve diğeri**, Stress and Strain in Curved Noncracked Concrete Members, Journal of Structural Engineering, Şubat 1994, V. 120.
- [44] **Samra, R. M.**, New Analysis for Creep Behaviour in Concrete Columns, Journal of Structural Engineering, Mart 1995, V. 121.
- [45] **Samra, R.**, Renewed Assessment of Creep and Shrinkage Effects in Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, 10/11- 1997, V. 94.

- [46] Ghali, A., Azarnejad, A., Deflection Prediction of Members at any Concrete Strength, ACI Structural Journal, Eylül/Ekim 1999, V. 96.
- [47] Daylan, M., Paslanmaz Çeliklerin Sürünmesi, Yük. Lisans Tezi, Y.T.Ü., 1997.
- [48] Geçkinli, E., Prof. Dr., Metalografi, İ.T.Ü. Yayınları., 1989.
- [49] Metallography, Structures and Phase Diagrams, ASM Metals Handbook V. 8.
- [50] Fractography, ASM Metals Handbook.
- [51] Türk, A., Zn-Al Esaslı ZA-8 Alaşımında Alaşım Elementlerinin Mekanik Özelliklere ve Mikroyapıya Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Ens., Eylül 1996.
- [52] Boyer, H., Ed., Atlas of Creep and Stress Rupture Curves, MTA 460, A 85, 1988.

6. EKLER

Şekil 6.1. Düşük karbonlu çelik çubuk oda sıcaklığı çekme diyagramı (ham grafik).

Şekil 6.2. Orta karbonlu çelik çubuk oda sıcaklığı çekme diyagramı (ham grafik).

Şekil 6.3. Yüksek karbonlu çelik çubuk oda sıcaklığı çekme diyagramı (ham grafik).

Şekil 6.4(a), 6.4(b), 6.4(c). Düşük karbonlu çelik sürünme diyagramları (ham grafik).

Şekil 6.5(a), 6.5(b), 6.5(c). Orta karbonlu çelik sürünme diyagramları (ham grafik).

Şekil 6.6(a), 6.6(b), 6.6(c). Yüksek karbonlu çelik sürünme diyagramları (ham grafik).

DEMİR ÇELİK

DOSYA VERİLERİ

YA ADI	TEST SAYISI	148
YA TANIMI	TARİH	13/01/80
FIG. DOSYASI	SAAT	15:01

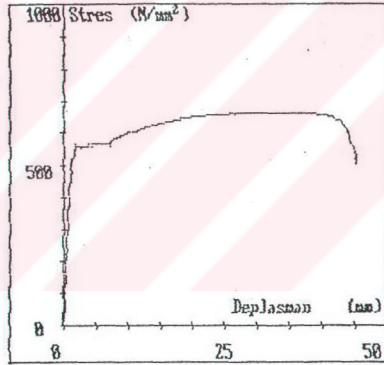
ÖRNEK VERİLERİ

ÖRNEK KODU	12	BİRİM AĞIR	1584
	16.00	CS*BY *BG	\
		EY *EG	\
İN	201.1	STANDART	
SALEL BOY	400.0	STANDART DISI	
GEYÇ BOYU	200.0		
GEYÇ BOYU	236.0		

TEST SONUÇLARI

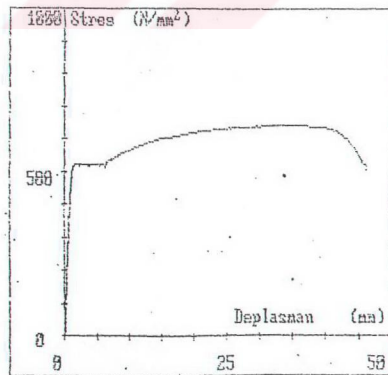
132.9	kN		
661	N/mm ²		
		A	18 %
.5x	560	N/mm ²	

ST TAMAMLANDI: KOPMA GÖZLENDİ
şünceler:



Şekil 6.1. Düşük karbonlu çubuk oda sıcaklığı çekme diyagramı (ham grafik).

DENİR ÇELİK			
DOSYA VERİLERİ			
DOSYA ADI		TEST SAYISI	
DOSYA TAYINI		TARİH	
KONFIG.DOSYASI		SAAT	
ÖRNEK VERİLERİ			
ÖRNEK KODU		BİRİM AĞIR	
1494		1.250	
		ÖSİYİ X26	
		EY KES	
ALAN		STANDART	
197.5 mm ²		STANDART DİSİ	
PARALEL BOY			
400.0 mm			
İLK GEYİ BOYU			
20.0 mm			
20X GEYİ BOYU			
94.5 mm			
TEST SONUÇLARI			
F ₀		A	
126.2 kN		16.0 %	
R _m			
639 N/mm ²			
R _{eH}			
521 N/mm ²			
R _{eL}			
511 N/mm ²			
R _{t .5%}			
519 N/mm ²			
TEST YAKAHLANDI: KOPMA GÜZLENDİ			
Düşünceler OKY			



Şekil 6.2. Orta karbonlu çubuk oda sıcaklığı çekme diyagramı (ham grafik).

DEMİR ÇELİK

DOSYA VERİLERİ

YİA ADI
YİA TANIMI
YİG. DOSYASI

TEST SAYISI 147
TARİH 13/01/80
SART 14:58

ÖRNEK VERİLERİ

ÖRNEK KODU 9
16.00 mm
AN 201.1 mm²
RALEL BOY 400.0 mm
K GEYÇ BOYU 200.0 mm
V GEYÇ BOYU 236.0 mm

BİRİM AĞIR 1533
CS*BY *BG \\
EY *EG \\
STANDART DİSİ

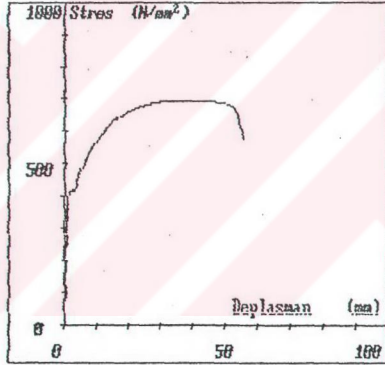
TEST SONUÇLARI

139.2 kN
692 N/mm²

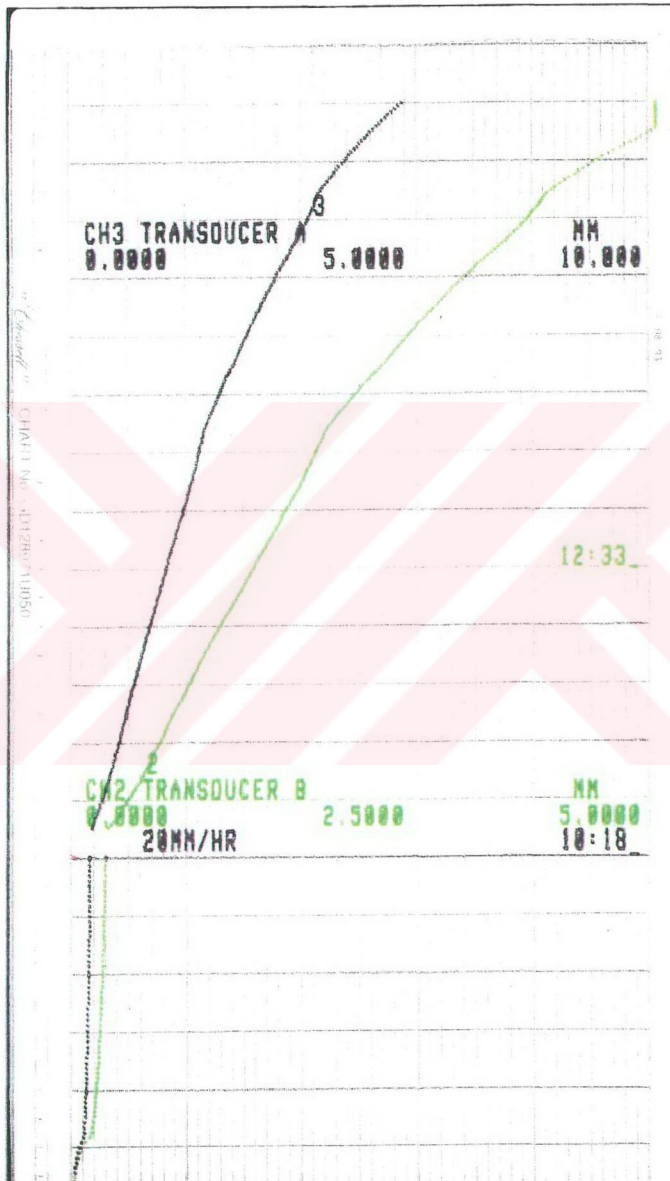
A 18 %

.5% 416 N/mm²

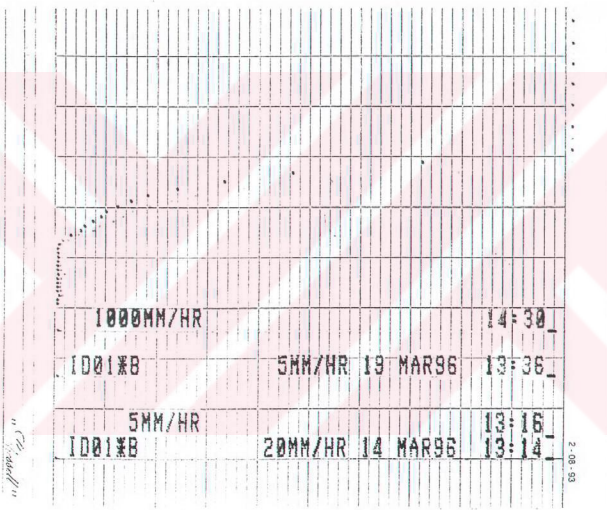
ST TAMAMLANDI: KOPMA GÖZLENDİ
Şünceler



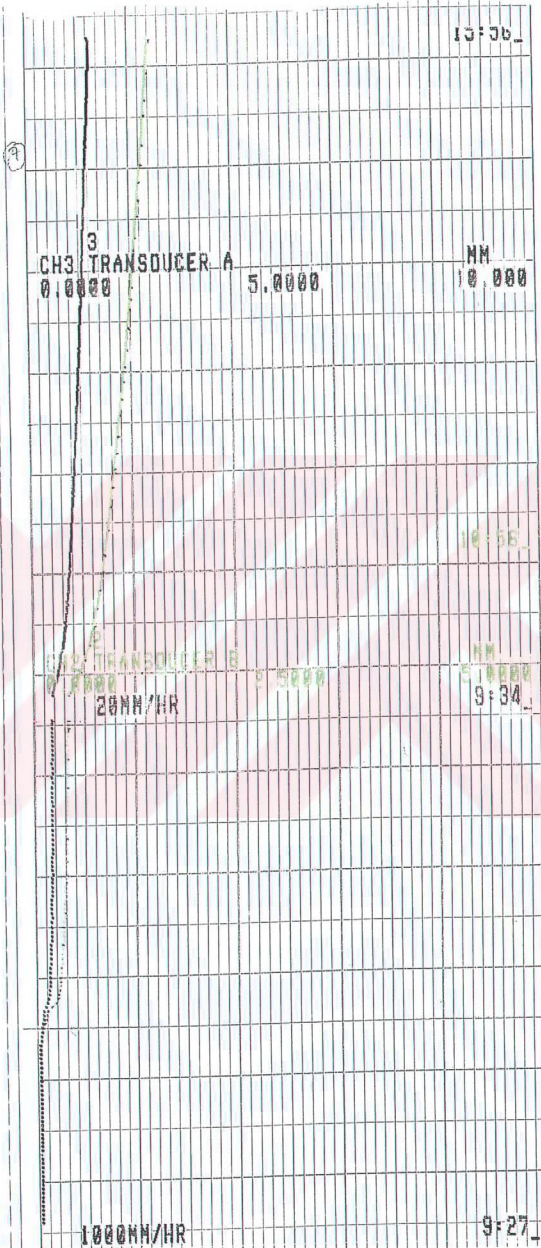
Şekil 6.3. Yüksek karbonlu çubuk oda sıcaklığı çekme diyagramı (ham grafik).



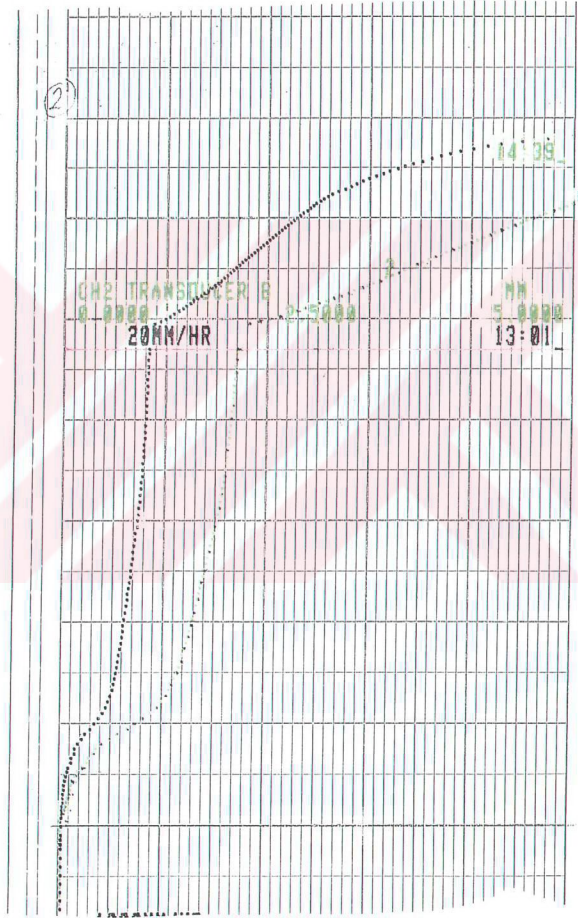
Şekil 6.4(a). Düşük karbonlu numune sürünme diyagramı (ham grafik, 500 °C, 250 MPa.)



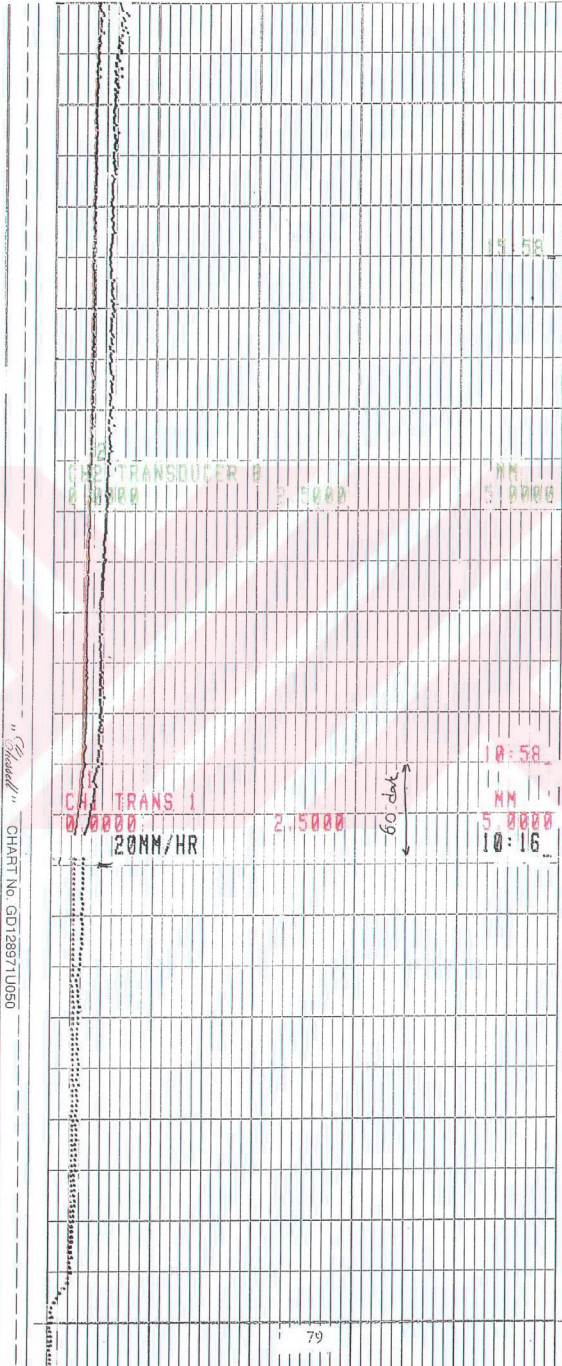
Şekil 6.4(c). Düşük karbonlu numune sürünme diyagramı (ham grafik, 500 °C, 375 MPa.)



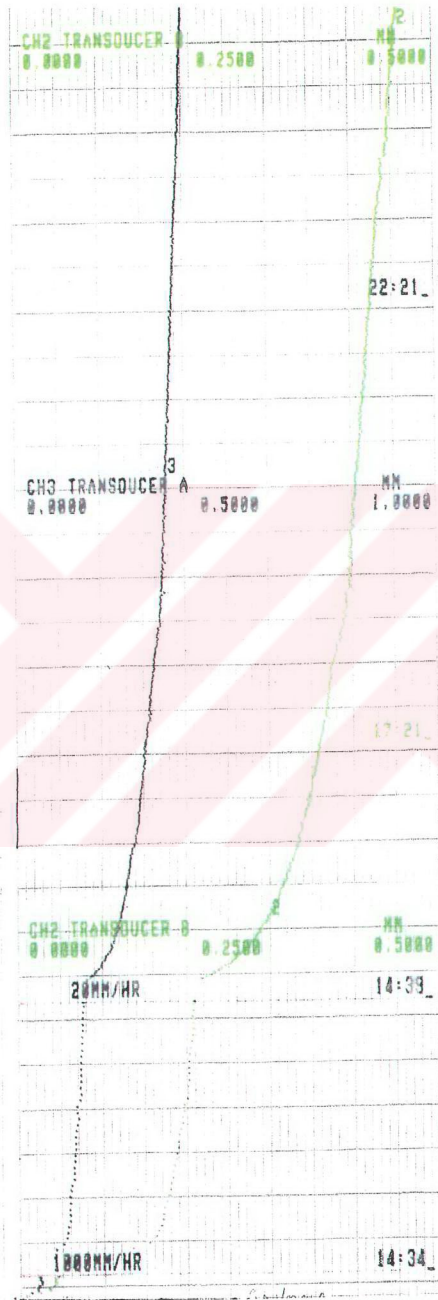
Şekil 6.5(a). Orta karbonlu numune sürünme diyagramı (ham grafik, 500 °C, 250 MPa.)



Şekil 6.5(c). Orta karbonlu numune sürünme diyagramı (ham grafik, 500 °C, 25Q MPa.)



Şekil 6.6(a). Yüksek karbonlu numune sürünme diyagramı (ham grafik, 500 °C, 225 MPa.)



Şekil 6.6(b). Yüksek karbonlu numune sürünme diyagramı (ham grafik, 500 °C, 250 MPa.)