

**MENEVİŞLENMİŞ ÇİFT FAZLI BİR ÇELİĞİN BALİSTİK
BAŞARIMININ İNCELENMESİ**

BAYRAM GÜREL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2010

ANKARA

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Anabilim Dalı Başkanı

Bayram GÜREL tarafından hazırlanan “Menevişlenmiş Çift Fazlı Bir Çeliğin Balistik Başarımının İncelenmesi” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Necip CAMUŞCU

Üye : Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

Üye : Doç. Dr. Adem ACIR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Bayram GÜREL

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Temmuz 2010

Bayram GÜREL

MENEVİŞLENMİŞ ÇİFT FAZLI BİR ÇELİĞİN BALİSTİK BAŞARIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Savunma sistemlerinde düşük ağırlıklı zırhların kullanılması hem enerji tasarrufu, hem de hareket kabiliyetinin artırılması açısından büyük önem taşıdığından mühendislik malzemelerinin balistik başarımlarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada dört farklı martenzit hacim oranına sahip menevişlenmiş çift fazlı bir düşük alaşım çeliğinin 7,62 mm zırh delici mermiler karşısında balistik başarımları incelenmiştir. Üçü ara kritik bölgeden, biri östenitik bölgeden su verilerek üretilen çeliklerde düşük, orta, yüksek ve tam martenzit hacim oranı elde edilmiştir. Su verme ısıl işleminin ardından çelikler 200 °C ve 400 °C’de menevişlenerek sekiz farklı ısıl işlem koşulunda numuneler hazırlanmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında numunelerin mekanik özellikleri ve içyapıları belirlenmiştir. Her bir ısıl işlem grubundaki numunelere sertlik ve çekme testleri yapılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında hazırlanan atış numunelerine Kırıkkale Silahsan Silah Fabrikası A.Ş. atış poligonlarında 7,62 mm zırh delici mermilerle beş farklı alan yoğunluğundaki her bir numune için üç atış tekrarlanarak 120 atış yapılmıştır. Deneylerden sonra bütün numunelerin mikro ve makro yapısı incelenerek balistik başarımları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek alan yoğunluğuna sahip numunelerin tamamının başarılı ve en düşük alan yoğunluğuna sahip numunelerin tamamının başarısız olduğu gözlemlenirken, başarılı olan en düşük alan yoğunluğuna sahip numunelerin 900 °C’den su verilmiş ve 200 °C’de menevişlenmiş grubun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift Fazlı Çelik, Balistik Uygulamalar, Menevişleme, Zırh Malzemeleri, Adyabatik Kayma Bandı.

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
Supervisor : Associate Professor Dr. Mustafa ÜBEYLİ
Degree Awarded and Date : M.Sc. – July 2010

Bayram GÜREL

**INVESTIGATION ON THE BALLISTIC PERFORMANCE OF A
TEMPERED DUAL PHASE STEEL**

ABSTRACT

In defense applications, ballistic performance of engineering materials should be known well, because it has a great importance to utilize lightweight armors that provide both energy saving and increasing maneuverability. In this study, the ballistic performance of a tempered dual phase steel, which has four different martensite volume fractions, was investigated against 7.62 mm Armor Piercing (AP) projectiles. In steels; low, medium and high martensite volume fractions were obtained by intercritically quenching and full martensite structure was obtained by quenching from ostenite region. After quenching, the specimens were prepared in eight different heat treatment conditions by tempering at 200 °C and 400 °C. In the first step of the study, mechanical characteristics and microstructures of the specimens were determined. Hardness and tensile tests were applied to specimens in all heat treatment conditions. In the second step, totally 120 ballistic tests were applied to specimens, which have five different areal density, by repeating three times for each specimen at the shooting gallery of Kırıkkale MKE Gunnery INC. After tests, ballistic performance of the specimens was evaluated by investigating in both macro and micro scale. According to the results, it was determined that while all the specimens which have highest areal density were successful and all the specimens which have lowest areal density were failed, the specimens quenched from 900 °C and tempered at 200 °C were the most successful group.

Key Words: Dual Phase Steel, Ballistic Applications, Tempering, Armor Materials, Adiabatic Shear Band.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasının her aşamasında değerli yardım ve katkılarını benden esirgemeyen, başta kıymetli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ'ye olmak üzere, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Öğretim Görevlisi Teyfik DEMİR'e, çalışmalarım boyunca bana moral ve destek veren sevgili meslektaşlarım M. Fatih AYCAN, M. Yusuf ÜNGÖR ve M. Emin CERİT'e, teknik desteğe ihtiyacım olduğunda emeğini esirgemeyen Kamil ARSLAN'a ve derin bilgilerine başvurduğum TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği öğretim üyelerine teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca emeği geçen MKE Kırıkkale Silahsan Silah Fabrikası A.Ş. çalışanlarına ve bu çalışmayı 106M211 numaralı projesiyle maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bayram GÜREL

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
3. BALİSTİK	8
3.1. İç Balistik	8
3.2. Dış Balistik	9
3.3. Terminal Balistik	10
4. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER	12
4.1. Çift Fazlı Çelik Üretim Yöntemleri ve İçyapı Oluşumları	14
4.2. Çift Fazlı Çeliklerin Menevişlenmesi	16
4.3. Çift Fazlı Çeliklerde Alaşım Elementleri	18
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	20
5.1. Malzeme	20
5.2. Numunelerin Boyutlandırılması	20
5.3. Numunelerin Isıl İşlemlerinin Yapılması	22
5.4. Sertliklerin Belirlenmesi	22
5.5. Çekme Deneyi	23
5.6. Numunelerin İçyapılarının İncelenmesi	24
5.7. Numunelerin Kodlanması	24
5.8. Balistik Deneylerin Yapılması	24

5.9. Balistik Deney Sonrası Numunelerin İncelenmesi	26
6. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA	27
6.1. Sertlik Ölçümleri	27
6.2. Çekme Deneyleri	29
6.3. İçyapı İncelemeleri	33
6.4. Balistik Deneyler Sonrası Makro İncelemeler	39
6.5. Balistik Deneyler Sonrası İçyapı İncelemeleri	60
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	86
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 5.1	Çalışmalarda kullanılan çeliğin ağırlıkça % alaşım elementi içeriği	20
Çizelge 5.2	Numunelerin kalınlıkları ve buna karşılık gelen alan yoğunlukları	21
Çizelge 5.3	Numunelere uygulanan ısıtma işlemleri	22
Çizelge 5.4	Atışlarda kullanılan 7,62 mm zırh delici merminin genel özellikleri	25
Çizelge 6.1	Numunelerin Rockwell C sertlik değerleri	27
Çizelge 6.2	Çekme testleri sonucu elde edilen değerler	29
Çizelge 6.3	Numunelerin balistik başarımları (%)	39
Çizelge 6.4	Su verilmiş numunelerin balistik başarımları (%)	58
Çizelge 6.5	4140 çeliğinin farklı ısıtma işlem koşullarındaki balistik başarımları (%)	59
Çizelge 6.6	100Cr6 çeliğinin ısıtma işlem durumuna göre balistik başarımları (%)	59

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 4.1	Çift fazlı yapının ısıtılma işlemi ile oluşumu	12
Şekil 4.2	YDMA çeliği, çift fazlı çelik ve düşük alaşım çeliklerinin deformasyon davranışlarının kıyaslayan gerilme-gerinim eğrileri	13
Şekil 4.3	Ara kritik bölgeden su verme ile çift fazlı çelik üretimi	14
Şekil 4.4	Östenit bölgesinden soğutma ile çift fazlı çelik üretimi	15
Şekil 4.5	Menevişleme sıcaklığının sertlik ve dayanıma etkisi	17
Şekil 4.6	Demir-Sementit denge diyagramında ara kritik bölge	18
Şekil 5.1	Atış numunesinin çizgesel gösterimi	21
Şekil 5.2	Çekme deneyi numunesi ölçüleri	23
Şekil 5.3	Atışların gerçekleştirildiği düzeneğin çizgesel görünümü	25
Şekil 5.4	Atış sonrası numunelerin incelenen yüzeyi	26
Şekil 6.1	Menevişleme ısıtılma işlemi ile sertlik değerleri değişimi	28
Şekil 6.2	Çekme testleri sonucu elde edilen her bir ısıtılma işlem grubuna ait numunelerin gerilme gerinim eğrileri	30
Şekil 6.3	Isıtılma işlem öncesi çeliği içyapısı, x200	33
Şekil 6.4	Tamamen martenzit hacim oranına sahip numunelerin içyapıları	34
Şekil 6.5	Yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin içyapıları	35
Şekil 6.6	Orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin içyapıları	36
Şekil 6.7	Düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin içyapıları	37
Şekil 6.8	200 °C'de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri	40
Şekil 6.9	400 °C'de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri	43
Şekil 6.10	DM09D numunesine atılan mermi çekirdeği	46
Şekil 6.11	200 °C'de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri	46
Şekil 6.12	400 °C'de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri	47
Şekil 6.13	OM15Y numunesi test sonrası kesit görünümü	49
Şekil 6.14	200 °C'de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri	50
Şekil 6.15	YM15D numunesine çarpan mermi çekirdeğinin görünümü	52
Şekil 6.16	400 °C'de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri	52
Şekil 6.17	200 °C'de menevişlenen tamamen martenzit içyapıya sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri	54
Şekil 6.18	400 °C'de menevişlenen tamamen martenzit içyapıya sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri	56
Şekil 6.19	Numunelerin içyapı fotoğraflarının çekildiği bölgeleri	60

Şekil 6.20	200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları	61
Şekil 6.21	200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları	63
Şekil 6.22	400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları	64
Şekil 6.23	400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları	66
Şekil 6.24	200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları	67
Şekil 6.25	200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları	69
Şekil 6.26	400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları	70
Şekil 6.27	400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları	72
Şekil 6.28	200 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları	73
Şekil 6.29	200 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater uzağındaki içyapıları	75
Şekil 6.30	400 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları	76
Şekil 6.31	400 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater uzağındaki içyapıları	78
Şekil 6.32	200 °C’de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları	79
Şekil 6.33	200 °C’de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater uzağındaki içyapıları	80
Şekil 6.34	400 °C’de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları	82

Şekil 6.35 400 °C’de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater uzağındaki içyapılar

82

1. GİRİŞ

Gelişen silah teknolojisine paralel olarak savunma sistemlerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Dokuzuncu yüzyıldan itibaren yapılan çalışmalar sonucu patlayıcı tozların bulunmasıyla ağır tahribatlı silahların üretilmesi, savaşların çehresini tamamen değiştirmiş ve yüksek dayanıma sahip koruyucu zırh ihtiyacı doğurmuştur [1]. Birinci ve İkinci Dünya Savaşları sırasında zırh malzemesi olarak kullanılan çelikler ağır olduklarından dolayı bireysel savunmada tamamen başarısız olup, ancak ağır zırhlı araçlarda kullanılabilmiştir [2]. Bu nedenle zırh malzemesinden yüksek dayanıma sahip olmasının yanı sıra düşük ağırlıklı olması da beklenmektedir.

Zırh malzemesi tasarımının şüphesiz en önemli basamağı malzeme seçimidir. Ürün tasarlanırken seçilen malzeme gerekli fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri sağlamalıdır. Bunların yanı sıra malzemenin kolay temin edilebilmesi ve yaygın imalat yöntemleriyle kolay şekillendirilebilmesi gerekir. Bütün bu gereksinimler göz önünde bulundurulduğunda demir ve alaşımlarının kolay temin edilebilmeleri ve çok çeşitli mekanik özelliklere sahip olmaları nedeniyle kullanımı oldukça yaygındır.

Demir, yer kabuğunun yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır, ancak bu dağılım dünyanın her yerinde eşit değildir [3]. Doğada bol miktarda bulunması ve çeşitli yöntemlerle çok geniş aralıkta mekanik özellikler kazandırılabilmesi demir alaşımlarını vazgeçilmez kılmıştır. Demir alaşımlarının en önemli grubunu oluşturan çelikler, yüksek çekme dayanımı ve toklukları ile en gözde malzemeler arasındadır. Ancak yoğunluklarının yüksek olması düşük ağırlık gerektiren uygulamalarda çeliklerin kullanımını kısıtlamaktadır. Polimerlerin düşük dayanıma sahip olması, seramiklerin de gevrek davranış göstermesi yeni malzeme ihtiyacı duyurmuş ve bununla birlikte geliştirilen kompozit malzemelerin de üretiminin zahmetli ve pahalı olması çelik ve diğer metaller üzerinde çalışmaların yoğunlaşmasını sağlamıştır.

Yüksek mukavemet ve tokluğa sahip, kolay şekillenebilir çelik arayışları sonucu 1937 yılında çift fazlı çelik üretilmiştir [4]. Ara kritik bölgeden su verme ısıl işlemiyle elde edilen bu çelik türü adını yapısında bulunan sünek ferrit ve sert

martenzit fazlarından almaktadır. Düşük karbon içeren çift fazlı çelikler yalın karbon çeliğinin gösterdiği dayanımı çok daha düşük kesitte göstererek kullanıldığı sistemin ağırlığını azaltmaktadır [5]. Ayrıca içerdiği martenzit fazının hacim oranının değiştirilmesiyle malzemenin mekanik özellikleri kolaylıkla değiştirilmektedir. Artan martenzit hacim oranıyla birlikte malzemenin dayanımı artarken, yapıda bulunan ferrit fazı malzemeyi toklaştırmaktadır [6].

Çift fazlı çelikler üzerinde yapılan çalışmalar, 1970'li yıllarda dünyada yaşanan petrol krizi sonrası yoğunlaşmıştır. Araçlarda yakıt tüketimini azaltmak için yapılan çalışmalar sonucu çift fazlı çelikler yüksek dayanımları, yüksek süneklığe sahip olmaları ve kolay şekillendirilebilme özellikleri nedeniyle otomotiv sanayinde geniş kullanım alanı bulmuştur.

Otomobil üretiminde çift fazlı çeliklerin kullanılması aracın ağırlığının azalmasına bağlı olarak yakıt tüketimini azaltmış ve aracın daha çevik hareket edebilmesini sağlamıştır. Sivil araçlarda olduğu kadar askeri araçlarda da ağırlığın azaltılması ve aracın hareket kabiliyetinin artırılması oldukça önemlidir. Özellikle tanklar ağır silahlara karşı koruyucu çelik zırhlarla donatıldığından sınırlı hızda hareket edebilmekte ve çok fazla yakıt tüketmektedir. Bu nedenle bu araçlarda zırh malzemesi olarak kullanılmak üzere malzeme arayışlarının sürmesi otomotiv sanayinde geniş uygulama alanı bulan çift fazlı çelikleri akla getirmiştir.

Bu çalışmada dört farklı sıcaklıktan su verme ısıl işlemiyle elde edilen çift fazlı çeliklerin 7,62 mm zırh delici mermiler karşısındaki balistik başarımının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında düşük, orta, yüksek ve tamamen martenzit hacim oranına sahip çift fazlı çeliklerin içyapıları incelenmiştir. Daha sonra yalnızca su verilmiş, su verme işleminden sonra 200 °C'de menevişlenmiş ve su verme işleminden sonra 400 °C'de menevişlenmiş koşullarda numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Sertlikleri ve çekme dayanımları incelenerek martenzit hacim oranının ve menevişleme ısıl işleminin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Dört farklı martenzit hacim oranına sahip iki grup numuneden birinci grup 200 °C'de, diğer grup 400 °C'de menevişlenerek toplam sekiz farklı ısıl işlem

koşulunda ve beş farklı alan yoğunluğunda olmak üzere kırk çeşit atış numunesi hazırlanmıştır. Her bir numuneden üçer adet hazırlanarak toplam 120 adet atış gerçekleştirilmiştir. Atışlar sonrası numunelerin makro ve mikro fotoğrafları çekilmiş, oluşan hasarlar gözlemlenmiş ve balistik başarımları belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Çift fazlı çeliklerin içyapılarının araştırılması ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine çok sayıda çalışma mevcut iken, balistik başarımlarının incelenmesi üzerine yapılan çalışmalar kısıtlıdır ya da bilinmemektedir. Zırh malzemesi geliştirilmesi askeri uygulama alanına girdiğinden bu alanda geliştirilen malzemeler askeri politikalar gereği gizli tutulmaktadır.

Topçu ve arkadaşları [7], çalışmalarında ağırlıkça %0,28 C, %1.45 Mn, %0,21 Cr, %0,20 Si, %0,13 V, %0,01 Nb, %0,02 P ve %0,02 S içeren çift fazlı çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada tam tavllanmış, normalleştirme ısıl işlemi uygulanmış ve sırası ile 737 °C, 754 °C, 779 °C ve 900 °C'den su verilmiş koşullarda hazırlanan numunelerin sertlikleri ve çekme dayanımları incelenmiştir. Tam tavlama ısıl işlemi uygulanan numunelerin içyapısında ferrit ve perlit fazları gözlemlenirken, normalleştirilmiş numunelerde ise daha ince taneli ferrit ve perlit olduğu tespit edilmiştir. Su verme ısıl işlemi uygulanan çeliklerde ise artan sıcaklığa göre sırası ile %30, %54, %77 ve %100 oranında martenzit fazı görülmüştür. Yapılan deneyler sonucu numunelerde artan martenzit hacim oranına bağlı olarak numunelerin sertliklerinin ve çekme dayanımlarının arttığı belirlenmiştir [7].

Akay [8], yaptığı çalışmada %0,055 C içeren çift fazlı çeliğin farklı ısıl işlem koşullarında mekanik özelliklerini belirlemeye çalışmıştır. Üç farklı ara kritik bölge sıcaklığından su verme ısıl işlemi uygulanan çeliklerin bir kısmı 400 °C'de menevişlenmiş ve her iki gruba çekme deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucu menevişleme işleminin malzemenin akma ve çekme dayanımını düşürdüğü ve bunun martenzit tane büyümesinden kaynaklandığı ortaya çıkmıştır. Çalışmada ayrıca çift fazlı çelikte dayanımı arttıran birinci etkenin artan martenzit hacim oranı olduğu belirtilmiştir.

Üngör [9], ağırlıkça %0,28 C, %1.45 Mn, %0,21 Cr, %0,20 Si, %0,13 V, %0,01 Nb, %0,02 P ve %0,02 S içeren çift fazlı çeliğin 737 °C, 754 °C, 779 °C ve 900 °C'den

su verilmiş, su verme ısıl işleminden sonra 200 °C ve 400 °C’de menevişlenmiş ve tam tavlama üzere toplam on üç farklı ısıl işlem koşulunda yorulma ömrünü incelemiştir. Çalışma sonucu menevişleme ısıl işleminin düşük ve orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin yorulma ömrünü azalttığı, yüksek ve tamamen martenzit hacim oranına sahip numunelerin ise yorulma ömrünü arttırdığı belirlenmiştir.

Zırh konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak bütüncül ve katmanlı olmak üzere iki tip zırh çeşidi kullanıldığı görülmektedir. Çelikler, üretim kolaylığı, düşük maliyeti ve geniş mekanik özellikleri nedeniyle en çok tercih edilen malzeme grubunu oluşturmuştur. Bununla birlikte seramikler, plastikler ve çelik dışı metaller de balistik olarak denenmiştir. Balistik uygulamalarda kullanılan zırh malzemesi yüksek sertliğin yanı sıra yüksek tokluğa sahip olmalıdır. Bu iki özelliği bir arada en üstün düzeyde sağlayabilmek için katmanlı kompozit zırhlar üretilerek deneyler yapılmıştır.

İkinci Dünya Savaşı’nın ardından düşük ağırlıklı zırh malzemelerinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. 1960’lı yıllarda cam elyaf kompozitlerin üretilmesiyle çelikten daha hafif bir malzemenin zırh olarak kullanılabilmesi düşüncesi yaygınlaşmıştır. Alüminyum oksit ana yapının cam elyaflarla takviye edilmesiyle geliştirilen kompozit, seramik sayesinde sert bir katmanda ve elyaflar yardımıyla tok bir yapıya sahiptir. Nispeten ucuz olan bu kompozitin alan yoğunluğu ise yaklaşık 60 kg/m²’dir. Zırh malzemesi olarak kullanılacak daha hafif malzeme arayışları sonucu geliştirilen bor karbür kompozitler alüminyum oksite göre %20 ağırlıktan kazanç sağlasalar da üretim zorlukları ve pahalılıkları yüzünden geniş uygulama alanı bulamamıştır [2].

Übeyli ve arkadaşları [10], çift fazlı bir çeliğin 7,62 mm zırh delici mermiler karşısındaki balistik başarımını incelemiştir. Ağırlıkça %0,28 C, %1,45 Mn, %0,21 Cr, %0,20 Si, %0,13 V, %0,01 Nb içeren çeliğe üç farklı ara kritik bölge sıcaklığından su vererek düşük, orta ve yüksek martenzit hacim oranına sahip atış numuneleri hazırlamışlardır. Bunun yanı sıra aynı çeliğe tam tavlama ısıl işlemi

uygulayarak dört farklı grup için balistik deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalar sonucunda artan martenzit hacim oranıyla birlikte balistik başarımın arttığı ve atış yapılan numunelerin tamamında bozulmuş adyabatik kayma bantları bulunduğu görülmüştür.

Deniz [11], Übeyli ve arkadaşlarının [10] çalışmasına ilave olarak aynı malzemeden, aynı ısıtma işlem koşullarında atış numuneleri hazırlayarak bunların önüne 6 mm kalınlığında %99 saflıkta alümina seramiği yapıştırılmış ve elde ettiği kompozitin balistik başarımını incelemiştir. Sonuç olarak çelik numunelerin önüne koyduğu yüksek sertliğe sahip seramiğin kırılarak darbe enerjisini büyük oranda sönmlediği ve çeliklerde oluşan hasarın azaldığını ortaya koymuştur [11]. Benzer şekilde araştırmacılar [12, 13] yaptıkları çalışmada AISI 1050, AISI 4140, AISI 4340, 100Cr6 ve Alüminyum alaşımlarına çeşitli ısıtma işlemleri uygulamış ve beş farklı alan yoğunluğunda atış numuneleri hazırlamıştır. Her bir alan yoğunluğunda 40, 50, 55 ve 60 HRC sertlikte hazırlanan çelik numuneler içerisinde en yüksek başarımı yaklaşık 53 HRC sertlikteki AISI 4340 numunesi göstermiştir. Demir [14], daha sonra bu numunenin önüne seramik takviye yerleştirerek deneyleri tekrarlamıştır ve seramik katmanın zırh çeliğine göre %48-56 oranında ağırlıktan kazanç sağladığını ortaya koymuştur. Çalışmalar aynı zamanda mermi çekirdeği ile aynı malzeme olan 100Cr6'nın zırh malzemesi olarak kötü başarım sergilediğini göstermiştir. Seramiğin balistik darbe sönmleyicisi olarak çok önemli görev üstlendiği bir başka çalışma tarafından desteklenmektedir [15].

Cerit [16], parçacık ve elyaf takviyeli Alüminyum matrisli kompozitlerin balistik başarımını incelemiştir. AA5083, AA2024 ve AA7075 matris içerisine ayrı ayrı Al_2O_3 ve SiC parçacık ve elyaf Kevlar-49 takviye etmiştir. Çalışmalar sonucunda parçacık takviyeli kompozitin ön katman olarak kullanıldığında daha başarılı sonuçlar verdiğini, elyaf takviyenin ise geride daha iyi enerji sönmlediğini göstermiştir.

Alüminyum üzerine yapılan bir diğer çalışmada ise Orgorkiewicz [17], AA7039'un zırh çeliğine göre ağırlıktan kazanç sağladığını ortaya koymuştur. Woodward [18] ise SAE 1020, SAE 4130, P8 Hadfield çeliği, AA5083, AA7039 ve titanyum alaşımlarının mekanik özelliklerinden yola çıkarak bir karşılaştırma yapmıştır. Çalışmaları sonucuna göre titanyum alaşımları ve Hadfield çeliği diğer malzemelerden daha üstün balistik başarıma sahiptir.

Gupta ve Madhu [19], RHA (Rolled Homogenous Armor – Haddelenmiş Homojen Zırh) çeliği, alüminyum ve düşük sertlikteki çelik numuneleri tek ve çok katmanlı olarak denemişlerdir. Çapı 6,2 mm olan mermiler karşısında balistik olarak test edilen numuneleri inceleyerek katman sayısının ikiden fazla olmasının başarımı olumsuz etkilediğini göstermişlerdir. Aynı araştırmacılar, yaptıkları bir diğer çalışmada [20] düşük ve yüksek saflıktaki seramik ön takviyenin 40 mm kalınlığındaki Al7017 destek ile birlikte balistik başarımını incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucuna göre yüksek saflıktaki seramik takviyeler daha iyi başarımlar göstermiştir.

Zırh malzemelerinin balistik başarımları eğik atış koşullarında zırha etkiyen normal kuvvetin azalması sonucu beklendiği şekilde artmaktadır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar [21–23] bu kanıyı desteklemektedir. Katmanlı zırh malzemelerinin birleştirilmesinde kullanılan yapıştırıcının etkisi ise Übeyli ve arkadaşlarının [24] yaptığı bir çalışmada araştırılmıştır. Bu çalışmaya göre metal ve seramik arasında kullanılan epoksi ya da poliüretan esaslı yapıştırıcının balistik başarıma önemli bir katkısı olmadığı, ancak poliüretan esaslı yapıştırıcı kullanıldığı durumlarda seramik katmanın atış sonrası parçalı bir halde metale tutunduğu ortaya konulmuştur.

3. BALİSTİK

Balistik, mermilerin hareket ve davranışlarını inceleyen bilim dalı olup, yüzyıllar boyu akademisyenlerin araştırma konusu olmuştur. Newton, Lagrange ve Bernoulli gibi dünyanın önde gelen fizik ve matematikçileri balistik uygulamalar üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Toplumun her kesiminden birçok kişinin ilgisini çeken balistik konusu üzerinde çalışan James Paris Lee, henüz 12 yaşında hiçbir akademik eğitim almamasına rağmen Lee-Enfield tüfeğini icat etmiştir [25].

Balistik konusu genel olarak üçe ayrılır:

1. İç balistik
2. Dış balistik
3. Terminal Balistik

Bazı kaynaklarda “ara balistik” olarak nitelendirilen dördüncü bir balistik dalı olduğu belirtilmektedir. Bu dal, merminin namluyu terk ettiği andaki olayları inceleyen balistik dalı olup, önceleri iç balistiğin uygulama alanına dahil edilirken son zamanlarda ayrı bir dal olarak anılmaya başlanmıştır [25].

3.1. İç Balistik

Silahlar çalışma ilkeleriyle içten yanmalı motora benzetilebilir. Motor içerisinde pistonun yakıtı sıkıştırması sonucu patlama meydana gelir ve bir itme kuvveti oluşur. Silah içerisinde de mermiyi harekete geçiren bu itme kuvvetidir [25]. İç balistik, merminin namlu içerisinde harekete geçmesinden itibaren namlu ağzından çıkıncaya kadarki hareketlerini inceleyen balistik dalıdır [26]. Namlu içerisinde gerçekleşen olaylar tam olarak son yarım yüzyıl içerisinde açıklığa kavuşmuştur. İlk kez Benjamin Robins isimli araştırmacı namlu içerisinde ateşlenen barutun oluşturduğu kuvvet hakkında kabul edilebilir çıkarımlar yapmıştır. Robins’e göre vakumlanmış ortamda ya da hava içerisinde ateşlenen barut ortamda elastik bir akışkan hava oluşturur. Bu akışkan hava ortama basınç uygular ve patlama anından itibaren oluşan

ısı akışkanın elastisitesini artırır. Yaklaşık 1000 atm basınca çıkan akışkanın sıcaklığı bu anda kızgın bir demirin sıcaklığına eşit olur. Yüksek basıncın etkisi ile birlikte namlu içerisinde mermi itilir ve ortamın genişlemesiyle birlikte namlu içerisindeki basınç azalmaya başlar. Mermi namluyu terk edene kadar basınç mermiyi ivmelendirmeyi sürdürür [26].

İç balistik uygulamalarıyla kullanılması gereken barutun cinsi ve miktarı belirlenebilmektedir. Yanma sonucu açığa çıkan basınç öngörülerek namlunun boyu ve kalınlığı hesaplanabilmekte, namlu içerisinde mermiye etkiyen kuvvetler analiz edilerek merminin hızının artırılması yönünde araştırmalar yapılabilmektedir [26].

3.2. Dış Balistik

Dış balistik, merminin namluyu terk ettiği andan hedefe çarpana kadar geçen süredeki davranışını inceleyen bilim dalıdır [25]. Mermi ya da fırlatılan nesneye uçuş esnasında çeşitli kuvvetler etki eder. Dış balistik genel olarak mermiye uçuş esnasında etkiyen kuvvetleri, merminin kararlılığını, öngörülen uçuş güzergahını, uçuş hızı ve süresini, yer ile yaptığı açıyı ve darbenin etkiyeceği bölgeyi inceler. Bunların hesaplanabilmesi için iç balistik bilgilerine ve merminin tasarım bilgilerine ihtiyaç vardır. Merminin çıkış hızı ve açısı, namlu içerisindeki yiv hızı, geometrisi ve ağırlığı bilinmeden dış balistik hesaplarının yapılması mümkün değildir. Bu nedenle dış balistik mermi tasarımcılarına da rehberlik etmektedir [25, 27]

Dış balistik uygulamalarının tamamen doğru yapılması molekül teorisinin yeteri kadar çözülememesi nedeniyle oldukça zordur. Havada merminin ilerleyebilmesi için hava moleküllerinin mermiye yol açması gerekmektedir. Merminin ağırlığından dolayı oluşan yer çekimi kuvveti ve uçan mermi ile hava arasında oluşan sürtünme kuvveti sonucu hava ile merminin tepkimeye girmesi söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle burada bir takım kabuller yapılarak dış balistik analizleri yapılmaktadır. En doğru sonuçlara ise ancak çok sayıda deney gerçekleştirilerek yapılan ölçümler sonucu ulaşılabilmektedir [27].

Dış balistik, mermiye uçuş sırasında etkiyen hava dinamiği kuvvetlerinin yanı sıra, hedefin hangi bölgesine çarpacağını da inceler. Merminin yörüngesi hesaplanırken hava koşullarının bilinmesi gerekmektedir [27].

3.3. Terminal Balistik

Hedef balistiği olarak da bilinen terminal balistik, merminin hedefe çarptığı anda gerçekleşen bütün olayları inceler. Merminin hedefe nüfuzu sırasında gerçekleşen mekanik olaylar, merminin ve hedefin çarpışmadan nasıl etkilendiği, varsa sıçrayan parçacıkların davranışı ve atışın öldürücü ya da yaralayıcı etkileri terminal balistik incelemeleri ile ortaya çıkar. Son zamanlarda merminin yaralayıcı etkileri konusu dünyada büyük önem kazandığından merminin dokulara etkisini inceleyen “yara balistiği” dalı türemiştir [25].

Mermi ile hedefin çarpışması sonucu oluşabilecek durumlar merminin hedefe çarpma hızına, açısına, mermi malzeme ve geometrisine ve hedef malzemenin mekanik özelliklerine bağlıdır. Merminin hedefi delip geçmesi, hedefe saplanıp kalması ya da hedeften sekmesi gibi çarpışma mekanizmaları gerçekleşebilir [11].

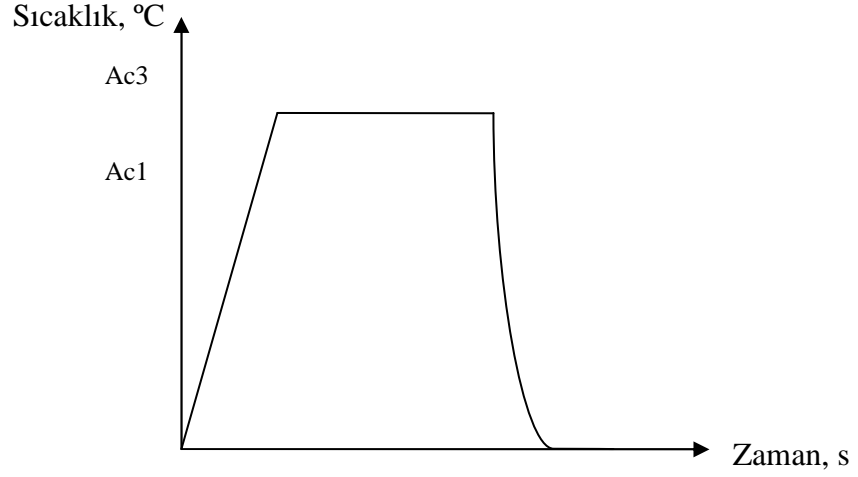
Zırh malzemesi olarak en çok metaller kullanılmaktadır. Mermiler zırhlara çok geniş aralıkta farklı hızlarda çarptığından her durumu ayrı ayrı değerlendirmek gerekir. Çok düşük çarpma hızlarında (<250 m/s) merminin enerjisinin bütün zırh tarafından sönmülenir ve cevap süresi yaklaşık 1 ms'dir. Artan çarpma hızlarında ise (500-2000 m/s) merminin enerjisi darbe merkezinin yaklaşık 2-3 mermi çapı kadar alanı tarafından karşılanır. Bu nedenle çarpma hızı arttıkça hedefin darbeye karşı tam koruma sağlaması için kalınlaştırılması gerekir. Çarpma hızının 12.000 m/s'ye çıkması durumunda ise enerjinin sönmülenebilmesi için teorik olarak darbeye maruz kalan numunenin buharlaşması gerekmektedir. Güncel askeri uygulamalarda bu hıza çıkılmadığı için gerçek etki bilinmemektedir [25].

Mermi hedefe çarptığı zaman hem mermi üzerinde hem de hedef üzerinde basma kuvveti dalgaları oluşmaktadır. Bu dalgalar hedefin dış serbest sınırına ulaştığında

çekme kuvveti olarak geri döner ve kırılma durumlarında numune bu anda kırılır. Eğer atış tamamen hedefe dik doğrultuda ise yalnızca iki-boyutlu dalgalardan söz edilebilir. Eğik atışlarda ise bu kuvvetlerle birlikte eğilme gerilmeleri oluşmaktadır. Tam koruma sağlayamayan numunelerde ise hedef malzemenin türüne göre çeşitli hasarlar oluşur. Merminin açtığı deliği tıkaması, delip geçmesi, hedefte taç yaprağı oluşturarak delmesi, çarptığı bölgeyi kabuk şeklinde kırması ve çarptığı bölgeden parçacıklar fırlatması oluşabilecek hasar mekanizmalarıdır [25].

4. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER

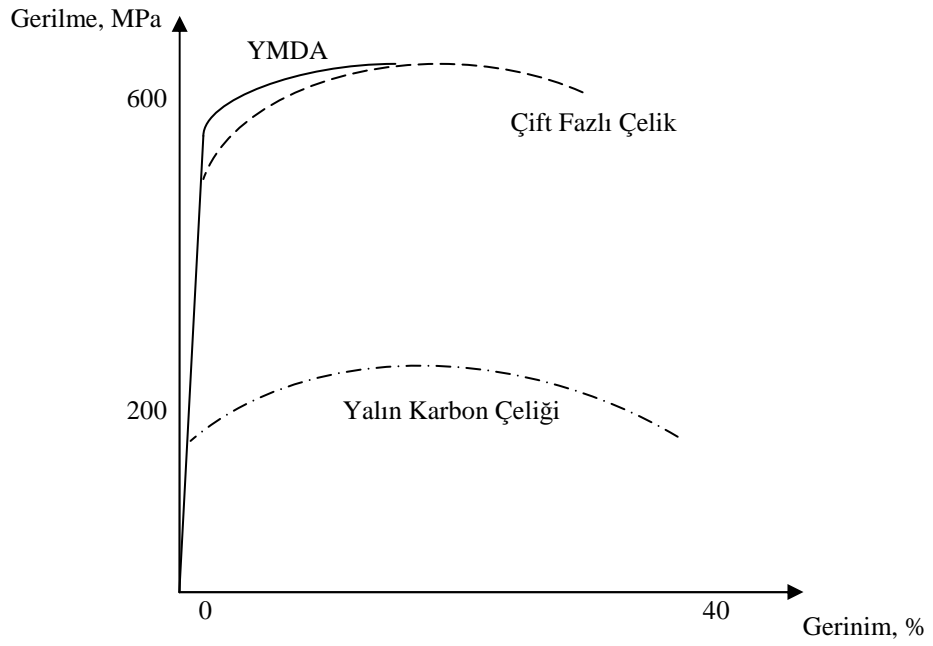
Çift fazlı çelikler düşük alaşım çelikleri grubundan olup, ara kritik bölgeden hızlı soğutma sonucu oluşurlar. Ara kritik bölgeye çıkarılan çeliğin bu sıcaklıkta tavlama ile yapısında östenit ve ferrit fazlarının oluşması sağlanır. Daha sonra bu sıcaklıktan hızlı soğutulan çeliğin içyapısında ferrit fazı aynen kalırken, östenit fazı martenzit fazına dönüşür. Oluşan ferrit ve martenzit fazı çift fazlı çeliğe ismini veren fazlardır [5]. Şekil 4.1’de çift fazlı yapının ısı işlemi ile oluşumunun çizgisel gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.1. Çift fazlı yapının ısı işlemi ile oluşumu.

Çift fazlı çeliklerin yapısında bulunan sert martenzit fazı malzemeye yüksek dayanım kazandırırken, ferrit fazı malzemenin sünek olmasını sağlar. Martenzit ve ferrit fazlarının oranları malzemenin mekanik özelliğini doğrudan etkilemektedir. Bunun yanı sıra ferrit tane boyutunun da mekanik özellikleri değiştirdiği yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkarılmıştır. Artan martenzit hacim oranıyla birlikte malzemenin çekme dayanımı artarken, sünekliği azalmaktadır [28, 29]. Yapıda bulunan martenzitin hacim oranı ara kritik bölgede yapılan tavlama sıcaklığının artırılması ile yükselirken, günümüzde çift fazlı çelikler genellikle %20 oranında martenzit içermektedir [30].

İçerdiği karbon miktarıyla düşük karbonlu çelikler sınıfında yer alan çift fazlı çelikler, sahip olduğu alaşım elementleriyle de yüksek mukavemet düşük alaşım (YMDA) çeliklerine benzemektedir. Şekil 4.2’de benzer kimyasal bileşime sahip YMDA çeliği ve çift fazlı çeliğe ek olarak alaşım elementi içermeyen düşük karbon çeliğinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir. YMDA çeliği ve çift fazlı çelik ağırlıkça %0,1 C, %1,5 Mn, %0,5 Si ve %0,1 V içermektedir [5].



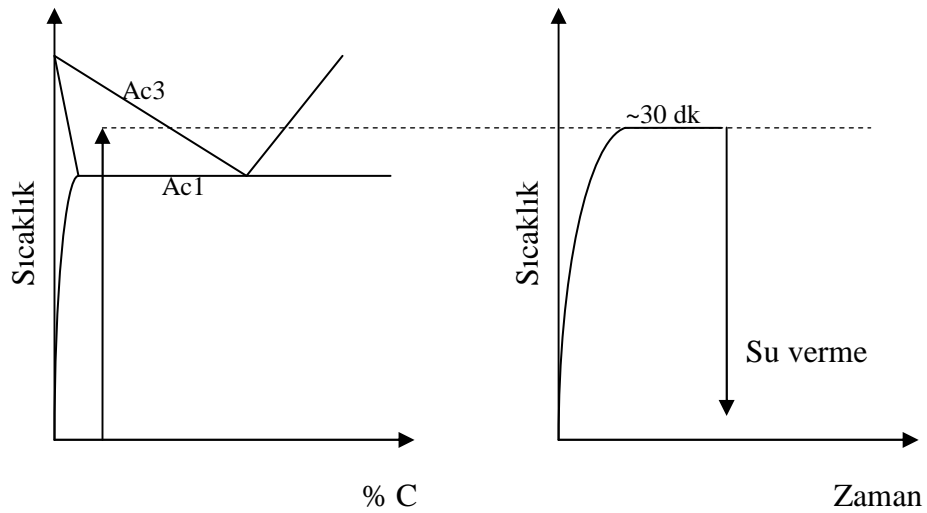
Şekil 4.2. YDMA çeliği, çift fazlı çelik ve düşük alaşım çeliklerinin deformasyon davranışlarının kıyaslayan gerilme-gerinim eğrileri [5].

YMDA çeliği ve çift fazlı çeliğin akma ve çekme dayanımları kıyaslandığında çift fazlı çeliğin daha düşük gerilme değerinde aktığı, buna karşılık YMDA çeliği ile aynı çekme dayanımına sahip olduğu görülür. Yüksek çekme dayanımlarına sahip olmalarının yanı sıra çift fazlı çeliklerin % uzama miktarları düşük karbon çeliği ile rekabet edebilecek kadar fazladır. Bu özellikleri onlara kolay şekillenebilirliğin yanı sıra yüksek tokluk kazandırmaktadır. Özet olarak çift fazlı çeliklerin avantajları; düşük akma/çekme oranına sahip olmaları, sürekli akma davranışı göstermeleri, yüksek toplam uzama miktarına sahip olmaları ve gerinim sertleşmesi miktarlarının fazla olması olarak sıralanabilir [4].

4.1. Çift Fazlı Çelik Üretim Yöntemleri ve İyapı Oluşumları

Çift fazlı çelik üretiminde kullanılan çeliğin ötektoidaltı çelik olması gerekmektedir. Yapısında bulunan alaşım elementleri martenzit fazının oluşumunu kolaylaştırdığı için genellikle YMDA çelikleri çift fazlı çelik üretiminde kullanılmaktadır [6]. Yapılan çalışmalara göre, çelikte çift fazlı yapıyı elde etmek için genellikle iki tür ısıl işlem yöntemi kullanılmaktadır [6, 8]. Her iki yöntem de çeliğin ara kritik bölgede tavlanaarak hızlı soğutulması esasına dayanır.

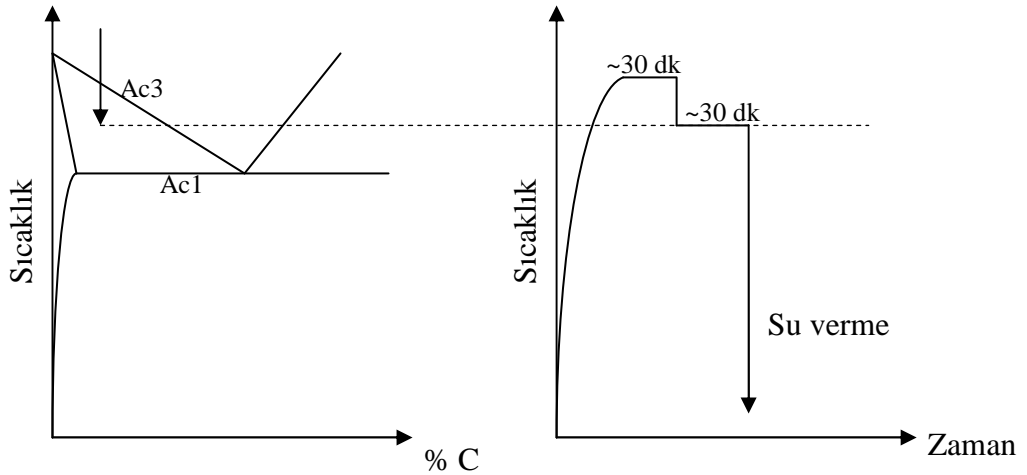
Birinci yöntemde çelik, ara kritik bölge sıcaklığına doğrudan çıkarılır. Başlangıçta ferrit ve sementit fazlarının bir arada bulunduğu çelikte ara kritik bölge sıcaklığına çıkılmasıyla östenit oluşumu gerçekleşir. Östenit, yüksek oranda karbon çözebildiğinden dolayı karbonca zengin bölge olan ferrit ve sementit ara yüzeylerinde çekirdeklenerek oluşmaya başlar. Östenit oluşumunun ilk basamağı olan çekirdeklenme anlık bir olaydır. Dönüşüm tamamlandıça çekirdekler hızla büyüyerek karbonca zengin östenit fazını oluşturur [5, 31–34]. Östenit oluşumunun tamamlanmasının yanı sıra, östenit tane sınırlarında dönüşüme uğramamış ferrit fazı bulunur. Şekil 4.3'te ara kritik bölgeden su verme ısıl işlemi ile çift fazlı çelik üretiminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.3. Ara kritik bölgeden su verme ile çift fazlı çelik üretimi.

Ara kritik bölge sıcaklığında yapısında östenit ve ferrit fazlarını bulandıran malzeme hızlı soğumaya maruz bırakıldığında, yapıda ferrit fazı aynen kalırken, karbonca zengin östenit fazı martenzit fazına dönüşür. Östenit yüzey merkezli kübik kafes yapıya sahip iken martenzit hacim merkezli tetragonal yapıdadır. Hızlı soğutma sırasında östenit içerisinde bulunan karbonun yayılımını engellenir ve hacim merkezli kübik kafes yapıya geçmek isteyen demir atomları karbon atomları tarafından sıkıştırılarak yapıyı hacim merkezli tetragonal yapıya dönüştürür [5, 35]. Yeterli hızda ve yeterli sürede soğuma gerçekleşirse östenitin tamamı martenzite dönüşür ve ferrit ve martenzitten oluşan çift fazlı yapı elde edilmiş olur.

İkinci yöntemde ise çelik, ara kritik bölge sıcaklığının da üzerine çıkarılarak yapıda tamamen östenit fazının oluşması sağlanır. Daha sonra ara kritik bölgeye soğutulan numune bu sıcaklıkta bir süre bekletilerek yapısında ferrit ve östenit fazları oluşturulur. İşlemin bundan sonrası birinci yöntem ile tamamen aynıdır. Ara kritik bölgeden hızlı soğumaya maruz bırakılan çelikte östenit fazı martenzit fazına dönüşerek çift fazlı yapıyı oluşturur [6]. Şekil 4.4'te bu yöntem ile çift fazlı yapı elde edilmesinin çizgesel gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.4. Östenit bölgesinden soğutma ile çift fazlı çelik üretimi.

Östenit bölgesinden ara kritik bölgeye soğutma yapıldığında östenit tane sınırlarında ferrit çekirdekleri oluşur. Büyüyen ferrit çekirdekleri östenitleri çevreler. Hızlı

soğutma sonucu östenitler martenzite dönüştüğünden, çift fazlı yapıda martenzitler ferritler tarafından çevrelenmiş haldedir [6, 35].

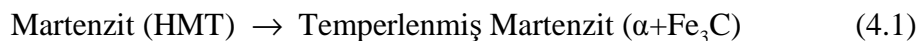
4.2. Çift Fazlı Çeliklerin Menevişlenmesi

Menevişleme, sertleştirilmiş bir çeliğin gerilimlerinin alınması için yeniden ötektoid sıcaklığının altında bir sıcaklıkta belirli bir süre bekletildikten sonra soğutulması işlemidir [35]. Çift fazlı çeliklere menevişleme işlemi uygulandığında yapıda ferrit ve menevişlenmiş martenzit fazları bir arada görülür.

Fazlar içerisinde en fazla sertliğe ve en yüksek dayanıma sahip olanı martenzit fazıdır. Bununla birlikte sünekliği ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Martenzit fazının sertliği yapısında bulunan karbon ile doğrudan ilgilidir. Oldukça gerilimli içyapıya sahip bu fazda karbonlar dislokasyon hareketlerini engelleyerek malzemeye dayanıklılık kazandırır. Ancak dayanımın artmasıyla birlikte sünekliğini yitiren malzemenin tokluğu düşmekte ve malzeme kırılma eğilimindedir. Karbonca zengin östenit fazının çok hızlı soğutulması sırasında, östenit kafes yapısı martenzit kafes yapısından daha yoğun olduğundan, kafes yapının hacminde bir artış meydana gelir. Karbon miktarının ağırlıkça %0,5'i geçmesi durumunda bu hacim artışı malzemede çatlaklar oluşturabilmektedir. Tüm bu sorunların ortadan kaldırılması için tamamen martenzit fazı içeren malzemeler menevişlenerek iç gerilmelerden arındırılır [5, 35].

Menevişleme işlemi genellikle 250–650 °C sıcaklıkları arasında yapılır. İşlem yapıldıktan sonra malzemenin sertliğinde bir miktar düşüş olur, ancak malzemenin % uzama miktarı arttığından tokluğu artırılmış olur. Ne kadar yüksek sıcaklıkta işlem gerçekleştirilirse sertlik de o kadar düşer [36].

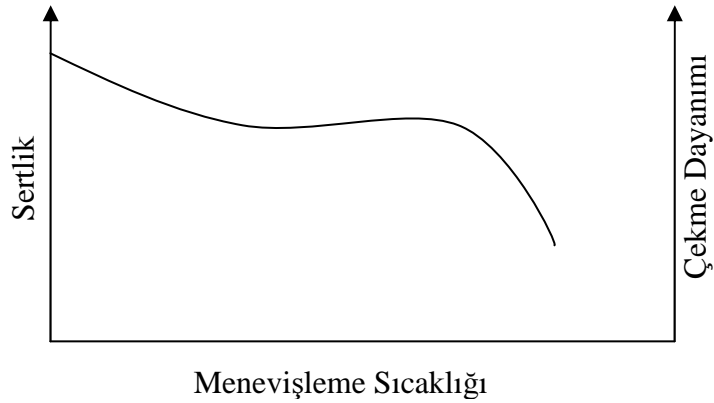
Martenzitin menevişlenmesi sonucu menevişlenmiş martenzit fazı oluşur ve (4.1)'de gösterildiği gibi ifade edilir.



Martenzit fazı karbonca aşırı doymuş hacim merkezli tetragonal yapıda tek bir faz iken menevişlenmiş martenzit kararlı ferrit ve sementit fazlarından oluşur. Burada aynı denge diyagramında olduğu gibi, ferrit hacim merkezli kübik yapıda iken sementit ortorombik kristal yapıya sahiptir [35].

Menevişlenmiş martenzitin içyapısı incelendiğinde oldukça küçük ve ferrit içerisine homojen dağılmış sementit parçacıkları görülür. Menevişlenmiş martenzitin de neredeyse martenzit kadar yüksek sertliğe sahip olması bu görüntü ile açıklanabilir. Birim hacimde ferrit ve sementit tane sınırlarının oldukça fazla olması dislokasyon hareketlerini engelleyerek malzemenin dayanımını arttırmaktadır. Ayrıca sert sementit, sünek ferrit fazını destekleyerek sertliğin artmasına katkı sağlamaktadır. Malzemenin sünekliğini, dolayısıyla tokluğunu arttıran etmen de yapıda sürekli fazının bulunmasıdır [5, 35].

Ferrit içerisinde dağılmış halde bulunan sementit parçacıklarının boyutu menevişlenmiş martenzitin dayanımını doğrudan etkilemektedir. Menevişleme sıcaklığının ve süresinin artması ile karbon yayılımı hızlanır ve oluşan sementit parçacıklarının boyutu büyür. Bu nedenle birim hacimdeki toplam ferrit ve sementit tane sınırı azalır. Sonuç olarak malzemenin sertliğinde azalma meydana gelirken, % uzama miktarı artmaktadır. Şekil 4.5'te menevişleme sıcaklığının sertliğe ve dayanımı etkisi gösterilmiştir [5, 35].

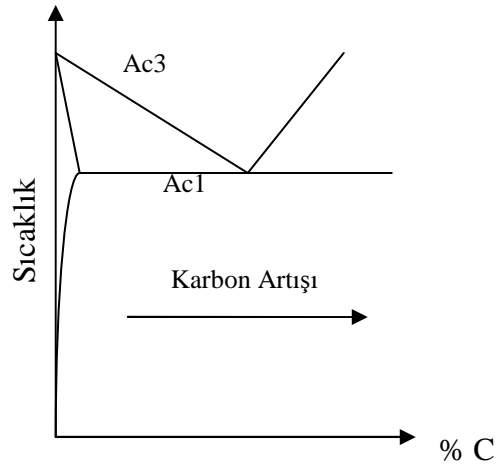


Şekil 4.5. Menevişleme sıcaklığının sertlik ve dayanıma etkisi [5].

4.3. Çift Fazlı Çeliklerde Alaşım Elementleri

Çeliklerin yapısında demir ve karbonun yanı sıra cevherden gelen çok az miktarda fosfor, kükürt ve silisyum bulunur. Bunların dışında alaşım elementi içermeyen bu tür çelikler yalnız karbon çelikleri olarak bilinir. Yalnız karbon çeliklerinin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesi için çeliğe Cr, Ni, Mn, Cu, Al, N, Mo, Nb, V, W ve Si gibi alaşım elementleri ilave edilir [5, 35, 37]. Bu elementler çeliğin ısısal işlem sonucu davranışını da önemli ölçüde etkilemektedir.

Çelikte çift fazlı yapı ara kritik bölgeden su verme ısısal işlemi ile elde edildiğinden, çift fazlı çelik üretiminde bu bölgenin geniş olduğu çeliklerin kullanılması kolaylık sağlar. Şekil 4.6'da verilen demir-sementit denge diyagramının ara kritik bölgesi incelendiğinde, çelikte karbon miktarı arttıkça ara kritik bölge daralmaktadır. Bölgenin daralması çift fazlı çelik üretimi ısısal işlemi zorlaştırırken, malzemenin kaynaklanma kabiliyetini de olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle çift fazlı çeliklerin üretilmesinde düşük karbonlu çelikler tercih edilir [38].



Şekil 4.6. Demir-Sementit denge diyagramında ara kritik bölge.

Diyagramda görüldüğü üzere karbon oranının artmasının yanı sıra çok düşük karbon oranında da kritik bölgede ısısal işlem yapılması zorlaşır. Bununla birlikte karbonun çok düşük olması mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Çeliğin martenzit fazı oluşturması doğrudan karbon oranının bir bağıntısı olduğundan oranın yaklaşık %0,3 olması tavsiye edilir [38].

Uygun karbon oranının seçilmesinin yanı sıra çeliğe Mn, Cr ve Mo alaşım elementlerinin ilavesi de ara kritik bölgeyi genişleterek çift fazlı çelik üretimini kolaylaştırır [37].

Çeliğe Cr ilavesi genellikle oksitlenmeye karşı direncin ve korozyon dayanımının artırılmasını akıllara getirir. Ancak çeliğin tamamen paslanmaz olması için bu oran en az %12 olmalıdır. Yapıda bu orandan daha az miktarda Cr bulunmasındaki amaç malzemenin sertleşebilirliğini arttırmaktır. Cr ile birlikte dayanım artışı sağlanırken, Ni tokluğu arttırmaktadır. Düşük karbonlu çeliklere menevişleme yapıldığında artan sıcaklıkla birlikte sertlikleri birden düşer. Ancak alaşım elementlerinin ilavesiyle bu durum engellenebilir. Karbür oluşturu elementler olarak bilinen Cr, Mo, V, Nb menevişleme ısıl işlemiyle birlikte sertliğin aniden düşmesini engeller. Menevişleme ısıl işlemiyle birlikte sertliğin düşmesi tane irileşmesi ile açıklanır. Çift fazlı çelikte yeterli miktarda karbür oluşturu elementlerin bulunması, menevişleme ısıl işlemi sırasında tanelerin irileşmesini engelleyerek dayanımı artırır. Ayrıca oluşan karbürler de yüksek sıcaklıklarda malzemenin dayanımını korumasını sağlar [5, 37].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme

Yapılan deneysel çalışmalarda içeriği Çizelge 5.1 ile verilen düşük alaşım çeliği kullanılmıştır. Piyasadan sıcak haddelenmiş olarak temin edilen çeliğin içeriği spektral analiz ile belirlenerek, sekiz farklı ısıl işlem koşulunda ve beş farklı alan yoğunluğunda olmak üzere toplam kırk çeşit atış numunesi hazırlanmıştır.

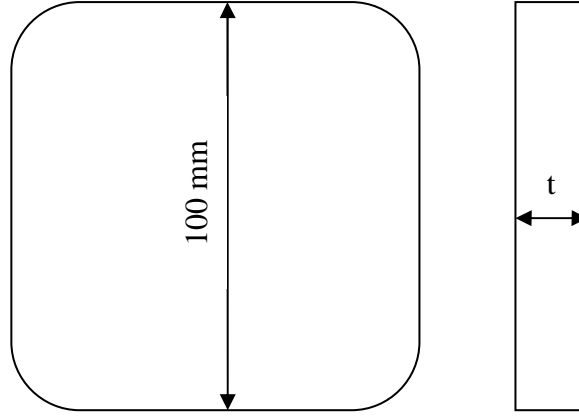
Çizelge 5.1. Çalışmalarda kullanılan çeliğin ağırlıkça % alaşım elementi içeriği.

C	Mn	Cr	Si	V	Nb	S	P	Fe
0,28	1,45	0,21	0,20	0,13	0,01	0,02	0,02	Kalan

Deneyde incelenen numunelerin kalınlıkları Deniz [11] tarafından çift fazlı bir düşük alaşım çeliğinde martensit hacim oranının balistik başarıma etkisinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmadan alınmıştır. Menevişlemenin balistik başarıma etkisinin gözlemlenebilmesi için aynı martenzit hacim oranlarını elde etmek amacıyla su verme işleminde de kullanılan sıcaklıklar bu çalışma ile aynı tutulmuştur.

5.2. Numunelerin Boyutlandırılması

Deney numunelerinin hazırlandığı çelik piyasadan 100x100x6000 mm ebatlarında temin edilmiştir. Belirlenen kalınlıklara yakın kalınlıkta şerit testere ile kesilen numuneler daha sonra üniversal torna tezgahı ile son kalınlığa indirilmiştir. Atış numunelerinin çizgesel gösterimi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Atış numunesinin çizgesel gösterimi.

Belirlenen kalınlıklara karşılık gelen alan yoğunlukları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Alan yoğunlukları aşağıda (5.1) ile verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$d_a = t.d \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte;

d_a : alan yoğunluğu, kg/m²

t : kalınlık, m

d : yoğunluk, kg/m³

değişkenlerini göstermektedir.

Çizelge 5.2. Numunelerin kalınlıkları ve buna karşılık gelen alan yoğunlukları.

Numune	Kalınlık, mm	Alan Yoğunluğu, kg/m ²
1	9	70
2	12	94
3	15	118
4	18	141
5	21	164

5.3. Numunelerin Isıl İşlemlerinin Yapılması

Deneyde incelenen numunelere ilk olarak su verme ısıl işlemi uygulanmıştır. Düşük, orta ve yüksek martenzit hacim oranına sahip çift fazlı yapıyı elde etmek için numuneler sırası ile ara kritik bölge sıcaklıkları olan 737 °C, 754 °C ve 779 °C'den oda sıcaklığındaki girdaplı suya atılmıştır. Tamamen martenzit yapı elde etmek için ise numunelere 900 °C'den su verilmiştir. Daha sonra su verilen numunelerden bir seri 200 °C'de, bir başka seri ise 400 °C'de 2 saat süre ile menevişlenmişlerdir. Yapılan ısıl işlemler sıcaklık ve süreleri ile birlikte Çizelge 5.3'te belirtilmiştir.

Çizelge 5.3. Numunelere uygulanan ısıl işlemler.

Grup	Su Verme Sıcaklığı (°C)	Fırında Tutma Süresi (dak)	Menevişleme Sıcaklığı (°C)	Menevişleme Süresi (dak)
1	737	30	200	120
2	754			
3	779			
4	900			
5	737		400	
6	754			
7	779			
8	900			

Isıl işlemlerin tamamı Protherm firması tarafından üretilen tav fırınında kontrol atmosfersiz ortamda gerçekleştirilmiştir.

5.4. Sertliklerin Belirlenmesi

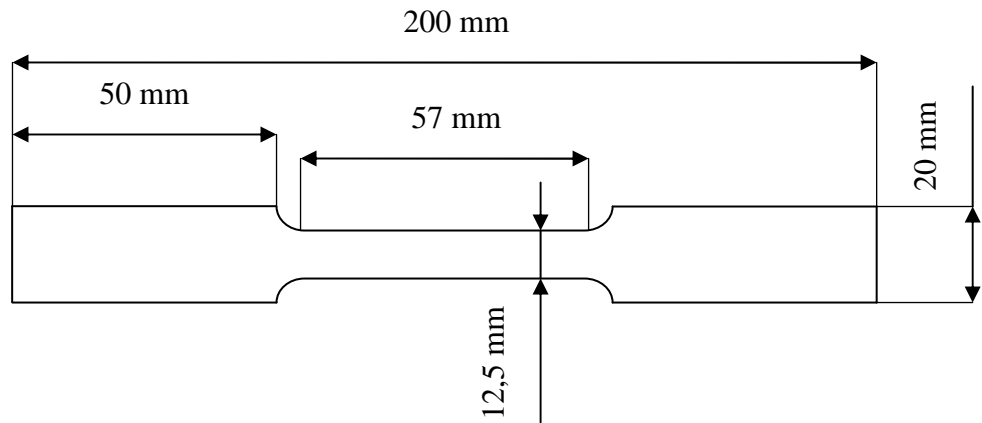
Atış numunelerinin hazırlanmasından önce sekiz farklı ısıl işlem koşulu bir kenarı yaklaşık 2 cm olan küp şeklinde numunelere uygulanarak, her bir numunenin sertliği 3 defa ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri Wilson Wolpert marka makro sertlik ölçüm

cihazında ASTM'nin Rockwell C standardı kullanılarak yapılmıştır [39]. Alınan ölçümlerin ortalaması ve standart sapması hesaplanmıştır.

Her bir ısıl işlem grubu için sertliklerin belirlendikten sonra atış numuneleri hazırlanmış ve her bir atış numunesinden 3 sertlik ölçümü alınarak yapılan ısıl işlemler kontrol edilmiştir.

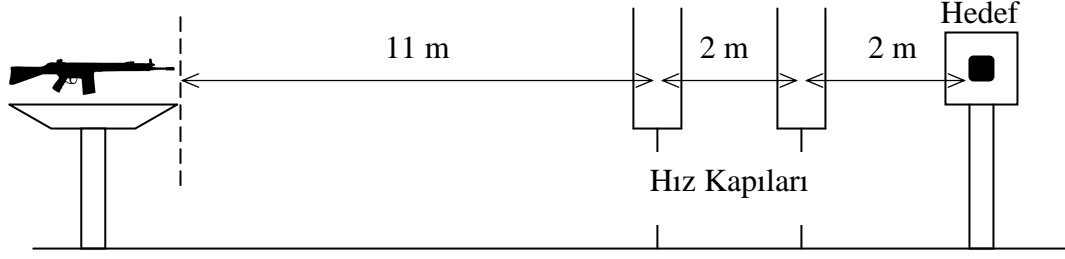
5.5. Çekme Deneyi

Menevişleme ısıl işleminin mekanik özellikleri nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla numunelere su verilmiş koşulda ve menevişlenmiş koşulda ayrı ayrı çekme deneyleri yapılmıştır. Deneylerin tamamı Instron marka LX600 model çekme cihazıyla standartlara uygun olarak 2 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Ölçüleri ASTM E8M-04 [40] standardına göre hazırlanan numune Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Numunelerin kalınlıkları ise Topçu [28]'nin yaptığı çalışmadan alınmıştır. Bu çalışmada yaptığı sertleşebilirlik deneylerinde su verme sonucu çift fazlı yapının 6 mm derinliğe kadar görüldüğünü belirlemiştir. Bu nedenle numuneler 6 mm kalınlıkta hazırlanmıştır. Her bir ısıl işlem grubu için deneyler 6 kez tekrar edilmiştir.



Şekil 5.2. Çekme deneyi numunesi ölçüleri.

Çekme deneyi sonuçlarına göre her bir ısıl işlem grubunun gerilme-gerinim eğrileri çizdirilmiş ve sonuçlar çizelge halinde bir araya getirilmiştir.



Şekil 5.3. Atışların gerçekleştirildiği düzeneğin çizgesel görünümü.

Deneyde balistik başarımı incelenen atış numuneleri namludan 15 m uzakta bulunan düzeneğe yerleştirilmiştir. Namludan 11 m mesafede 2 m arayla yerleştirilmiş hız kapıları yardımıyla merminin hızı ölçülerek ortalama mermi hızı $782 \pm 4,4$ m/s olarak hesaplanmıştır.

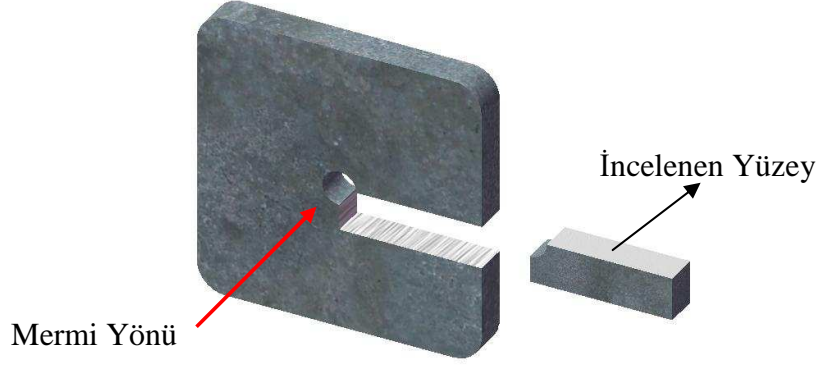
Atışlar G3 piyade tüfeği ile gerçekleştirilmiş olup genel özellikleri Çizelge 5.4'te belirtilen 7,62 mm zırh delici mermi kullanılmıştır. Her bir numuneye yalnızca bir kez atış yapılmak suretiyle aynı ısıl işlem ve kalınlığa sahip numunelerden üçer adet hazırlanarak toplam 120 atış yapılmıştır. Atış sonrası numunenin başarılı kabul edilmesi için tamamen delinmemiş olması gerekmektedir.

Çizelge 5.4. Atışlarda kullanılan 7,62 mm zırh delici merminin genel özellikleri [41].

Fişek uzunluğu	71,12±076 mm
Fişek ağırlığı	25,47±1,75 g
Kovan malzemesi	Pirinç (CuZn30)
Kovan ölçüleri	7,62x51 mm
Çekirdek malzemesi	DIN 100Cr6
Çekirdek sertliği	61-62 HRC
Mermi ağırlığı	9,75±0,7g
Mermi uzunluğu	32,95 mm
Burun tipi	Konik

5.9. Deney Sonrası Numunelerin İncelenmesi

Deney sonrası numunelerin tamamının üzerinde mikro ve makro incelemeler yapılmıştır. Numunelerin makro fotoğrafları çekilerek oluşan hasarlar incelenmiştir. Delinen numunelerin delinme şekilleri, tam koruma sağlayan numunelerde merminin çarptığı bölgede oluşan tahribatın biçimi gözlemlenerek ısıtılma işleminin mekanik özelliğe etkileri irdelenmiştir. Ayrıca Şekil 5.4 ile gösterilen kesikli çizgiler doğrultusunda numuneler kesilerek siyah ok ile gösterilen yüzeyde içyapı incelemeleri yapılmış ve tüm numunelerde içyapı değişiminin ne şekilde gerçekleştiği araştırılmıştır.



Şekil 5.4. Atış sonrası numunelerin incelenen yüzeyi.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Sertlik Ölçümleri

Her bir ısıtım işlem koşulu için ayrı ayrı hazırlanan numunelerden 3 adet sertlik ölçümü alınarak, ortalama sertlik değerleri standart sapmalarıyla birlikte hesaplanmıştır. Ölçümlerin tamamı Rockwell C standardına göre yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

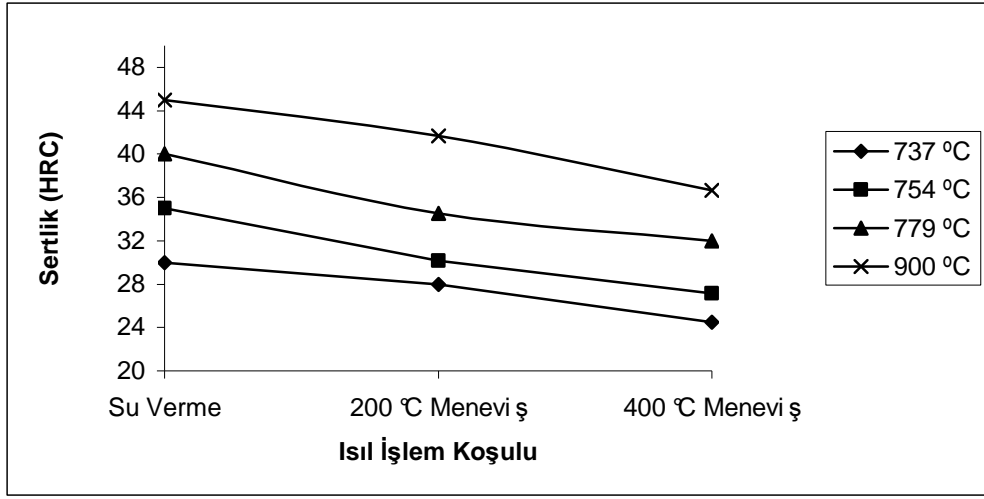
Çizelge 6.1. Numunelerin Rockwell C sertlik değerleri.

Tavlama Sıcaklığı, °C	Su Verme	Menevişleme	
		200 °C	400 °C
737	30,3 ± 1,2	28,0 ± 1,4	24,5 ± 1,6
754	34,6 ± 1,6	30,2 ± 1,7	27,2 ± 1,6
779	39,2 ± 1,8	34,5 ± 1,2	32,0 ± 1,1
900	45,2 ± 1,7	41,7 ± 1,5	36,7 ± 1,2

Çizelge 6.1 ile verilen sertlik değerleri incelendiğinde ara kritik bölge sıcaklığı artırıldığında su verilen numunelerin sertliklerinin arttığı görülür. Çift fazlı çeliklerin mekanik özelliklerini belirleyen en önemli etken olan martenzit hacim oranı bu değişimin temel sebebidir. Beklendiği üzere numunelerde artan martenzit hacim oranına bağlı olarak sertlik değerleri yükselmiştir. Hesaplanan standart sapma değerleri sertlik değerlerinin numunelerin farklı bölgelerinde birbirine oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Burada elde edilen sonuçların doğruluğunu bu konuda yapılan diğer çalışmalar desteklemektedir [9, 10, 28, 42].

Menevişleme ısıtım işleminin malzemenin sertliğine olan etkisinin daha iyi görülmesi için, Çizelge 6.1’de gösterilen sonuçlar Şekil 6.1’de grafik halinde verilmiştir. Grafikte menevişleme ısıtım işlemiyle birlikte numunelerin sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir. Artan menevişleme sıcaklığı ile birlikte sertlik kaybı da artış göstermiştir. Su verme ısıtım işlemi ile östenitten martenzit dönüşen içyapı, menevişleme ısıtım işlemi ile birlikte menevişlenmiş martenzite dönüşmüştür. Martenzit menevişlendiği zaman HMT kristal yapısı bozularak, HMK yapıya ferrit ve

ortorombik yapılu karbürleri oluşturur. Bu bozunumun temel sebebi karbon yayınıdır. Artan sıcaklıkla birlikte yayınım hızlanarak daha iri taneli karbürlerin oluşmasına neden olurken, buna zıt olarak, yapıda bulunan alaşım elementleri karbür oluşturu ve tane küçültücü görev üstlenir ve sertliği korumaya çalışır. Verilen grafikte 200 °C’de yapılan menevişleme işleminin sertliği önemli derecede düşürmediği görülürken, 400 °C’de yapılan menevişleme sonucu sertliğin yaklaşık olarak aynı oranda doğrusal olarak azaldığı sonucuna varılır.



Şekil 6.1. Menevişleme ısıl işlemi ile sertlik değerleri değişimi.

Menevişleme işlemi ile sertlik düşüşünde dikkat çeken bir diğer husus grafikteki doğrusalların eğimlerinin birbirine çok yakın olduğudur. 900 °C’den su verilen numunenin sertliği 400 °C’de menevişleme sonucu 45,2 HRC’den 36,7 HRC’ye düşerken, 737 °C’den su verilen numunenin sertliği 30,3 HRC’den 24,5 HRC’ye düşmüştür. Sonuç olarak sertliği yüksek olan numunenin sertlik kaybının da yüksek olduğu belirlenmiştir.

Her bir ısıl işlem koşulundaki numunenin sertliği belirlendikten sonra hazırlanan 120 adet atış numunesinin sertlik değerleri en az 3’er kez ölçülerek atış numunelerine yapılan ısıl işlemler kontrol edilmiştir. Aynı zamanda bu ölçümlerin numunelerin farklı bölgelerinden alınmasına dikkat edilmiştir.

6.2. Çekme Deneyleri

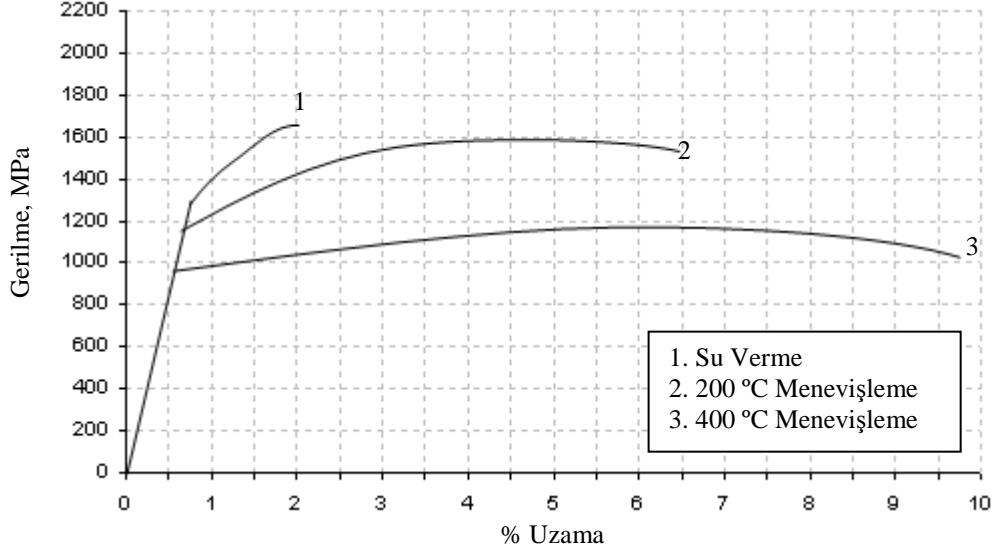
Sertlik değerleri belirlenenin belirlenmesinin ardından her bir ısıl işlem koşulunda çekme deneyi numuneleri hazırlanarak ASTM'nin ilgili standardına uygun olarak çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümlerinde olduğu gibi menevişleme ısıl işleminin mekanik özelliklere olan etkisinin incelenbilmesi amacıyla, yalnızca menevişlenmiş numunelerin balistik başarımı araştırılmasına rağmen, su verilmiş numunelere de çekme testi yapılmıştır. Çekme testleri sonucu numunelerin akma ve çekme dayanımlarıyla beraber % uzamaları belirlenmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Çekme testleri sonucu elde edilen değerler.

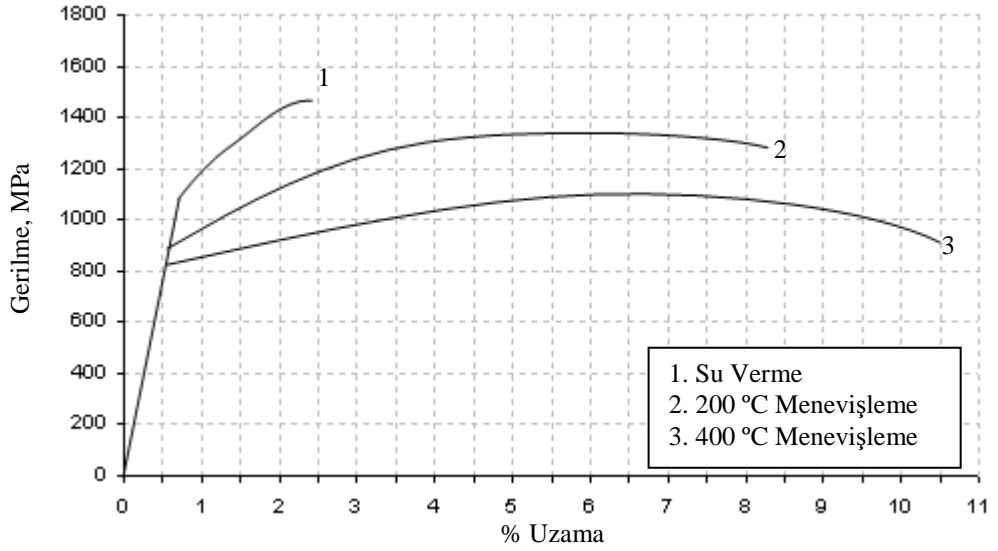
Su Verme Sıcaklığı (°C)	Menevişleme (°C)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
900	-	1192	1652	2,1
	200	1155	1584	6,5
	400	1003	1178	9,7
779	-	997	1417	2,5
	200	906	1369	8,3
	400	816	1139	10,5
754	-	788	1286	3,2
	200	733	1231	8,5
	400	602	930	11,4
737	-	634	1167	4,2
	200	620	1122	9,5
	400	583	886	12,2

Çizelgede verilen çekme testleri sonuçları incelendiğinde artan su verme sıcaklığına bağlı olarak yükselen martenzit hacim oranı malzemenin akma ve çekme dayanımını arttırmıştır. Martenzit hacim oranına artmasıyla, malzemeye süneklik özelliği veren ferrit bölgelerinin azalması sonucu numunelerin toplam uzama değerleri azalmıştır. Çekme testi sonuçları Çizelge 6.1 ile verilen sertlik ölçüm sonuçlarıyla kıyaslandığında numunelerin sertliklerinin artmasıyla dayanımlarının da arttığı görülür. Menevişleme ısıl işleminin sertliğe olan etkisi benzer şekilde dayanıma da yansımıştır. Artan menevişleme sıcaklığıyla birlikte numunelerde akma ve çekme dayanımları düşerken, toplam uzama miktarları artmıştır.

Şekil 6.2’de her bir ısı işlem grubuna ait numunelerin çekme testleri sonucu elde edilen gerilme-gerinim eğrileri verilmiştir.

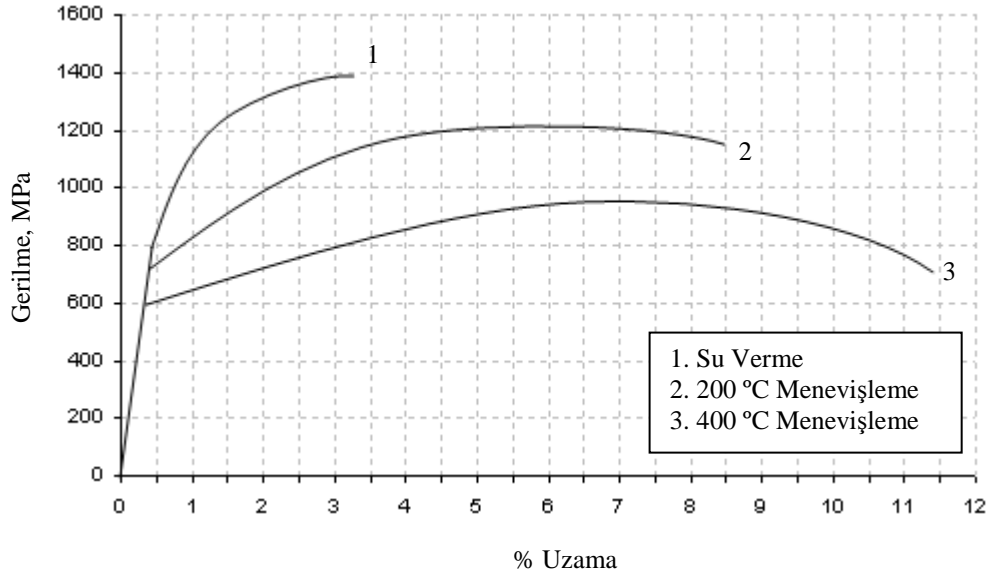


a) 900 °C’den su verilen numunelerin gerilme-gerinim eğrileri.

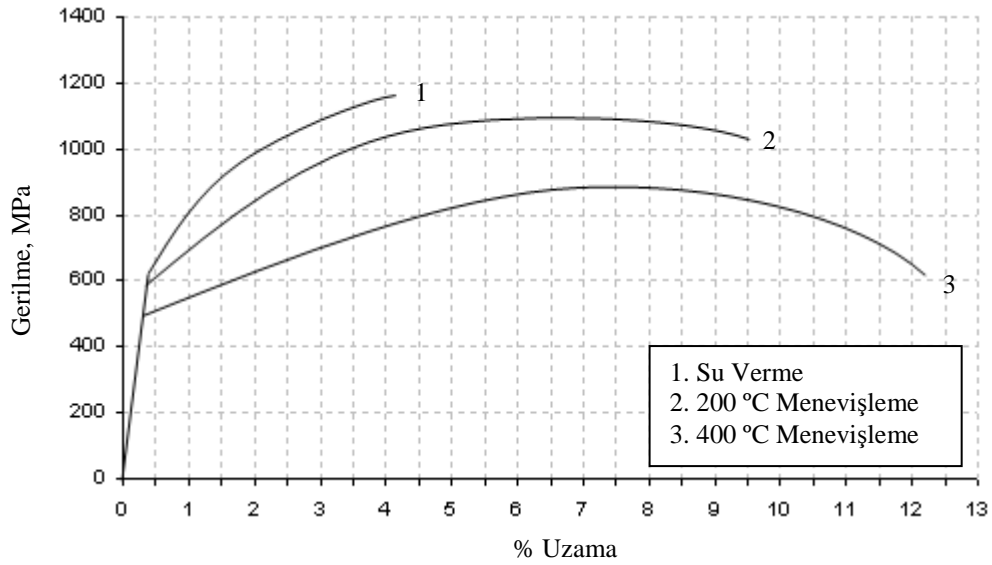


b) 779 °C’den su verilen numunelerin gerilme-gerinim eğrileri.

Şekil 6.2. Çekme testleri sonucu elde edilen her bir ısı işlem grubuna ait numunelerin gerilme gerinim eğrileri.



c) 754 °C'den su verilen numunelerin gerilme-gerinim eğrileri.



d) 737 °C'den su verilen numunelerin gerilme-gerinim eğrileri.

Şekil 6.2. (Devamı) Çekme testleri sonucu elde edilen her bir ısıl işlem grubuna ait numunelerin gerilme gerinim eğrileri.

Şekil 6.2’de yer alan (a), (b), (c) ve (d) eğri grupları incelediğinde menevişleme ısı işleminin dayanımı nasıl etkilediği açıkça görülür. Tüm gruplarda 1 ile gösterilen eğriler su verilmiş koşuldaki numunelerin gerilme-gerinim davranışını göstermektedir. Bu numunelerin tamamı kendi grubu içerisinde en yüksek akma ve çekme dayanımına ve en düşük toplam yüzde uzama değerine sahiptir. Gruplarda yer alan 2 numaralı eğriler su verme ısı işleminin ardından 200 °C’de menevişlenen numuneleri göstermektedir. Bu sıcaklıkta yapılan menevişleme sonucu tüm gruplarda malzemenin çekme dayanımında önemli bir azalma meydana gelmezken toplam yüzde uzama miktarı önemli derecede artmıştır. Bunun sebebi menevişleme ısı işlemi ile karbon yayılımı sonucu martenzit çıtalari bozularak ferrit matris yapı içerisinde dağılmış karbürleri oluşturmuştur. Ferrit yapının sürekliliğinden dolayı malzeme süneklik kazanırken karbürlerin dislokasyon hareketini engellemesi sonucu dayanım neredeyse korunmuştur. Gruplarda yer alan 3 numaralı eğriler ise su verme ısı işleminin ardından 400 °C’de menevişlenen numunelerin gerilme-gerinim davranışını göstermektedir. Bu eğrilerin hepsinde yüksek sıcaklıkta yapılan menevişleme ısı işleminin malzemenin akma ve çekme dayanımında önemli bir azalmaya yol açtığı görülmektedir. Bununla birlikte malzemenin toplam yüzde uzama miktarı artmıştır. Menevişleme ısı işleminde yüksek sıcaklığa çıkılmasıyla oluşan karbürler büyüyerek ferrit ve karbürlerin ara yüzeylerindeki toplam tane sınırı mesafesini azaltmıştır. Bu nedenle 200 °C’de yapılan menevişleme ısı işlemine göre dislokasyon hareketleri daha az engellenmiş ve malzeme daha fazla süneklik kazanmıştır.

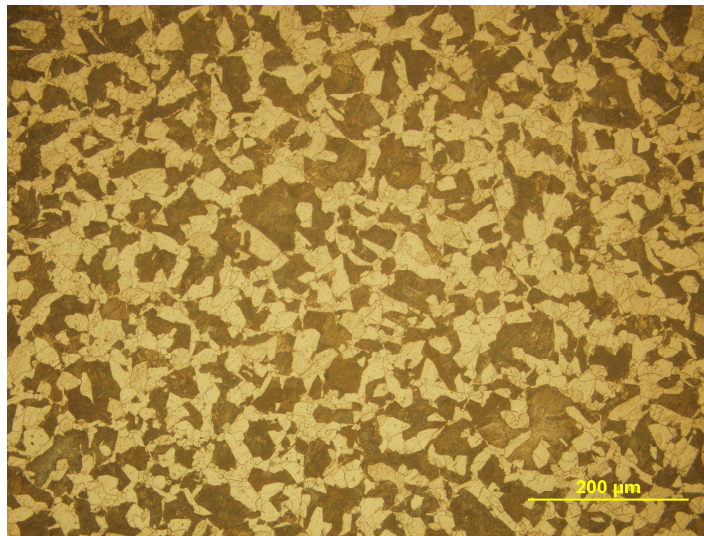
Çekme testi sonuçlarına göre dayanımdan bir miktar taviz verilerek malzemenin tokluğu artırılabilir. Gerilme-gerinim eğrilerin altında kalan alanlar incelendiğinde düşük sıcaklıkta yapılan menevişleme ısı işleminin tokluğu önemli derecede arttırdığı görülür. Çift fazlı çelikte menevişleme ile tokluğun artmasını yapıda bulunan Cr, Mo, V gibi alaşım elementleri sağlar. Bu elementler menevişleme sırasında karbürler oluşturarak ve tane inceltici görev üstlenerek dayanımın korunmasını sağlar ve malzemeye tokluk kazandırır. Bu nedenle yüksek darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda malzemenin düşük sıcaklıkta menevişlenmesinde fayda vardır.

Sonuçlar yapılan diğer çalışmalarla [4, 6, 7] kıyaslandığı zaman numunelerin akma ve çekme dayanımlarında farklılıkların olduğu görülür. Diğer çalışmalarda kullanılan çift fazlı çeliklerin içeriğinde bulunan alaşım elementleri miktarlarındaki farklılık bu değişimin temel sebebidir. Oluşan karbür miktarlarındaki farklılık, ısıl işlem sonrası numunelerin çarpılmış olabilmesi, su verme ortamlarının farklı olması ve numunelerin fırından çıkarılıp suya atılması sırasında yaşanabilecek zaman kayıpları mekanik özelliklerde değişikliklere neden olabilir. Tüm sonuçların ortak özelliği artan martenzit hacim oranıyla birlikte akma ve çekme dayanımlarında artış olduğu ve toplam yüzde uzama miktarında azalma olduğudur.

6.3. İçyapı İncelemeleri

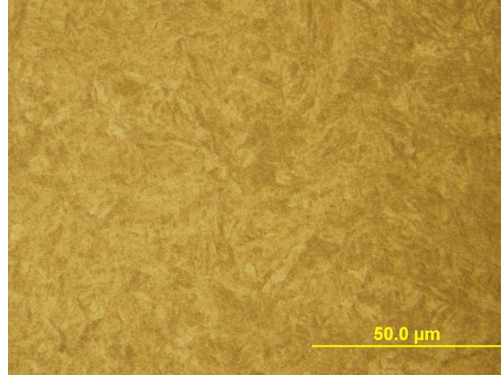
Balistik başarımı araştırılan numunelerin atışlar öncesi ısıl işlem yapılmadan ve her bir ısıl işlem koşulunda içyapıları incelenmiştir. Metalografik işlemlerden geçirilerek hazırlanan numunelerin görüntüleri bilgisayara bağlı optik mikroskop ile alınmıştır. Numuneler %3 nital ile 30 sn süre ile dağlanmıştır.

Şekil 6.3'te mikro alaşımlı çeliğin temin edildiği koşuldaki içyapısı verilmiştir. Şekil incelendiğinde malzemenin ferrit ve pörlitten oluşan bir içyapıya sahip olduğu görülür.

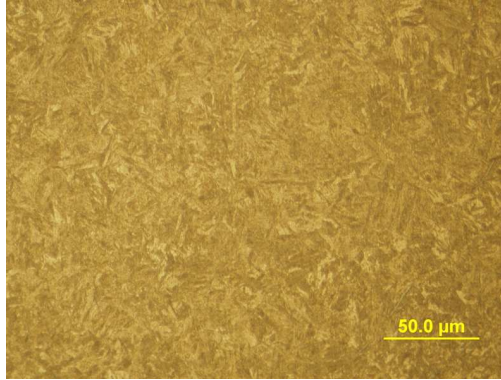


Şekil 6.3. Isıl işlem öncesi çeliğin içyapısı, x200.

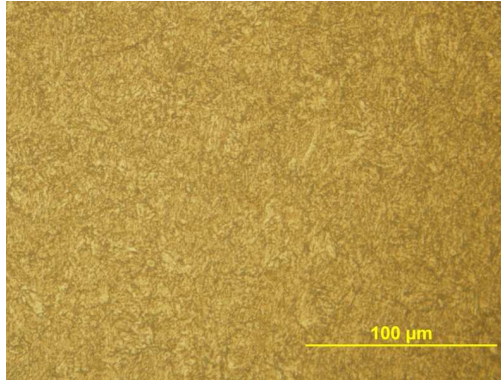
Şekil 6.4'te (a), (b) ve (c)'de sırası ile 900 °C'den su verilmiş, 200 °C'de ve 400 °C'de menevişlenmiş numunelerden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir. Şekillerde sırası ile martenzit ve menevişlenmiş martenzit fazları görülmektedir.



a) 900 °C'den su verilmiş numune, x1000.



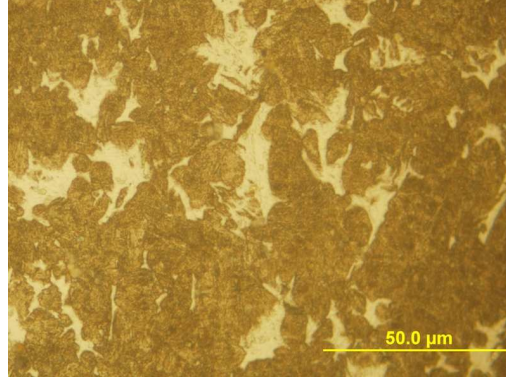
b) 900 °C'den su verildikten sonra 200 °C 'de menevişlenmiş numune, x500.



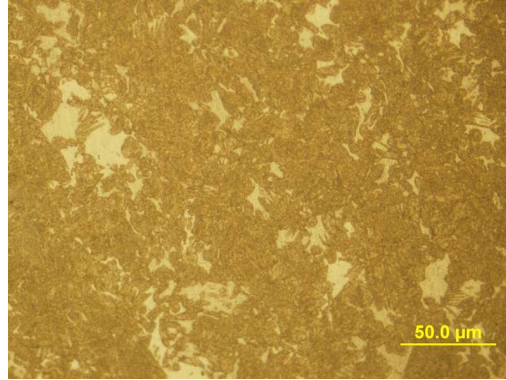
c) 900 °C'den su verildikten sonra 400 °C 'de menevişlenmiş numune, x500.

Şekil 6.4. Tamamen martenzit hacim oranına sahip numunelerin içyapıları.

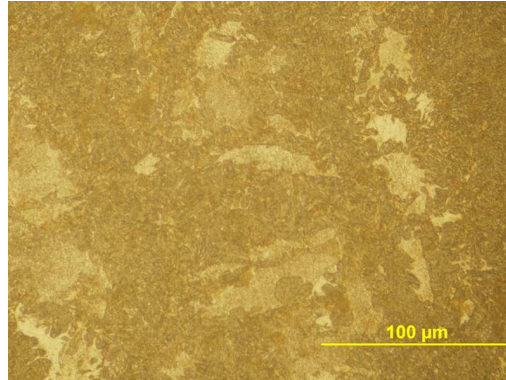
Şekil 6.5'te (a), (b) ve (c)'de sırası ile 779 °C'den su verilmiş, 200 °C'de ve 400 °C'de menevişlenmiş numunelerden alınan içyapı görüntülerinde ferrit ve martenzit fazları ve ferrit ile menevişlenmiş martenzit fazları yer almaktadır.



a) 779 °C'den su verilmiş numune, x1000.



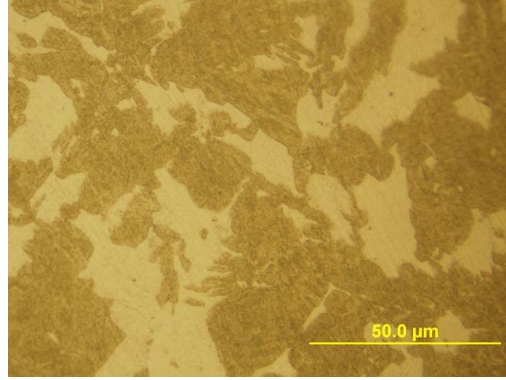
b) 779 °C'den su verildikten sonra 200 °C 'de menevişlenmiş numune, x500.



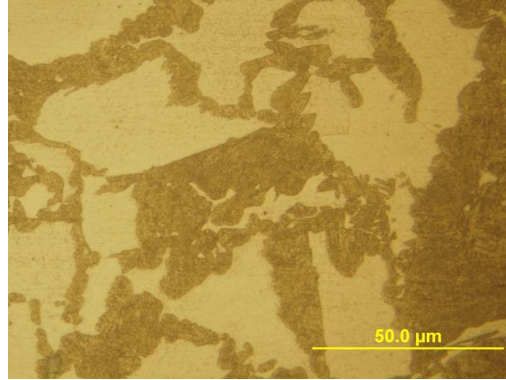
c) 779 °C'den su verildikten sonra 400 °C 'de menevişlenmiş numune, x500.

Şekil 6.5. Yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin içyapıları.

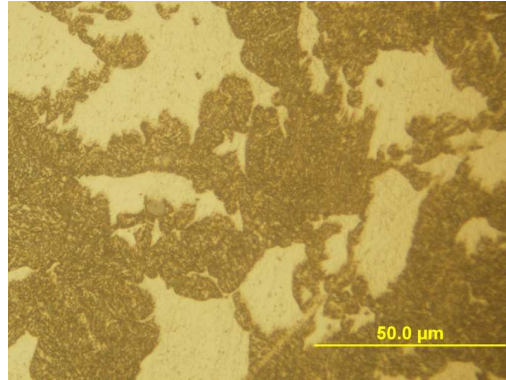
Şekil 6.6'te (a), (b) ve (c)'de sırası ile 754 °C'den su verilmiş, 200 °C'de menevişlenmiş ve 754 °C'de menevişlenmiş numunelerden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir. Ferrit miktarındaki artış ile birlikte martenzit fazları görülmektedir.



a) 754 °C'den su verilmiş numune, x1000.



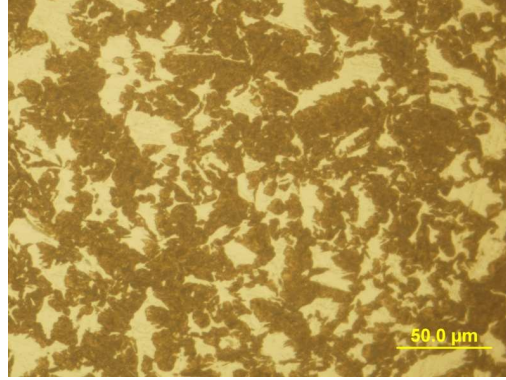
b) 754 °C'den su verildikten sonra 200 °C 'de menevişlenmiş numune, x1000.



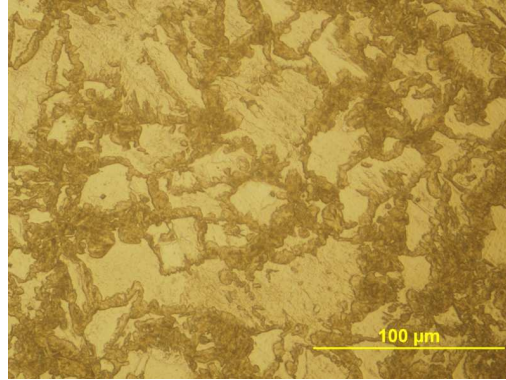
c) 754 °C'den su verildikten sonra 400 °C 'de menevişlenmiş numune, x1000.

Şekil 6.6. Orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin içyapıları.

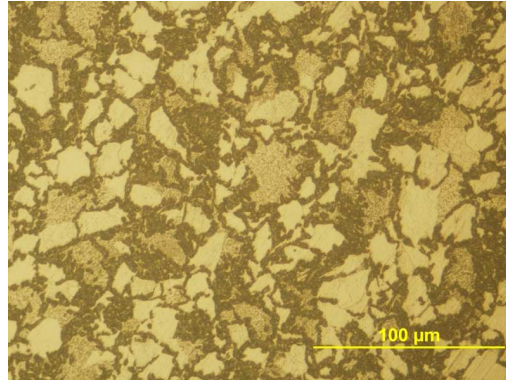
Şekil 6.7’te (a), (b) ve (c)’de sırası ile 737 °C’den su verilmiş, 200 °C’de menevişlenmiş ve 754 °C’de menevişlenmiş numunelerden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir. Ferrit ve martenzit fazları görülen şekillerde ferrit oranı artmıştır.



a) 737 °C’den su verilmiş numune, x500.



b) 737 °C’den su verildikten sonra 200 °C ‘de menevişlenmiş numune, x500.



c) 737 °C’den su verildikten sonra 400 °C ‘de menevişlenmiş numune, x500.

Şekil 6.7. Düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin içyapıları.

Isıl işlem görmemiş numunenin içyapısı incelendiğinde Şekil 6.3'te görüldüğü gibi perlitler ferritler tarafından çevrilmiştir. Numune 900 °C'ye çıkarılıp yeterli süre beklendiği zaman ferrit ve sementitler bozularak tamamen yüzey merkezli kübik yapılı östenit fazına dönüşür. Bu sıcaklıktan numuneye su verildiği zaman içyapı Şekil 6.4 (a)'da görülen tamamen martenzit fazına dönüşür. Şekilde martenzitlerin çıta şeklinde olduğu görülmektedir. Bu görüntü çekme ve sertlik deneyleri sonucundan da anlaşılacağı üzere numunenin sert olduğunu göstermektedir. Numune 200 °C'de menevişlendiğinde Şekil 6.4 (b)'ye bakıldığında içyapıda önemli bir değişiklik olmadığı görülür. Menevişleme sıcaklığı düşük olduğundan karbon yayılımı martenzit çıtalarını bozmaya yetmez. Ancak yapı içerisinde görülen beyaz renkli bölgelerden dolayı martenzitin menevişlenmiş martenzite dönüşerek yapıda ferritleri oluşturduğu söylenebilir. Şekil 6.4 (c)'de ise bu durum daha da açığa çıkmaktadır. Menevişleme sıcaklığının artmasıyla birlikte karbon yayılımı hızlanmış ve yapı tamamen ferrit ve karbürlerden oluşan menevişlenmiş martenziti oluşturmuştur.

Şekil 6.5 (a)'da görülen içyapı numuneye 779 °C'den su verilmesiyle elde edilmiştir. Ara kritik bölgeye çıkılmasıyla numunede ferrit ve östenit fazları elde edilmiş ve hızlı soğumayla birlikte östenitler martenzite dönüşmüştür. Ara kritik bölge sıcaklığının yüksek olmasından ötürü numunede yüksek martenzit hacim oranı elde edilmiştir. Görüntüde dikkat çeken bir diğer husus ise martenzit yapının sürekliliğidir. Ferrit adaları martenzitler tarafından çevrelenmiştir. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda yapılan menevişleme ısıl işlemi sonucu elde edilen içyapı bir önceki numunede olduğu gibi menevişlenmiş martenzittir. Numunelerin tavlandığı ara kritik bölge sıcaklığı 754 °C'ye düşürüldüğünde ferrit ve östenit fazları yaklaşık olarak eşit miktarda oluşur. Bu sıcaklıktan su verildiğinde Şekil 6.6 (a)'da görüldüğü gibi östenitler martenzite dönüşür ve orta martenzit hacim oranı elde edilir. Burada da martenzitler yapıdaki oranı düşüğü halde sürekliliğini korumaktadır. Aynı şekilde artan menevişleme sıcaklığıyla birlikte martenzit fazı içerisindeki beyaz renkli bölgeler artmaktadır. Şekil 6.6 (a) ve (b)'de görülen koyu renkli bölgeler menevişlenmiş martenzit iken, açık bölgeler yapıdaki ferritlerdir. Ferritlerin tane boyutları incelendiğine genel dağılımın 30-50 µm arasında olduğu görülür.

Şekil 6.7 (a) incelendiğinde 737 °C’den yapılan su verme ısıl işlemi sonucu çift fazlı yapıda düşük martenzit hacim oranı elde edildiği görülür. Menevişleme ısıl işlemiyle birlikte martenzit fazı menevişlenmiş martenzite dönüşmüştür.

6.4. Balistik Deneyler Sonrası Makro İncelemeler

Balistik deneylerde 8 farklı ısıl işlem koşulunda ve 5 farklı alan yoğunluğunda olmak üzere 3’er adet hazırlanan numunelere toplam 120 atış yapılmıştır. Atışlar sonucu numunelerin gösterdiği başarımlar Çizelge 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Numunelerin balistik başarımları (%).

Numune Grubu (S) Su Verme, (M) Meneviş	Alan Yoğunluğu (kg/m ²)				
	I. 70	II. 94	III. 118	IV. 141	V. 164
737 °C (S)- 200 °C (M)	0	0	67 (2)	100	100
737 °C (S)- 400 °C (M)	0	0	33 (1)	67	100
754 °C (S)- 200 °C (M)	0	0	67 (1)	100	100
754 °C (S)- 400 °C (M)	0	0	67 (2)	100	100
779 °C (S)- 200 °C (M)	0	0	100	100	100
779 °C (S)- 400 °C (M)	0	0	100 (1)	100	100
900 °C (S)- 200 °C (M)	0	100 (1)	100	100	100
900 °C (S)- 400 °C (M)	0	33	100	100	100

Çizelge 6.3’te verilen değerler tamamen aynı özellikte 3 adet numuneye yapılan atışlar sonucu hesaplanmıştır. Örneğin 3 numune birden atışlar sonucu delinmişse balistik başarımları %0’dır. Çizelgede parantez içerisinde verilen sayılar ise o numune grubuna ait numunelerde kaç tanesinin arka yüzeyinde hasar oluştuğunu göstermektedir. Arka yüzeylerinde çatlak oluşan numuneler başarılı sayılmıştır.

Balistik başarımlar çizelgesinde en yüksek alan yoğunluğuna sahip IV. ve V. grup tüm numunelerin %100 koruma sağladığı ve en düşük alan yoğunluğundaki I. grup numunelerin tamamının başarısız olduğu görülmektedir. III. grup numunelerde artan martenzit hacim oranıyla birlikte balistik başarımları artmıştır. Tamamen martenzit ve yüksek martenzit içeren numuneler %100 başarı gösterirken, orta ve düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerden en az bir tanesi delinmiştir.

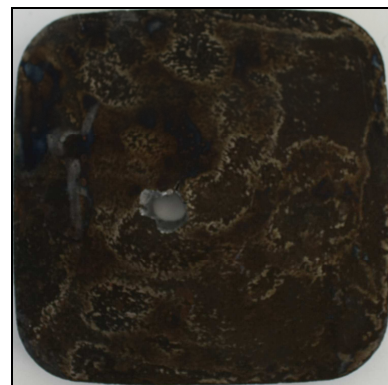
Çizelgedeki sonuçlara göre artan menevişleme sıcaklığıyla birlikte balistik başarımda düşüş olmuştur. Yüksek martenzit hacim oranına sahip olan numunelerden 200 °C’de menevişlenen üç numune de tam koruma sağlarken, 400 °C’de menevişlenen grupta bir numunenin arka yüzeyinde çatlak meydana gelmiştir. Benzer şekilde %67 başarı gösteren orta martenzit grubu numunelerden 200 °C’de menevişlenen bir numunenin, 400 °C’de menevişlenen iki numunenin arka yüzeyi çatlamış ya da delinmiştir. Düşük martenzit grubunda da artan menevişleme sıcaklığı ile birlikte balistik başarımlar %67’den %33’e düşmüştür.

Yapılan bir çalışmada [43] balistik başarımın akma dayanımı ile orantılı olduğu ortaya konmuştur. Bu çalışmadaki sonuçlar incelendiğinde de balistik başarımlar çekme deneyi sonuçlarında yer alan akma dayanımı değerleriyle orantılı olarak artmıştır. Çizelgeden çıkarılabilecek çarpıcı bir diğer sonuç ise benzer mekanik özelliklere sahip olan numunelerin aynı balistik başarımları göstermesidir. Sertliği 28,0 HRC olan 200 °C’de menevişlenmiş düşük martenzit hacim oranına sahip numuneler ile 27,2 HRC sertlikteki 400 °C’de menevişlenen numuneler %67 başarılı olurken iki grupta da mermiler numunelere saplanarak durmuştur.

Şekil 6.8’de 200 °C’de menevişlenmiş düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası görüntüleri verilmiştir.



a) DM09D – ön



b) DM09D - arka

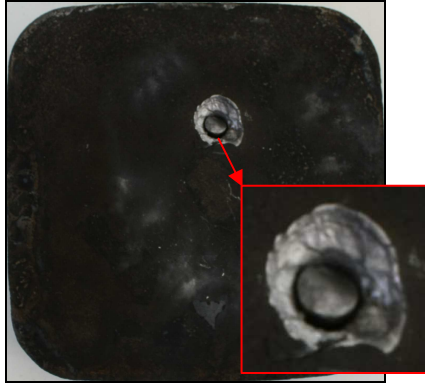
Şekil 6.8. 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



c) DM12D – ön



d) DM12D – arka



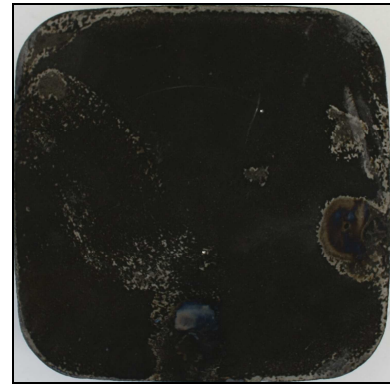
e) DM15D – ön



f) DM15D – arka



g) DM18D – ön



h) DM18D – arka

Şekil 6.8. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



i) DM21D – ön

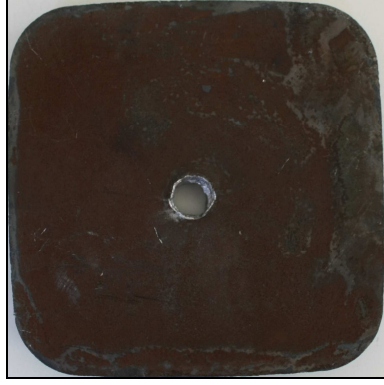


j) DM21D – arka

Şekil 6.8. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.

Şekil 6.8’de görüldüğü üzere 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim sahip numunelerin balistik başarımı artan alan yoğunluğu birlikte artmıştır. En düşük iki alan yoğunluğuna sahip numuneler tamamen delinirken, en yüksek iki alan yoğunluğuna sahip numuneler tam balistik koruma sağlamıştır. 15 mm kalınlığındaki III. alan yoğunluğuna sahip numunede mermi numuneye saplanarak durmuştur. (e)’de merminin kırıldığı, (f)’de arka taraftan çıktığı görülmektedir. Yapılan çalışmalar [44, 45] sonucu ortaya konulan hasar mekanizmalarına göre oluşan hasar mekanizmaları incelendiğinde en düşük alan yoğunluğuna sahip delinen numunelerde malzemenin gevrekliğine bağlı olarak parça koparak numune delinmiştir. Numunelerin tamamının delindiği II. alan yoğunluğuna sahip numunelerde de benzer şekilde numunelerin parçalar koparak delindiği görülür. Merminin saplanarak durduğu III. alan yoğunluğundaki numunenin arka yüzeyinde radyal çatlak oluşmuştur. Artan alan yoğunluğuyla birlikte IV. Grup numunelerde mermi numuneye saplanmıştır. Bununla birlikte merminin numuneye girdiği bölgede numuneden parça koptuğu görülmektedir. Tam balistik koruma sağlayan en yüksek alan yoğunluğuna sahip numunede de mermi numuneye saplanmış ve numuneden merminin girdiği noktada parçalar kopmuştur.

Şekil 6.9’da 400 °C’de menevişlenmiş düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri yer almaktadır.



a) DM09Y – ön



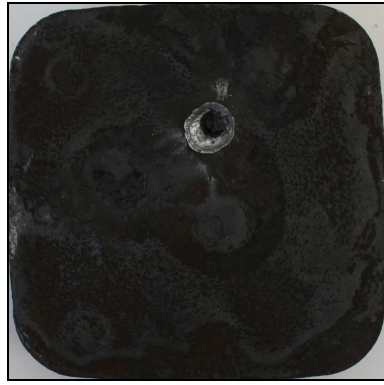
b) DM09Y – arka



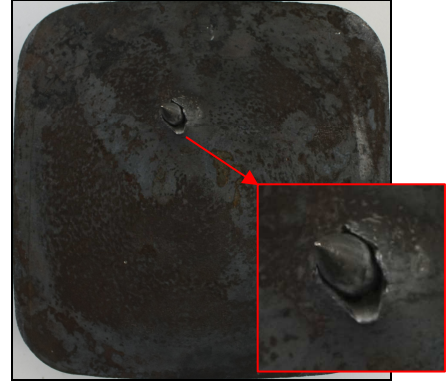
c) DM12Y – ön



d) DM12Y – arka



e) DM15Y – ön

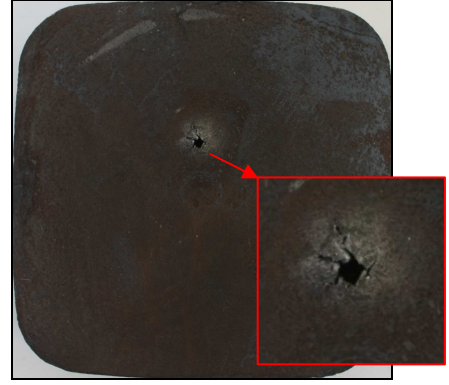


f) DM15Y – arka

Şekil 6.9. 400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



g) DM18Y – ön



h) DM18Y – arka



i) DM21Y – ön



j) DM21Y – arka

Şekil 6.9. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.

400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numuneler, balistik başarımı incelenen tüm numuneler içerisinde en zayıf mekanik özelliklere sahip olan gruptur. Balistik deneyler sonrası 18 mm kalınlığa sahip IV. alan yoğunluğundaki numunelerde delinme yalnızca bu grupta tek numunede gözlemlenmiştir. Şekil 6.9 (h)’de gösterildiği gibi numunenin arka yüzeyinde sünek delinme gerçekleşmiştir. Delik yapısı incelendiğinde çapın ancak bir merminin geçebilecek kadar olduğu görülür. Bu görüntüye göre çıkan merminin hızının oldukça düşük olduğu sonucuna varılır. Aynı koşulda test edilen diğer iki numunenin delinmemesi bu kanıyı desteklemektedir. Martenzit oranı düşük IV. alan yoğunluğuna sahip numunelerden düşük sıcaklıkta menevişleme ısıl işlemi yapılmış olan gruptaki numunelerin balistik başarımı %100 iken, menevişleme sıcaklığının artmasıyla başarım %67’ye

düşmüştür. Benzer şekilde III. alan yoğunluğuna sahip numunelerde balistik başarımlar %67'den %33'e gerilemiştir. Bu gruptaki numuneleri gösteren Şekil 6.8 (f) ve Şekil 6.9 (f) karşılaştırıldığı zaman yüksek sıcaklıkta menevişlenen numunede merminin daha derine saplanarak arka yüzeyden daha fazla çıktığı görülür.

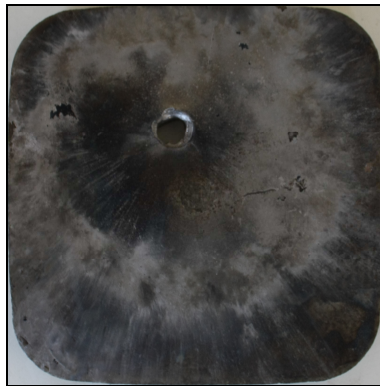
Her iki ısıl işlem grubu için atış sonrası oluşan deliklerin ağızları incelendiğinde, düşük sıcaklıkta menevişlenmiş grupta yer alan numunelerin delik ağızlarının gevrek kırıldığı görülür. Yüksek sıcaklıkta menevişlenmiş numunelerin delik ağızlarında oluşan hasar malzemenin daha sünek olduğunu göstermektedir.

Yüksek sıcaklıkta menevişlenen ve en düşük alan yoğunluğuna sahip numuneler mermiyi en az zorlayan numunelerdir. Şekil 6.10'da bu numuneyi delen mermi incelendiğinde mermi de hiçbir hasarın oluşmadığı görülür.

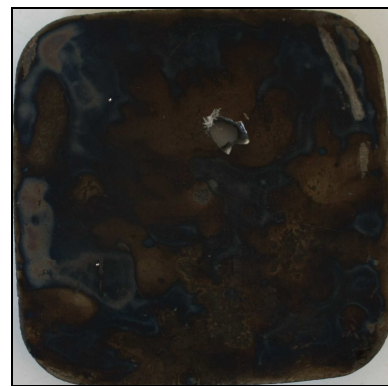


Şekil 6.10. DM09D numunesine atılan mermi çekirdeği.

Şekil 6.11'de 200 °C'de menevişlenmiş orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri yer almaktadır.

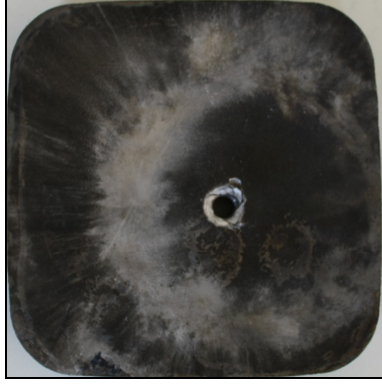


a) OM09D – ön

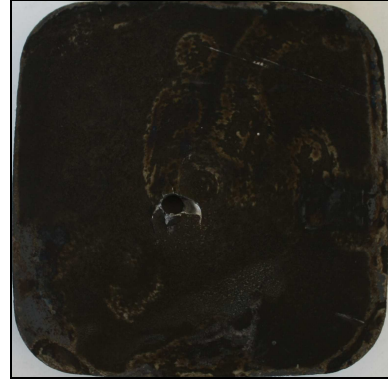


b) OM09D – arka

Şekil 6.11. 200 °C'de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



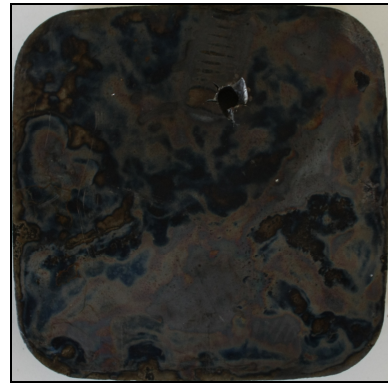
c) OM12D – ön



d) OM12D – arka



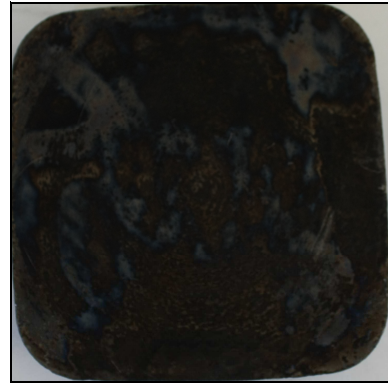
e) OM15D – ön



f) OM15D – arka



g) OM18D – ön



h) OM18D – arka

Şekil 6.11. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



i) OM21D – ön



j) OM21D – arka

Şekil 6.11. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.

Şekillerde atış sonrası oluşan delik ağzlarının gevrek kırıldığı ve artan alan yoğunluğuyla birlikte balistik başarımın arttığı görülmektedir. En düşük üç alan yoğunluğuna sahip numunelerin tamamı delinirken delik ağzlarından parçalar kopmuştur. Ayrıca delinen numunelerde alan yoğunluğu arttıkça delik çapı küçülmüştür. Yüksek alan yoğunluğuna sahip numuneler tam balistik koruma sağlarken delik ağzlarından parçaların koptuğu delik yüzeylerinden anlaşılmaktadır.

Şekil 6.12’de 400 °C’de menevişlenmiş orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri yer almaktadır.



a) OM09Y – ön



b) OM09Y – arka

Şekil 6.12. 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



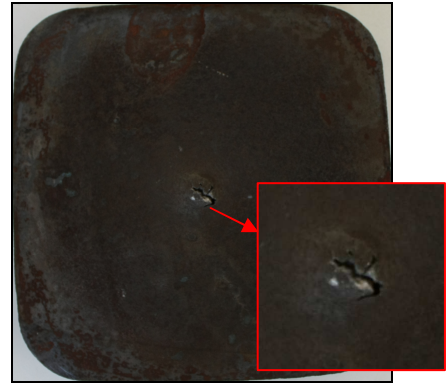
c) OM12Y – ön



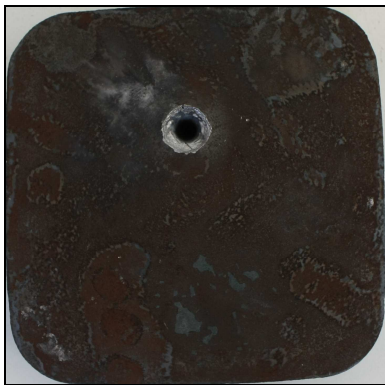
d) OM12Y – arka



e) OM15Y – ön



f) OM15Y – arka



g) OM18Y – ön

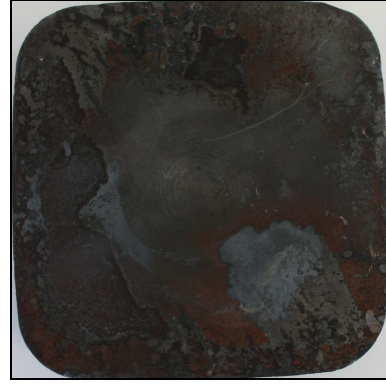


h) OM18Y – arka

Şekil 6.12. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



i) OM21Y – ön



j) OM21Y – arka

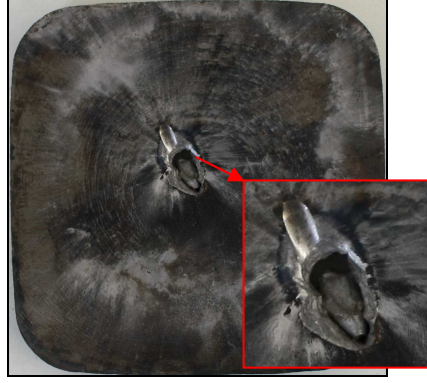
Şekil 6.12. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.

Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’de gösterilen numuneler kıyaslandığında orta martenzit hacim oranında düşük ve yüksek sıcaklıkta menevişlenen numunelerin benzer balistik başarımlar gösterdiği görülür. Bu ısıl işlem koşullarında kritik kalınlık 15 mm’dir. III. alan yoğunluğuna sahip 15 mm kalınlığındaki numunelerin düşük ve yüksek sıcaklıkta menevişlenmiş koşulda balistik başarımlarını %67 iken, düşük sıcaklıkta menevişlenen grupta bir, yüksek sıcaklıkta menevişlenen grupta iki numunenin arka yüzeyi çatlamış ya da mermi numuneye saplanmıştır. Şekil 6.13’te OM15Y numunelerinden bir tanesine saplanan merminin kesit görüntüsü verilmiştir. Şekilde malzemenin sünek davrandığı gözlemlenmektedir. Mermi girerken gömleğinin sıyrılması sonucu delik ağzında krater oluşmuştur ve numune sünek delinmiştir. Mermi de ise hasar oluşmamıştır.

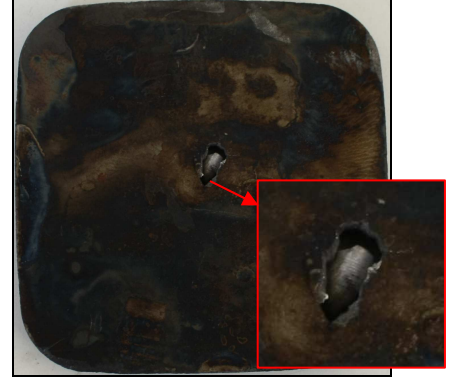


Şekil 6.13. OM15Y numunesi test sonrası kesit görünümü.

Şekil 6.14'te 200 °C'de menevişlenmiş yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri verilmiştir.



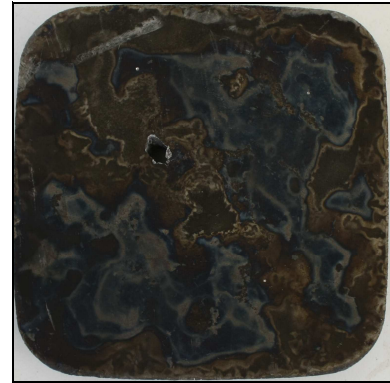
a) YM09D – ön



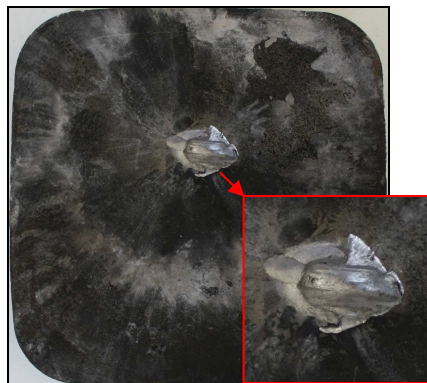
b) YM09D – arka



c) YM12D – ön



d) YM12D – arka



e) YM15D – ön

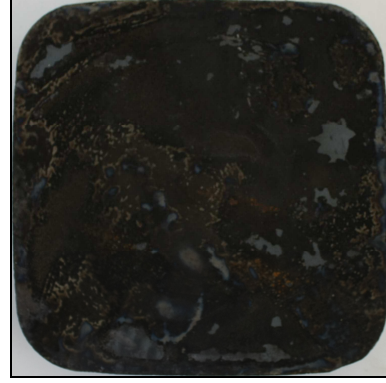


f) YM15D – arka

Şekil 6.14. 200 °C'de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



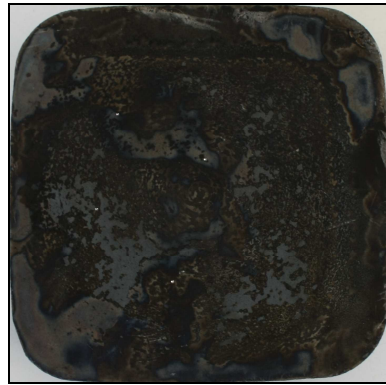
g) YM18D – ön



h) YM18D – arka



i) YM21D – ön



j) YM21D – arka

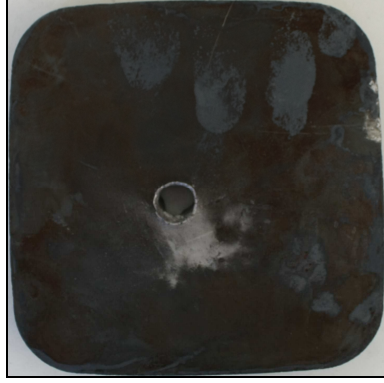
Şekil 6.14. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.

Şekiller incelendiğinde martenzit hacim oranının artmasıyla balistik başarımın arttığı görülür. 200 °C’de menevişlenmiş düşük ve orta martenzit hacim oranına sahip III. alan yoğunluğundaki numunelerde balistik başarım %67 iken, yüksek martenzit hacim oranına sahip numuneler tam balistik koruma sağlamıştır. Şekil 6.15’te YM15D numunesinden seken merminin görüntüsü verilmiştir. Çarpışma sırasında enerjinin bir miktarı mermi tarafından soğurularak merminin eğilmesine yol açmıştır. Bununla birlikte yüksek hızda numuneye çarpan mermi çekirdeği yüksek sertlikteki ve yeterli alan yoğunluğundaki numuneye çarptığı zaman mermide yön değişimi söz konusu olabilmektedir. Gerçekte mermi numune yüzeyine tam normal doğrultuda gelmemektedir ve mermi yüzeye geldiğinde yüksek bir tepki ile karşılaştığında bu eğiklik sonucu merminin yönü değişmektedir.

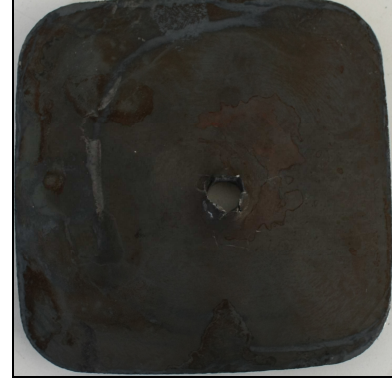


Şekil 6.15. YM15D numunesine çarpan merminin çekirdeğinin görünümü.

Şekil 6.16'da 400 °C'de menevişlenmiş yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri verilmiştir. 200 °C'de menevişlenmiş aynı martenzit hacim oranına sahip numunelere göre bu koşulda malzemenin daha sünek davrandığı şekillerden anlaşılmaktadır.



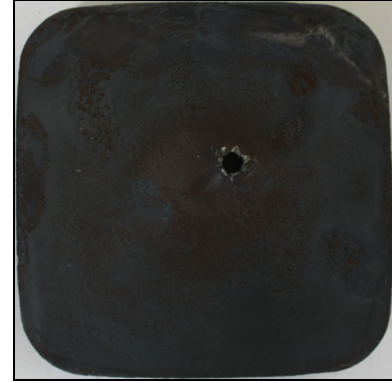
a) YM09Y – ön



b) YM09Y – arka

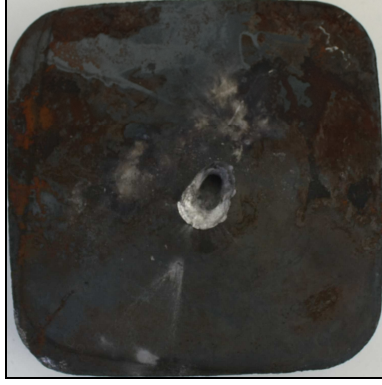


c) YM12Y – ön

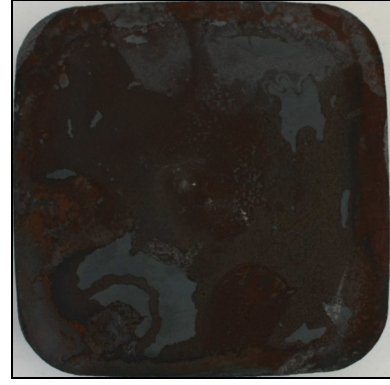


d) YM12Y – arka

Şekil 6.16. 400 °C'de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



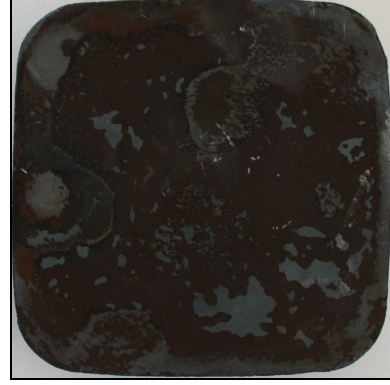
e) YM15Y – ön



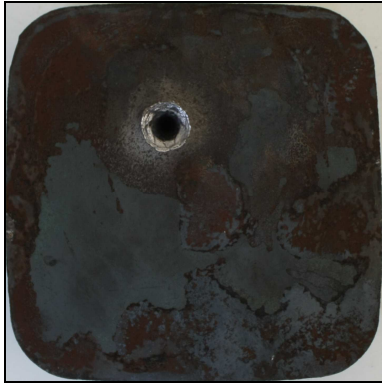
f) YM15Y – arka



g) YM18Y – ön



h) YM18Y – arka



i) YM21Y – ön

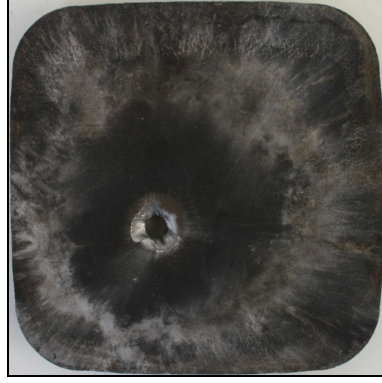


j) YM21Y – arka

Şekil 6.16. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.

Numunelerin yüksek sıcaklıkta menevişlenmesi sonucu balistik başarımları değişmemiştir, ancak şekillerde merminin daha derine indiği görülür.

Şekil 6.17'de 200 °C'de menevişlenmiş tamamen martenzit fazında içyapıya sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri verilmiştir.



a) TM09D – ön



b) TM09D – arka



c) TM12D – ön



d) TM12D – arka

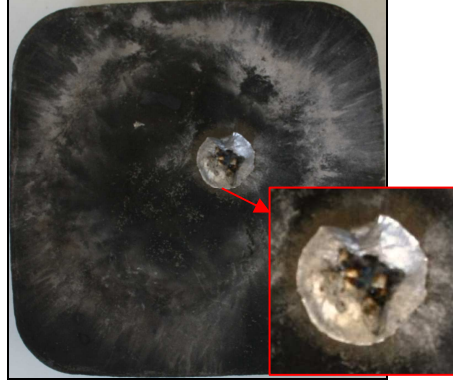


e) TM15D – ön



f) TM15D – arka

Şekil 6.17. 200 °C'de menevişlenen tamamen martenzit içyapıya sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



g) TM18D – ön



h) TM18D – arka



i) TM21D – ön



j) TM21D – arka

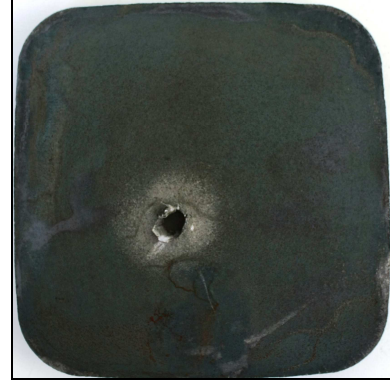
Şekil 6.17. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen tamamen martenzit içyapıya sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.

200 °C’de menevişlenen tamamen martenzit içyapıya sahip numuneler, balistik başarımı araştırılan tüm numuneler arasında en yüksek sertlik ve dayanıma sahip grubu oluşturmaktadır. Yapıdaki martenzit miktarının en yükseğe çıkmasıyla balistik başarımları önemli derecede artmıştır. Düşük, orta ve yüksek martenzit hacim oranına sahip numuneler içerisinde en iyi başarımları III. alan yoğunluğundaki numuneler gösterirken, bu grupta II. alan yoğunluğunda tam koruma sağlamıştır. 12 mm kalınlığındaki numunelere yapılan üç atışta numune delinmemiş, yalnızca bir tanesinde mermi saplanarak durmuştur. Şekil 6.17 (c)’de görüldüğü gibi mermi kırılmış ve aynı zamanda numunenin arka yüzeyinde hasar oluşturmuştur. Yüksek alan yoğunluklarında merminin numuneye çarpmasıyla oluşan çukurda, Şekil 6.17 (g) ve (i)’de görülen gömlek malzemesi kalıntılarına rastlanmıştır.

Şekil 6.18'de 400 °C'de menevişlenmiş tamamen martenzit fazında içyapıya sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri verilmiştir.



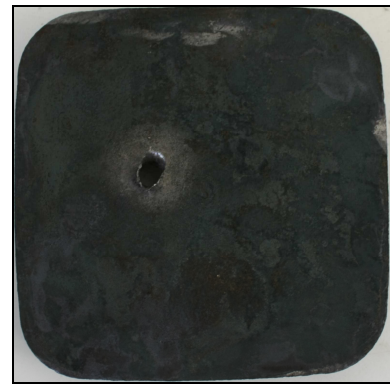
a) TM09Y – ön



b) TM09Y – arka



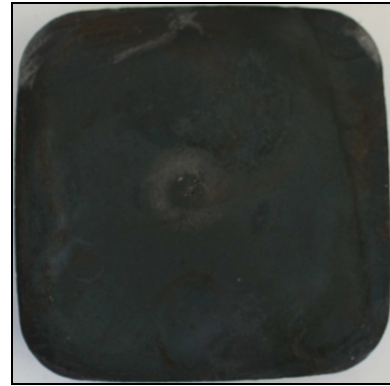
c) TM12Y – ön



d) TM12Y – arka



e) TM15Y – ön



f) TM15Y – arka

Şekil 6.18. 400 °C'de menevişlenen tamamen martenzit içyapıya sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.



g) TM18Y – ön



h) TM18Y – arka



i) TM21Y – ön



j) TM21Y – arka

Şekil 6.18. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen tamamen martenzit içyapıya sahip numunelerin atış sonrası görüntüleri.

Şekil 6.17 ve 6.18 karşılaştırıldığı zaman yüksek derecede yapılan menevişleme ısı işleminin sonucu malzemenin dayanımı düştüğü için merminin daha derine nüfuz ettiği görülür. Bunun yanı sıra tamamen martenzit olan numunelerin balistik başarımında kritik kalınlık 12 mm’dir. Düşük sıcaklıkta menevişlenen grup %100 koruma sağlarken, yüksek sıcaklıkta menevişleme sonucu bu oran %33’ düşmüştür.

Balistik deneyler sonrası bütün numunelerin başarımları değerlendirildiğinde en yüksek başarıyı gösteren grup 200 °C’de menevişlenmiş tamamen martenzit içyapıya sahip numunelerdir. Bu numuneler 12 mm ve üzeri kalınlıklarda mermiyi durdurmayı başarmıştır. En başarısız olan grup ise IV. alan yoğunluğunda numunenin arka yüzeyinin hasar gördüğü 400 °C’de menevişlenmiş düşük martenzit

hacim oranına sahip olan numunelerdir. Buradan çıkarılacak sonuç malzemenin balistik başarımının yüksek dayanım ve tokluğuyla orantılı olduğudur.

Deneysel sonuçlar Übeyli ve arkadaşlarının [10] yaptığı çalışma ile karşılaştırıldığına menevişleme ısı işlemi etkisi açıkça görülür. Yapılan çalışmada ara kritik bölgeden su verme ısı işlemi ile üretilen düşük, orta ve yüksek martenzit hacim oranına sahip numuneler menevişlenmeden balistik testlere tabi tutulmuştur. Numunelerin kimyasal bileşimi ve martenzit hacim oranları bu çalışmadakilerle aynıdır. Çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Su verilmiş numunelerin balistik başarımları (%) [10].

Numune Grubu (S) Su Verme	Alan Yoğunluğu (kg/m ²)				
	70	94	118	141	164
737 °C (S)	0	0	40	100	100
754 °C (S)	0	0	100	100	100
779 °C (S)	0	60	100	100	100

Sonuçlara göre en yüksek balistik başarıma sahip olan grup, en yüksek martenzit hacim oranına sahip olan numunelerdir. Her iki çalışmada da I., IV ve V. alan yoğunluğuna sahip numuneler aynı başarıyı göstermiştir. II. alan yoğunluğunda ise yüksek martenzit hacim oranında su verilmiş numuneler %60 başarı gösterirken, menevişleme ısı işlemi sonrası numuneler tamamen başarısız olmuştur. Buradan, aynı alan yoğunluğundaki numunelerin balistik başarımlarının öncelikle sertlikleriyle ilgili olduğu sonucu çıkarılır. Benzer şekilde III. alan yoğunluğundaki numuneler karşılaştırıldığı zaman yine menevişleme ısı işlemi ile birlikte balistik başarımın düştüğü görülür. İki çalışma kıyaslandığı zaman çıkarılabilecek bir diğer sonuç menevişleme ısı işleminden sonra numunelerde kırılma ya da çatlama görülmediğidir. Su verilen numunelerde gevrek delinme, çatlama ya da tamamen kırılma gözlemlenirken, menevişlenmiş numunelerde böyle bir durum söz konusu olmamıştır. Özellikle menevişleme sıcaklığının artmasıyla malzemenin sünek davranışı önemli ölçüde belirginleşmiştir.

Yapılan bir diğ er ç alişmada [46] benzer kimyasal bileşime sahip 4140 ç eliğ inin farklı ısı l işlem koşullarındaki balistik başarımı araştırılmıştır. Numunelerin balistik başarımları ısı l işlem koşulları ve sertlikleriyle beraber Ç izelge 6.5'te verilmiştir.

Ç izelge 6.5. 4140 ç eliğ inin farklı ısı l işlem koşullarındaki balistik başarımı (%) [46].

Numune Grubu		Sertlik (HRC)	Alan Yoğ unluğ u (kg/m ²)				
Su Verme	Menevişleme		55	70	85	100	115
860	250	60,0	0	0	0	0	80
	400	53,4	0	0	0	100	100
	450	49,9	0	0	0	0	0
	580	37,8	0	0	0	0	0

Ç alişmada YMDA alaşım ç eliğ inin en yüksek balistik başarımı 53,4 HRC sertlikle g österdiğ i ortaya ç ıkmıştır. 100 kg/m² alan yoğ unluğ unda tam koruma sağlayan numune 400 °C'de menevişlenmiş martenzit iç yapıya sahiptir. Bu ç alişmada incelenen ç ift fazlı ç elikte ise daha d ũř ũk alan yoğ unluğ unda tam balistik koruma sağlanmıştır. Tamamen martenzitik iç yapıya sahip numunelerin d ũř ũk sıcaklıkta menevişlenmesi sonucu 94 kg/m² ve ũzeri alan yoğ unluklarında koruma sağlandığından ç ift fazlı ç eliklerin bu alanda YMDA ç eliklerine tercih edilebileceğ i sonucuna varılır.

Ç alişmada 4140 ç eliğ inin yanı sıra DIN 100Cr6 ç eliğ inin de balistik başarımı incelenmiştir. Bu numuneye uygulanan ısı l işlemler sonucu elde edilen sertlik değ erleri ve numunelerin balistik başarımları Ç izelge 6.6'da verilmiştir.

Ç izelge 6.6. 100Cr6 ç eliğ inin ısı l işlem durumuna g öre balistik başarımı (%) [46].

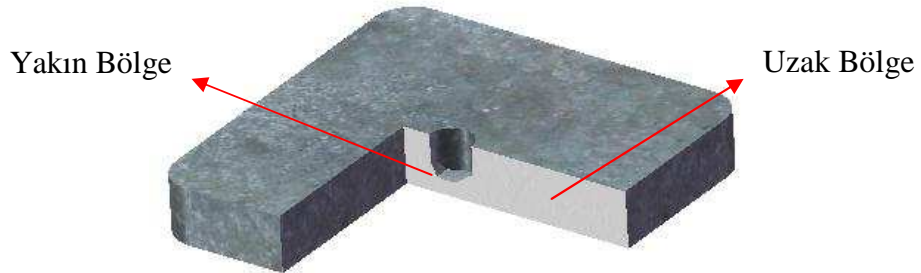
Numune Grubu		Sertlik (HRC)	Alan Yoğ unluğ u (kg/m ²)				
Su Verme Sıcaklığ ı, °C	Menevişleme Sıcaklığ ı, °C		55	70	85	100	115
860	250	59,5	0	0	0	0	60
	400	57,0	0	0	0	0	20
	450	48,8	0	0	0	0	0
	580	40,4	0	0	0	100	100

Çizelge 6.6'ya göre YMDA çeliğinde olduğu gibi 100Cr6 malzemesi de en iyi balistik başarımı 100 kg/m² ve üzeri alan yoğunluklarında sağlamıştır. Bu numunenin balistik başarımı sertliği arttıkça azalmıştır. Sonuçlar çift fazlı çeliğin başarımı ile kıyaslandığı zaman çift fazlı çeliğin daha iyi balistik başarımlar gösterdiği görülmektedir. 100Cr6 içerdiği yüksek oranda alaşım elementlerinden ötürü pahalı bir malzeme olduğundan düşük alaşımlı çift fazlı çelik kullanılması hem sistemin maliyetini, hem de ağırlığını azaltacaktır.

Tamamen martenzitik içyapıya sahip YMDA, 100Cr6 ve menevişlenmemiş düşük alaşım çeliklerine yapılan atışlar sonucu numunelerde kırılmalar gerçekleşirken, menevişlenen düşük alaşım numunelerinin hiçbirisinde kırılma meydana gelmemiştir. Ancak artan menevişleme sıcaklığıyla birlikte balistik başarımlar düşmüştür. Bu nedenle balistik korumada kullanılan düşük alaşım çeliklerinin düşük sıcaklıklarda menevişlenerek tokluğunun artırılmasında fayda vardır.

6.5. Balistik Deneyler Sonrası İçyapı İncelemeleri

Balistik testi yapılan her bir ısıl işlem grubuna ait numunelerin farklı alan yoğunluklarındaki içyapıları incelenmiştir. Şekil 6.19'da gösterildiği gibi merminin nüfuz ettiği deliğin hemen etrafından ve uzağından içyapıları görüntüleri alınmıştır.



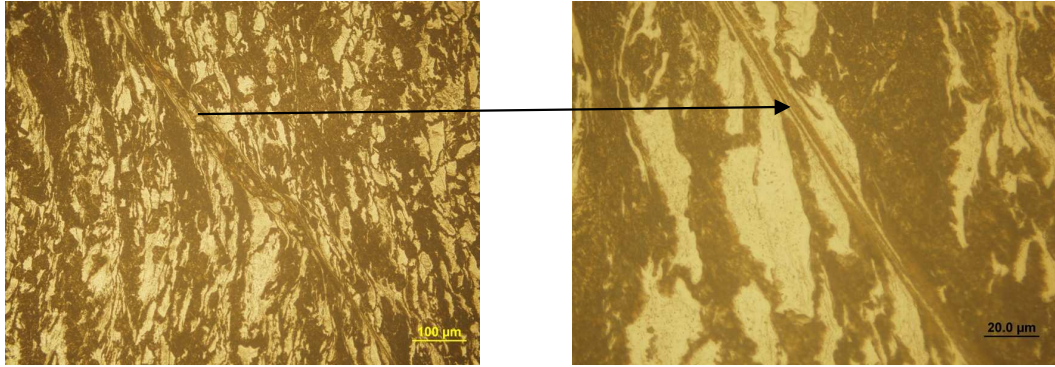
Şekil 6.19. Numunelerin içyapı fotoğraflarının çekildiği bölgeleri.

İçyapıların incelenmesi sonucunda tüm numunelerde atış sonra içyapının uzak bölgede değişmediği görülmüştür. Yakın bölgeden alınan fotoğraflarda bütün numunelerde adyabatik kayma bantlarına rastlanmıştır.

Adyabatik kayma bandı yoğun dinamik yüklemeye maruz kalan metallerin içyapısında görülen ince ve genellikle iki boyutlu düzlemsel bölgelerdir [47]. Bandın her iki tarafındaki düzlemlerin birbiri üzerinde kayması sonucu oluşan adyabatik kayma bantlarının kalınlıkları birkaç mikrometre ile santimetreler arasında değişir. Bu nedenler bantların en/boy oranı hakkında bir tahmin yapmak zordur. Adyabatik kayma bantları çok yüksek gerinim hızlarında meydana gelir. Özellikle balistik uygulamalarda malzemeler yüksek hızda deformasyona maruz kaldığından malzemelerde adyabatik bant oluşumu söz konusudur.

Yapılan çalışmalara göre bozulmuş bantlar ve dönüşmüş bantlar olmak üzere iki çeşit adyabatik kayma bandı vardır [47, 48]. Adyabatik kayma bantları yüksek hızlı deformasyon sonucu ısınan numunenin yüksek gerinim hızından ötürü ısıyı malzemeden atamaması sonucu oluşur. Bu ısı enerjisi yüksek sertlikteki numunelerde kristal yapı değişimine neden olur. Dağlanarak mikroskopta incelenen numunelerde beyaz ışık şeklinde bir görüntü oluşur. Bu tür bantlar dönüşmüş bantlar olarak adlandırılır. Nispeten sünek malzemelerde görülen ve mikroskopta incelendiği zaman birbirinden kayarak ayrılmış iki düzlem görünen bantlar ise bozulmuş bantlardır [47–49].

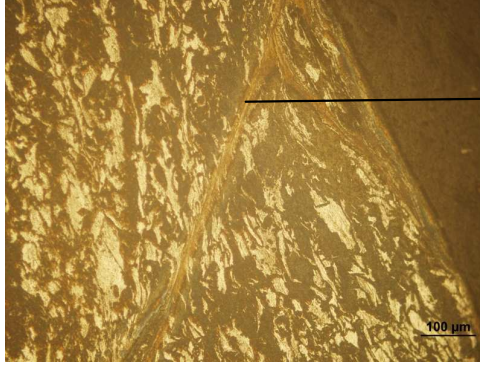
Şekil 6.20’de 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin krater yakın bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



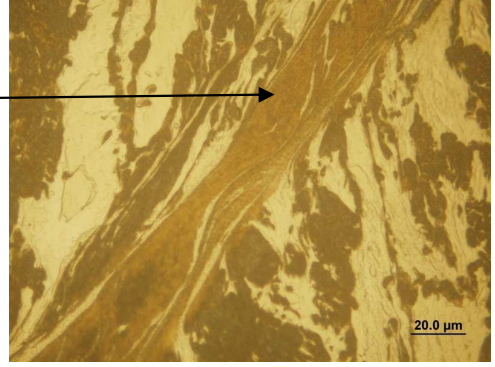
a) DM09D, x200.

b) DM09D, x1000.

Şekil 6.20. 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları.



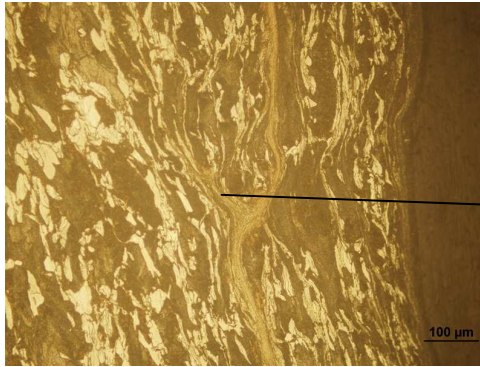
c) DM12D, x200.



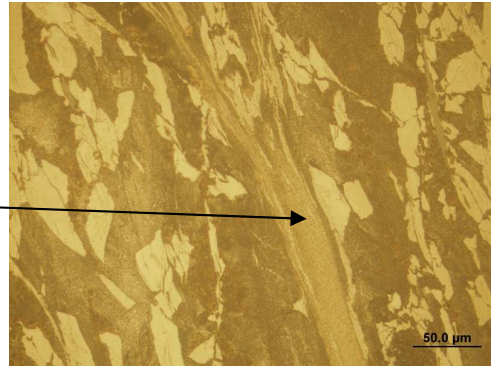
d) DM12D, x1000



e) DM15D, x200.

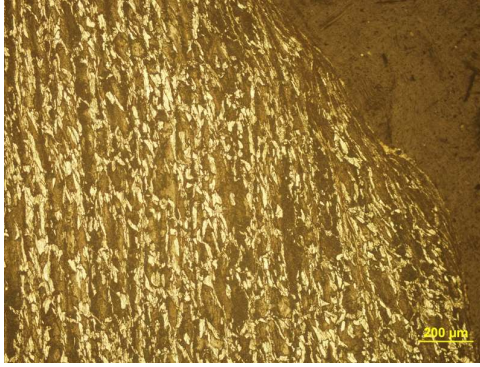


f) DM18D, x200.

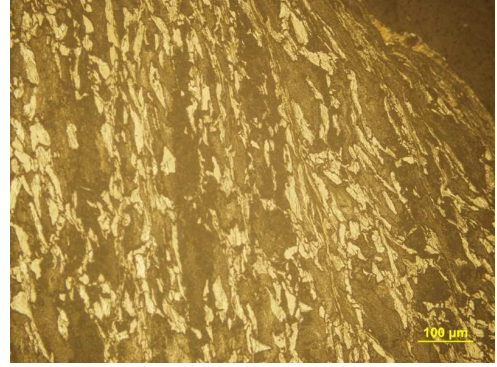


g) DM18D, x500

Şekil 6.20. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları



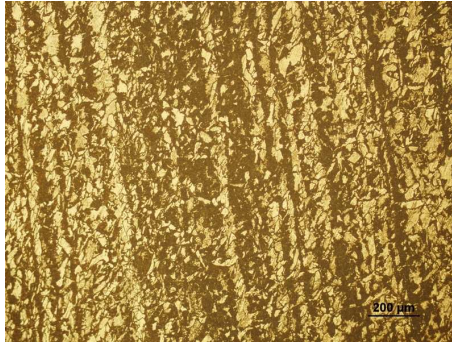
h) DM21D, x100.



i) DM21D, x200.

Şekil 6.20. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları

Şekil 6.21’de 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin kraterine uzak bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



a) DM09D, x100.



b) DM12D, x100.



c) DM15D, x100.



d) DM18D, x100.

Şekil 6.21. 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları.



e) DM21D, x100.

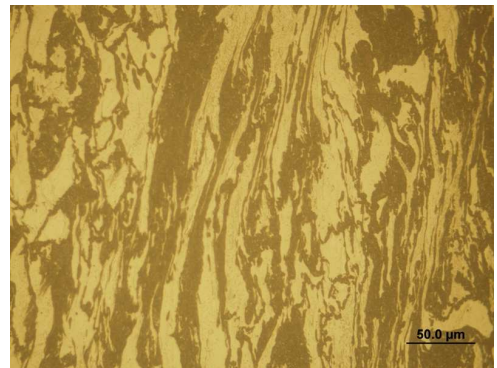
Şekil 6.21. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları

Şekil 6.20 incelendiğinde 200 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerde alan yoğunluğundan bağımsız olarak bozulmuş kayma bantları oluşmuştur. I. alan yoğunluğundaki numunelerde oluşan bant kalınlığı yaklaşık olarak 10 µm iken, Şekil 6.20 (g)’de verilen IV. alan yoğunluğunda bant kalınlığı yaklaşık 40 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 6.20 (h) ve (i)’de verilen en kalın numunede ise ağ şeklinde çok sayıda bozulmuş bant oluşmuştur. Şekil 6.21’de tüm alan yoğunluklarında kraterden uzak bölgede bant oluşmadığı görülür.

Şekil 6.22’de 400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin kratere yakın bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.

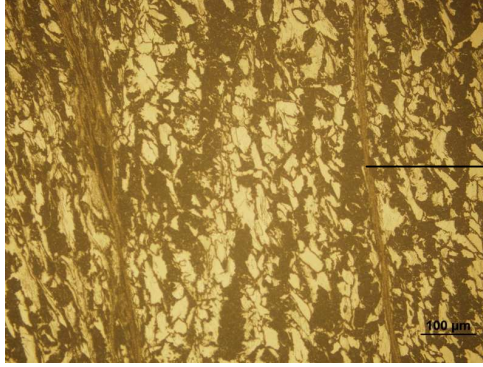


a) DM09Y, x200.

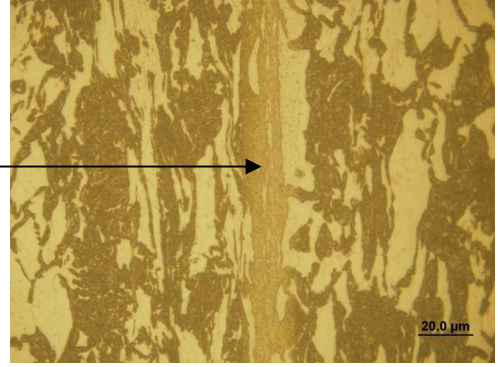


b) DM09Y, x500.

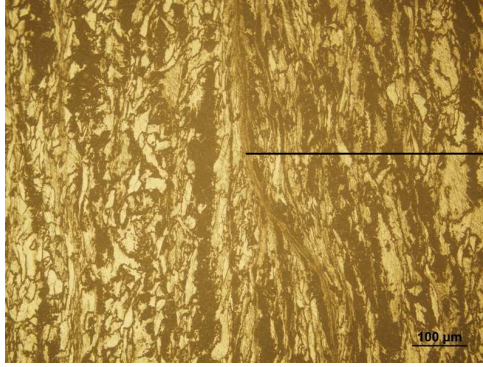
Şekil 6.22. 400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları.



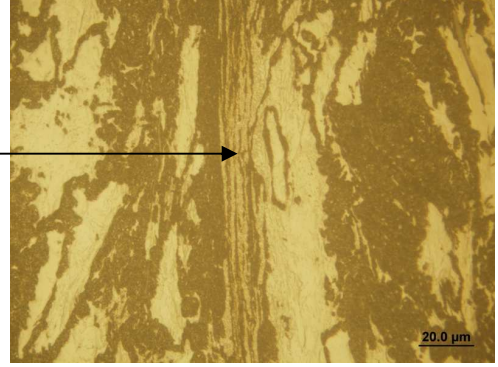
c) DM12Y, x200.



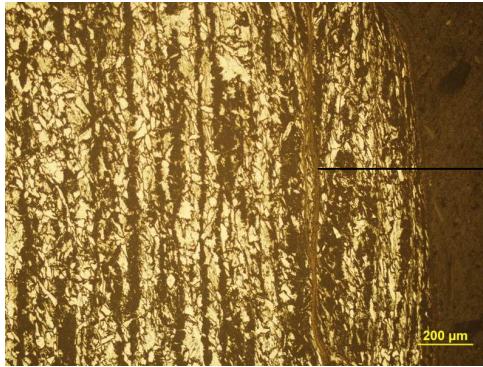
d) DM12Y, x1000.



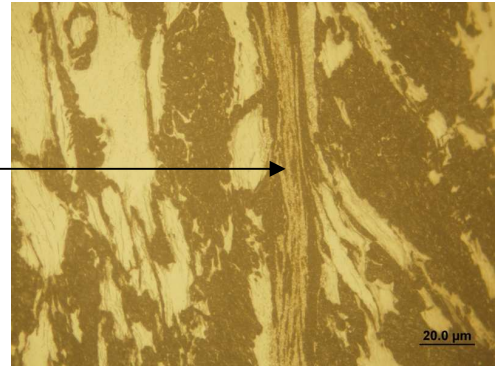
e) DM15Y, x200.



f) DM15Y, x1000.

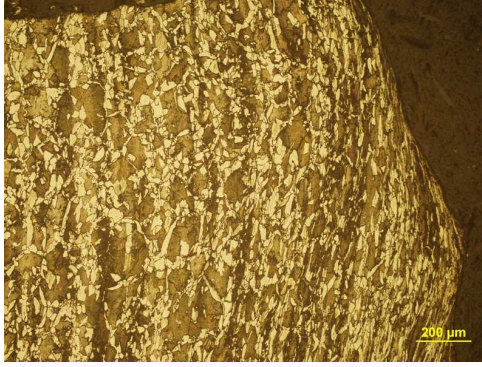


g) DM18Y, x100.



h) DM18Y, x1000.

Şekil 6.22. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları



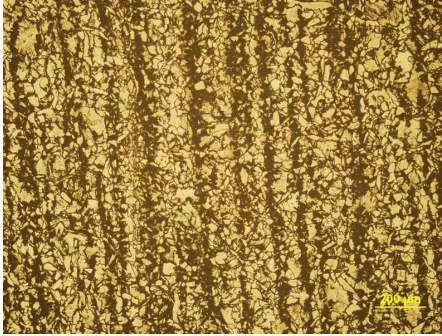
g) DM21Y, x100.



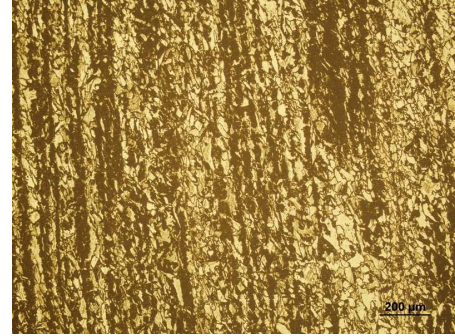
h) DM21Y, x200.

Şekil 6.22. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları

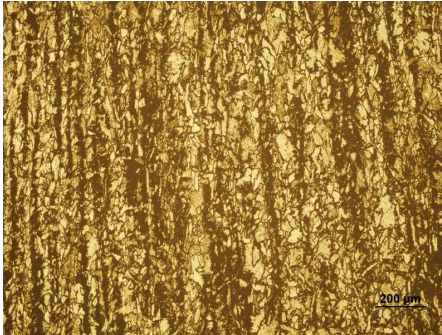
Şekil 6.23’te 400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin kraterine uzak bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



a) DM09Y, x100.



b) DM12Y, x100.



c) DM15Y, x100.



d) DM18Y, x100.

Şekil 6.23. 400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları.

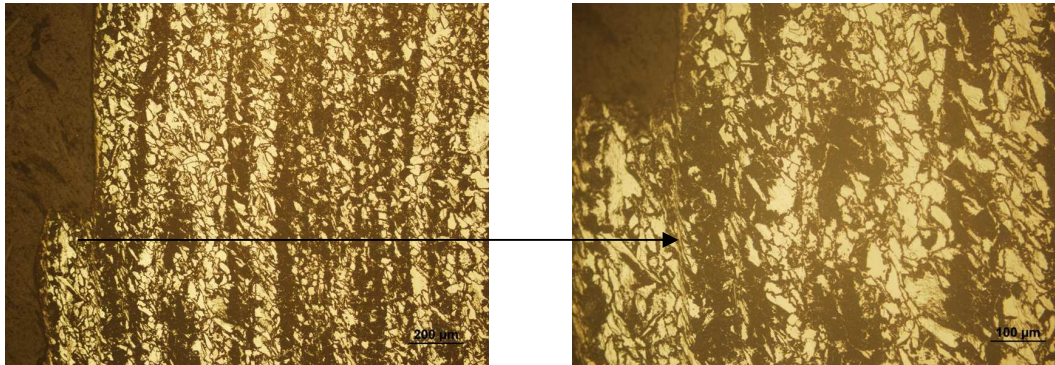


e) DM21Y, x100.

Şekil 6.23. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları

Şekil 22 ve Şekil 23’te verilen görüntüler incelendiğinde krater ya da deliğe yakın bölgede tüm alan yoğunluğundaki numunelerde bozulmuş adyabatik kayma bantları olduğu, uzak bölgede ise içyapının herhangi bir değişime uğramadığı görülür. Menevişleme sıcaklığının artmasıyla birlikte bantların incelendiği göze çarpmaktadır. Şekil 6.22 (h)’de görüldüğü gibi kraterin en yakın bölgede yüksek oranda deformasyona uğramış ferrit taneleri görülmektedir. Bu tanelerin arasında ise kılcal bantlar yer almaktadır.

Şekil 6.24’te 200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin kraterin yakın bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



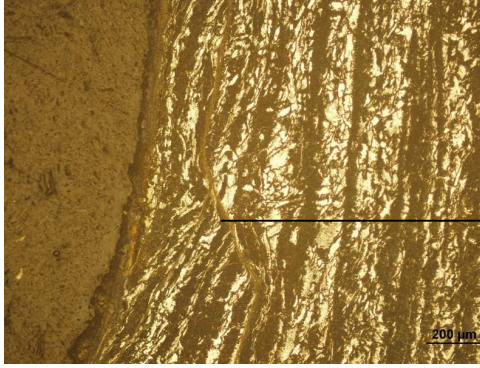
a) OM09D, x100.

b) OM09D, x200.

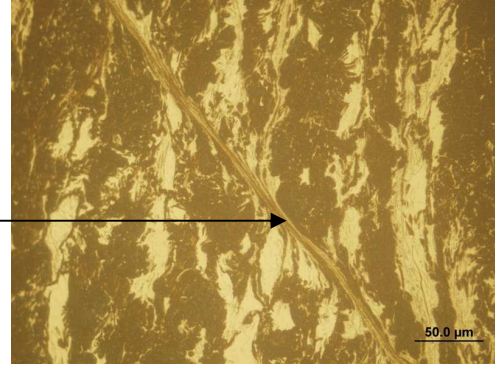
Şekil 6.24. 200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları.



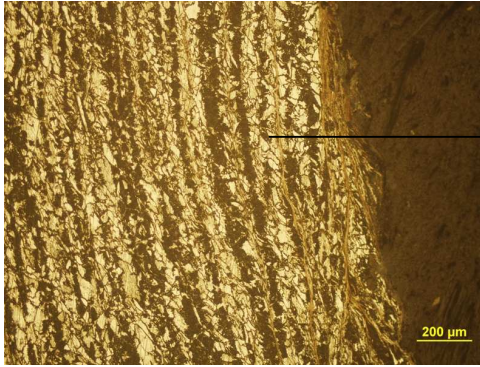
c) OM12D, x100.



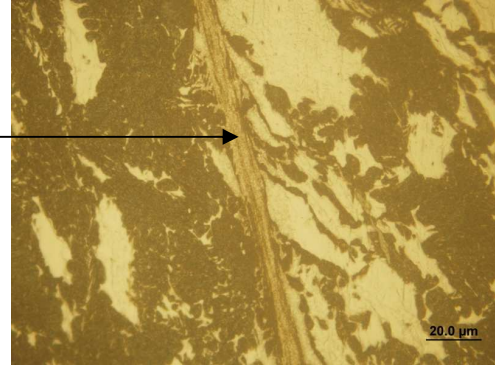
d) OM15D, x100.



e) OM15D, x500.

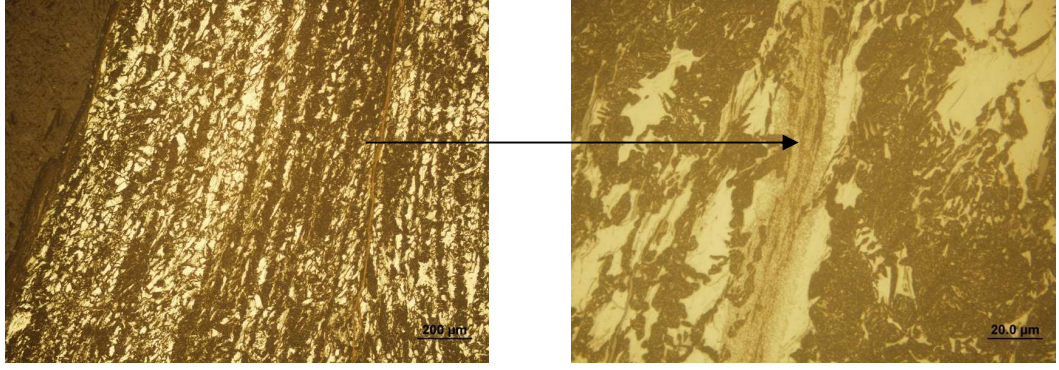


f) OM18D, x100.



g) OM18D, x1000.

Şekil 6.24. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları



h) OM21D, x100.

i) OM21D, x1000.

Şekil 6.24. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları

Şekil 6.25’te 200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin kraterine uzak bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



a) OM09D, x100.



b) OM12D, x100.

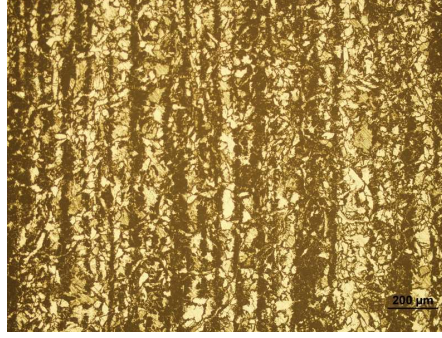


c) OM15D, x100.



d) OM18D, x100.

Şekil 6.25. 200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları.

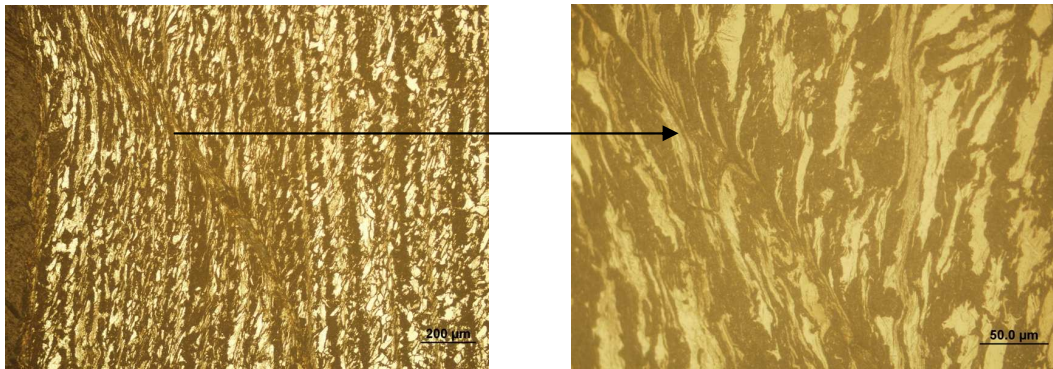


e) OM21D, x100.

Şekil 6.25. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları

Şekillerde alan yoğunluğundan bağımsız olarak krater yakınında bozulmuş bantlar görülürken, krater uzağında atış öncesinde görünen içyapı korunmuştur. Bazı numunelerde kılcal bantlar oluşmuşken, bazılarında ise daha kalın bantlara rastlanmıştır. Ayrıca bantlar doğrusal ilerlememiş, dallı bir görüntü çizerek malzeme içerisinde ilerlemiştir.

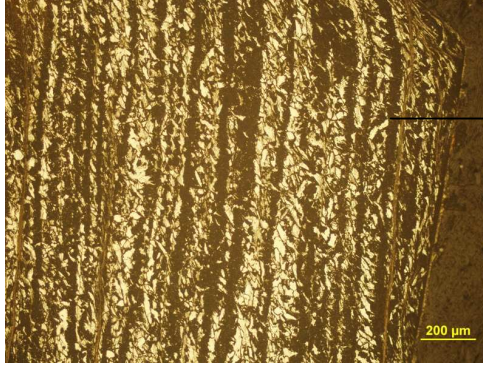
Şekil 6.26’da 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin kraterine yakın bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



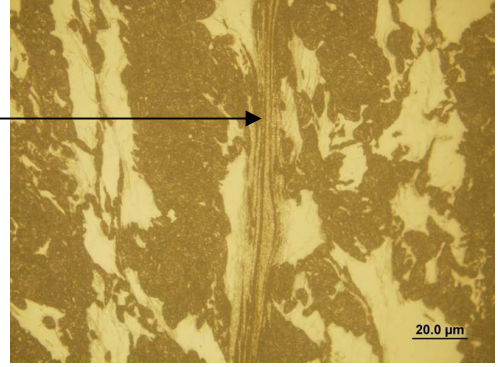
a) OM09Y, x100.

b) OM09Y, x500.

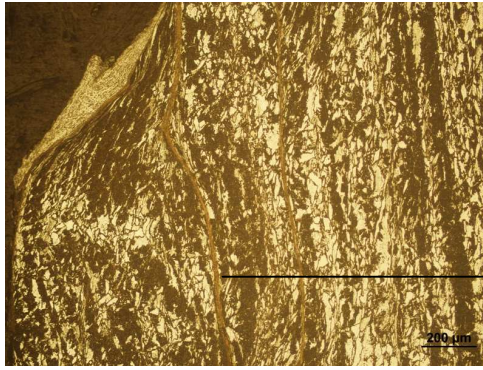
Şekil 6.26. 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları.



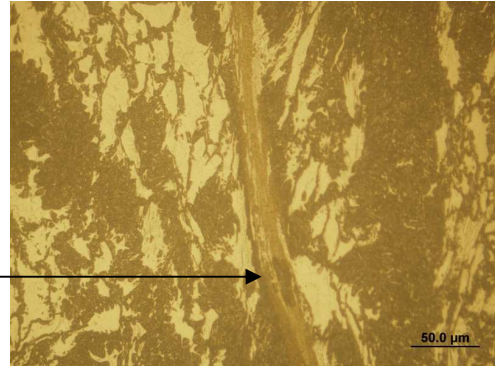
c) OM12Y, x100.



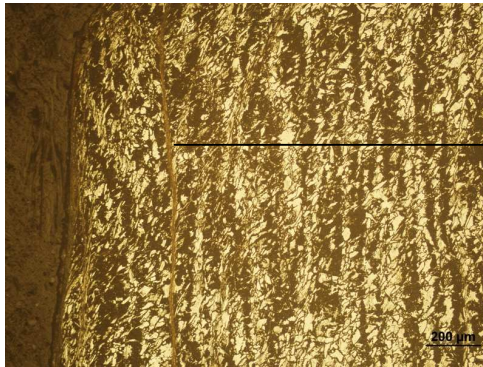
d) OM12Y, x1000.



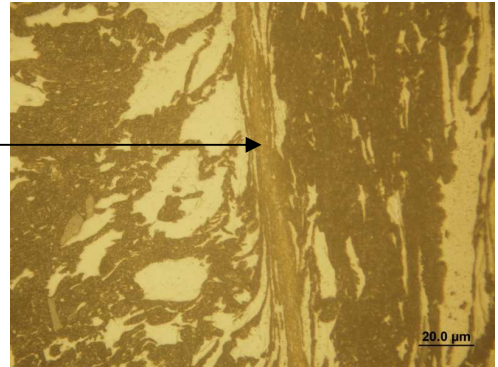
e) OM15Y, x100.



f) OM15Y, x500.

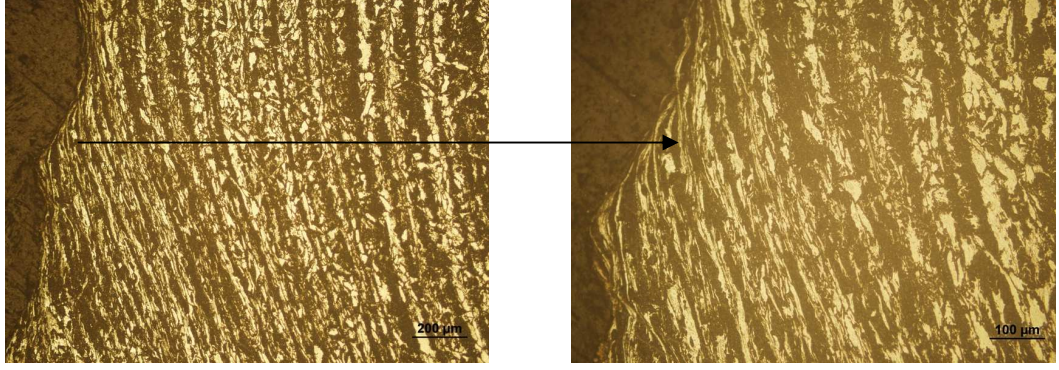


g) OM18Y, x100.



h) OM18Y, x1000.

Şekil 6.26. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları

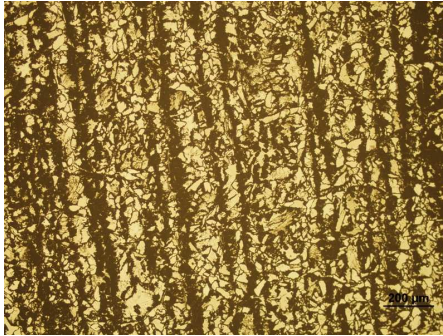


i) OM21Y, x100.

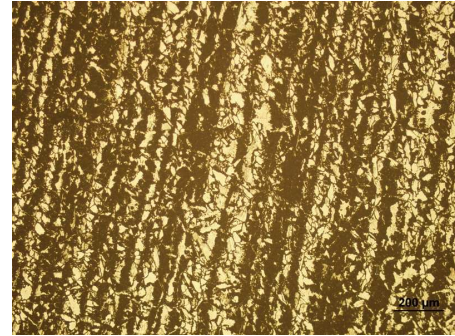
j) OM21Y, x200.

Şekil 6.26. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları

Şekil 6.27’de 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin krater uzak bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



a) OM09Y, x100.



b) OM12Y, x100.



c) OM15Y, x100.



d) OM18Y, x100.

Şekil 6.27. 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları.

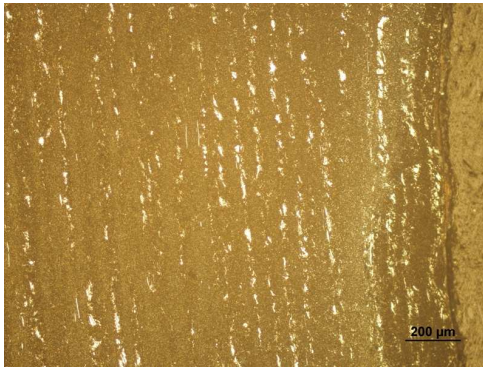


d) OM21Y, x100.

Şekil 6.27. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen orta martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası kraterin uzağındaki içyapıları

Şekil 6.26 ve Şekil 6.27’de verilen görüntüler incelendiğinde orta martenzit grubunda da krater çevresinde bozulmuş bantların olduğu görülür. Krater uzağındaki bölgelerde ise içyapıda herhangi bir değişiklik olmamıştır. Martenzit hacim oranının artmasıyla birlikte sertleşen malzemenin balistik davranışı değişmiştir. Yüksek sıcaklıkta menevişlenen düşük martenzit hacim oranına sahip grupta, krater ağızlarında ferritlerin şekil değiştirdiği, orta martenzit hacim oranda düşük menevişleme sıcaklığında malzemenin daha gevrek davrandığı gözlemlenmiştir.

Şekil 6.28’de 200 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin kratere yakın bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.

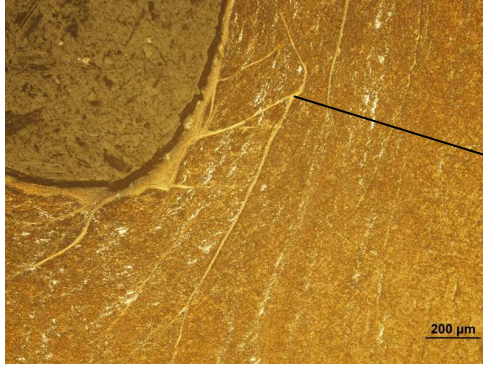


a) YM09D, x100.

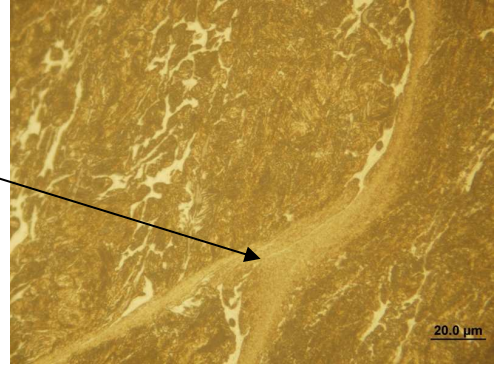


b) YM12D, x200.

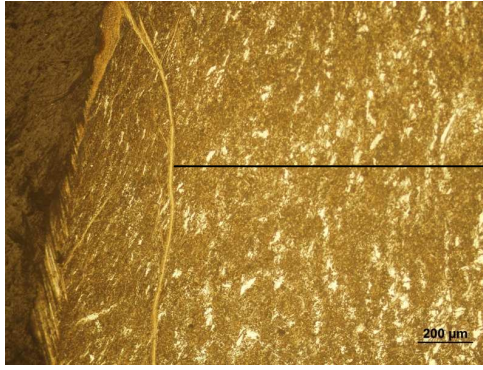
Şekil 6.28. 200 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları.



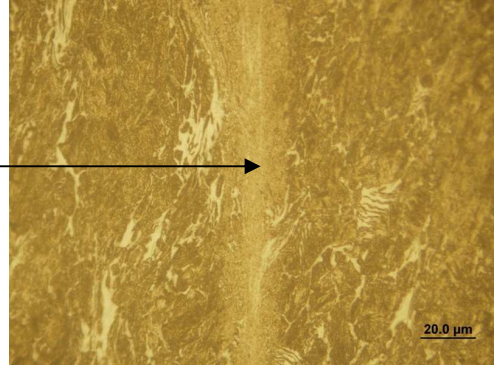
c) YM15D, x100.



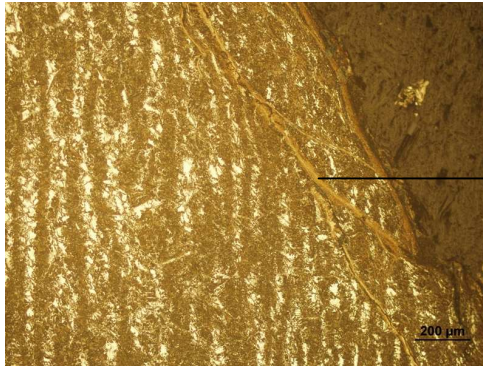
d) YM15D, x1000.



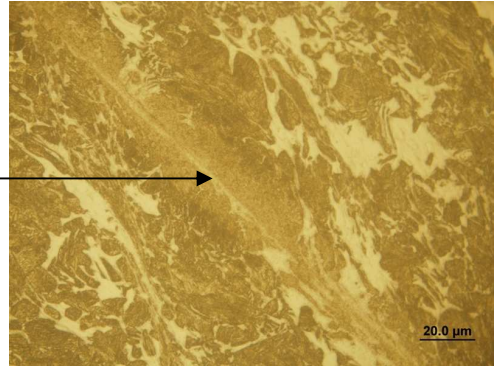
e) YM18D, x100.



f) YM18D, x1000.



g) YM21D, x100.

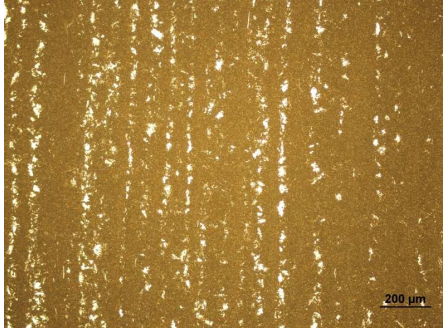


h) YM21D, x1000.

Şekil 6.28. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları

Şekil 6.28’de martenzit hacim oranının artmasıyla krater çevresinde oluşan adyabatik kayma bantlarının daha açık renkli oluşmaya başladığı görülmektedir. Düşük alan yoğunluğundaki numunelerde kılcal bantlar oluştuğu anda numune delinmiştir.

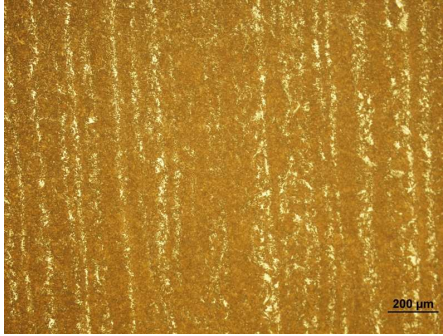
Şekil 6.29'da 200 °C'de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin krater uzak bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



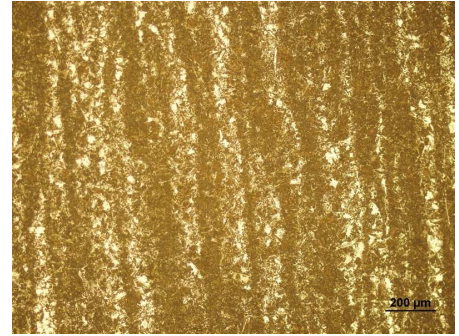
a) YM09D, x100.



b) YM12D, x100.



c) YM15D, x100.



d) YM18D, x100.

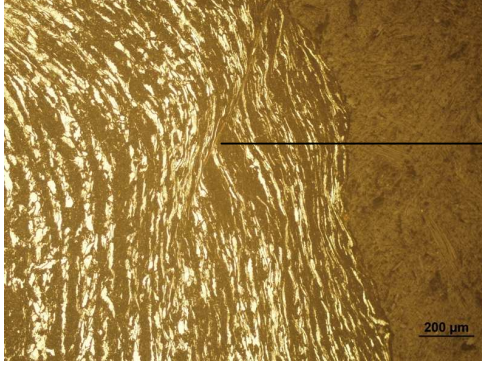


e) YM21D, x100.

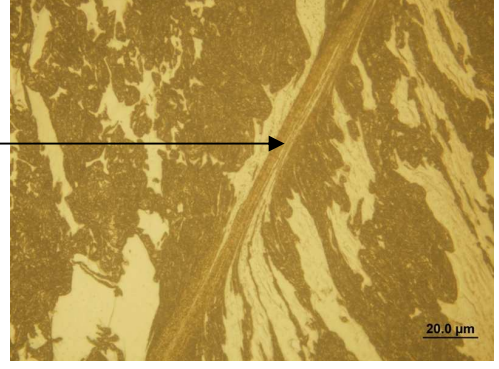
Şekil 6.29. 200 °C'de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater uzağındaki içyapıları.

Numunelerin hiçbirinde kraterin uzak bölgesi atıştan etkilenmemiştir. Herhangi bir bant oluşumu söz konusu değildir.

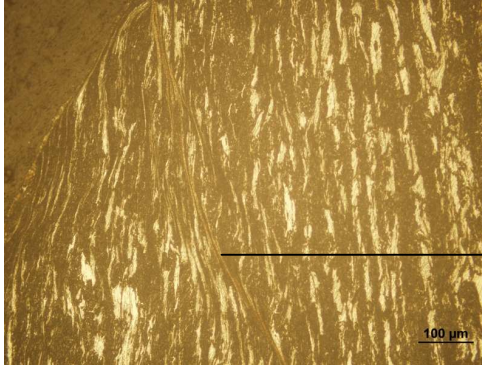
Şekil 6.30'da 400 °C'de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin kratere yakın bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



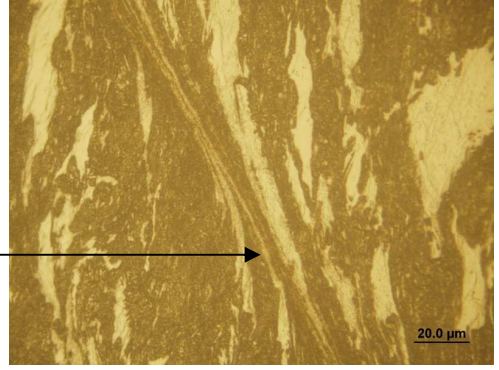
a) YM09Y, x100.



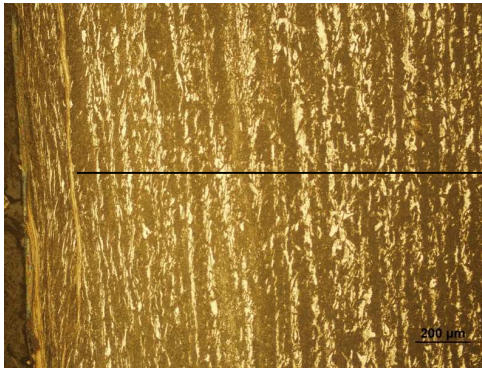
b) YM09Y, x1000.



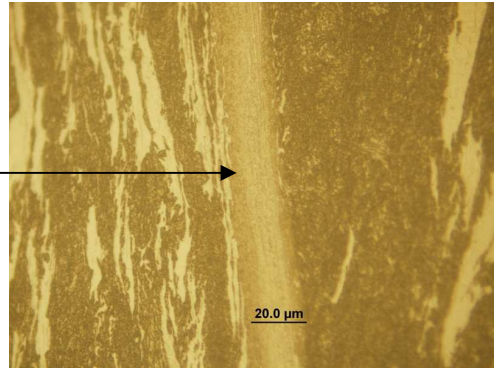
c) YM12Y, x200.



d) YM12Y, x1000.

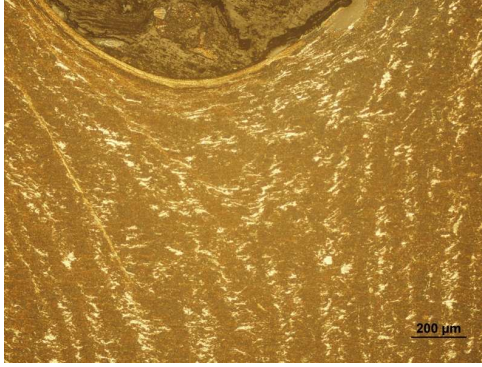


e) YM15Y, x100.

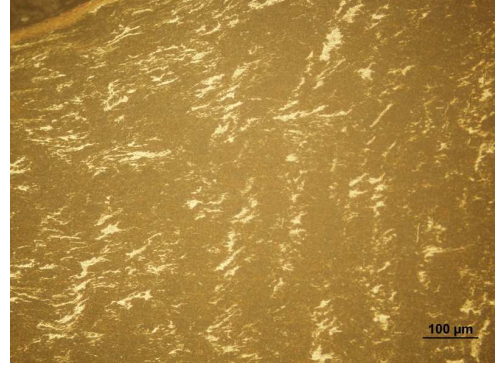


f) YM15Y, x1000.

Şekil 6.30. 400 °C'de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları.



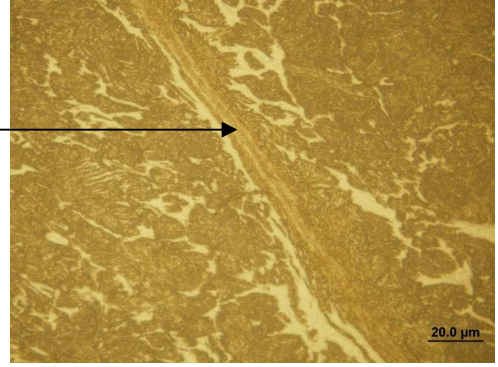
g) YM18Y, x100.



h) YM18Y, x200.



i) YM21Y, x100.



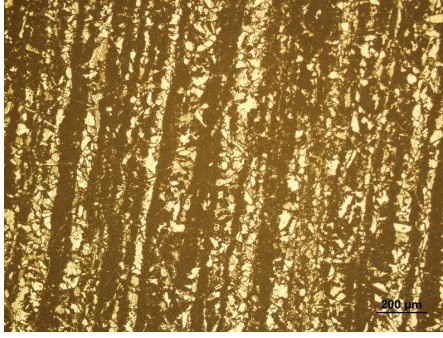
j) YM21Y, x1000.

Şekil 6.30. (Devamı) 400 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları

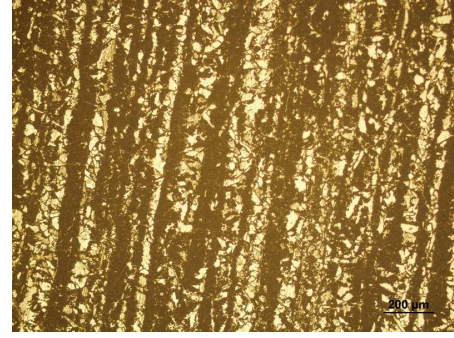
Numunelere yüksek sıcaklıkta menevişleme yapılması sonucu yüksek martenzit hacim oranındaki numunelerde oluşan adyabatik kayma bantlarında önemli bir değişme olmadığı görülmektedir. Menevişleme sıcaklığının artmasıyla dayanım düştüğünden dolayı bantlar biraz daha koyu renkte oluşmuştur.

Şekil 6.30’da yer alan içyapılar incelendiğinde fazla sayıda adyabatik bandın olduğu numunelerde bantların daha dar kesite sahip olduğu görülür. (b)’de görülen bandın genişliği yaklaşık 10 μm iken, (f)’deki bant 20 μm genişliğindedir. Bu grupta yer alan numunelerde oluşan bantlar da bozulmuş bantlardır.

Şekil 6.31’de 400 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin krater uzak bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



a) YM09Y, x100.



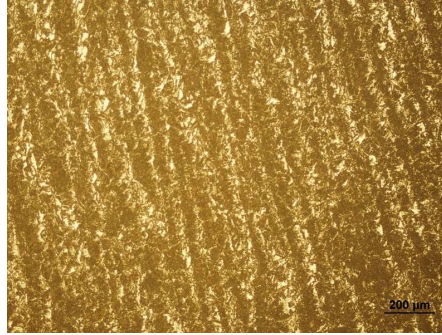
b) YM12Y, x100.



c) YM15Y, x100.



d) YM18Y, x100.

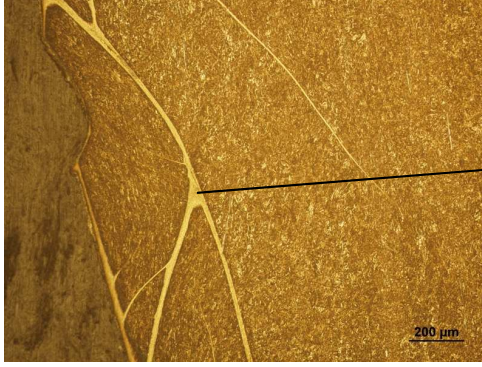


c) YM21Y, x100.

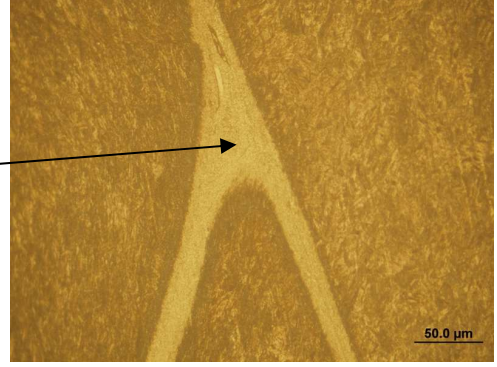
Şekil 6.31. 400 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater uzağındaki içyapıları.

Şekil 6.31’de içyapı görüntüleri verilen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin tüm alan yoğunluklarında kraterden uzak bölgede atış sonrası içyapı değişimi gerçekleşmemiştir.

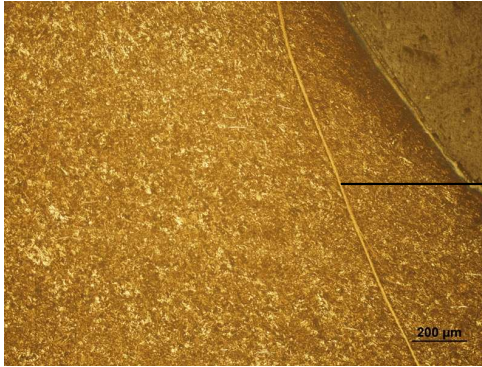
Şekil 6.32’de 200 °C’de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin krater yakın bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir. Şekillerde adyabatik kayma dönüşmüş bantlarının oluştuğu görülmektedir.



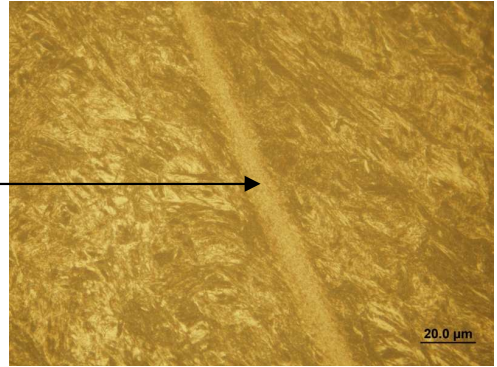
a) TM09D, x100.



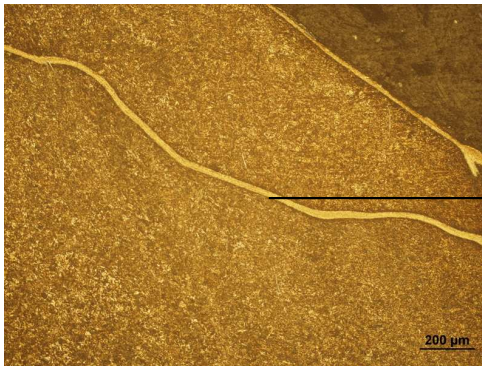
b) TM09D, x500.



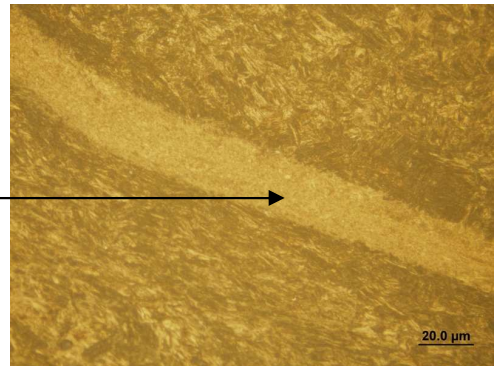
c) TM12D, x100.



d) TM12D, x1000.

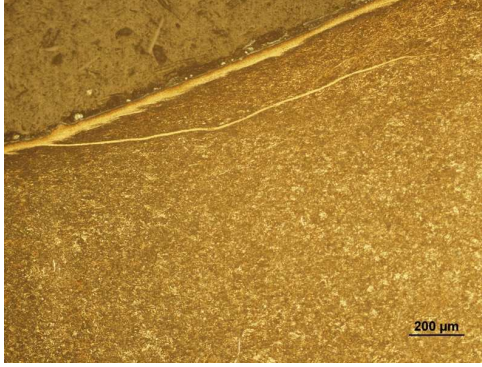


e) TM15D, x100.



f) TM15D, x1000.

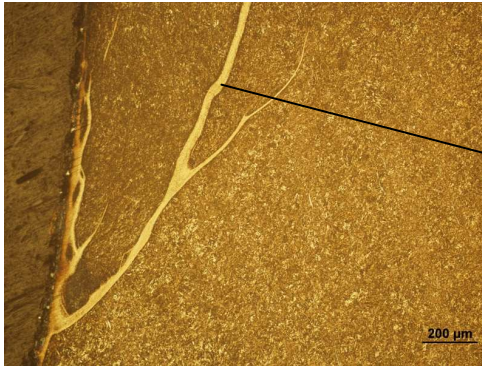
Şekil 6.32. 200 °C’de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları.



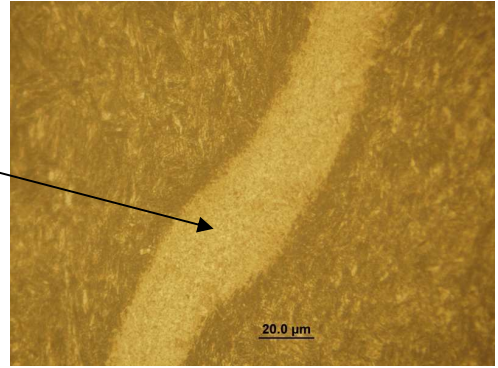
g) TM18D, x100.



h) TM18D, x200.



i) TM21D, x100.



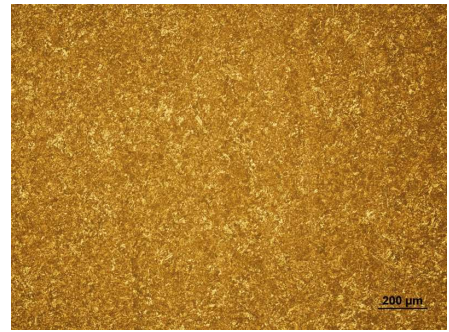
j) TM21D, x1000.

Şekil 6.32. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları

Şekil 6.33’te 200 °C’de menevişlenen yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerin krater uzak bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



a) TM09D, x100.



b) TM12D, x100.

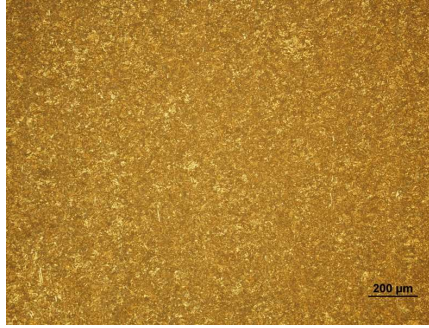
Şekil 6.33. 200 °C’de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater uzağındaki içyapıları.



c) TM15D, x100.



d) TM18D, x100.



e) TM21D, x100.

Şekil 6.33. (Devamı) 200 °C’de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater uzağındaki içyapıları

Şekil 6.33’te verilen bütün içyapılar birbirinin aynısıdır. Düşük, orta ve yüksek martenzit hacim oranına sahip numuneler ara kritik bölgede tavlандıklarından sıcak haddeleme sırasında oluşmuş ferrit bantları bozulmamıştır. Ara kritik bölgeye çıkılmasıyla ferrit ve perlitte oluşan içyapı, ferrit ve östenite dönüşmüştür. Bu dönüşüm sırasında ferritlerin bir kısmı değişimi uğramadığından numunelerin içyapısında ferritler bantlar halindedir. Tamamen martenzitik içyapıya sahip numuneler ise östenit bölgesi olan 900 °C’de tavlannmıştır. Tavlama esnasında ısıl işlem öncesi yapıda bulunan ferrit ve perlit bantları tamamen bozulmuştur ve malzeme homojenleşmiştir. Malzemenin homojenleşmesini sağlayan olay yüksek sıcaklıkta hızla gerçekleşen karbon yayınıdır. Östenit bölgesinde yeterli süre beklenerek karbon yayınına zaman tanınmış ve homojen östenit elde edilmiştir. Östenit fazındaki numuneye su verilmesi sonucu tamamen martenzit içyapı elde edilmiştir. Şekillerde atıştan etkilenmemiş menevişlenmiş martenzit görülmektedir.

Şekil 6.34'te 400 °C'de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin krater'e yakın bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



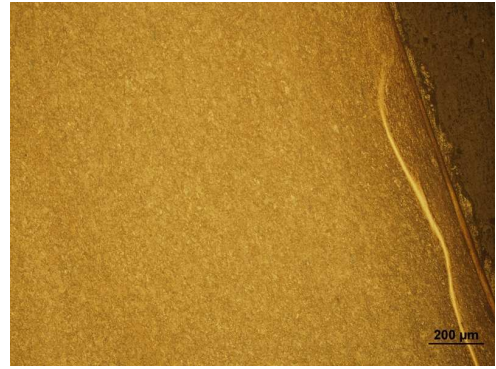
a) TM09Y, x100.



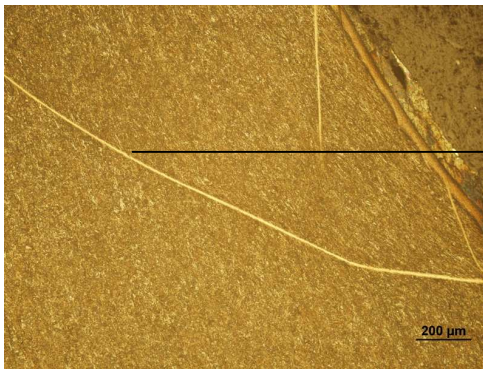
b) TM12Y, x100.



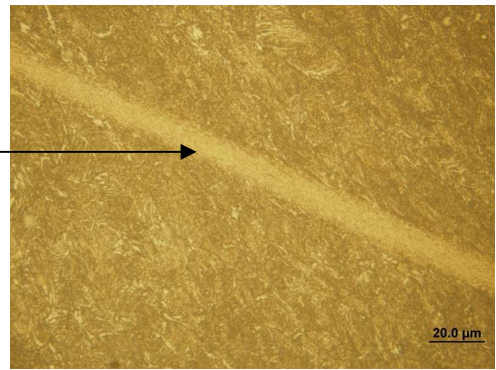
c) TM15Y, x100.



d) TM18Y, x100.



e) TM21Y, x100.



f) TM21Y, x1000.

Şekil 6.34. 400 °C'de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater yakınındaki içyapıları.

Şekil 6.35'te 400 °C'de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin krater uzak bölgelerinden alınan içyapı görüntüleri verilmiştir.



a) TM09Y, x100.



b) TM12Y, x100.



c) TM15Y, x100.



d) TM18Y, x100.



e) TM21Y, x100.

Şekil 6.35. 400 °C'de menevişlenen tamamen martenzitik içyapıya sahip numunelerin balistik deneyler sonrası krater uzağındaki içyapıları.

Şekil 6.35'te verilen içyapı görüntülerinin tamamı benzer olup yapılar da menevişlenmiş martenzit görülmektedir. Yapılar atışlardan etkilenmemiştir.

Balistik deneyler sonrası oluşan içyapılar incelendiğinde düşük sertlikteki numunelerde bozulmuş adyabatik kayma bantlarına rastlanırken, sertliğin artmasıyla birlikte dönüşmüş bantlar oluşmaya başlamıştır. İncelenen numuneler içerisinde en düşük sertlik ve dayanıma sahip olan yüksek sıcaklıkta menevişlenmiş düşük martenzit hacim oranına sahip numunelerde yüksek oranda şekil değiştirmiş ferrit taneleri ve bozulmuş adyabatik kayma bantları görülmüştür. Darbenin etkisiyle birlikte malzemeye yüklenen enerji malzeme içerisinde bir bölgenin diğer bölge üzerinde kaymasıyla soğurulmuştur. Yapıda yüksek oranda bulunan sünek ferrit fazı taneleri kolayca şekil değiştirerek bozulmuş bantları oluşturmuştur. Yüksek sertlikteki numunelerde yoğun martenzit fazında bölgelerin birbiri üzerinde kayması oldukça zordur. Bu nedenle çarpışma enerjisi kayma bölgesinin aşırı ısınmasına yol açar. Aşırı ısınan bölgede kristal yapı değişimi gerçekleşir ve açık renkli dönüşmüş bantları oluşturur. Yüksek martenzit hacim oranına sahip numuneler incelendiğinde oluşan bozulmuş bantların rengi, malzemenin dönüşmüş bant oluşturmaya olan yatkınlığını göstermektedir. Martenzit fazının menevişlenmiş olması ve yapıda bulunan ferritler bozulmuş bant oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Yapılan bu çalışmada yüksek sıcaklıkta menevişleme yapıldığı zaman yüksek martenzit hacim oranındaki numunelerde oluşan bantların daha koyu renkli olduğu ortaya konmuştur. Übeyli ve arkadaşlarının [10], aynı bileşimde ve tamamen martenzit hariç aynı martenzit hacim oranlarında numunelerin balistik başarımlarını incelediklerinde atış sonrası numunelerin tamamında bozulmuş adyabatik kayma bantları olduğunu belirlemişlerdir. Numunelerin menevişlenmesi sonucunda da yine bozulmuş adyabatik kayma bantları oluşmuştur. Ancak yüksek martenzit hacim oranında dayanımın artması sonucu dönüşmüş adyabatik kayma bantları oluştuğu görülmektedir.

İncelemelerde düşük alan yoğunluğuna sahip bazı numunelerde kılcal bantların oluştuğu gözlemlenmiştir. Mermiyi durduramayan numune çok fazla enerji soğurmak zorunda kalmamıştır ve bu nedenle bantlar incedir. Bazı numunelerde çok sayıda bant oluştuğundan soğurulan enerji farklı bölgelerce paylaşılmış ve yine ince bantlar oluşmuştur. Tamamen martenzit fazındaki numunede ise mermiye karşı

koyma kuvveti fazla olduğundan bölgeler yüksek hızda gerinime maruz kalmış ve dönüşmüş adyabatik kayma bantlarını oluşturmuştur.

Bu çalışmada olduğu gibi yapılan diğer çalışmada [46] 4140 ve 4340 YMDA çeliklerinin balistik başarımları incelenmiştir. Menevişlenmiş martenzit fazında içyapıya sahip dört farklı sertlikteki numunelerde artan sertlikle beraber dönüşmüş bant oluşumu gözlemlenmiştir. Düşük sertlikteki numune grubunda sadece bozulmuş adyabatik kayma bantlarına rastlanırken yüksek sertlikte numunelerde hem bozulmuş ve dönüşmüş bantlara bir arada rastlanmıştır. Numunelerde artan alan yoğunluğuyla birlikte oluşan adyabatik bant yoğunluğu da artmıştır. Bir diğer çalışmada [50] ise farklı alan yoğunluklarına ve farklı sertliklere sahip 4340 ve 100Cr6 çelikleri balistik olarak test edilmiş ve oluşan adyabatik kayma bantları incelenmiştir. Çalışma sonucunda 49–59 HRC arasındaki numunelerde dönüşmüş adyabatik kayma bantlarına rastlanırken, incelenen tüm numunelerde bozulmuş bantlar gözlemlenmiştir. Ölçülen bant genişlikleri 10–60 µm arasındadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Çift fazlı çelikte martenzit hacim oranının artmasıyla birlikte sertlik ve dayanım artmaktadır.
- Düşük, orta, yüksek ve tam martenzit hacim oranındaki numuneler yalnızca su verilmiş koşulda oldukça gevrek davranış göstermiştir.
- Numunelerin sertlikleri su verildikten sonra 200 °C'de menevişlenmesi sonucunda yaklaşık %10, 400 °C'de menevişlenmesi sonucunda %20 azalmıştır.
- Numunelerin su verildikten sonra 200 °C'de menevişlenmesi sonucu dayanımları yaklaşık %5–10 arasında azalırken süneklikleri 2–3 kat artmıştır.
- Numunelerin su verildikten sonra 400 °C'de menevişlenmesi sonucu dayanımları yaklaşık %20–25 arasında azalırken süneklikleri 3–5 kat artmıştır.
- İncelenen tüm numuneler içerisinde en yüksek balistik başarıımı tamamen martenzit içyapıya sahip olan ve 200 °C'de menevişlenen numuneler göstermiştir. Bu numuneler 94 kg/m² ve üzeri alan yoğunluklarında tam balistik koruma sağlamıştır.
- Numunelerin hiçbirisi atış sonrası parçalara ayrılmamıştır.
- Alan yoğunluğu arttıkça delinen numunelerde çap küçülmüştür.
- 400 °C'de yapılan menevişleme ısıl işlemi balistik başarıımı olumsuz yönde etkilemiştir.
- Balistik deneyler sonrasında bütün numunelerin içyapısında adyabatik kayma bantları oluşmuştur.
- Düşük, orta ve yüksek martenzit hacim oranına sahip numunelerde bozulmuş adyabatik kayma bantları oluşurken, yüksek sertlikteki tam martenzit numunelerde dönüşmüş bant oluşmuştur.
- Menevişleme ısıl işlemi sonucunda malzemenin dönüşmüş bant oluşturma eğilimi azalmıştır.

- Fazla sayıda adyabatik kayma bandı oluşan numunelerdeki bantların daha ince olduğu görülmüştür.

Bu çalışmayla ilgili olarak önerilen çalışmalar:

- Tamamen martenzitik düşük alaşımlı çelikler ile arada boşluk kalmak kaydıyla yüksek sertlikte seramik ön takviye kullanarak boşluklu zırh malzemeleri denenebilir.
- Çift fazlı çeliklerin eğik atış ve çoklu atış başarımları incelenebilir.
- Farklı oranda alaşım elementleri içeren çift fazlı çeliklerin balistik başarımları incelenebilir.
- Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak adyabatik kayma bantları daha detaylı incelenebilir.
- Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak numunelerde oluşan hasar mekanizmaları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Crocker, G., The Gunpowder Industry, Buckinghamshire, Shire, 2. Baskı, 2002.
- [2] Bhatnagar, A., Lightweight Ballistic Composites Military and Law-Enforcement Applications, Cambridge, Woodhead, 2006.
- [3] Hood, C., Iron and Steel – Their Production and Manufacture, Read Books, 2007.
- [4] Kabakçı, F., 2006, Çift Fazlı Çeliklerde Mikroyapının Mekanik Özelliklere Etkisi, *Bilim Uzmanlığı Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [5] Krauss, G., Steels, ASM International, Materials Park, Ohio 2005.
- [6] Çelik, H., 2001, AISI-SAE 4330 Çeliğinde Çift Fazlı Çelik Yapısının Üretilmesi ve Bu Yapının Çekme Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [7] Topçu, O., Übeyli, M., On the Microstructural and Mechanical Characterizations of a Low Carbon and Micro-Alloyed Steel, *Materials and Design*, 30(8), 3274-3278, 2009.
- [8] Akay, S. K., 2005, Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çift Fazlı Çeliklerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Uludağ Enstitüsü Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [9] Üngör, Y., 2010, Çift Fazlı Bir Çelikte Martenzit Hacim Oranının ve Menevişleme Isıl İşleminin Yorulma Ömrü Üzerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [10] Übeyli M., Demir, T., Deniz, H., Yıldırım, R. O., Keleş, Ö., Investigation on the Ballistic Performance of a Dual Phase Steel Against 7.62mm AP Projectile, *Materials Science and Engineering A* 527, 2036-2044, 2009.
- [11] Deniz, H., 2009, Çift Fazlı Bir Çeliğin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermi Karşısında Balistik Davranışının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [12] Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Investigation On the Ballistic Impact Behavior of Various Alloys Against 7.62 mm Armor Piercing Projectile, *Materials and Design* 29 (2008) 2009–2016.
- [13] Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Effect of Hardness on the Ballistic Impact Behavior of High-Strength Steels Against 7.62-mm Armor Piercing Projectiles, *Journal of Materials Engineering and Performance*, (2009) 18:145–153.
- [14] Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Karakaş, M.S., Response of Alumina/4340 Steel Laminated Composites Against the Impact of 7.62 mm Armor Piercing Projectiles, *Science and Engineering of Composite Materials*, 16, 89-98 (2009).
- [15] Gonçalves, D. P., de Melo, F. C. L., Klein, A. N., Al-Qureshi, H. A., Analysis and Investigation of Ballistic Impact on Ceramic/Metal Composite Armour, *Machine Tools and Manufacture*, 44-307-316, 2004.

- [16] Cerit, A. A., 2004, Partikül ve Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitin Balistik Performansının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [17] Orgorkiewicz, R. M., Armor for Combat Vehicles, *New Armor Materials*, Mach Des, 36-42, 1969.
- [18] Woodward, R. L., A Rational Basis for the Selection of Armour Materials, *The Journal of Aust Inst of Metals*, 22:167-170, 1977.
- [19] Gupta, N. K., Madhu, V., An Experimental Study of Normal and Oblique Impact of Hard-Core Projectile on Single and Layerede Plates, *International Journal of Impact Engineering*, 19:395-414, 1997.
- [20] Madhu, V., Ramanjaneyulu, K., Bhat, T. B., Gupta, N. K., An Experimental Study of Penetration Resistance of Ceramic Armour Subjected to Projectile Impact, *International Journal of Impact Engineering*, 32:337-350, 2005.
- [21] Hohler V., Comparative Analysis of Oblique Impact on Ceramic Composite Systems, *International Journal of Impact Engineering*, 26:333-344, 2001.
- [22] Sadanandan S., Heterington J. G., Characterization of Ceramic/Steel and Ceramic/Aluminum Aromours Subjected to Oblique Impact, *International Journal of Impact Engineering*, 19:811-819, 1997.
- [23] Gupta, N. K., Madhu, V., Normal and Oblique Impact of a Kinetic Energy Projectile on Mild Steel Plates, *International Journal of Impact Engineering*, 12(3):333-343, 1992.
- [24] Übeyli, M., Yıldırım, R. O., Ögel, B., Investigation on the Ballistic Behavior of $Al_2O_3/Al2024$ Laminated Composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 196:356-364, 2008.
- [25] Carlucci, D. E., Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition, *Taylor & Francis Group*, New York, 2008.
- [26] Ingalls, C. Interior Ballistics; A Text Book for the Use of Student Officers at the US Artillery School, *Read Books*, 2008.
- [27] Ingalls, J. M., Exterior Ballistics in the Plane of Fire, *BiblioBazaar, LLC*, 2008.
- [28] Topçu, O., 2009, Çift Fazlı Bir Çeliğin Frezede İşlenebilirliğinin Araştırılması ve Yapay Sinir Ağları ile Kestirimi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [29] Davies, R. G., Influence of Martensite Composition and Content on the Properties of Dual Phase Steels, *Metallurgical Transactions A*, Vol 9A, 1978.
- [30] Steiner, R., *ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, High Performance Alloys*, ASM International, USA, 2005.
- [31] Oliveira, F.L.G., Andrade, M.S., Cota, A.B., Kinetics of Austenite Formation During Continuous Heating in A Low Carbon Steel, *Materials Characterization*, 58(3), 256-261, 2006.
- [32] Garcia, C.I., Deardo, A.J., Formation of Austenite in 1.5 Pct. Mn Steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 12(3), 575-579, 1981.
- [33] Speich, G.R., Demarest, V.A., Miller, R.A., Formation of Austenite during Intercritical Annealing of Dual-Phase Steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 12(8), p. 1419-1428, 1981.

- [34] Jeong, C.W., Kim, C.H., Formation of Austenite from a Ferrite-Pearlite Microstructure during Intercritical Annealing, *Journal of Materials Science.*, 20(12), 4392-4398, 1985.
- [35] Callister, W. D., *Materials Science and Engineering an Introduction*, Wiley, 2003.
- [36] Midea, S. J., *Heat Treating; Including Steel Heat Treating in the New Millennium an International Symposium in Honor of Prof. George Krauss*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2000.
- [37] Thelning, K-E., *Steel and its Heat Treatment*, Bofors Handbook, Butterworth, London, 1975.
- [38] Demir, B., 1997, Çift Fazlı Çelik Üretimi, Çift Fazlı Çeliklerde Martenzit Hacim Oranı ve Morfolojisinin Çekme Özellikleri Üzerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [39] *Standart Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*, ASTM E 18-93, ASTM International, USA, 1993.
- [40] *Standart Test Methods for Tension Testing of Metalic Materials [Metric]*, ASTM E8M-04, ASTM International, USA, 2004.
- [41] MIL-C-60617A, *Military Specification, Cartridge, 7,62 mm: NATO*, AP, M61, 1991.
- [42] Topçu, O., Übeyli, M., Demir, T., On the Hardenability of an Intercritically Heat Treated Microalloyed Steel, *Instrumentation Science & Technology*, 38: 2, 178-186.
- [43] Borvik, T., Dey, S., Clausen, A.H., Perforation Resistance of Five Different High Strength Steel Plates Subjected to Small-Arms Projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, 36:948-964, 2009.
- [44] Borvik, T., 2001, Ballistic Penetration and Perforation of Steel Plates, *Doktora Tezi*, Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Yapı Mühendisliği Bölümü, Norveç.
- [45] Zukas, J.A., *Penetration and Perforation of Solids, Impact Dynamics*, John Wiley&Sons, New York, 155-213, 1982.
- [46] Demir, T., 2008, Metal ve Katmanlı Zırh Malzemelerin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermiler Karşısında Balistik Başarımlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [47] Wright, T. W., *The Physics and Mathematics of Adiabatic Shear Bands*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [48] Dornmeval, R., The Adiabatic Shear Phenomenon, pp.47-69, in *Materials at High Strain Rates*, Elsevier Applied Science, 1987.
- [49] Aeberli, K.E., Pratt, P. L., *Journal of Materials Science*, 20 (316), 1985.
- [50] Übeyli, M., Demir, T., Yıldırım, R.O., Aycan, M.F., Effect of Heat Treatment on the Formation of Adiabatic Shear Bands in High Strength Steels Impacted by AP Projectiles, *Kovove Mater.* 47 2009 409–413.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÜREL, Bayram
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 16.08.1986 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 292 42 33
Faks : 0 (312) 292 42 31
e-posta : bgurel@etu.edu.tr

Eğitim

<i>Derece</i>	<i>Eğitim Birimi</i>	<i>Mezuniyet tarihi</i>
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği	2008

İş Deneyimi

<i>Yıl</i>	<i>Yer</i>	<i>Görev</i>
2008–2009	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Arş. Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce