



**SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ SAE 8620 ÇELİĞİNE
KRİYOJENİK VE SEMENTASYON İŞLEMİNİN ETKİLERİ**

Bilal KÖYLÜOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2014

Bilal KÖYLÜOĞLU tarafından hazırlanan “SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ SAE 8620 ÇELİĞİNE KRİYOJENİK VE SEMENTASYON İŞLEMİNİN ETKİLERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metal Eğitimi Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. A. Tamer ÖZDEMİR

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Ahmet GÜRAL

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 25/07/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bilal KÖYLÜOĞLU

25.07.2014

SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRLMİŞ SAE 8620 ÇELİĞİNE KRİYOJENİK VE SEMENTASYON İŞLEMİNİN ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Bilal KÖYLÜOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2014

ÖZET

Bu çalışmada, SAE 8620 kalite çelik malzemenin sürtünme kaynağı ile birleştirme tavrına karbürizasyon ve kriyojenik işlemin etkileri incelenmiştir. Öncelikle bu malzemenin sürtünme kaynağı ile başarılı birleştirme parametrelerin belirlenmesi için pilot çalışmalar yapılmıştır. Karşılaştırma için sürtünme kaynaklı ve kaynaksız numuneler hazırlanmış ve daha sonra numunelerin hepsi karbürizasyon, kriyojenik ve tavlama işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Kaynaklı numunelerin kalıntı gerilme ölçümleri ile uyumlu olacak şekilde çekme testleri yapılmıştır. Buna rağmen sertlik, çekme mukavemeti ve kalıntı gerilme dağılımları arasında doğrudan bir ilişki bulunulamamıştır. İlk başta, testler için uygun geometrideki numunelerin işlenerek hazırlanması safhasında şiddetli kesme kuvvetlerine bağlı olarak yüzeyde büyük miktarda basma yönlü kalıntı gerilmesi oluşmaktadır. Daha sonra yapılan sistematik ısıtma işlemleri neticesinde bu eksi yönlü gerilmelerin çoğunlukla artı yöne geçiş yaptığı tespit edilmiştir. Bunun tersi olarak, kaynaklı parçaların hem kalıntı gerilme dağılımları hem de mekanik mukavemetleri tamamen farklı şekilde tavrı sergilemektedirler.

Bilim Kodu : 710.1.092

Anahtar Kelimeler : Sürtünme kaynağı, sementasyon, kriyojenik işlem, kalıntı gerilmeler

Sayfa Adedi : 80

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. A. Tamer ÖZDEMİR

EFFECTS OF CRYOGENICS AND CASE HARDENING ON FRICTION WELDED

SAE 8620 STEEL PARTS

(M.Sc. Thesis)

Bilal KÖYLÜOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2014

ABSTRACT

In this work, effects of carburizing and cryogenic treatments on the behavior of friction welded SAE 8620 quality steel parts were examined. Some preliminary work was accomplished to determine the best parameters to successfully adjoin the steel parts by friction welding technique. For comparison, as well as friction welded, plain samples were also prepared. All samples were categorized in several groups, where each batch received a specific treatment such as; successive combinations of carburization, cryogenics and annealing treatments, respectively. Some preliminary mechanical testing using tensile testing in accordance with residual stress measurements for welded samples were accomplished simultaneously. However, a direct correlation in between hardness, tensile strength and residual stress distribution could not be found. It is evident that due to severe cutting forces induced during machining of the samples, severe compressive residual stresses were introduced on the surface. After systematic heat treatments, these negative stresses were mostly found to increase in the positive sense. On the contrary, welded parts displayed completely different manner of mechanical strength as well as residual stress distributions.

Science Code : 710.1.092

Key Words : Friction Welding, carburized, cryogenic process, residual stress

Page Number : 80

Supervisor : Prof. Dr. A. Tamer ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren saygıdeğer hocam Prof. Dr. A. Tamer ÖZDEMİR'e şükranlarımı sunarım. Çalışmalarımın her aşamasında değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yardımlarını benden esirgemeyen değerli hocalarım ve bu tezi tamamlamamda çok büyük yardımları olan Doç. Dr. Hakan ATEŞ, Doç. Dr. Fırat KAFKAS'a, ayrıca Prof. Dr. Rıza GÜRBÜZ'e ve onun nezdinde laboratuvar çalışmalarında imkânlarından faydalandığım ODTÜ Metalürji Mühendisliği Bölümü çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışması esnasında beraber çalıştığım Zihni DEMİRKAYA'ya ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan Sedef SEZER ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. SÜRTÜNME KAYNAĞI.....	3
2.1. Yöntemin Tanımlanması	3
2.2. Kaynak Parametreleri.....	7
2.2.1. Çevresel hız.....	8
2.2.2. Sürtünme basınç kuvveti	8
2.2.3. Sürtünme süresi.....	8
2.2.4. Yığma süresi.....	8
2.2.5. Yığma basınç kuvveti.....	9
2.3. Avantajları ve Dezavantajları	9
3. SEMENTASYON ÇELİKLERİ	11
4. KRİYOJENİK İŞLEM.....	15
4.1. Kriyogeni ve Kriyojenik İşlem.....	16
4.1.1. Kriyojenik işlem uygulamalarında kullanılan soğutma metodları	19
4.1.2. Direkt soğutma metodu	19
4.1.3. Endirekt soğutma metodu.....	20
5. KALINTI GERİLMELER	21

Sayfa

5.1. Kalıntı Gerilme Tipleri	21
5.2. Kalıntı Gerilmesi Ölçüm Metodları	22
5.2.1. Katman kaldırma yöntemi	22
6. MALZEME VE METOT	29
6.1. Malzeme	29
6.2. Sürtünme Kaynağı İşlemi.....	29
6.3. Isıl İşlemler.....	30
6.4. Mikroyapı İncelemeleri	31
6.5. Sertlik Testleri	32
6.6. Çekme Testleri.....	32
6.7. Kalıntı Gerilme Ölçümleri	33
6.7.1. Kalıntı gerilmelerinin hesaplanması.....	37
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	411
7.1. Mikroyapı İncelemeleri	41
7.2. Mikrosertlik Testi Bulguları	46
7.3. Çekme Testi Bulguları.....	50
7.4. Kalıntı Gerilmesi Deney Bulguları	57
8. YORUM VE SONUÇLAR.....	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin diğer ülke standartlarında yaklaşık karşılıkları.....	12
Çizelge 3.2. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin kimyasal bileşimi	12
Çizelge 3.3. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin mekanik özellikleri (Sementasyon ve sertleşmeden sonra)	12
Çizelge 3.4. SAE 8620 sementasyon çeliğinin ısıtılma koşulları.....	13
Çizelge 4.1. Kriyojenik sıvılar ve atmosferik buharlaşma sıcaklıkları	17
Çizelge 6.1. SAE 8620 çeliğinin kimyasal analizi.....	29
Çizelge 6.2. Malzemelere uygulanan kaynak parametreleri değerleri.....	29
Çizelge 6.3. Malzemelere uygulanan ısıtılma basamakları	31
Çizelge 7.1. Numunelerin 4 farklı bölgesinden alınan ortalama sertlik değerleri	46
Çizelge 7.2. Çekme testi numunelerinin birleştirilmiş verileri	51
Çizelge 7.3. Numunelerin ortalama akma ve kopma dayanımı	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sürtünme kaynağı işlemi	3
Şekil 2.2. Sürtünme kaynağının uygulanma şekilleri	5
Şekil 2.3. Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı.....	6
Şekil 2.4. Lineer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı	6
Şekil 2.5. Tipik bir sürtünme kaynağı makinesi	6
Şekil 3.1. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin sürekli soğutma zaman-sıcaklık diyagramı	13
Şekil 3.2. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin izotermik soğutmada zaman-sıcaklık diyagramı.....	14
Şekil 3.3. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin sertleşebilirlik bandı	14
Şekil 4.1. Kriyojenik ısıtılmasının azot ortamındaki sıcaklık-zaman döngüsü.	15
Şekil 4.2. Kriyojenik ısıtılmasının basamağının sıcaklık-zaman diyagramındaki yeri.....	16
Şekil 4.3. Direkt soğutma metodu ile çalışan kriyojenik işlem sisteminin şematik gösterimi	19
Şekil 4.4. Endirekt soğutma metodu ile çalışan kriyojenik işlem sisteminin şematik gösterimi	20
Şekil 5.1. Kalıntı gerilmesi ölçüm metodları	22
Şekil 5.2. Katman kaldırma esnasında kalıntı gerilmenin yeniden dağılımı	23
Şekil 5.3. Kaldırılmış katman kalınlığının eğilme deformasyonu	24
Şekil 5.4. Elektrokimyasal işleme yönteminin prosesi	26
Şekil 5.5. Elektrolit içerisindeki iş parçasına uygulanan elektro kimyasal süreç	27
Şekil 6.1. Isıl işlemlerin şematik özeti	30
Şekil 6.2. Çekme numunesi ölçüleri	33
Şekil 6.3. Kalıntı gerilmesi deney numunesi ölçüleri.....	33
Şekil 6.4. f (a) Fonksiyonunun türev alma düzeni	38
Şekil 6.5. Numuneden tabaka kaldırıldıktan sonraki halinin şekilsel gösterimi.....	39
Şekil 7.1. N ₂ 'ye ait ana malzeme bölgesinden elde edilmiş mikroyapı.....	42

Şekil	Sayfa
Şekil 7.2. N2'ye ait ITAB bölgesinden elde edilmiş mikroyapı	42
Şekil 7.3. N2'ye ait kaynak bölgesinden elde edilmiş mikroyapı	43
Şekil 7.4. N2'ye ait birleştirme bölgesinden elde edilmiş mikroyapı	43
Şekil 7.5. N3'e ait ana malzeme bölgesinden elde edilmiş mikroyapı.....	44
Şekil 7.6. N3'e ait ITAB bölgesinden elde edilmiş mikroyapı	44
Şekil 7.7. N3'e ait kaynak bölgesinden elde edilmiş mikroyapı	45
Şekil 7.8. N3'e ait birleştirme bölgesinden elde edilmiş mikroyapı	45
Şekil 7.9. N1 numunesi mikrosertlik testi sonucu	47
Şekil 7.10. N2 numunesi mikrosertlik testi sonucu	47
Şekil 7.11. N3 numunesi mikrosertlik testi sonucu	48
Şekil 7.12. N5 numunesi mikrosertlik testi sonucu	49
Şekil 7.13. Birleştirilmiş mikrosertlik sonuçları	50
Şekil 7.14. N1 numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği	52
Şekil 7.15. N2 numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği	52
Şekil 7.16. N3 numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği	53
Şekil 7.17. N4 numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği	53
Şekil 7.18. N5 numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği	54
Şekil 7.19. 5 numunenin çekme dayanımı testi grafiği.....	54
Şekil 7.20. Numunelerin çekme, kopma ve akma dayanımları grafiği.....	55
Şekil 7.21. Kaynaksız N2 numunesine ait çekme testi grafiği	56
Şekil 7.22. Kaynaksız N3 numunesine ait çekme testi grafiği	56
Şekil 7.23. Kaynaklı N1 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	58
Şekil 7.24. Kaynaklı N1 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	58
Şekil 7.25. Kaynaklı N1 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	59

Şekil	Sayfa
Şekil 7.26. Kaynaklı N2 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	59
Şekil 7.27. Kaynaklı N2 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	60
Şekil 7.28. Kaynaklı N2 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	60
Şekil 7.29. Kaynaklı N3 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	61
Şekil 7.30. Kaynaklı N3 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	61
Şekil 7.31. Kaynaklı N3 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	62
Şekil 7.32. Kaynaklı N4 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	62
Şekil 7.33. Kaynaklı N4 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	63
Şekil 7.34. Kaynaklı N4 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	63
Şekil 7.35. Kaynaklı N5 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	64
Şekil 7.36. Kaynaklı N5 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	64
Şekil 7.37. Kaynaklı N5 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu.....	65
Şekil 7.38. N1 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği	66
Şekil 7.39. N2 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği	66
Şekil 7.40. N3 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği	67
Şekil 7.41. N4 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği	68
Şekil 7.42. N5 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği	69
Şekil 7.43. Kaynaklı numunelerin kalıntı gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması	70
Şekil 7.44. Kaynaksız ve kaynaklı N2 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği	71
Şekil 7.45. Kaynaksız ve kaynaklı N3 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği	71

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Sürtünme kaynağı yapılmış numune	29
Resim 6.2. Mikroyapı incelemesi için numunelerden alınan fotoğraf bölgeleri.....	31
Resim 6.3. Numunelerden alınan sertlik ölçüm bölgeleri.....	32
Resim 6.4. Çekme testinde N5 numunesine ait kopma öncesi	33
Resim 6.5. İlk deneylerde kullanılan katman kaldırma düzeneği	35
Resim 6.6. İlk deneylerde kullanılan numunelerden alınan ölçüm noktalarının yerleri.	35
Resim 6.7. İkinci aşama kalıntı gerilme deneylerinde kullanılan katman kaldırma düzeneği	36
Resim 6.8. Katman kaldırma işlemi sonrasında numunenin görünümü	37
Resim 7.1. Numunelerden alınan 4 farklı bölge yeri	46

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
σ	Kalıntı gerilmesi (Mpa)
1t	1 Saat temperleme işlemi (230°C)
3s	3 Saat sementasyon (900°C)
3t	3 Saat temperleme işlemi (230°C)
a	Aşındırılan kısım (Mm)
b	Kaldırılan katman genişliği (Mm)
d	Aşındırılan kısmın son çapı (aşınma sonrası) (Mm)
d _s	Aşındırılan yüzeyin ilk çapı (aşınma öncesi) (Mm)
e	Elastikiyet modülü (Mpa)
hn	Ham numune (ısıtıl işlem görmemiş)
k	24 Saat kriyojenik işlem (-145°C)
k _y	Düzeltilme katsayısı
l	Kaldırılan katmanın uzunluğu (180 ⁰ derecelik kısım) (mm)
n1	1 Numaralı numune
n2	2 Numaralı numune
n3	3 Numaralı numune
n4	4 Numaralı numune
n5	5 Numaralı numune
r	Aşındırılan kısmın yarıçapı (mm)
rm	Kopma dayanımı
rt	Akma dayanımı
ys	Yağda soğutma

Kısaltmalar	Açıklamalar
AISI	American Iron And Steel Institute (Amerika Demir Ve Metal Enstitüsü)
ASTM	American Society For Testing And Materials (Amerikan Gereçleri Deneme Derneği)
DIN	Deutsches Institut Für Normen (Alman Standartları Enstitüsü)
EN	European Standards (Avrupa Standartları)
HRC	Rockwell Sertlik Değeri
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
HV	Vickers Sertlik Değeri
SAE	Society Of Automotive Engineers (Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği)
SEM	Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
R²	Regresyon Doğrusu

1. GİRİŞ

SAE 8620 (21NiCr5) sementasyon çeliği makine elemanlarında ve otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle dişli çark, pim, mil, şalter kovanı ve benzeri parçaların imalatına tercih edilen malzeme, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişken ve darbeli zorlamalara dayanıklı yerlerde tercih edilen düşük alaşımlı bir yapı çeliğidir. Sementasyon, maliyeti yüksek olmayan geleneksel bir yüzey sertleştirme işlemidir ve bahsi geçen niteliklere ulaşmak için tatbik edilen temel bir ısıtma işlemidir [1]. Kriyojeni ise yakın zamanlarda önemi anlaşılmaya başlanan bir yöntemdir. Malzemenin aşırı soğutulması, yapısal değişim meydana gelecek kadar tutulması ve daha sonra bu ortamdan çıkarılarak yeniden oda sıcaklığına dönmesi kademelerini içerir. Özel durumlarda temperleme işlemiyle yapı geliştirilebilir [2]. Konvansiyonel yöntemlerle yapılan kriyojenik işlemler, -100°C ye kadar olan ara sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Bu seviyenin östenitin tamamına yakın oranda martensite çevrilmesine yeterli olduğu kabul edilmiştir. Ancak günümüzdeki araştırmalar ultra düşük sıcaklıklarda (-200°C gibi) yapılan kriyojeni işlemlerinin, aşınma direncini daha da arttırdığını ortaya koymaktadır [3]. Ancak, yapısal değişim mekanizması hala tam olarak anlaşılamamaktadır. Özellikle, kriyojeni sonrası martemperleme işleminde, martensit içinde karbür çökmesine etkisi hakkında sınırlı sayıda birbirinden farklı bilgi ve gözlemler bulunmaktadır [4]. Kriyojenik işlemine bağlı malzemedeki aşınma direnci, yorulma ve korozyon dayanımı vs. kalıntı östenit oranının azaltılmasının ötesinde, yapıda olması muhtemel farklı niteliklerde oluşan çok ince dağılımlı karbürlerden kaynaklanabileceği belirtilmektedir [4, 5]. Kısaca, kriyojenik işleminin yapısal etkileri hala çalışılmaktadır.

Literatür araştırmasında, kaynakla birleştirilmiş, sementasyon sonrası kriyojenik işlem görmüş malzemelerin davranışları hakkında bilgiye rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmanın özünü; sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş SAE 8620 çelik çubukların, sementasyon ve kriyojenik işlemler sonrası çeşitli mekanik özelliklerindeki değişimlerin irdelenmesi oluşturmaktadır. Sürtünme kaynağı, bir çeşit basınçlı kaynaklama yöntemidir ve malzemenin eritilmeden sürtünme basıncının oluşturduğu ısı etkisiyle temas yüzeylerinin plastik deformasyona uğratarak birleştirildiği bir tekniktir [6, 7]. Çalışma başlangıcında SAE 8620 çeliğinin özellikleri de göz önüne alınarak en uygun kaynak

parametreleri belirlenmiş ve eldeki parçaların bir kısmı sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Öte yandan sementasyon ve kriyojeni işlemlerinin temel etkilerini de gözleyebilmek için, hiç kaynak işlemi görmemiş, sade parçalar da benzer geometrilerde hazırlanmıştır. Kısaca, hiç işlem görmemiş, sementasyon işlemi görmüş, sementasyon işlemi sonrası kriyojeni işlemi uygulanmış ve en sonra da belli süre menevişlenmiş parçalar, hem kaynaklı, hem de kaynaklı malzemelere tatbik edilerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, mekanik özelliklerdeki değişimler ve oluşması beklenen kalıntı gerilmelerin tespit ve karşılaştırılması şeklinde hedeflenmiştir.

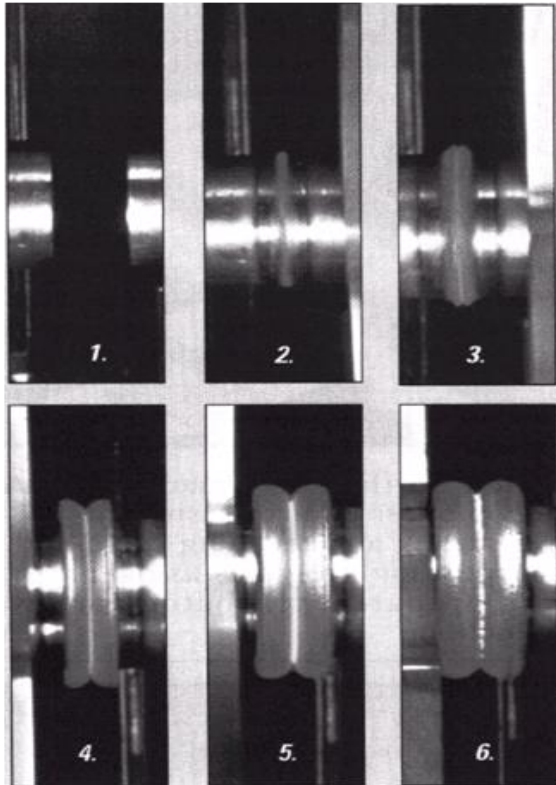
Çalışma sonunda; sertlik, mikroyapı incelemesi, çekme testleri ve kalıntı gerilim ölçümleriyle, sementasyon ve kriyojeni işlemlerinin sürtünme kaynaklı numuneler üzerindeki kalıcı etkileri tespit edilmiştir.

2. SÜRTÜNME KAYNAĞI

2.1. Yöntemin Tanımlanması

Sürtünme kaynağı, elektrik enerjisi veya diğer kaynaklardan ısı enerjisi uygulamadan malzeme yüzeyleri arasındaki mekanik dönme hareketinin ısı enerjisine dönüşmesi ile kaynak için gerekli ısının elde edilerek yapıldığı bir katı hal kaynak işlemidir. Sürtünme kaynakları, ara yüzey kaynak sıcaklığına ulaşana kadar sabit bir iş parçasıyla dönen bir iş parçasının sabit veya belirli olarak artan basınç altında yapılır ve sonunda dönme durdurularak işlem tamamlanır. Birbirinin ters yönüne dönen her iki parçada hareketli olan sürtünme kaynağı sistemleri de bulunmaktadır. Sürtünme ısısı iş parçasının ara yüzey sıcaklığını hızla artırarak ergime derecesinin altında belli bir değere getirir ve plastik sıcaklık aralığında ısınan bölgeye uygulanan basıncın etkisi altında birleşme meydana gelir [1, 2].

İşlem sürecine bakıldığında;

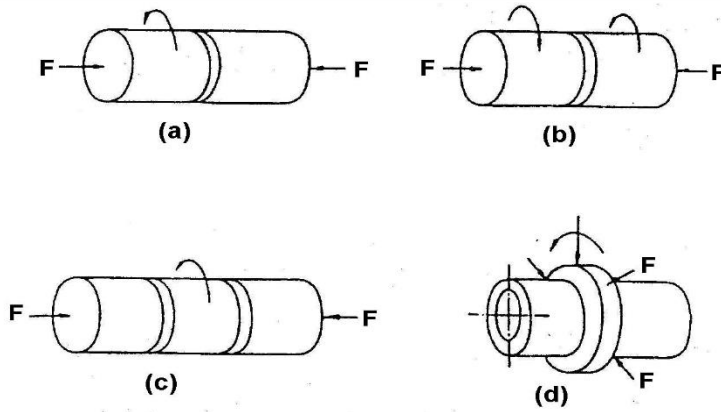


Şekil 2.1. Sürtünme kaynağı işlemi

1. Parçalardan biri sürtünme kaynağı mekanizması tarafından döndürülürken diğer parça sabittir. Dönen parça sabit duran parçaya temas edecek şekilde ilerletilir.
2. Dönme sonucu da sürtünen yüzeylerde ısı açığa çıkar. Metallerde ortaya çıkan yüksek ısı, kaynak bölgesi sıcaklığını her zaman ergime sıcaklığının altında tutar.
3. Yumuşayan metal uygulanan basıncın etkisiyle dışarı doğru taşmaya başlar.
4. Dövülmüş sıcak bölge ara yüzeyden dışarı doğru yönlendirilir.
5. Makine döndürme işlemini durdurur ve dövme kuvveti ile kaynak tamamlanır.
6. Sıcak işlemeye maruz kalan birleşme bölgesi tüm yüzey ve çap boyunca homojen bir forma ve yüksek kalitede kaynağa sahiptir [8].

Kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler basınç altındadır ve ısıtma fazı ya da sürtünme fazı olarak adlandırılan bu süreç yüzeylerde plastik şekil verme sıcaklığı oluşana kadar sürer. Çelikler için bağlantı bölgesinde oluşan sıcaklık 900-1300 °C arasındadır. Çoğu durumda ısıtma fazı sonrasında basınç artırılarak ara yüzeydeki ısıtılmış metal yığılır. Böylece kaynak bölgesi bir tür termomekanik işleme tabii tutulmuş olur ve dolayısı ile bu bölge iyi bir tane yapısı gösterir. Bundan dolayıdır ki, diğer yöntemlerle kaynak edilemeyen metaller ve metal alaşımları rahatlıkla kaynak edilebilir. Bilindiği gibi parçalar arasında kaynak bağı oluşabilmesi için çıplak yüzeylerin temas haline gelmesi gerekir, sürtünme kaynağında bütün temassızlıklar sürtünme yolu ile giderildiği için bu temas çok iyi gerçekleşir. Normal şartlar altında sürtünen yüzeylerde bir ergime olayı oluşmaz, şayet çok küçük miktarlarda bir ergime oluşmuşsa da kaynak sonu uygulanan yığma işleminden dolayı ergimiş metale ait bir delil bulunmaz [9].

Şekil 2.1’de sürtünme kaynağının yapılışı şematik olarak görülmektedir. Başlangıçta parçalardan biri dönerken diğeri sabittir. Dönme hızı belirli bir hıza eriştiğinde iki parça bir araya getirilip eksenel bir basınç uygulanır ve ara yüzeydeki parçalar bölgesel olarak ısınır. Dönme hareketi durdurulduğunda eksenel basınç artırılarak parçalara komple yığma uygulanır [8].

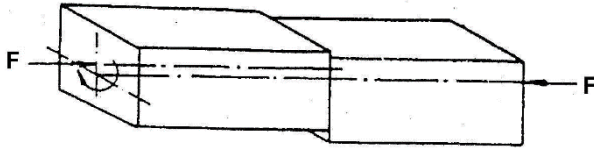


Şekil 2.2. Sürtünme kaynağının uygulanma şekilleri [10]

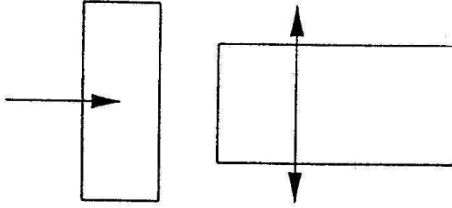
Sürtünme kaynağı uygulamalarının temelini ağırlıklı olarak dairesel kesitli çubukların ya da boruların kaynağı oluşturmaktadır. Bu tarz uygulamalarda sürtünmeyi oluşturan temel hareket dönme hareketidir ve proses Konvensiyonel sürtünme kaynağı şeklinde ifade edilir. Şekil 2.2’de normal sürtünme kaynağının uygulama şekilleri görülmektedir. Şekil 2.2-a en çok kullanılan ve en basit uygulama şeklidir. Şekil 2,2-b’ deki durum yüksek dönme hızlarının gerekli olduğu ufak çaplı numuneler için uygundur. Şekil 2.2-c çok uzun iki parçanın birleştirilebilmesi açısından yerinde bir yöntemdir. Şekil 2.2-d ise boru kaynağı için geliştirilmiş ve radyal kuvvet etkisi altınca dönel bir bilezikten faydalanılarak yapılan kaynak gösterilmektedir [11].

Sürtünme kaynağında, sürtünme için kullanılan dönme hareketi yanında, yörünge hareketi, lineer titreşim hareketi ve açısal titreşim hareketi de uygulanabilir. Yörüngesel hareket silindirik olmayan parçaların kaynağı içindir. Bu uygulamada sabit duran parça üzerinde diğer parça bir köşesi dairesel bir yörünge çizerek hareket etmektedir. (Şekil 2.3).

Lineer titreşim hareketinde parçalardan biri uygulanan basınç altında ileri geri titreşim hareketi şeklindedir. Bu yöntem ilk olarak Vill tarafından sunulmuştur. (Şekil 2.4). Açısal titreşim hareketinde ise parçalardan biri uygulanan basınç altında belirli bir açıyı gören yay parçası, yörünge üzerinde hareket eder [10].

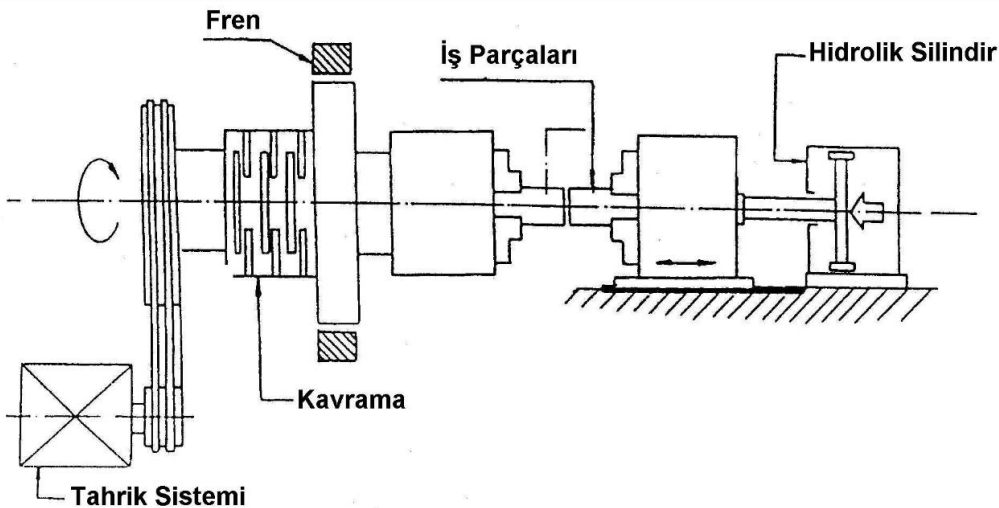


Şekil 2.3. Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı [10]



Şekil 2.4. Lineer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı [10]

Sürtünme hareketi sırasında, yüzeyleri kaplayan oksit ve yabancı tabaka kendiliğinden yırtılarak, sürtünme yüzeyleri arasından uzaklaşırken, yüzeylerin aşırı ısınan bölgesinde sıcaklık, hemen hemen malzeme ergime sıcaklığına kadar yükselir. Isı iletme kabiliyeti az olan malzeme çiftlerinde, birleştirme için gerekli olmasa bile, kısa surede sınırlı dar bir bölgede, ergime olabilmektedir. Sürtünme ısısı ile yumuşayan malzeme, gerek sürtünme ve gerekse durma sırasındaki basınç etkisi ile kaynak yerinde arzu edilmeyen bir şişkinlik (çapak) meydana getirmektedir. Bu çapak, arzu edildiği kadar küçük tutulabileceği gibi, kaynak yapma sırasında zararsız bir şekilde deforme edilebilir veya daha sonra, herhangi bir talaş kaldırma işlemi ile ortadan kaldırılabilir.



Şekil 2.5. Tipik bir sürtünme kaynağı makinesi [10]

Modelleme olarak sürtünme kaynağı makineleri torna, matkap gibi metal işleme makinelerine benzetilmektedir ve ilk sürtünme kaynağı makineleri bu tezgahların modifiye edilmiş şekilleridir. Şekil 2.5’de tipik bir sürtünme kaynağı makinesi gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere bir sürtünme kaynağı makinesi, ana gövde bağlama tertibatları, dönme ve yığma mekanizmaları, fren sistemi, güç ünitesi, kontrol üniteleri ve kumanda tablosu kısımlarından oluşmaktadır. Sürtünme kaynağı makineleri tam mekanize makinelerdir. Parçaların bağlanması, boşaltılması ve oluşan çapakların alınması otomatize edilebilir. Bilindiği üzere sürtünme kaynağının ana fonksiyonları parçaların bağlanması ve sıkıştırılması, basınç altında dönme ve sürtünme, frenleme, yığma ve gerekli sürelerin hassas olarak ayarlanmasıdır. Numune bağlama aparatları gerekli rijitliğe sahip olmalı, üzerine gelecek momentleri karşılamalı, radyal kaçıklıkları ve titreşimleri saf dışı edilebilmelidir. Esasen kaynak süreci boyunca oluşacak titreşimler, gerekli incelemeler ve araştırmalar yapılarak sönmülenebilecek şekilde makine dizaynı yapılmalıdır. Titreşimler yanında oluşacak radyal ve eksenel kuvvetlerden dolayı parçaların sabitlemesi ve eksenel kaçıklıkların engellenmesi mecburidir. Bu nedenle, bağlama tertibatı parçaları gereken miktarda sıkıştıracak şekle sahip olmalıdır [11].

Kaynak ekipmanlarını tutmak için kullanılan bütün durdurma ekipmanları güvenilir olmalıdır. Bağlantısı yapılacak mekanizmada oluşabilecek küçük bir kayma, hem kötü bir kaynak bağlantısına ve hem de frenleme sisteminin zarar görmesine sebep olabilmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi sürtünme kaynağı, gerekli mekanik enerjiyi sağlayan kaynağa göre iki ayrı yöntemle uygulanabilir. Günümüzde bu iki yöntemin bileşimi olan kombine kaynak yöntemleri de geliştirilmiştir [10].

2.2. Kaynak Parametreleri

Sürtünme kaynağı kontrolü gereken oldukça fazla sayıda parametre içermektedir. Bu yöntemle ilgili değişkenler dönme hızı, sürtünme basıncı, yığma basıncı, sürtünme süresi, frenleme süresi, yığma geciktirmesi süresi ve yığma süresidir. Bunun dışında numune geometrisi ve numunenin yapıldığı malzemeden kaynaklanan diğer parametreler de söz konusudur. Ancak yapılan çalışmalar yöntem üzerinde en etkili olan ve optimizasyonu gereken parametrelerin dönme hızı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve

yığma süresi olduğunu göstermiştir. Konu ile ilgili temel eserler incelendiğinde kaynak parametreleri ile ilgili şu genel sonuçlar çıkartılabilir;

2.2.1. Çevresel Hız

Yapılan çalışmalar neticesinde ara yüzey sıcaklığı ve bağlantı kalitesi üzerinde en etkili parametrenin çevresel hız olduğunu görülmüştür. Yüksek çevresel hız yüksek ara yüzey sıcaklığı üretirken düşük çevresel hız yetersiz ısıtma sonucu kaynak bağlantısını olumsuz etkiler. Yüksek çevresel hızına bağlı olarak deformasyon hızının değişimi kaynak süresini azaltır. Bununla birlikte, farklı metal bağlantıları için düşük hızlar, gevrek bir intermetalik fazın oluşumunu sınırlandırabilir. Yüksek hızların kullanılması durumunda ise kaynak bölgesindeki fazla ısınmayı önlemek için sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin denetimi iyi yapılmalıdır.

2.2.2. Sürtünme Basınç Kuvveti

Sürtünme basınç kuvveti, numune geometrisi ve birleştirilecek malzeme çiftinin plastik şekil değiştirme yeteneğiyle orantılı olarak değişir. Sürtünme basıncı kuvveti, temas eden ara yüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek, yüzeylerin atmosfer ile ilişkisini kesebilecek ve ara alanda üniform bir ısıtma elde edilecek seviyede olmalıdır. Sürtünme basıncı, dar bir aralıkta değişmez. Basınç değişkeni, kaynak bölgesindeki sıcaklık derecesi ve eksenel kısalma sayesinde incelenebilir.

2.2.3. Sürtünme Süresi

Sürtünmenin süresi, sürtünen yüzeylerdeki oluşabilecek kalıntı ve pislikleri temizleyecek ve gerekli plastisite için üniform bir kaynak bölgesi sıcaklığına ulaşmayı sağlayabilecek seviyede olmalıdır. Öte yandan sürtünme süresinin fazla uzun olması IEB' nin genişlemesine ve aşırı yığılmaya neden olacaktır [10].

2.2.4. Yığma Süresi

Yığma süresi, malzeme çifti ara yüzeyinde gerekli olan plastik deformasyonu oluşturmak ve sürtünme kaynağının oluşum sisteminden biri olan difüzyonu

hızlandırmak için yığma basınç kuvvetinin uygulandığı bir aşamadır.

2.2.5. Yığma Basınç Kuvveti

Sürtünme periyodunun ardından özellikle çelikler için bir yığma basıncının uygulanması bağlantının kalitesini yükseltir. Yığma basıncı malzemenin sıcak akma sınırına bağlıdır ve aşırı kaynak yığılmasına neden olacak kadar yüksek, elverişsiz şekillendirmeye dolayısıyla yetersiz kaynaklanmaya neden olacak kadar da düşük olmamalıdır. Yığma basınç kuvveti, sürtünme periyodu sonrasında malzeme çifti arasında difüzyon mekanizmasının hızını arttırmak amacıyla uygulanır. Yığma basıncı, malzemelerin birleştirilebilmeleri için malzemelerin sıcak dövme mukavemetlerinin altında olmamalıdır. Öte yandan, yığma basıncı çok yüksek alınırsa aşırı metal deformasyonu oluşur ve bu aşırı yığılma sırasında kaynak bölgesinde metalik olmayan inklüzyonlar istenmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekillenirler [10].

2.3. Avantajları ve Dezavantajları

2.3.1. Sürtünme kaynağının avantajları

Sürtünme kaynağının başlıca avantajları aşağıda belirtilmiştir.

1. İşlemede ve işçilikten tasarruf,
2. Yüksek üretim oranları,
3. Malzeme tasarrufu,
4. Düşük bakım masrafları,
5. Birleşme mukavemetinin ana malzemeye eşit veya daha fazla olması,
6. Kaynak sırasında kendi kendini temizleme ve yüzey hazırlama zamanı ve maliyetinin düşüklüğü,
7. Güvenilir kaynaklı birleştirme bütünlüğü, yüksek kalite ve tekrarlanabilir işlemler, - kaynak sonrası toleransın iyi olması,
8. Üretim boyunca kaynak parametrelerinin kontrolü,
9. Metal - metal birleştirmelerinde ana metalle aynı akma mukavemetinin sağlanması,
10. Farklı metal kombinasyonlarının birleştirilebilmesi,
11. Düşük kaynak gerilmesi,
12. Düşük enerji tüketimi,

13. Yanma olmadan üretim,
14. Oksit ve yabancı maddelerin kaynak yüzeyinden işlem sırasında uzaklaştırılabilmesi,
15. Basit parça tasarımı, ilave metal, toz ve koruyucu gaz ihtiyacı olmaması,
16. Tecrübeli işçiye gerek duyulmaması,
17. Elle veya otomatik olarak yükleme yapılabilmesi olarak sıralanabilir.

2.3.2. Dezavantajları

Bu kaynak metodunda sınırlandırılan en büyük etken parçanın geometrik biçimidir. Her ne kadar bununla mücadele için özel metotlar geliştirilmişse de bağlantısı yapılacak parçalardan birinin bir eksene göre simetrik olması ve çoğu zaman bir eksen etrafında dönebilir olması istenir [12, 13].

3. SEMENTASYON ÇELİKLERİ

Sementasyonla sertleştirme işlemi makine yapımında yüzey sertliğinde, aşınma dayanımında ve sürekli dayanımda artma yaptığı gibi, çekirdek dayanımını ve sünekliliği iyileştirdiği için çok yaygın olarak kullanılır. Böylece, büyük kuvvetler taşınabilir ve darbe tarzındaki yükler kırılma olmadan karşılanabilir. Soğuk oyma ile işlenen ve çok iyi talaşsız şekillendirme gerektiren duromer ve benzeri plastik malzemeler için pres kalıbı gibi belirli kalıplarda da sementasyonla sertleştirme yapılmaktadır [14].

Sementasyon çeliklerinde karbon miktarı, genel olarak % 0,10 ilâ 0,20 arasındadır, ancak bazı türlerde ortalama % 0,25'e kadar çıkabilmektedir. Alaşımsız ya da düşük alaşımlı olabilirler. Alaşımsız olanlar kaliteli çelik (P ve S, her biri max % 0,045) ve asal çelik (P ve S, her biri max % 0,035) olarak üretilirler. Yeni geliştirilen alaşımsız Cm 15 çeliğinde ve bazı alaşımlı çeliklerde, talaşlı şekillendirmeyi iyileştirmek için kükürt miktarı % 0,020 ile 0,035 arasında olacak şekilde düzenleme getirilmiştir (Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4) [14].

Alaşımlı sementasyon çelikleri, Cr'lu, MnCr'lu, MoCr'lu ve CrNi'li olmak üzere gruplara ayrılabilir. Sünekliliği ve çekme dayanımı iyi olan MCr'lu çelikler, TS ve DIN standartlarından çıkarılmıştır [14].

Ancak bu gruplara ilave olarak, ülkemizde özellikle dişli yapımında çok kullanılan yüksek dayanımlı 21NiCrMo2 (1.6523 ya da SAE 8620) çeliği, TS 2850'de (Ekim 1977) korunmuştur (TS 2850 yerine geçen standart TS EN 10084 29.04.2010). 21 NiCrMo2 çeliği, çok fazla zorlanan, makine ve otomobillerde dişli çark, pim, mil, şalter kovani ve benzeri parçalarda kullanılmaktadır. Aşağıdaki tabloda TS 2850'ye göre SAE 8620 sementasyon çeliği ve bileşimleri verilmiştir (Çizelge 3.1, Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3) [15].

Çizelge 3.1. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin diğer ülke standartlarında yaklaşık karşılıkları

Türkiye TS 2850	Almanya DIN 17210		Fransa	İngiltere	İtalya	Japonya	Amerika Birleşik Devletleri
MKE	Malz. No	Sembol	AFNOR	B.S.	UNI	JIS	AISI/SAE
Ç 8620	1.6523	21NiCrMo2	20 NCD 2	805 M 20	20NiCrMo2	SNM 220(H)	8620

Çizelge 3.2. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin kimyasal bileşimi

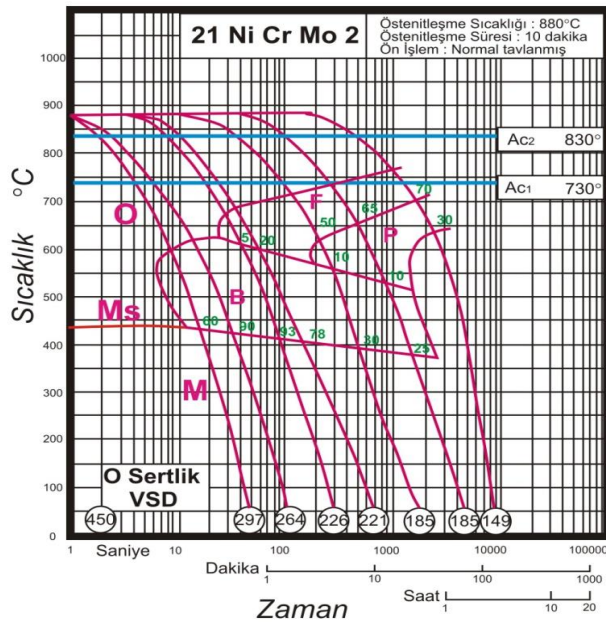
KİMYASAL BİLEŞİM (% Ağırlık)							
C	Si	Mn	P _{MAX}	S _{MAX}	Cr	Mo	Ni
0,18...0,23	0,20...0,35	0,70...0,90	0,040	0,040	0,40...0,60	0,15...0,25	0,40...0,70

Çizelge 3.3. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin mekanik özellikleri (sementasyon ve sertleşmeden sonra)

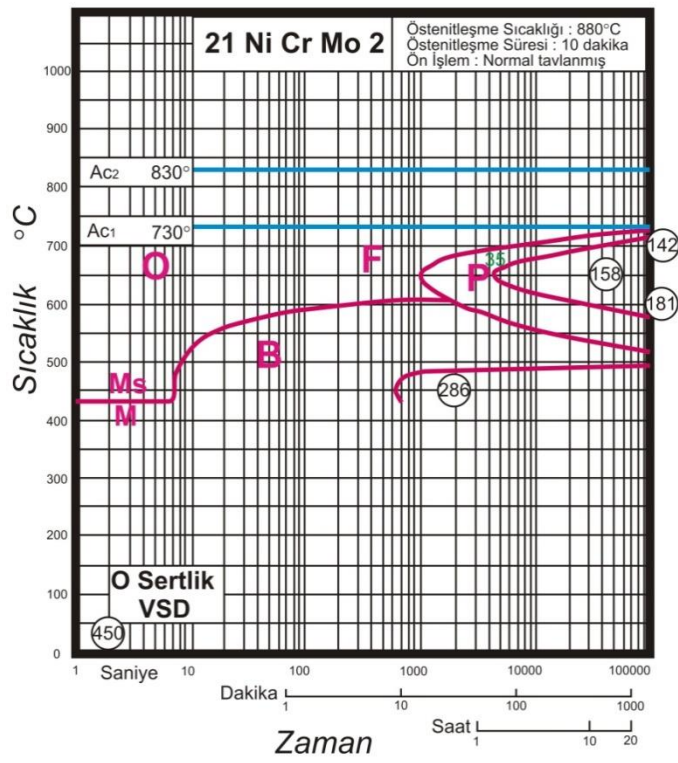
Malzeme Temininde			Yumuşak tavlı			Brinell Sertliği BSD 30			≤	235			
			Belirli dayanım değeri için ısıtıl işlemli							187...235			
			Belirli yapı durumu için ısıtıl işlemi							170...217			
Sementasyon ve Sertleşmeden Sonra													
Akma Sınırı			Çekme Dayanımı			Kopma Uzaması			Kesit Daralması			Çentik Darbe İş	
Rt			Rm			A L ₀ = 5d ₀			Z			(DVM)	
Ø11 mm	Ø30 mm	Ø63 mm	Ø11 mm	Ø30 mm	Ø63 mm	Ø11 mm	Ø30 mm	Ø63 mm	Ø11 mm	Ø30 mm	Ø63 mm	Ø11 mm	Ø30 mm
≥ MPa			MPa			≥%			≥%			≥%	
835	785	685	1230 : 1470	1180 : 1420	1080 : 1320	7	8	8	30	35	35	41	41

Çizelge 3.4. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin ısıt işlemleri koşulları

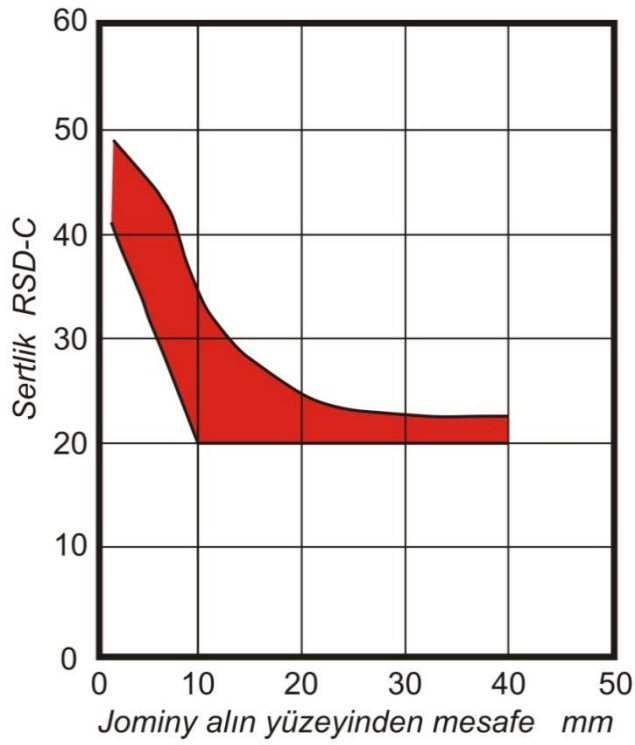
Sementasyon İşlemi Tarzı			Sementasyon Sıcaklığı	Sementasyondan sonra Soğutma ortamı					
Direkt Sertleştirme	Basit Sertleştirme	Çift Sertleştirme		Su	Yağ	Sıcak Banyo	Tuz Banyo	Sement. Kutusu	Hava
			°C						
			900 : 950	-	*	*	-	*	*
*	*	-	Çekirdek Sertleştirme Sıcaklığı	Ara Tavlama Sıcaklığı	Cidar Sertleştirme				Meneviş Sıcaklığı En az 1 saat
			°C	°C	°C	Su	Yağ	Sıcak Banyo	°C
			840 : 870	630 : 650	800 : 830	(*)	*	*	170 : 210



Şekil 3.1. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin sürekli soğutmada zaman-sıcaklık diyagramı [14]



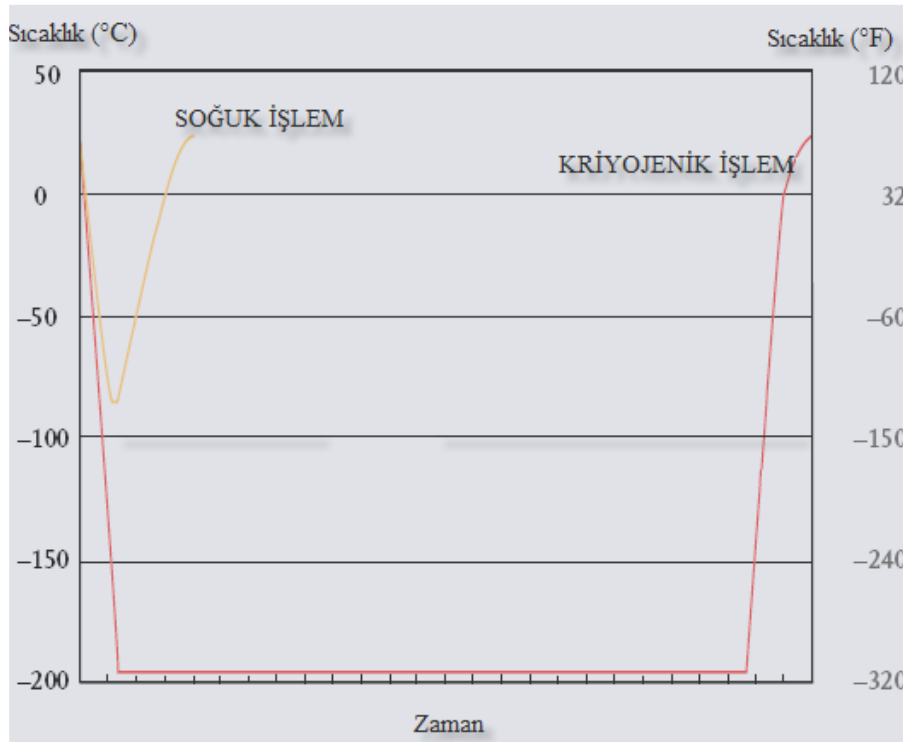
Şekil 3.2. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin izotermik soğutmada zaman-sıcaklık diyagramı [14]



Şekil 3.3. SAE 8620 Sementasyon çeliğinin sertleşebilirlik bandı [14]

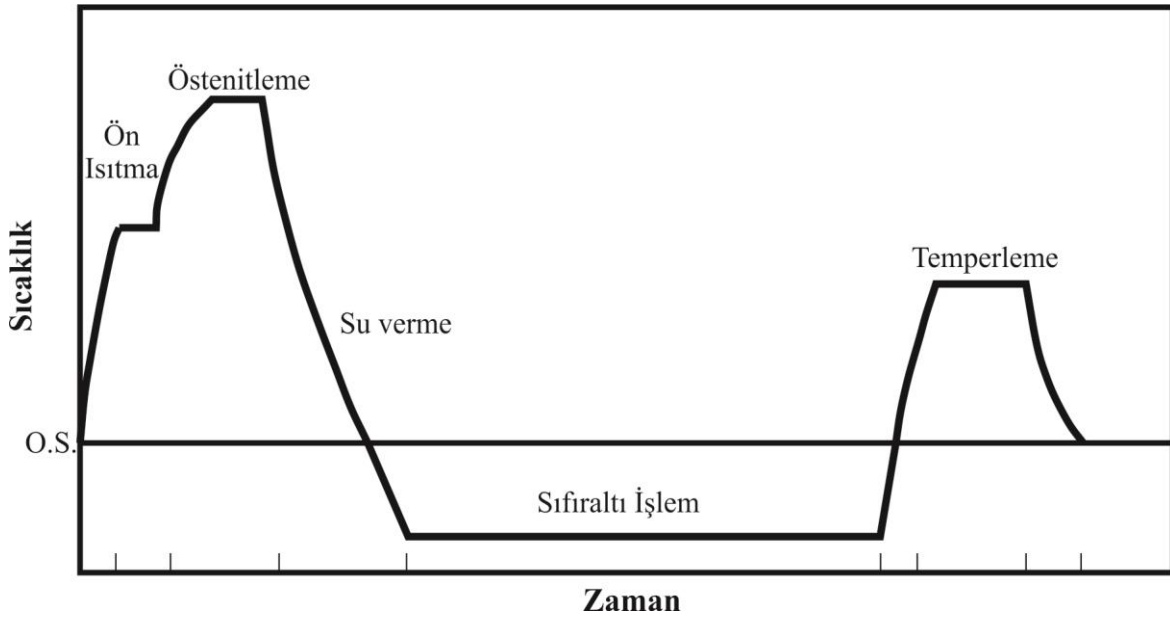
4. KRİYOJENİK İŞLEM

Kriyojenik işlem (kriyojenik), düşük sıcaklıkların üretilmesi ve bu sıcaklıklarda malzeme davranışlarını inceleyen bilim dalıdır [16]. Kriyojenik işlem, genellikle yüksek aşınmaya maruz kalan malzemelerde aşınma direncini artırma amacıyla uygulanan ısıl işlemi tamamlayıcı Kriyojenik işlem olarak da bilinmektedir. Kaplamaların aksine parçanın tüm bölümünü etkileyen, bir kereye mahsus yapılan ucuz ve kalıcı bir işlemdir. Kriyojenik işlem, malzeme üzerindeki uygulama sıcaklıklarına bağlı olarak sıg kriyojenik işlem (-50 ile -80°C arasında) ve derin kriyojenik işlem (-125°C'den daha düşük sıcaklıklar) olarak sınıflandırılmaktadır. Isıl işlem sonrası malzemeler sıg ya da derin kriyojenik işlem sıcaklıklarında belirlenen bir bekletme süresinde tutularak oda sıcaklığına kadar kademeli olarak getirilmektedir. Bu yöntem ile geleneksel ısıl işlem uygulanmış malzeme içerisindeki kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi, ince karbür çökeltilerinin oluşumu ve homojen karbür dağılımı sağlanmaktadır. Böylece malzemelerin sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerinde ciddi iyileşmeler elde edilmektedir [17]. Şekil 4.1'de Kriyojenik işlemin sıcaklık-zaman döngü grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kriyojenik ısıl işleminin (azot ortamındaki) sıcaklık-zaman döngüsü [15]

Kriyojenik işlem sıcaklığına 2,5~5 °C/dakika gibi bir soğutma hızıyla inilmelidir. Yüksek kesitli parçalarda da soğutma sırasında termal hasar oluşumunu engellemek için sıcaklığın belli bir ara değere düşürülerek orada parça sıcaklığının homojen olmasını beklemek ve soğutmaya bundan sonra devam etmek gerekmektedir. Akabinde malzemeden istenen özelliklerine göre belirlenen bekleme süresi ve işlem sıcaklığında Kriyojenik işlemi gerçekleştirilir. Şekil 4.2’de Kriyojenik ısıtılmasının konvansiyonel ısıtılma işlem döngüsüne ilave olarak uygulandığı yer gösterilmiştir [18].



Şekil 4.2. Kriyojenik ısıtılma işlem basamağının sıcaklık-zaman diyagramındaki yeri [18]

4.1. Kriyojeni ve Kriyojenik İşlem

Kriyojeni, düşük sıcaklıkların üretilmesi ve bu sıcaklıklarda malzeme davranışlarını inceleyen bilim dalıdır [16]. Soğutmanın bittiği kriyojenin başladığı sıcaklık noktasını Kolorado, Boulder'daki Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü çalışanları -180°C'nin (93.15K) altındaki sıcaklıkları faaliyet alanı olarak belirlemişlerdir [19].

Endüstrinin kriyojenik işleme ilgisi, 1950'li yıllarda ilk uzay programı ve bu uzay programının takım üreticilerini teşvik etmesi ile başlamıştır. Başlangıçta bu firmalar kriyojenik işlemi, takımları sıvı azot içerisine daldırmak suretiyle denemişlerdir; ancak bu yöntem takımların termal şoklar sonucu zarar görmesi ile sonuçlanmıştır. Dolayısıyla, termal şok olasılığını azaltmak için programlanabilir sıcaklık denetleyicilerini, sıvı azot

akışını kontrol etmek için bir selenoid valfi ve iş parçası sıcaklığını görüntülemek için bir ısı çifti de içeren daha etkili ve kontrollü sistemler geliştirilmiştir [20].

Günümüzde kriyojenik işlemde, düşük sıcaklık kademesinin (-80 ve daha düşük sıcaklıklar) oluşturulmasını ve kullanımını kapsamaktadır. Bu düşük sıcaklıklar; oksijen, hidrojen, helyum, argon ve azot gibi gazların sıvılaştırılmasında da kullanıldığından günümüzde kriyojenik kavramı “kriyojenik mühendisliği” olarak yaygınlaşmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan kriyojenik sıvılar ve atmosferik buharlaşma sıcaklıkları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir [21].

Çizelge 4.1. Kriyojenik sıvılar ve atmosferik buharlaşma sıcaklıkları

R702 Hidrojen	-253 °C 20 K
R729 Hava	-192 °C 81 K
R704 Helyum	-270 °C 3 K
R270 Neon	-246 °C 27 K
R732 Oksijen	-183 °C 90 K
R728 Azot	-196 °C 77 K

Kriyojenik işlem bir kez yapılan kalıcı bir işlemdir ve genellikle konvansiyonel ısıl işlemin sonunda fakat menevişlemeden önce yapılan malzemenin tüm kesitini etkileyen bir işlemdir. Aynı zamanda ısıl işlemin yerini alacak bir işlem olmayıp, konvansiyonel ısıl işlemi tamamlayıcı bir işlemdir. İmalat sektöründe kriyojenik işlem, üretilecek parçalar için düzenli ısıl işlem çevrimlerine henüz eklenmemiştir [22].

Kısacası kriyojenik işlem ısıl işleme benzer bir yöntemdir. Bilgisayar kontrollü ısıl işlem fırınlarında numuneler, -196 C°’ye kadar termal mikro çatlakların oluşumundan kaçınmak için belirli bir soğutma hızında (0,5 °C/dak) soğutulmakta ve ardından bir süre (ortalama 24 saat) bu sıcaklıkta bekletildikten sonra yavaşça oda sıcaklığına getirilmektedir [23]. Kriyojenik işlem çok değişik parçalara, örneğin kesici takımlar, yüksek aşınmaya maruz kalan çeliklere, yarış otomobili motorları gibi parçalara uygulanabilmektedir. Sadece yüzeysel bir işlem olan kaplamaların ve yüzey sertleştirmenin aksine kriyojenik işlem takım çekirdeğine ulaşarak malzemenin tamamına etki etmektedir. Malzemelerin çalışma

ömürlerinin %60 oranında arttırma ve aşınma direncine etkisi olmaktadır [24]. Bununla birlikte Amerika, Çin ve diğer gelişmiş ülkelerdeki birtakım uzay, otomotiv ve elektronik sanayiler, rakipleri üzerine üstünlük sağlamak ve parçaların aşınma direncini ve boyutsal kararlılığını iyileştirmek için üretim hattına bu işlemi entegre etmişlerdir [22].

Kriyojenik işlemin amacını anlayabilmek ve yorumlayabilmek için, öncelikle konvansiyonel ısıtma işlemi ile olan ilişkisinin iyi kurulması gerekir. Östenitin martenzite dönüşümü, süreden bağımsız tamamen sıcaklığa bağlı bir süreçtir. İşte bu noktadan yola çıkarak kriyojenik işlem sayesinde parçalar, su verme sürecini takiben sıcaklığının altına kadar soğutulabilmektedir. Bu sayede kalıntı östenitin neredeyse tamamı martenzite dönüştürülebilmektedir [18].

Kriyojenik işlem, yeni olduğu gibi kullanılmış, eski malzemelere de kolaylıkla uygulanabilmektedir. Malzemelerin yeniden işlenmesi kriyojenik işlemi etkilememektedir. İşlem, titanyum ve diğer metal malzemelerde aynı zamanda boyutsal kararlılığı da geliştirmektedir ve hatta kalaylama ve krom kaplama gibi yüzey koruma yöntemleriyle eşdeğer performans sergilemektedir. Yüksek yüzey gerilimine sahip alüminyumun, kriyojenik ıslah işleminden sonra ölçüleri değişmemektedir. Bu işlem aynı zamanda, naylon, teflon ve plastikler gibi sentetik malzemelerde de başarılı sonuçlar vermektedir. Bu işlemin en önemli dezavantajı, çok hızlı bir üretim temposunda işleri, en az 24 saat sürmesinden ileri gelerek yavaşlatmasıdır. Ayrıca soğutma odalarının ölçüleri de burada ıslah edilecek parçalar için kısıtlayıcı bir etmendir [18].

Kriyojenik işlemin etkileri;

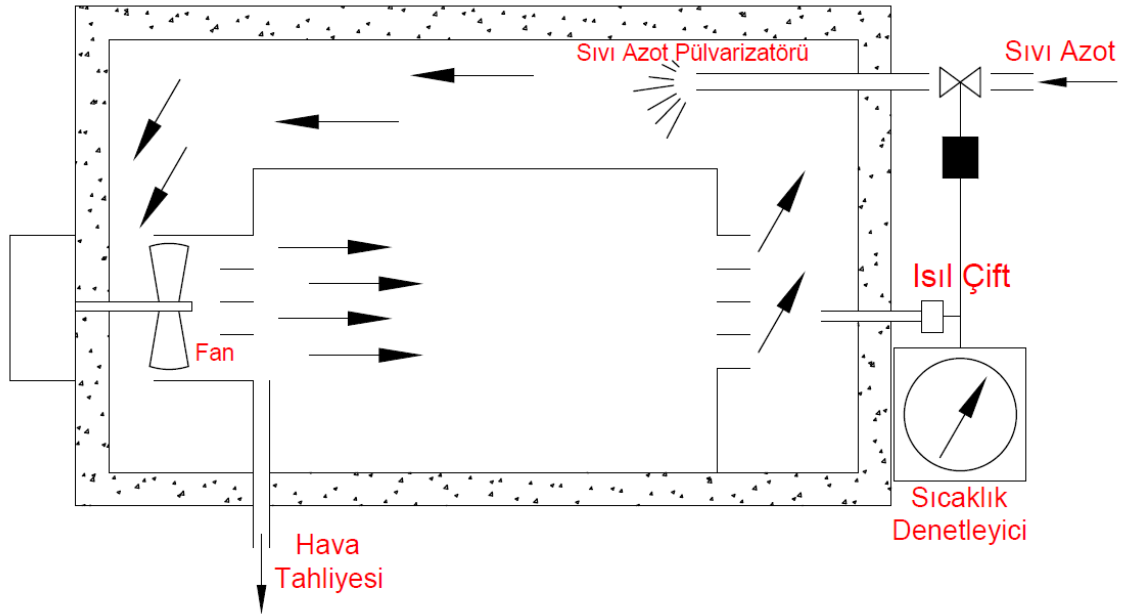
- Kalıntı östenitin giderilmesi ve yapının martenzite dönüşmesi,
Çok ince η -karbür (eta karbür) partiküllerinin martenzit matris üzerinde homojen olarak çökmesi,
- Sertlik dağılımının düzenlenmesi,
- İç gerilmelerin/kalıntı gerilmelerin giderilmesi (birçok mekanik özelliği etkiler),
- Tokluğu arttırır, aşınma dayanımını arttırır, yorulma dayanımını arttırır [18].

4.1.1. Kriyojenik işlem uygulamalarında kullanılan soğutma metodları

Kriyojenik işlemde gerekli sıcaklıklara inebilmek ve hızlı soğuma elde edebilmek için sıvı azotu son derece verimli kullanabilen dondurucular geliştirilmiştir. Kriyojenik işlemlerinde kullanılan sistemlerin hepsi, doğrudan ve dolaylı soğutma olarak iki ana grupta incelenebilir [18].

4.1.2. Direkt soğutma metodu

Bu grupta yer alan sistemler hızlı soğutma için sıvı azotu etkin bir biçimde kullanır. En yaygın kullanılan yöntem olup sprey püskürtme sistemi kullanarak azotun atomize edilmesi ve çok soğuk gaza dönüşerek buharlaşması esnasında parçanın soğutulması şeklinde bir işleyişi vardır. Ayrıca, azot debisi kontrol edilerek sıcaklığı ayarlamak mümkün kılınmış ve akış kontrolü sayesinde de soğutma hızının kontrolü sağlanmıştır (Şekil 4.3) [18].

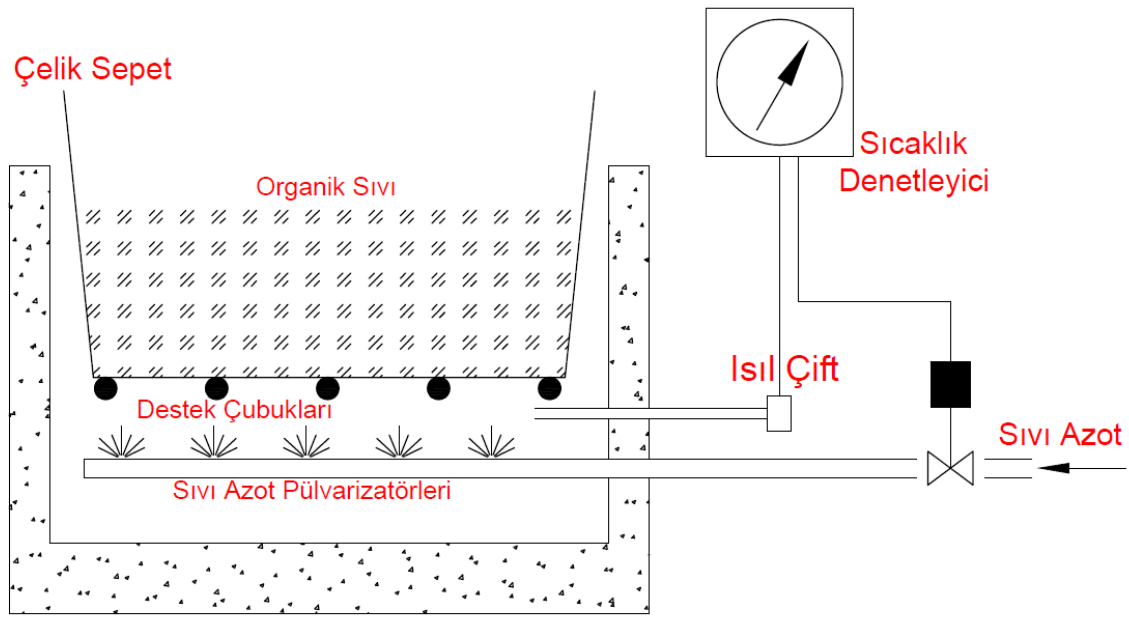


Şekil 4.3. Direkt soğutma metodu ile çalışan kriyojenik işlem sisteminin şematik gösterimi [27]

4.1.3. Endirekt soğutma metodu

Sıvı azot ile bir alkol tankının dışarıdan soğutulması ve parçaların kriyojenik işlem için bu alkole daldırılması şeklinde uygulanılmaktadır. Bu yöntemde ulaşılabilecek en düşük sıcaklık -120°C 'dir.

Kriyojenik işlem sistemlerinde kullanılan sıvı azot, uygun depolama tanklarında muhafaza edilmelidir. Sıvı azot tanklarının iki cidarı bulunmaktadır ve iç cidar kriyojenik sıcaklıklara dayanıklı paslanmaz çelikten, dış cidar ise karbon çeliğinden imal edilmelidir. Bu iki cidar arasında ısı iletimini engellemek üzere özel yalıtım maddesi konulur ve vakum ortamı sağlanır (Şekil 4.4) [18].



Şekil 4.4. Endirekt soğutma metodu ile çalışan kriyojenik işlem sisteminin şematik gösterimi [27].

5. KALINTI GERİLMELER

Kalıntı gerilmeler, dış kuvvetlerden bağımsız olarak bir cisimde meydana gelen gerilmeler sistemi olarak tanımlanır [28]. Bir makine elemanı eğer hiç kalıntı gerilmesi bulundurmada üretilmiş olsa bile, özellikle değişken yüklemenin söz konusu olduğu servis şartlarında kalıntı gerilmeler ortaya çıkabilir. Bundan dolayı tasarım mühendisi bu tür gerilmeleri dikkate almak zorundadır [29].

Kalıntı gerilmeler elastik gerilmelerdir. Kalıntı gerilmenin ulaşabildiği maksimum değer malzemenin akma gerilmesi ile sınırlıdır. Gerilme bu değeri geçtiği anda, ters yönlü bir dış kuvvet yoksa akma gerilmesi değerine ininceye kadar malzeme kendisini deforme eder. Bir diğer ifade ile plastik deformasyon meydana gelerek kalıntı gerilme değeri düşer [29].

Sertleştirme işlemleri sonucu iş parçasının yüzey bölgesinde hacim değişiklikleri ortaya çıkar [29]. Bir metal ısıtıldığında ve hemen ardından soğutulduğunda meydana gelen farklı genleşmeler, termal kaynaklı kalıntı gerilmelerin oluşumunun temel nedenidir. Tam veya yüzey sertleştirme işlemlerinde iş parçasının farklı bölgelerinde farklı sıcaklıkların bulunmasından iç gerilmeler doğar. Bu nedenle, bu işlem esnasında doğal olarak dış yüzey bölgelerinde soğuma hızı iç bölgelere göre daha yüksektir. Ayrıca, faz dönüşümü sonucu da kalıntı gerilmeler meydana gelmektedir[28, 30].

Parça şekillendirmede kullanılan imalat işlemleri mikro yapı, son yüzey ve kalıntı gerilme gibi kapsamlı değişkenleri içerir. Kalıntı gerilmelerin kaynaklarının bilinmesi ve kontrol edilmesi, kalıntı gerilmelerden istenilen yönde sonuç elde edilmesini sağlar [31].

5.1. Kalıntı Gerilme Tipleri

Metalik malzemeler söz konusu olduğunda, kalıntı gerilmeler makro, mikro ve submikroskopik kalıntı gerilmeler olmak üzere üç tip olmaktadır. Makro kalıntı gerilmeler, plastik deformasyondan ileri gelebilir ve geniş bir alanı etkilerler. Mikro gerilmeler, mikro yapıdaki homojensizlikler nedeniyle (örneğin faz dönüşüm süreçleri) meydana gelirler. Özellikle tanelerde etkili olurlar ve genellikle rasgele dağılmışlardır. Mikro kalıntı

gerilmeler makro gerilmeler içerisinde dahil olmuştur. Sub-mikroskopik kalıntı gerilmeler ise kristal kafesi oluşturan atomlar arasında meydana gelir [27].

5.2. Kalıntı Gerilmesi Ölçüm Metotları

Kalıntı gerilmesi ölçüm yöntemleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir [19]

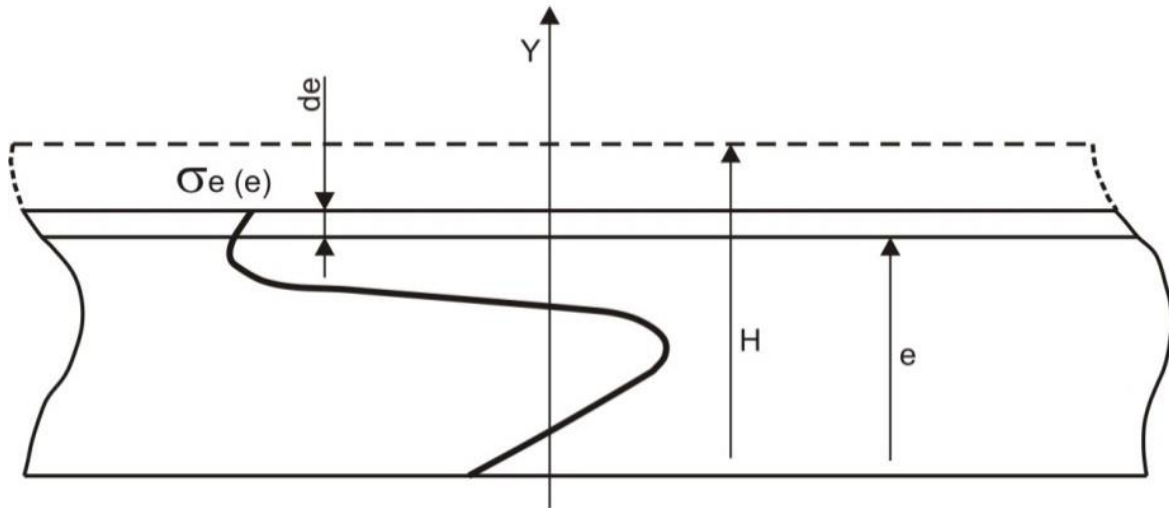
Kalıntı Gerilme Ölçüm Metotları			
Mekaniksel gerilme ölçüm metodu	Kırınım yardımıyla gerilme ölçümü	Dalga metotları	Diğer metotlar
1- Katman kaldırma metodu 2- Delik delme metodu 3- Çatlak uyma metodu 4- Diğer mekanik metotlar	1- Elektron kırınımı 2- X- ışını kırınımı 3- Nötron kırınımı 4- Kuvvetli X- ışınları	1- Manyetik dalga teknikleri 2- Elektrik dalgaları teknikleri 3- Ultrasonik dalga tekniği 4- Piezospektroskopik etki teknikleri	1- Termoelastik Metotlar 2- Foto elastik metotlar 3- Dönüşüm gerinimi ölçümü

Şekil 5.1. Kalıntı gerilmesi ölçüm metodları [27]

5.2.1. Katman kaldırma yöntemi

Bu çalışmada, katman kaldırma yöntemi kullanıldığından dolayı sadece bu teknikle ilgili literatür çalışması aşağıdadır.

Bu metodun temeli basittir. Kalıntı gerilmelerin bulunduğu düzlem bir parça iç momentler ve kuvvetlerin statik dengesini bozmayacak şekilde biçim değiştirir. İnce bir paralele kenar test numunesinde bu biçim değişiklikleri sehim (δ) olarak ifade edilir. Bu sehim kalıntı gerilmenin büyüklük ve tipine bağlıdır ve malzeme kalınlığı boyuncaki dağılımı $\sigma(e)$ ’nin bir fonksiyonu yardımıyla karakterize edilir. Burada “e” numunenin yüzey alanına göre ele alınacak alanın kalınlığıdır (Şekil 5.2) [27, 32].



Şekil 5.2. Katman kaldırma esnasında kalıntı gerilmenin yeniden dağılımı [31]

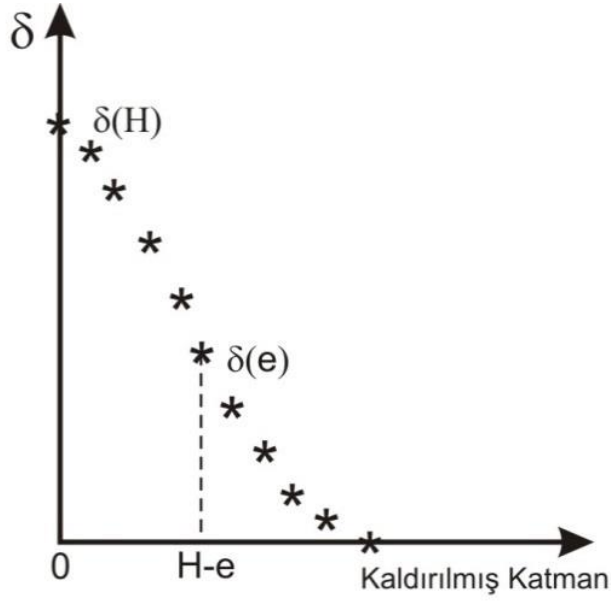
Eğer kalıntı gerilmelerin bulunduğu malzeme katmanı kimyasal işleme ile düzgün olarak kaldırılırsa, aynı zamanda iç kuvvetlerin ve momentlerin dengesi yeniden oluşacaktır. Bu dengenin yeniden elde edilmesi için, parça biçim değiştirecektir. “de” kalınlığındaki katmanın kaldırılmasıyla oluşan dδ sehimindeki değişime bağlı (Şekil 5.3) kaldırılmış katmanda var olan $\sigma_e(e)$ yüzey gerilmesi “Eş. 5.1” yardımıyla ifade edilebilir [27].

$$\sigma_e(e) = -\frac{4}{3} E \frac{e^2}{l^2} \frac{d\delta}{de} \quad (5.1)$$

Burada, l sehimin ölçüldüğü uzunluğu, E ise malzemenin elastikiyet modülünü ifade eder [27].

Bu denklem aşağıdaki hipotezlerin kabulüne bağlıdır [32].

- Ön gerilmeli deney numunesi homojendir ve izotropiktir: temel gerilmeler bu gerilmelerin eksenine ile çakışıktır.
- Kalınlık boyunca var olan gerilme ihmal edilebilir.
- Enine gerilmeler öncelikli olarak ihmal edilebilecek olsa bile, tam anlamıyla hesaba katılmış olmalıdır [27].



Şekil 5.3. Kaldırılmış katman kalınlığının bir fonksiyonu olarak eğilme deformasyonu [27]

Bu nedenle, sadece test numunesinin eksenine paralel temel gerilme dikkate alınır. Bu gerilme, sabit bir eğriye sahip olan sabit bir bükme momentinin zorlamasına maruz kalmış bir kirişteki gerilme durumuna benzetilebilir. Gerilme sadece derinliğe göre değişecek ve deney numunesinin bütün genişliği ve uzunluğu boyunca değişmeyecektir [32].

İşlenmeden önce (de katmanı kaldırılmadan önceki yüzeyde) deney numunesinde var olan, $\sigma(e)$, kalıntı gerilme,

$$\sigma(e) = \sigma_e(e) + \Delta\sigma \quad (5.2)$$

“Eş. 5.2” ile ifade edilir [19].

“e” ölçüsü üzerindeki katmanların kaldırılması sonucu “e” ölçüsündeki toplam gerilme değişimini ifade eden $\Delta\sigma$,

$$\Delta\sigma = -\frac{8 \cdot E \cdot e}{l^2} \cdot \int_h^e d\delta + \frac{8}{3} \cdot \frac{E}{l^2} \cdot \int_h^e e' \cdot d\delta \quad (5.3)$$

“Eş. 5.3” ile hesaplanır [21].

Bu durumda, “Eş. 5.2” ve “Eş. 5.3” “Eş. 5.4” de yerine konularak,

$$\sigma(e) = -\frac{4}{3} \cdot E \cdot \frac{e^2}{l^2} \cdot \frac{d\delta}{de} - \frac{8 \cdot E \cdot e}{l^2} \cdot \int_h^e d\delta + \frac{8}{3} \cdot \frac{E}{l^2} \cdot \int_h^e e' \cdot d\delta \quad (5.4)$$

deney numunesinde var olan toplam kalıntı gerilmeyi belirlemek için gerekli “Eş. 4.4” elde edilir [27]

Katman kaldırma tekniği genellikle katmanlar ve kaplamalar içerisindeki gerilmeleri belirlemek için kullanılır. Katmaların kaldırılması esnasında oluşan deformasyon değişimleri kaldırılan tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak gerilmedeki uygun varyasyonların hesaplamasını mümkün kılar. Deformasyonlar, temaslı (profilometre, strain gage vb.) ya da temassız (video, lazer tarama, ızgaralama, çift kristal kırınım topolojisi vb.) ölçü araçlarından biri kullanılarak ölçülebilir. Elde edilen deformasyon değerleri $0,1 \text{ mm}^{-1}$ civarının altındadır. Ölçümler genellikle çok eksenli deformasyonları ve mekaniksel kararlılığı sağlamak için dar şeritler (genişlik/uzunluk $<0,2$) üzerinde yapılır [27].

Katman kaldırma işlemi metalik ve polimerik kompozitlerdeki, ayrıca plazma, kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme kullanılarak üretilmiş kaplamalardaki gerilmeleri belirlemek için uygulanabilmektedir [27].

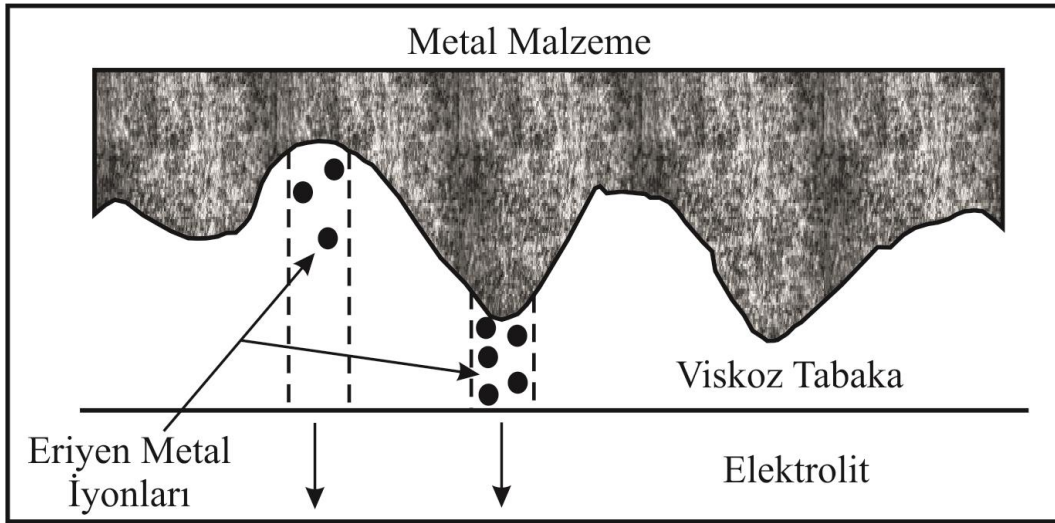
Metal malzemelerde elektrokimyasal parlatma yöntemiyle katmanların seri bir biçimde kaldırılması mümkündür. İşlemeden kaynaklanan ilave bir gerilme oluşturmaması, elektrokimyasal parlatma yönteminin katman kaldırma işlemi için tercih edilmesindeki en büyük sebeptir. Bunun yanında, bu yöntem diğer yöntemlere göre oldukça ucuzdur ve amaca uygun çok özel aparatlar gerektirmez [27].

Elektrokimyasal işlemde parça yüzeyinden katmanların kaldırılması yüzeye gönderilen elektronlar yardımıyla olmaktadır. Gerilmelerin etki yaptığı derinliğinin her bir katı için df/da hesaplandıktan sonra gerilme değerleri formüllerle hesaplanır [30].

Elektrokimyasal yöntemle katman kaldıran sistem, birbirinden bağımsız olmayan dört takımdan oluşmaktadır [30]. Bunlar:

1. Elektrokimyasal yöntemle numuneden sürekli tabakalar kaldıran elektrokimyasal takım,
2. Numunenin cihaza bağlanmasını, elektrolit içerisine daldırılmasını ve elektrolitin numune üzerine akışım sağlayan pompa sistemini içeren mekanik takım,
3. Numuneden tabakalar kaldırılırken oluşan deformasyonu elektrik sinyallerine dönüştüren elektrik takım,
4. Sinyalleri bilgisayarın anlama ve aktarma mantığına dönüştürebilen donanım ve yazılımlar.

Elektrokimyasal yöntem ile yüzeyden tabaka kaldırma süreci öncesinde metal parçanın yüzeyi aktif ve pasif alanlardan oluşur. Aktif alanlar mikroskobik yükseklikler, pasif alanlar ise mikroskobik çukurluklar olarak düşünülür. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi elektrokimyasal işlemede ilk olarak elektrolit içerisine batırılan malzemenin (anot) mikroskobik yükseklikleri aşınmaya başlar. Mikroskobik yüksekliklerin aşınması sonucunda anot malzeme yüzeyinde ince bir oksit tabakası oluşur [30].



Şekil 5.4. Elektrokimyasal işleme yönteminin prosesi [30]

Elektrokimyasal işlemede iyi bir yüzey kalitesi için akım yoğunluğu, voltaj ilişkisi en önemli parametredir [30].

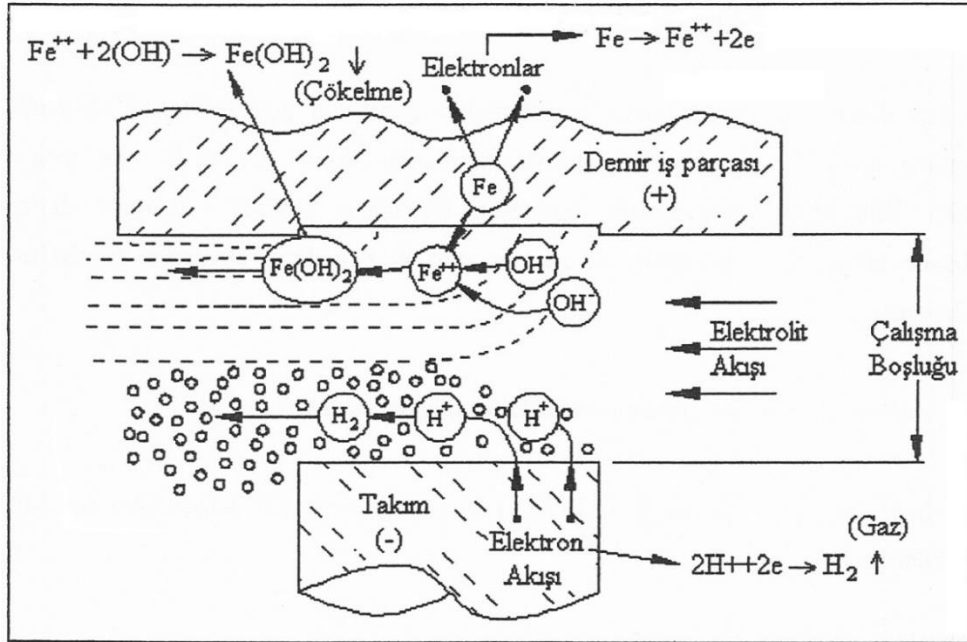
Elektrokimyasal işlemede akım yoğunluğu ve voltaj dışında numune yüzeyini etkileyen diğer parametreler şunlardır [30]:

1. Elektrolit sıcaklığı,

2. Elektrolit içerisindeki anot ile katodun yönü,
3. Elektrolit tipi,
4. Anot ile katot arasındaki mesafe,
5. Elektrolitin ömrü,
6. Katot malzemesi

Elektrolit metalik bir iletkeninden farklıdır. Çünkü akım elektronlar yardımıyla değil de, ya alınan ya da verilen elektronlara sahip atomlar yardımıyla taşınmaktadır ve bundan dolayı ya negatif ya da pozitif yükler elde edilir. Böyle atomlar iyon olarak adlandırılır, negatif yükleri taşıyan bu atomlar elektrolitten anoda (iş parçasına) doğru geçer ve anyon olarak adlandırılır. Pozitif olarak yüklenmiş iyonlar katoda doğru hareket eder ve katyon olarak adlandırılır (Şekil 5.4) [30].

Elektro kimyasal işleme ile elektroliz prosesini daha net olarak ifade etmek için, Şekil 5.5’de uygun bir elektrolitin içerisindeki demir bir iş parçasına uygulanmış olan elektro kimyasal prosesi gösterilmektedir. Çalışma boşluğu arasından akan elektrot içerisindeki anoda (iş parçasına) ve katoda (takım) bir DC güç kaynağı bağlandığında anot çözünmesi başlar [30].



Şekil 5.5. Uygun bir elektrolit içerisindeki iş parçasına uygulanan elektro kimyasal süreç [28]

Gerçekte elektrokimyasal işleme ile talaş kaldırma, mekanik kesmeyle ya da metalin ergitilmesi ve buharlaştırılmasıyla gerçekleştirilmediğinden iş parçasında hiçbir ısı hasar meydana gelmez ve iş parçası yüzeyinde hiçbir kalıcı gerilme oluşmaz. Elektrokimyasal işleme ile elde edilecek yüzey pürüzlülüğü değeri; malzemeye, elektrolite ve akım yoğunluğuna bağlıdır. Yüzey pürüzlülüğünde iyileştirme genellikle malzemenin doğru yöntemle işlem görmesiyle mümkündür [28].

6. MALZEME VE METOT

Bu bölüm, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin hazırlık süreçleri, gerçekleştirilen ısıt işlemler ve araştırmada izlenen adımları içermektedir.

6.1. Malzeme

Çalışma için seçilen çelik malzeme SAE 8620 kalite çeliği 600x20 mm ebatlarında temin edilmiştir ve detaylı kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. SAE 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi

Çelik	Kimyasal Bileşim, % ağırlıkça							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S
8620	0.27	0.80	0.33	0.47	0.19	0.55	0.022	0.015

6.2. Sürtünme Kaynağı İşlemi

SAE 8620 çelik çubuklar eldeki sürtünme kaynağı cihazına uygun olacak şekilde, 80x Ø10 mm boyutlarında hazırlanmış olup kaynak işlemi Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde gerçekleşmiştir. Kaynak işlemi parametreleri ve örnek olarak kaynaklanmış numunelerden birinin resmi, Resim 6.1 ve Çizelge 6.2’ de verilmiştir.



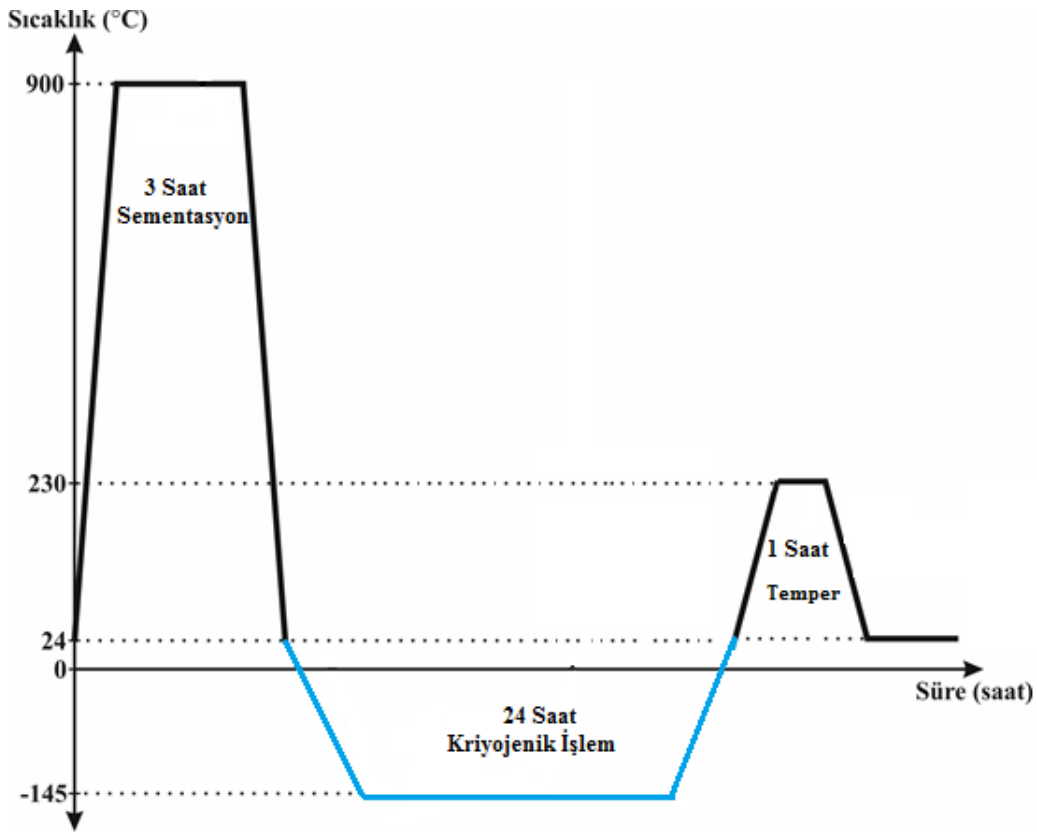
Resim 6.1 Sürtünme kaynağı yapılmış numune

Çizelge 6.2. Malzemelere uygulanan kaynak parametre değerleri

Sürtünme Basıncı/süre	Yığılma basıncı/süresi	Devir
10bar/6sn	20bar/10sn	3000

6.3. Isıl İşlemler

Başlangıç olarak bütün numuneler 900 °C de, yaklaşık 0,5 mm sert yüzey derinliği için, 3 saat gaz ortamında sementasyon işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra farklı kademelerden, yağda soğutma, sıvı azot ortamında -145 °C de 24 saat kriyojeni ve son olarak 200-230 °C arasında 1 saat temperleme (menevişleme) işlemleri, 5 ayrı safhada tatbik edilmiştir (Şekil 6.1). Çizelge 6.3 de uygulanan işlem basamakları ayrıntılı gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Isıl işlemlerin şematik özeti

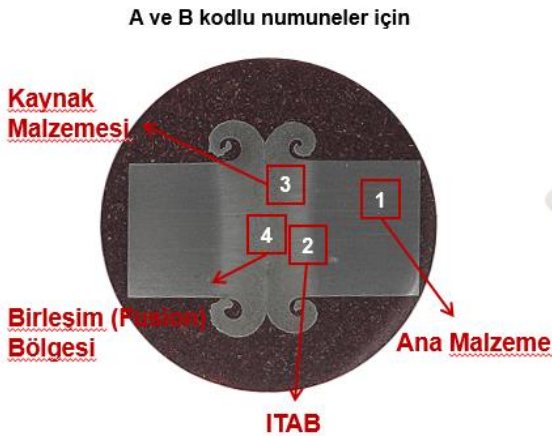
Çizelge 6.3. Malzemelere uygulanan ısıt işlemler basamakları

NUMUNE NO	UYGULANAN İŞLEMLER	KOD
N1	Sementasyon + Yağda Su Verme	(3S + YS)
N2	Sementasyon + Yağda Su Verme + 1 Saat Temperleme	(3S+YS+1T)
N3	Sementasyon + Yağda Su Verme + 24 Saat Kriyojenik + 1 Saat Temperleme	(3S+YS+K+1T)
N4	24 Saat Kriyojenik + 1 Saat Temperleme	(K+1T)
N5	Ham Numune	(HN)

6.4. Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri için özellikle kriyojenik işleminin etkilerini irdelemek için N2 ve N3 numunelerinin yüzeyi hazırlanmıştır. Sonrasında yüzey %2 Nital solüsyonu ile dağlanmıştır.

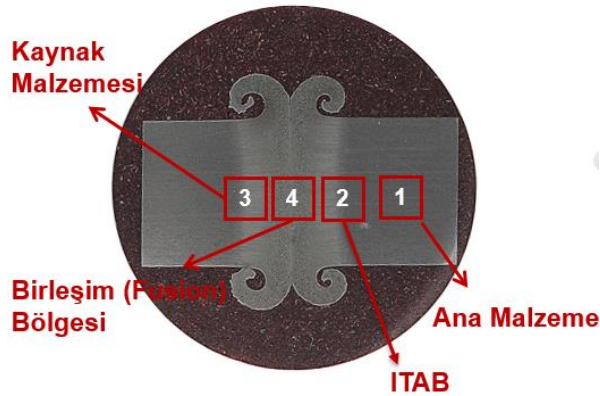
Nikon Eclipse LV 150 optik mikroskop altında 50x - 1000x arası büyütme ile numune yüzeyi görüntülenmiştir. Fotoğraflar, Resim 6.2’de temsili olarak verilen, ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve kaynak malzemesi bölgelerinden çekilmiştir.



Resim 6.2. Mikroyapı incelemesi için numunelerden alınan fotoğraf bölgeleri

6.5. Sertlik Testleri

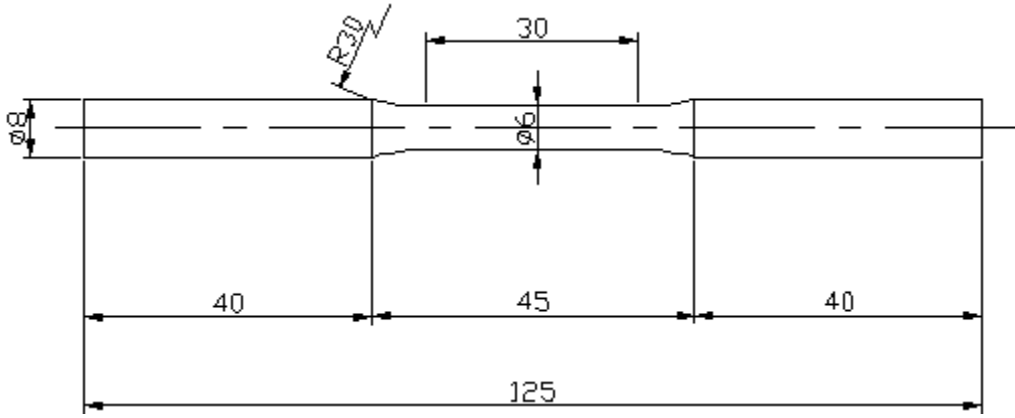
Uygulanan farklı ısıt işlemler sonucunda kaynaklı numunelerdeki sertlik dağılımlarını tespit etmek için, her bir numunenin 4 farklı bölgesinden (ana malzeme, kaynak malzemesi, ITAB, birleşme bölgesi) Vickers mikro-sertlik ölçümleri alınmış ve 1 kg yükleme ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerden alınan sertlik ölçüm bölgeleri Resim 6.2’ de gösterilmiştir.



Resim 6.3. Numunelerden alınan sertlik ölçüm bölgeleri

6.6. Çekme Testleri

Kaynaklanmış numunelerin mekanik özelliklerini tespit edebilmek için çekme testleri de yapılmıştır. Bunun için ısıt işlem görmüş parçalardan ASTM standartlarına uygun çekme numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 6.2). Testler, ODTÜ Metalürji Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir. Bunun için ısıt işlem görmüş parçalardan ASTM standartlarına uygun çekme numuneleri testleri hazırlanmıştır. Çekme sonuçları, ham veriler olarak sunulmuştur.



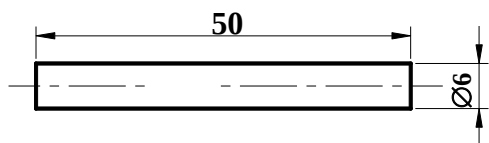
Şekil 6.2. Çekme numunesi ölçüleri



Resim 6.4. Çekme testinde N5 numunesine ait kopma öncesi

6.7. Kalıntı Gerilme Ölçümleri

Kaynaklanmış SAE 8620 kalite çeliği öncelikle yapılacak deneyler için talaş kaldırma yöntemleri uygulanarak kalıntı gerilmesi deney numunesi için uygun ebatlara getirilmiştir.



Şekil 6.3. Kalıntı gerilmesi deney numunesi ölçüleri

Kalıntı gerilme çalışmaları için kimyasal aşındırma katman kaldırma yöntemi, hem maliyetinin düşük olması hem de uygulanabilmesi kolay olması nedeniyle tercih edilmiştir. Katman kaldırma yönteminde kullanılan genel matematiksel bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\sigma = \frac{E \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot l^2 \cdot b \cdot k_y} \cdot \frac{df}{da} \quad (6.1)$$

Burada;

E : Elastikiyet Modülü (MPa) (SAE 8620 çeliği için E değeri: 200 GPa olarak alınmıştır)

d: Aşındırılan Kısım Çapı (d-a1) (mm)

a1: Aşındırılan kısım Uzunluğu (mm)

l : Kaldırılan Katman Uzunluğu 180° olduğu için [$\pi \cdot (r-a)$] (mm)

b : Kaldırılan Katman Genişliği (mm)

k_y : Deformasyon Büyütme Katsayısı

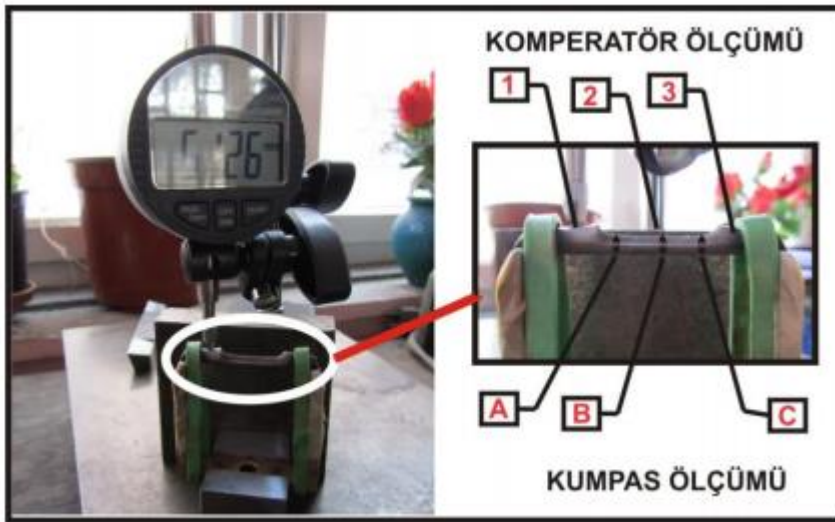
f : Komperatör Ölçüsünün Ortalaması

a : Kumpas Ölçüsü Ortalaması

Kalıntı gerilme ölçümlerinin sağlıklı yapılabilmesi için verilerin hassasiyetle alınması gereklidir. Başlangıçta yapılan çalışmalarda, kalıntı gerilmeler ölçülmüştür (Resim 6.5). Bunun için numune boyları yaklaşık 40x1mm boyutuna indirilmiştir. Tasarlanıp, oluşturulan düzenele ile kalıntı gerilmeler ölçülmeden önce birim zamanda numunenin aşınma miktarı ve birim deformasyonun kaç volta karşılık geldiğinin belirlenmesi gerekmiştir. Bu verilere erişebilmek için ön çalışmalar yapılmış ve elde edilen bilgiler doğrultusunda kalıntı gerilme deneyleri öncesi aşınma değerlerine deney düzeneği kalibre edilmiştir. Elektro-kimyasal yöntemle katman kaldırma yönteminde istenilen iki önemli şart vardır. Bunlardan birincisi; elektro-kimyasal aşındırma işlemleri esnasında numune yüzeylerinin kaliteli, kararmamış, parlak görünümde olmasıdır. İkincisi ise, numuneden birim zamanda kaldırılan her bir katman kalınlığının olabildiğince eşit olmasıdır. Bunun için seçilen malzemenin türüne göre, en uygun elektrolitin seçilmesi ve buna bağlı olarak, sisteme uygulanan akım yoğunluğunun en uygun değerleriyle, akım sürelerinin belirlenmesi, önceden tespit edilmesi gereken en önemli parametrelerdir.



Resim 6.5. İlk deneylerde kullanılan katman kaldırma düzeneği



Resim 6.6. İlk deneylerde numunelerden alınan ölçüm noktalarının yerleri

Numunelerden ölçüm alınırken kumpas ve komperatör ölçüm cihazlarından faydalanılmıştır. Resim 6.5’de gösterildiği gibi A, B ve C diye üç noktadan kumpas yardımıyla numunedeki aşınma miktarları ölçülmüştür. Üç ayrı nokta seçilmesinin sebebi orta kısmın kenar kısımlara göre aşınmaya daha yatkın olmasından dolayı ortalama bir aşınma oranı elde edebilmek içindir. 1, 2 ve 3 diye adlandırılan noktalar ise komperatör yardımıyla ölçülmüş olup, deney numunesindeki salgı miktarlarını tespit etmek için kullanılmıştır.

Ancak, elle yapılan testlerde dış müdahalenin oldukça fazla olması nedeniyle, yapılan ölçümlere bağlı olarak çıkan verilerde tutarsızlıklar görülmüş ve bu yüzden sistem değişikliğine gidilmiştir(Resim 6.7).

İkinci aşama kalıntı gerilme çalışmalarına, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümündeki mevcut olan kimyasal aşındırmayla katman kaldırma sistemiyle devam edilmiştir (Resim 6.7).



Resim 6.7. İkinci aşama kalıntı gerilme deneylerinde kullanılan katman kaldırma düzeneği

Resim 6.7’de görüldüğü gibi, bu yeni sistemde deneyler el değmeden yapılmakta ve ünitenin üzerine bulunan sehim ölçer sistemiyle komperatör kullanmadan salgı verileri belli zaman aralıklarında otomatik olarak üniteye bağlı bilgisayara aktarılmaktadır. Böylece daha sağlıklı veriler toplanmakta ve numunelerin kalıntı gerilim dağılımları daha güvenilir olarak hesaplanmaktadır.

Deney düzeneğinin ana kısımları şu şekildedir.

1. Depo (İçerisinde elektrolit sıvısı ve devir daim pompası),
2. Gövde (Elektrolitin içerisinden dolaştığı ve numunenin yerleştirildiği ana kısım),
3. Katot (Grafitten yapılmış),
4. Ölçme çubuğu,
5. Anot (Numuneleri bağlamak için özel olarak tasarlanmış numune bağlama ayakları.

Bakır malzemeden üretilmiş numuneye elektrik akımını ileten parça),

6. Doğrusal Ölçüm Aygıtı (0,1 μm hassasiyetinde),
7. Doğrusal ölçüm aygıtına ait gösterge paneli,
8. Dönüştürücü (Gösterge panelinden gelen veriyi dijital sinyale dönüştüren cihaz),
9. RS 232 kablo (Verilerin bilgisayara aktarılmasını sağlayan ara bağlantı kablosu),
10. Güç Kaynağı (Giriş gücü: 220V $\pm$ 10% 50/60 Hz Çıkış Gücü: 0 ile 30 V arası değişken ve sabit olarak kullanılabilir. Akım: 0 ile 3A arası değişken ve sabit olarak kullanılabilir),
11. Yazılım

Numunelerden katman kaldırma işlemine başlamadan önce ön çalışmalar yapılmış ve uygun şartlar sağlandıktan sonra deney sürecine geçilmiştir.

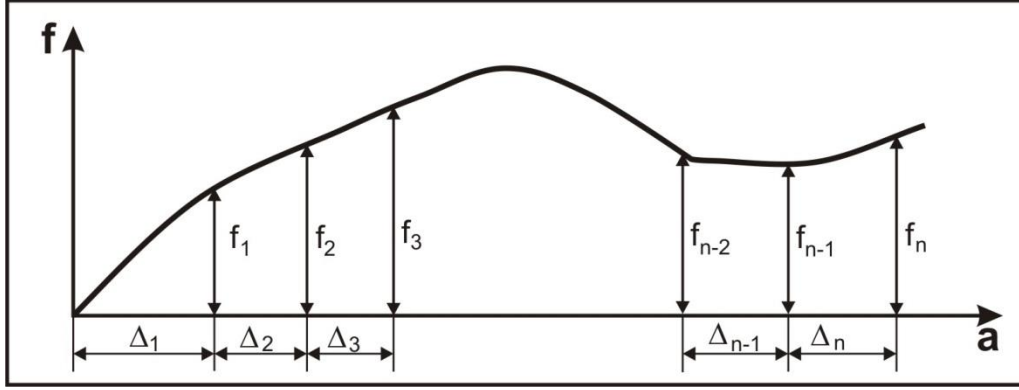
Deney düzeneği çalıştırıldıktan sonra numune yüzeyinden dakikada bir ölçüm alarak elde edilen veriler yazılım sayesinde bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Bu şekilde her bir işlem numune başına ortalama 2 saat sürmektedir. Bu sürenin sonunda numune deney düzeneğinden çıkarılarak kaldırılan toplam katman mesafesi ölçülmektedir.



Resim 6.8. Katman kaldırma işlemi sonrasında numunenin görünümü

6.7.1. Kalıntı gerilmelerinin hesaplanması

Elektrokimyasal yöntemle katman kaldırma deney sonuçlarının hesaplanabilmesi için birim zamanda kaldırılan her katmana karşılık gelen “a” değeri ile deformasyon miktarı “f” değerinin, birim zamanda kaldırılan her bir katmana karşılık gelen ($f \rightarrow a$), df/da değerinin hesaplanması gerekmektedir. df/da değeri “Eş. 6.2”, “Eş. 6.3” ve “Eş. 6.4” gösterilmiştir. Şekil 6.4’de gösterildiği gibi $f(a)$ fonksiyonuna bir parabol olarak bakılabilir [33].



Şekil 6.4. f(a) Fonksiyonunun türev alma düzeni

Deneyin;

Başlangıcında (a=0) df/da değeri;

$$\frac{df}{da}(a=0) = f_1 \left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta_1 \cdot \Delta_2} \right) - f_2 \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_1 \cdot \Delta_2} + \Delta_2^2 \right) \quad (6.2)$$

Bir süre sonraki df/da değeri;

$$\frac{df}{da}(a=0) = -f_1 \left(\frac{\Delta_3}{(\Delta_2(\Delta_2 + \Delta_3))} \right) + f_2 \left(\frac{\Delta_3 - \Delta_2}{\Delta_2 \cdot \Delta_3} \right) + f_3 \left(\frac{\Delta_2}{(\Delta_3(\Delta_2 + \Delta_3))} \right) \quad (6.3)$$

Sonunda df/da değeri;

$$\frac{df}{da}(a_n) = -f_{n-2} \left(\frac{\Delta_n}{(\Delta_{n-1}(\Delta_{n-1} + \Delta_n))} \right) - f_{n-1} \left(\frac{\Delta_{n-1} - \Delta_n}{\Delta_{n-1} \cdot \Delta_n} \right) + f_n \left(\frac{\Delta_n + (\Delta_{n-1} - \Delta_n)}{(\Delta_n(\Delta_{n-1} + \Delta_n))} \right) \quad (6.4)$$

Formülleri ile tayin edilir [36].

Gerilmelerin birim zamandaki etki yaptığı her “a” derinliği için yukarıdaki denklemler kullanılarak df/da hesaplandıktan sonra “Eş 6.4”deki denklemde yerine konarak gerilmeler hesaplanır.

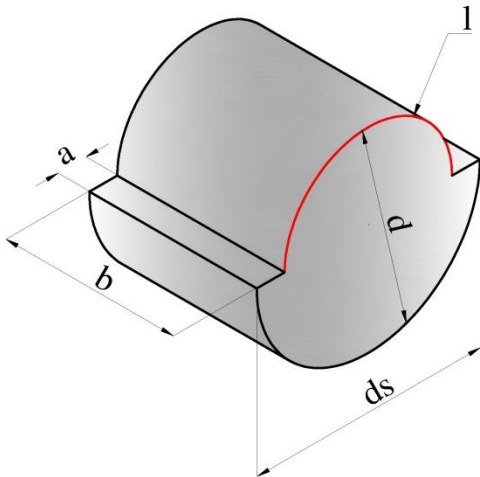
$$\sigma = \frac{E \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot l^2 \cdot b \cdot k_y} \cdot \frac{df}{da} \quad (6.5)$$

Burada σ ; kalıntı gerilmesi (MPa), a ; aşındırılan kısım (mm), E ; elastikiyet modülü (MPa), d ; aşındırılan kısmın son çapı (aşınma sonrası) (mm), d_s ; aşındırılan yüzeyin ilk çapı (aşınma öncesi) (mm) ve “Eş.6.6” ile hesaplanır.

$$d = d_s - a \quad (6.6)$$

“Eş. 6.5” deki, b ; kaldırılan katman genişliği (mm), k_Y ; düzeltme katsayısı, l ; kaldırılan katmanın uzunluğu (180° derecelik kısım) (mm), r ; aşındırılan kısmın yarıçapı (mm) ve “Eş. 6.7” ile hesaplanır.

$$l = \pi \cdot (r - a) \quad (6.7)$$



Şekil 6.5. Numuneden tabaka kaldırıldıktan sonra kaldırılmış olan katmanın bulunduğu bölgenin geometrisi ve hesaplamada kullanılan birimlerin yerleri [33]

Elde edilen veriler denklemde yerine konularak birim zamanda kaldırılan katmanın kalıntı gerilmesi değerleri tespit edilmiş olur.

Birim zamanda kaldırılan katmanın kalıntı gerilmeleri değerleri birleştirilerek kalıntı gerilmesi grafiği oluşturulur.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

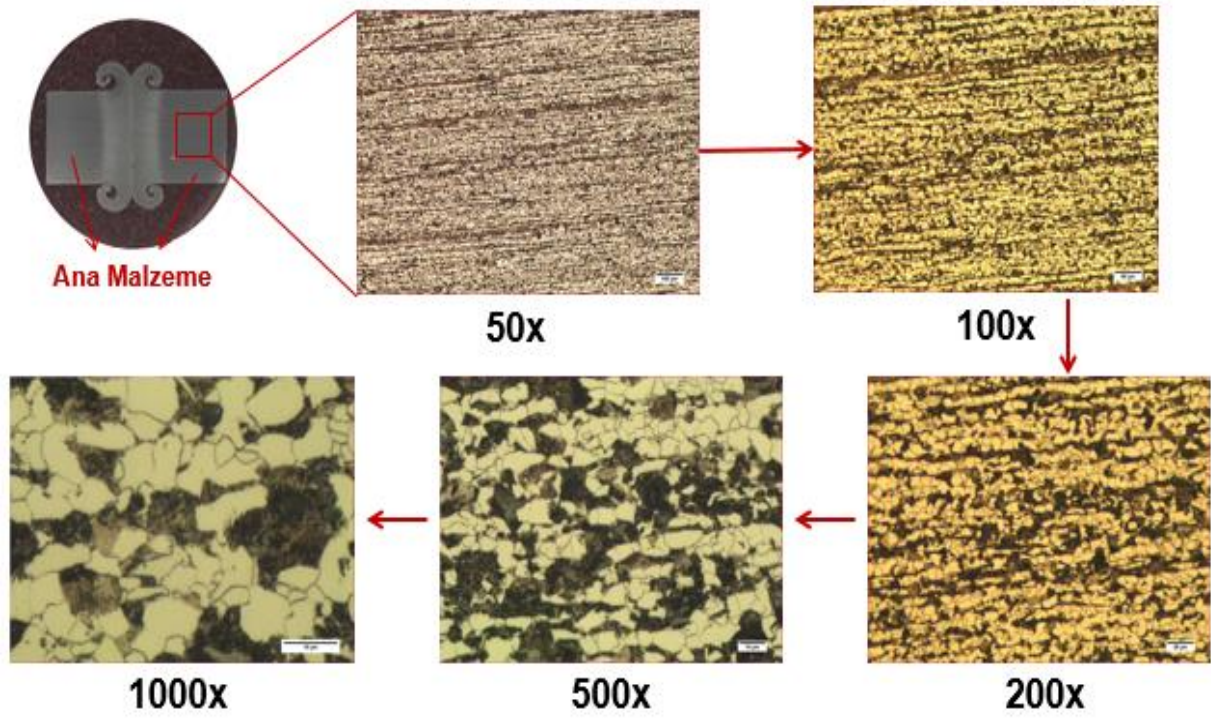
Bu bölümde, SAE 8620 kalite çeliğe; mikroyapı, mikrosertlik, çekme testi ve kalıntı gerilmesi ölçümü, sementasyon ve kriyojenik işlemleri uygulanarak sınıflandırılmış numuneler üzerindeki etkileri tespit edilerek karşılaştırma zemini oluşturulmaya çalışılmıştır.

7.1. Mikroyapı İncelemeleri

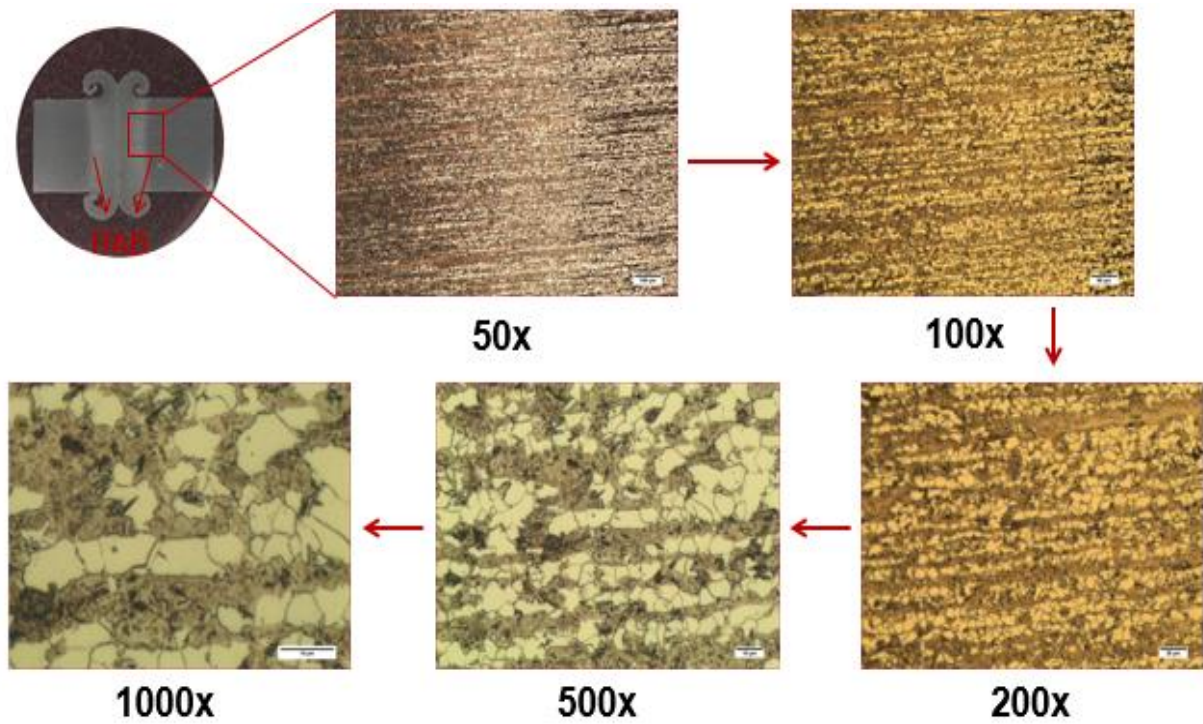
Farklı ısıt işlemler uygulanmış N2 (3S+YS+1T) ile N3 (3S+YS+K+1T) numunelerine ait optik mikroyapı fotoğrafları (Şekil 7.1-7.2) gösterilmiştir. Sertleştirme işleminden sonra uygulanan kriyojenik işlem (N3), mikroyapılarda çok belirgin bir değişikliğe neden olmamıştır ve kriyojenik işlem uygulanmamış mikroyapılara (N2) çok benzer bir mikroyapı elde edilmiştir.

Sadece sertleştirilmiş haldeki mikroyapılarda bir miktar kalıntı östenitin varlığı beklenmekle birlikte, bu fazın optik mikroskopla ayırt edilmesi oldukça güçtür; yalnızca yüksek çözünürlüklü elektron mikroskop yardımıyla tespiti mümkündür. Öte yandan kriyojenik işlem sonrası malzemedeki dönüşümler, optik mikroyapı fotoğraflarından kolaylıkla belirlenmeyecek bir mikroyapı dönüşümüdür.

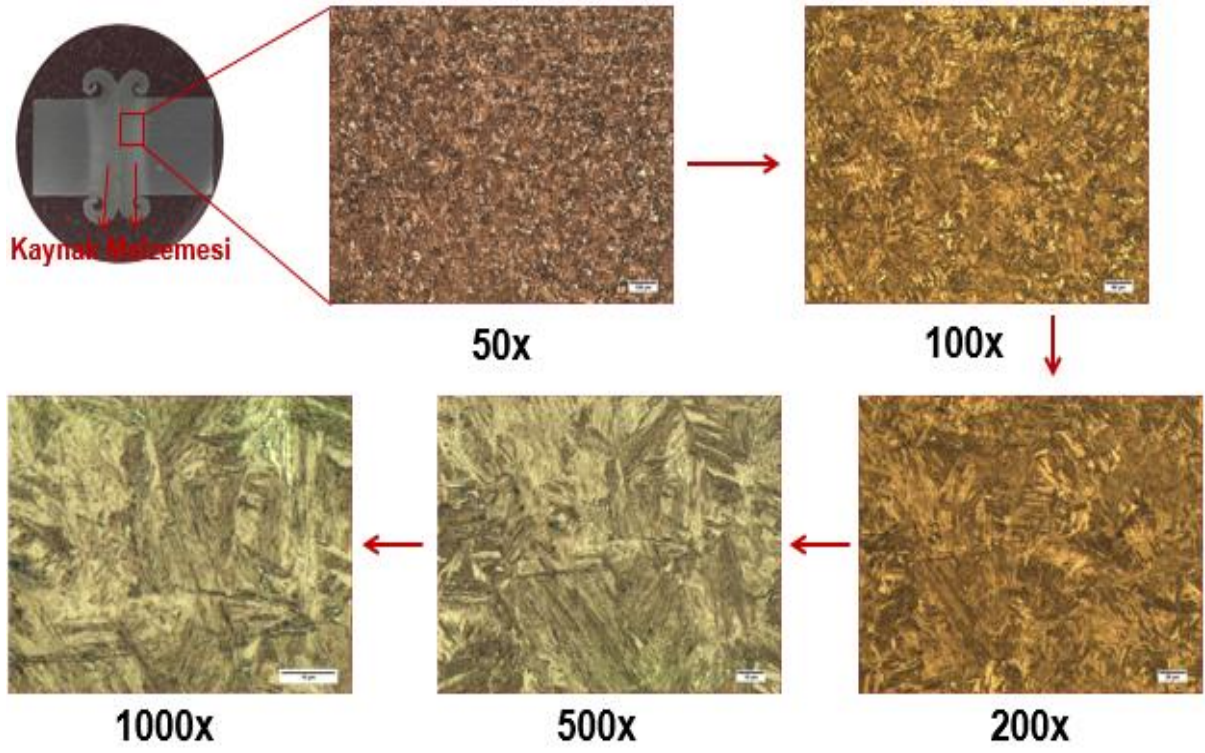
Nitekim kriyojenik işlem sonrası malzemedeki değişimlerin daha çok küçük olan atomik boyutlarda gerçekleştiği ve optik mikroskopla ayırt etmenin oldukça güç olduğu düşünülmektedir [34].



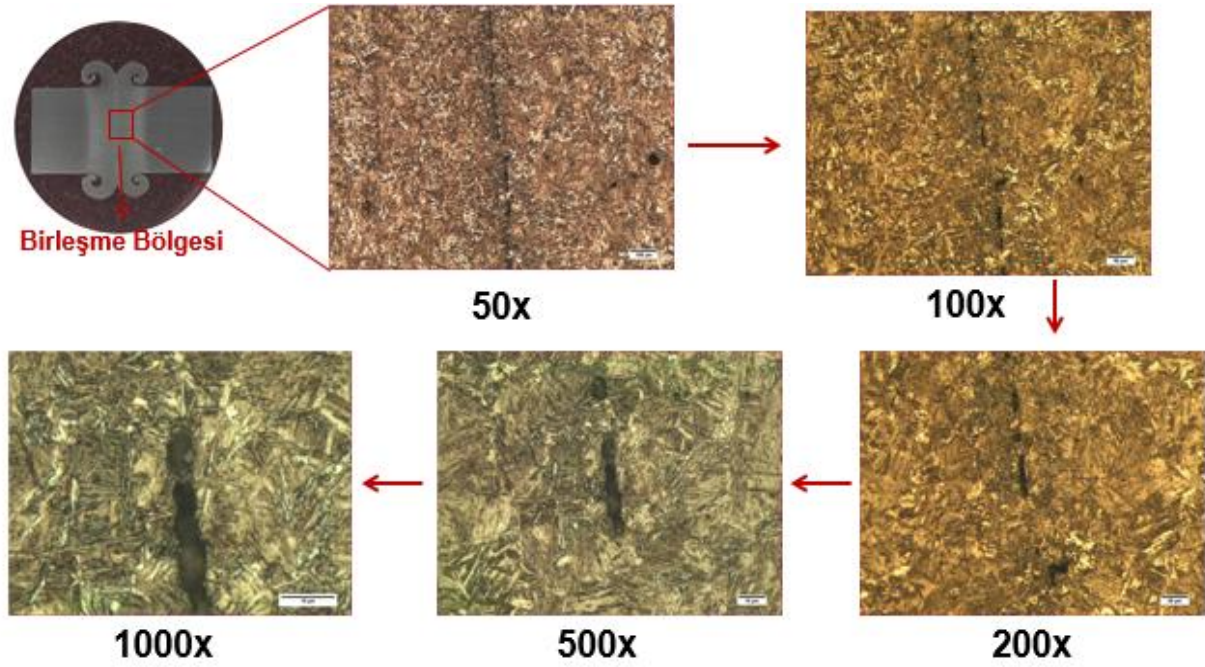
Şekil 7.1. N2 (3S+YS+1T) ye ait ana malzeme bölgesinden elde edilmiş mikroyapı



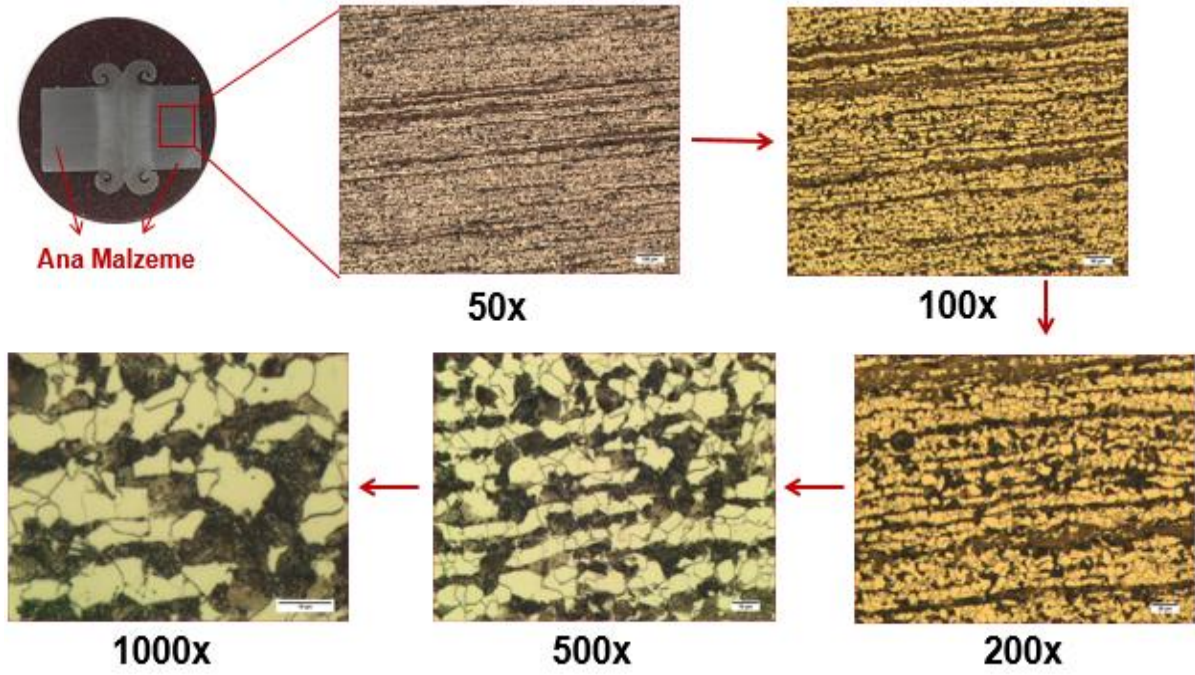
Şekil 7.2. N2 (3S+YS+1T) ye ait ITAB bölgesinden elde edilmiş mikroyapı



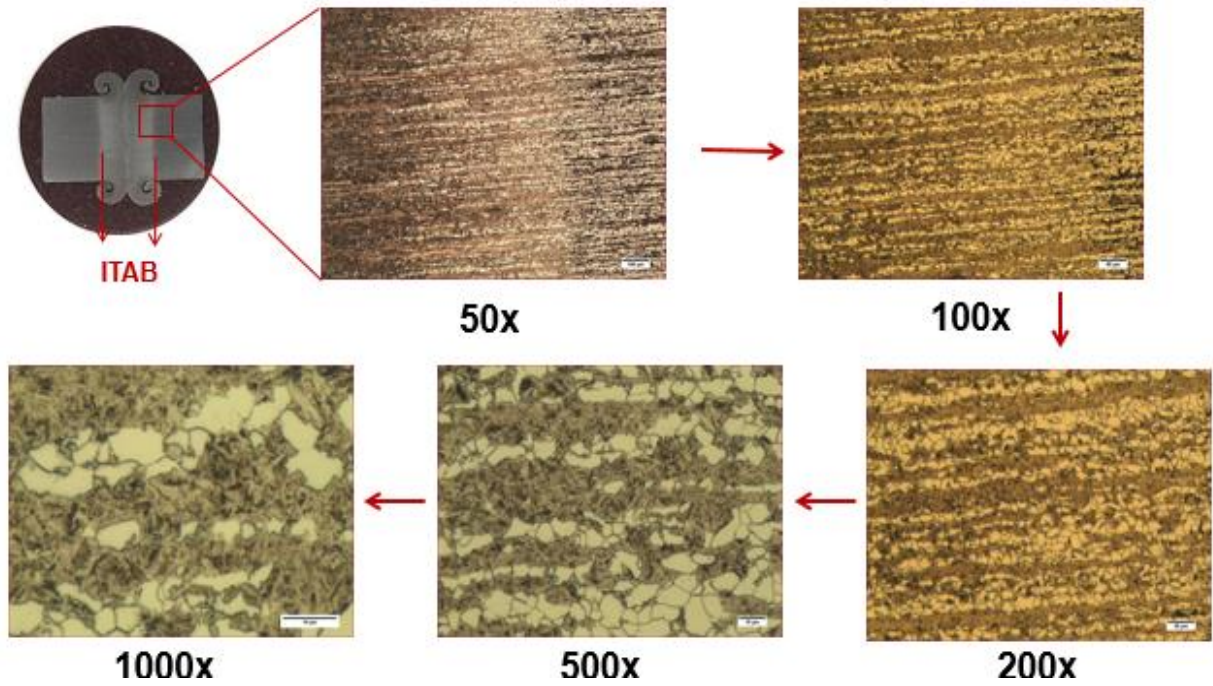
Şekil 7.3. N2 (3S+YS+1T) ye ait kaynak bölgesinden elde edilmiş mikroyapı



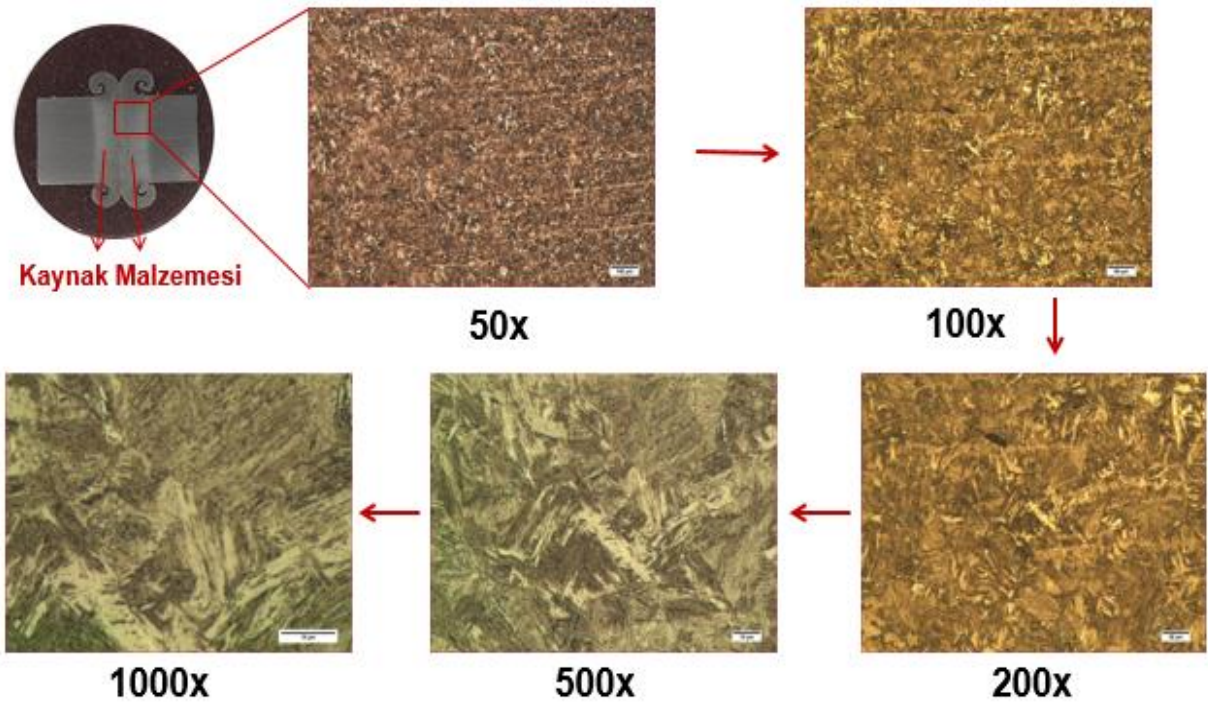
Şekil 7.4. N2 (3S+YS+1T) ye ait birleşme bölgesinden elde edilmiş mikroyapı



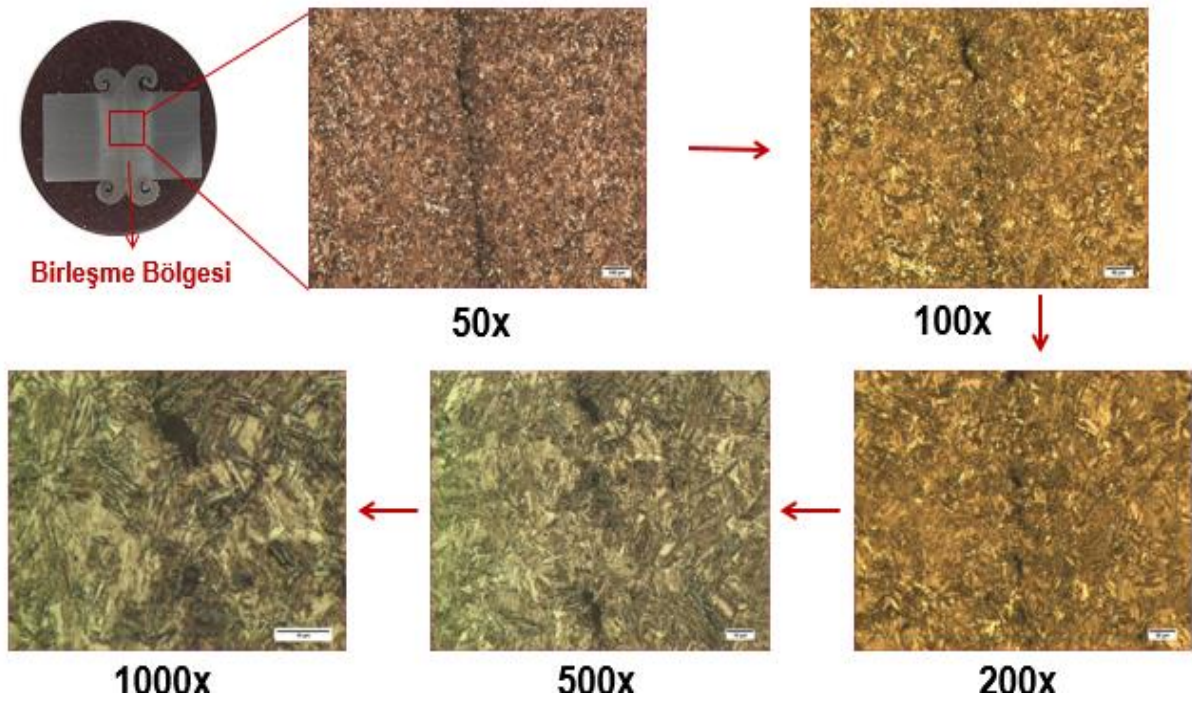
Şekil 7.5. N3 (3S+YS+K+1T) e ait ana malzeme bölgesinden elde edilmiş mikroyapı



Şekil 7.6. N3 (3S+YS+K+1T) e ait ITAB bölgesinden elde edilmiş mikroyapı



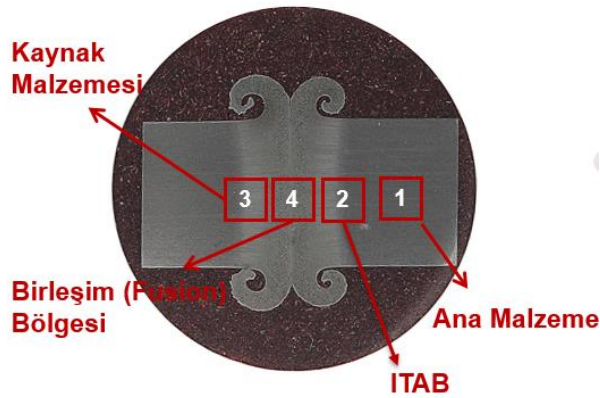
Şekil 7.7. N3 (3S+YS+K+1T) e ait kaynak bölgesinden elde edilmiş mikroyapı



Şekil 7.8. N3 (3S+YS+K+1T) e ait birleşme bölgesinden elde edilmiş mikroyapı

7.2. Mikrosertlik Testi Bulguları

Uygulanan ısıtıl işlemler sonucunda kaynaklı numunelerdeki sertlik dağılımlarını tespit etmek için, her bir numunenin 4 farklı bölgesinden (ana malzeme, kaynak malzemesi, ITAB, birleşme bölgesi) ve her bir bölgeden 5 adet mikrosertlik ölçümü alınarak sertlik değerlerindeki değişimler tespit edilmeye çalışılmıştır. (Resim 7.1).

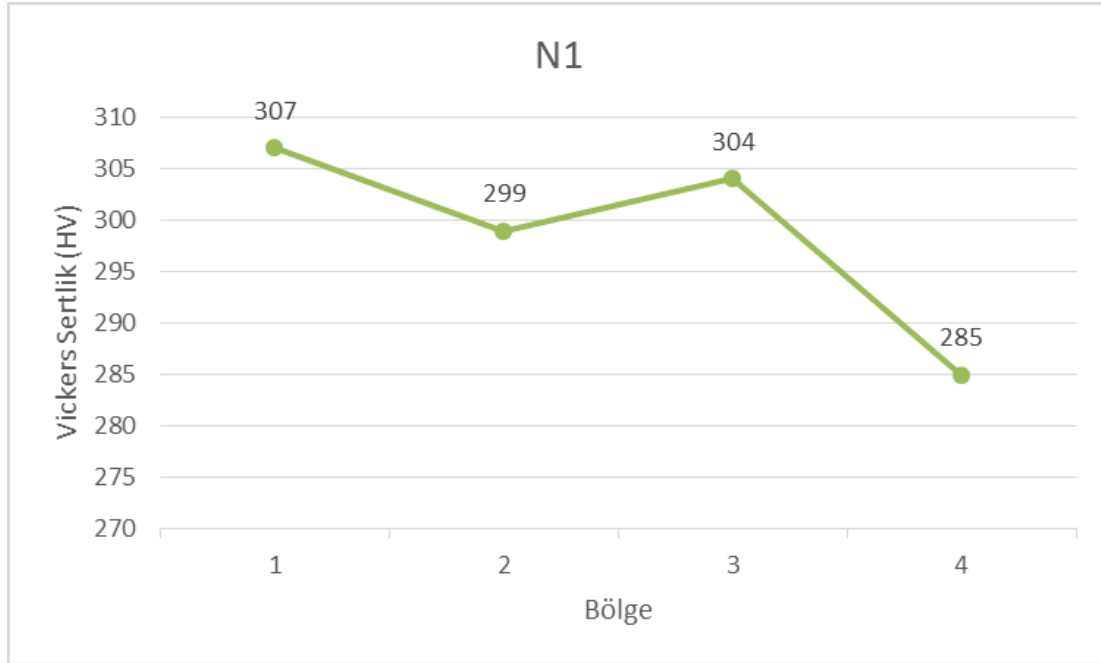


Resim 7.1. Numunelerden alınan 4 farklı bölge yeri

Çizelge 7.1. Numunelerin 4 farklı bölgesinden alınan ortalama sertlik değerleri

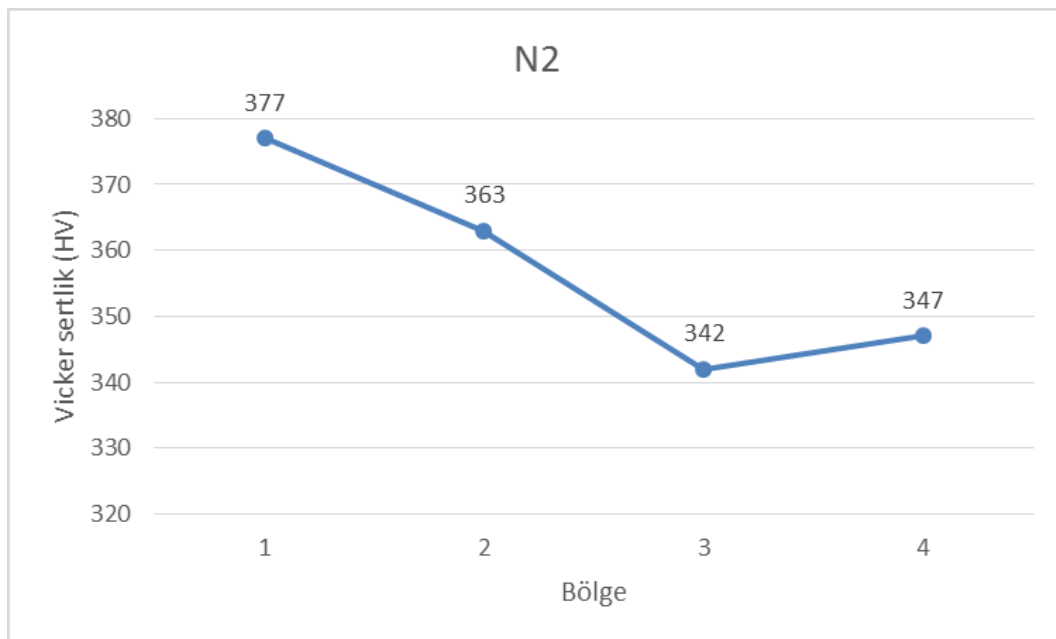
Vickers Sertlik Değerleri				
	N1 (3S+YS)	N2 (3S+YS+1T)	N3 (3S+YS+K+1T)	N5 (HN)
Bölge 1	307	377	630	231
Bölge 2	299	363	637	224
Bölge 3	304	342	637	235
Bölge 4	285	347	612	240

N1 (3S+YS) olarak adlandırılan numunenin, sementasyon ve yağda su verme işlemi sonrasında, yüzey sertliği ana malzeme bölgesinde 307 HV değerine, ITAB bölgesinde 299 HV değerine, kaynak bölgesinde 304 HV değerine ve son olarak birleşme bölgesinde 285 HV değerine düştüğü görülmektedir.



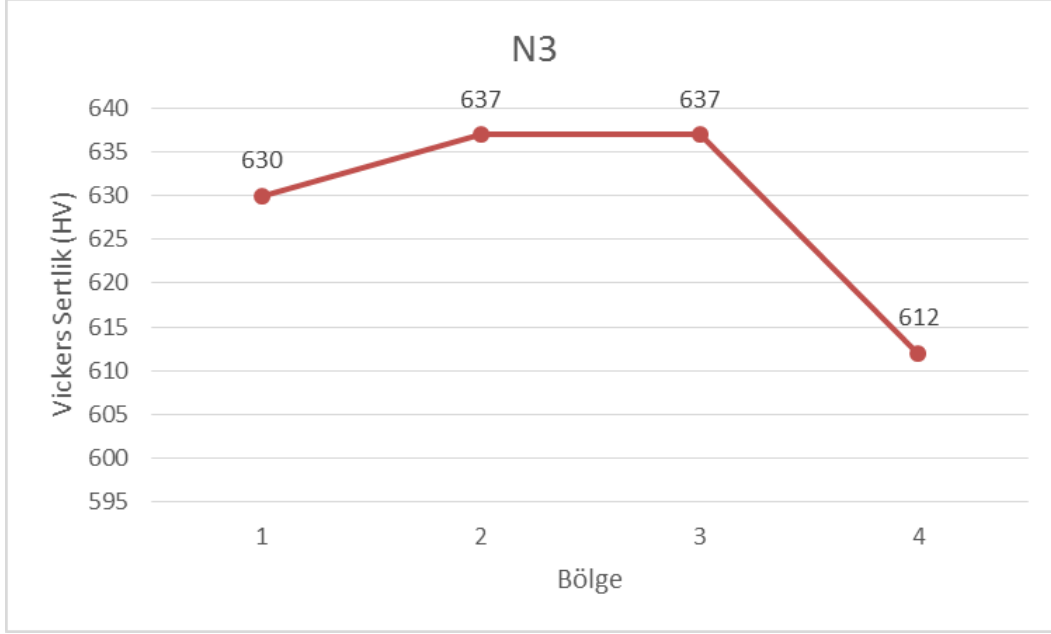
Şekil 7.9. N1 numunesi mikrosertlik testi sonucu

N2 (3S+YS+1T) olarak adlandırılan numunenin, sementasyon sonrası yağda su verme işlemi ve 1 saat temperleme işlemi sonrasında, yüzey sertliği ana malzeme bölgesinde 377 HV değerine, ITAB bölgesinde 363 HV değerine, kaynak bölgesinde 342 HV değerine ve son olarak birleşme bölgesinde 347 HV değerine düştüğü görülmektedir.



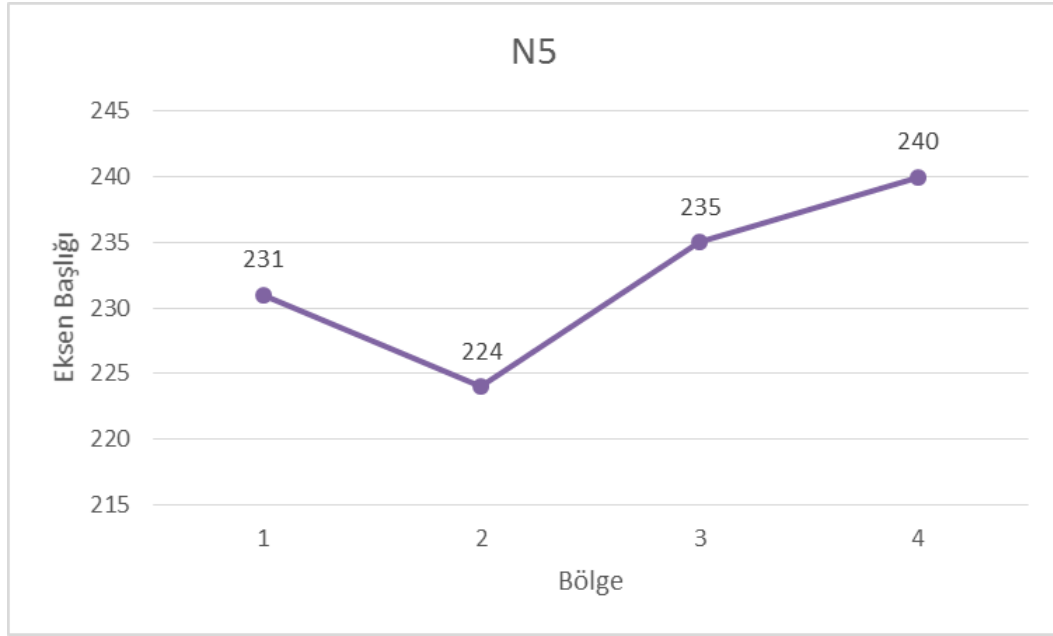
Şekil 7.10. N2 numunesi mikrosertlik testi sonucu

N3 (3S+YS+K+1T) numunesine ait sertlik deęerleri incelendięinde, yzey sertlięi ana malzeme bølgesinde 630 HV deęerine, ITAB bølgesinde 637 HV deęerine, kaynak bølgesinde 637 HV deęerine ve son olarak birleřme bølgesinde 612 HV deęerine dūřtūęu gürlmektedir.



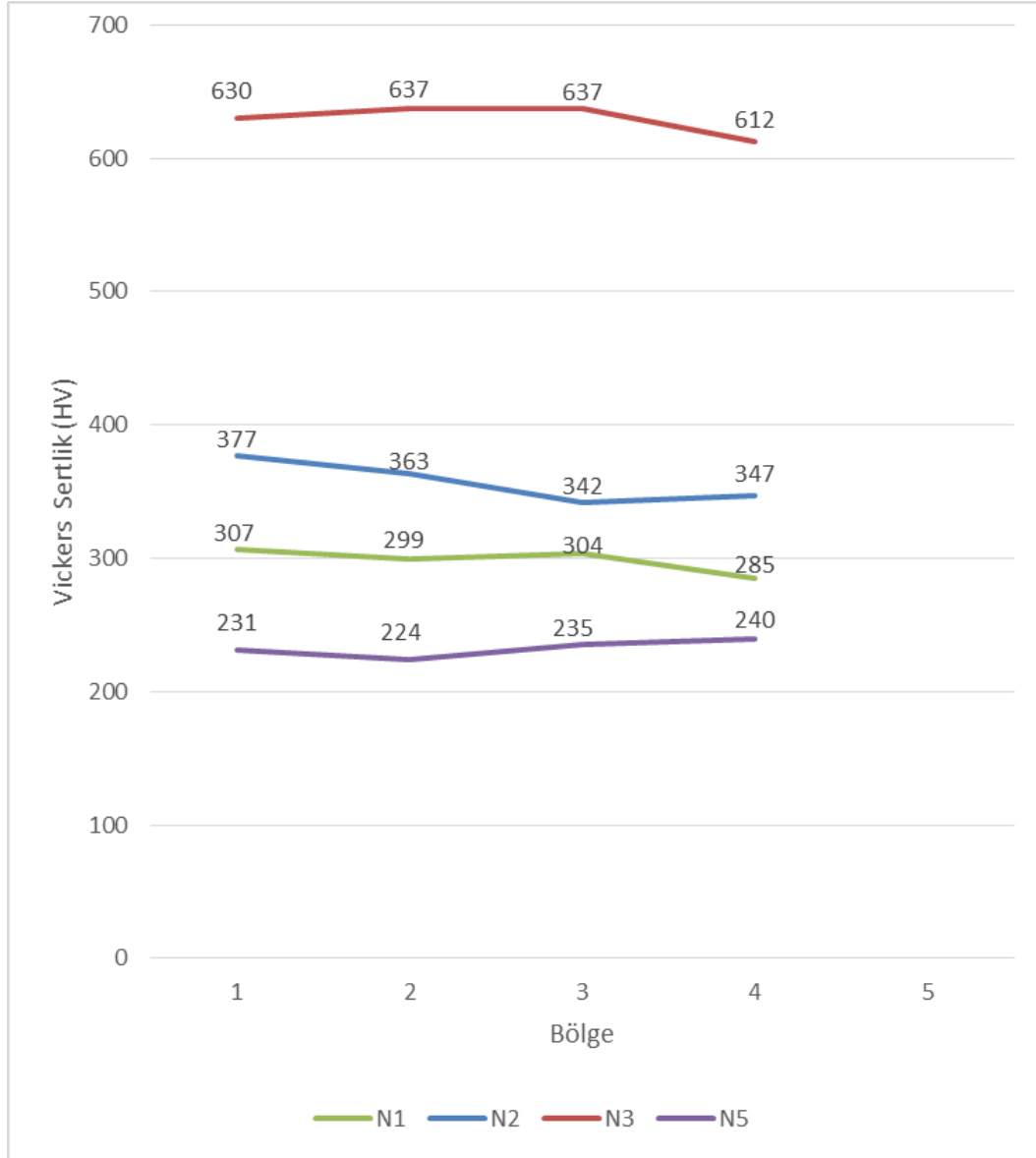
şekil 7.11. N3 numunesi mikrosertlik testi sonucu

Öte yandan hiç işlem gürmemiş ham haldeki N5 (HN) numunesini ait mikrosertlik değerlerine bakıldığında, yzey sertliği ana malzeme bølgesinde 231 HV değerine, ITAB bølgesinde 224 HV değerine, kaynak bølgesinde 235 HV değerine ve son olarak birleşme bølgesinde 240 HV değerinde olduğu gürlmektedir.



Şekil 7.12. N5 numunesi mikrosertlik testi sonucu

Farklı ısıtıl işlem görmüş numunelere ait mikrosertlik değeri ölçümlerinin karşılaştırılmalı grafiği Şekil 7.13’ de verilmiş olup elde edilen değerler ışığında N3 numunesinin sertlik değerlerinde ciddi bir artış olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni, kriyojenik işlem sırasında ve sonrasında, kalıntı östenit miktarı azalırken, daha fazla ve daha ince Fe_3C ve/veya ϵ – karbür oluşması ve böylece malzemenin genel davranışı açısından sertlik, aşınma ve yorulma dayanımlarının artması söz konusu olmasıdır.



Şekil 7.13. Birleştirilmiş mikrosertlik sonuçları

7.3. Çekme Testi Bulguları

5 ayrı kategoride sınıflandırılmış olan kaynaklanmış numuneler çekme testine tabi tutulmuş olup farklı ısıtma işlemleri sonucunda numunelerdeki farklılıklar gözlenmeye çalışılmıştır.

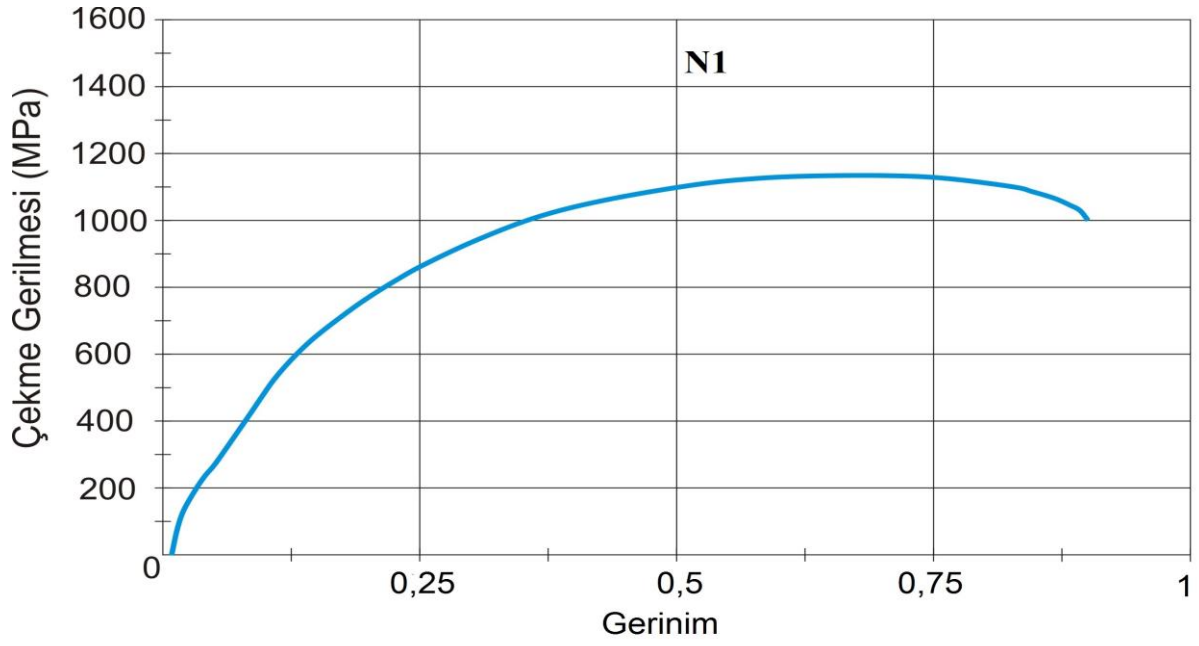
Şekil 6.9'daki N1(3S+YS), N2(3S+YS+1T), N3(3S+YS+K+1T), N4(K+1T), N5(HN)'ye ait numuneler incelendiğinde en yüksek dayanım değerleri 1440 MPa olarak gözlemlenmiştir (Çizelge 7.2). Sementasyon işlemi yapılan numunelere (N1,N2,N3) bakıldığında dayanım değerlerinin, sementasyon işlemi yapılmamış numunelere nazaran

oldukça yüksek dayanım değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Özellikle N3(3S+YS+K+1T) numunesinin en yüksek dayanım değerine sahip olduğu gözlemlenmiş, bunun altında yatan sebepler irdelendiğinde, kriyojenik işlem sonrası kalıntı östenit miktarının azalması, dolayısıyla temperleme sonrası daha ince sementit dağılımı olduğundan sertlik, aşınma dayanımı ve yorulma dayanımlarında artış olduğu düşünülmektedir [35].

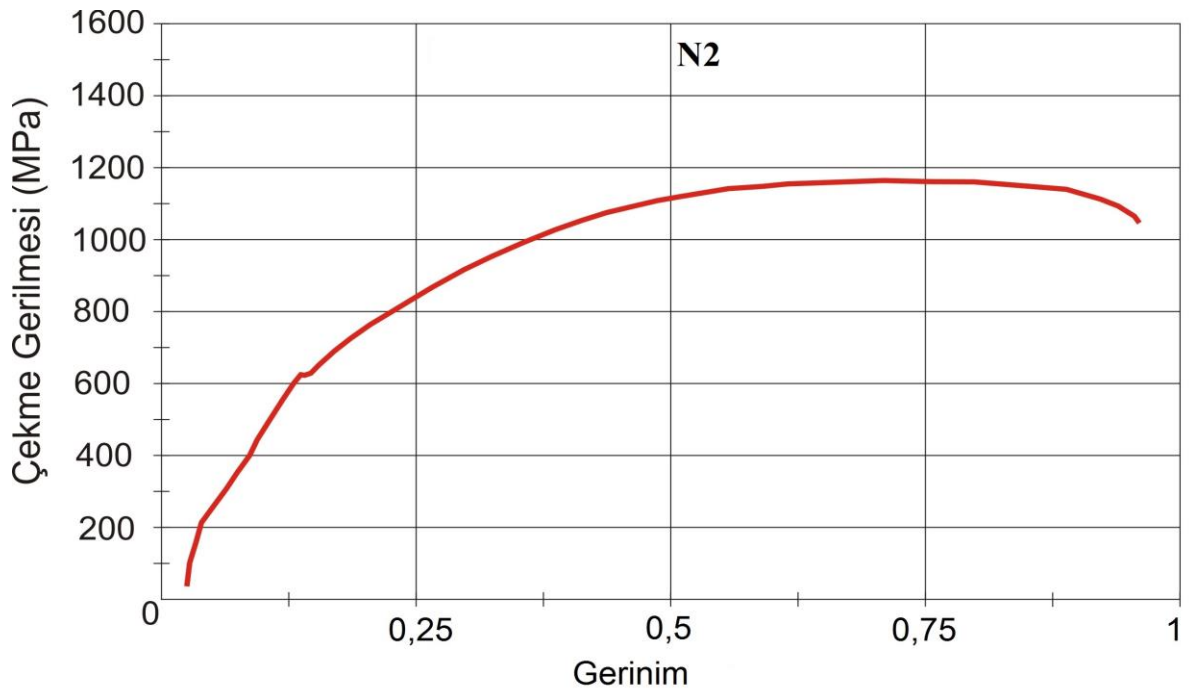
Ancak çekme grafikleri incelendiğinde yukarıda açıklanan durumun N4 (K+1T) numunesi için geçerli olmadığı görülmüştür (Şekil 7.17-7.18). N4 (K+1T) numunesi ile N5(HN) numunesi karşılaştırıldığında hemen hemen aynı dayanım değerlerine sahip oldukları gözlemlenmiştir. Bu durumun kriyojenik işlem sonrası yapılan uzun süreli temperleme işleminden dolayı kriyojenik etkinin nispeten kaybolmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 7.2. Çekme testi numunelerinin birleştirilmiş verileri

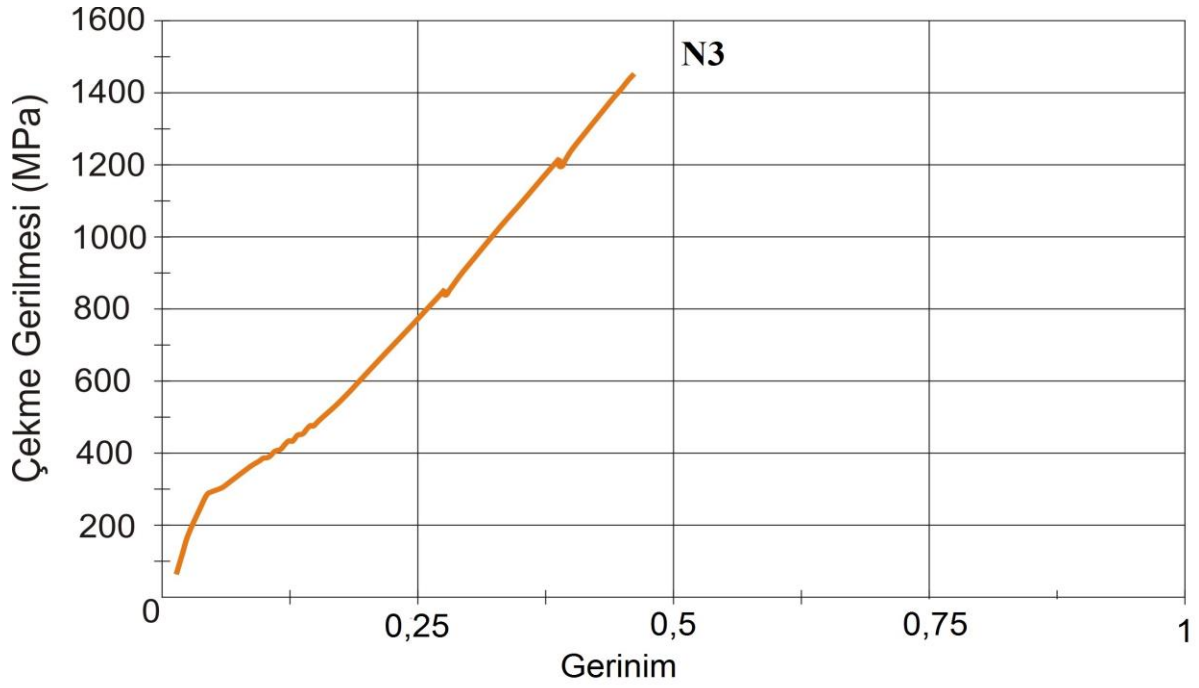
Numune	Çap	Alan	İlk Boy	Son Boy	Fm	Rm	Rt %5	A %5,65	At
No	(mm)	(mm ²)	(mm)	(mm)	(kN)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(%)
N1	5,950	27,80	34,00	34,60	36,6	1002	638	2,00	2,50
N2	5,950	27,80	34,00	35,40	34,7	1084	647	4,50	4,50
N3	5,950	27,80	34,00	34,50	37,3	1437	840	1,50	2,00
N4	5,950	27,80	34,00	--	20,8	471	442	0,00	0,00
N5	5,950	27,80	34,00	--	20,4	503	451	0,00	0,00



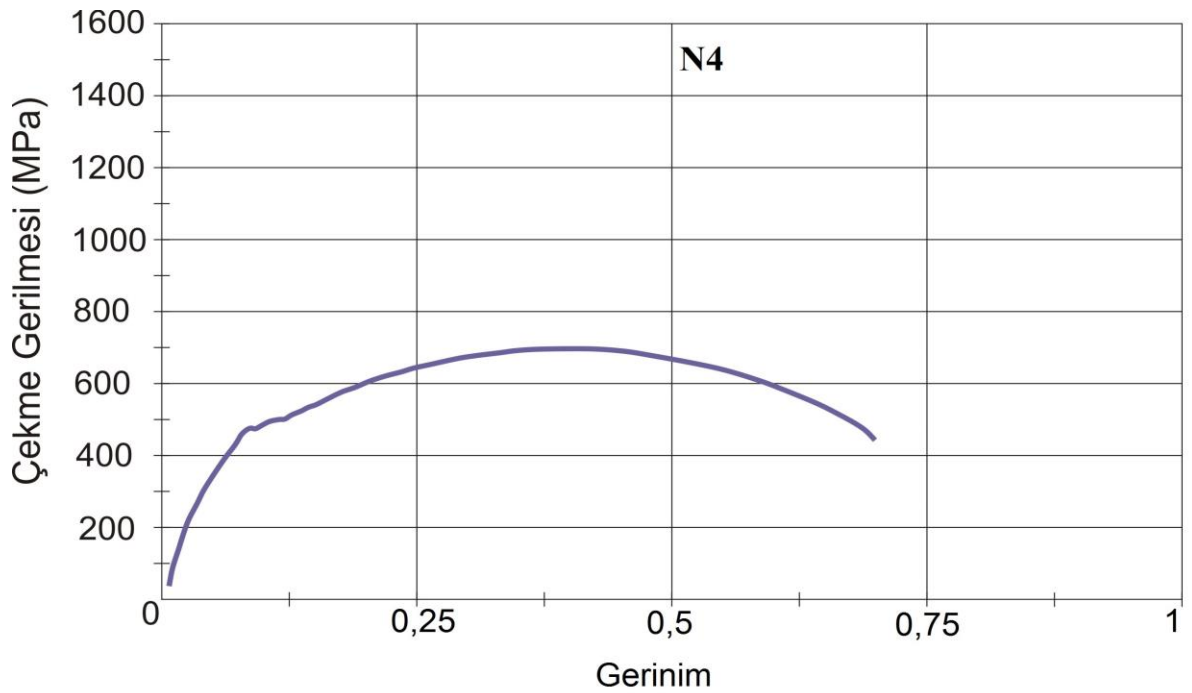
Şekil 7.14. N1 (3S+YS) numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği



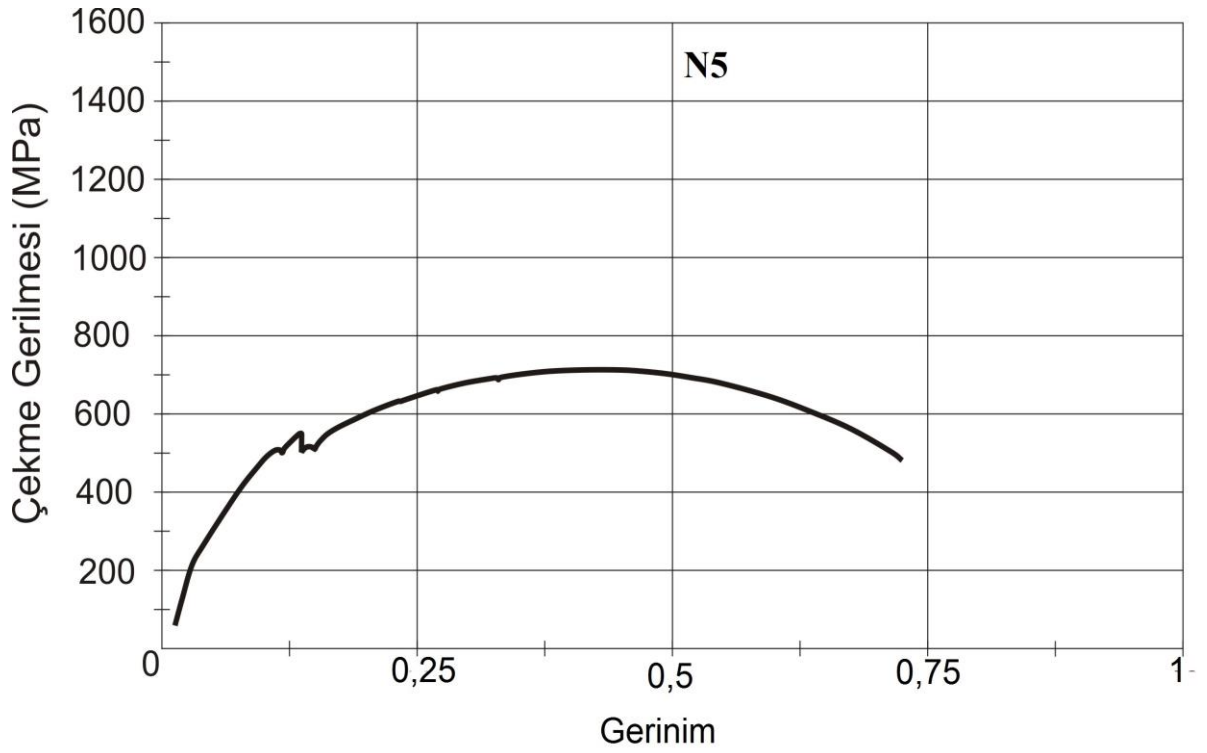
Şekil 7.15. N2 (3S+YS+1T) numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği



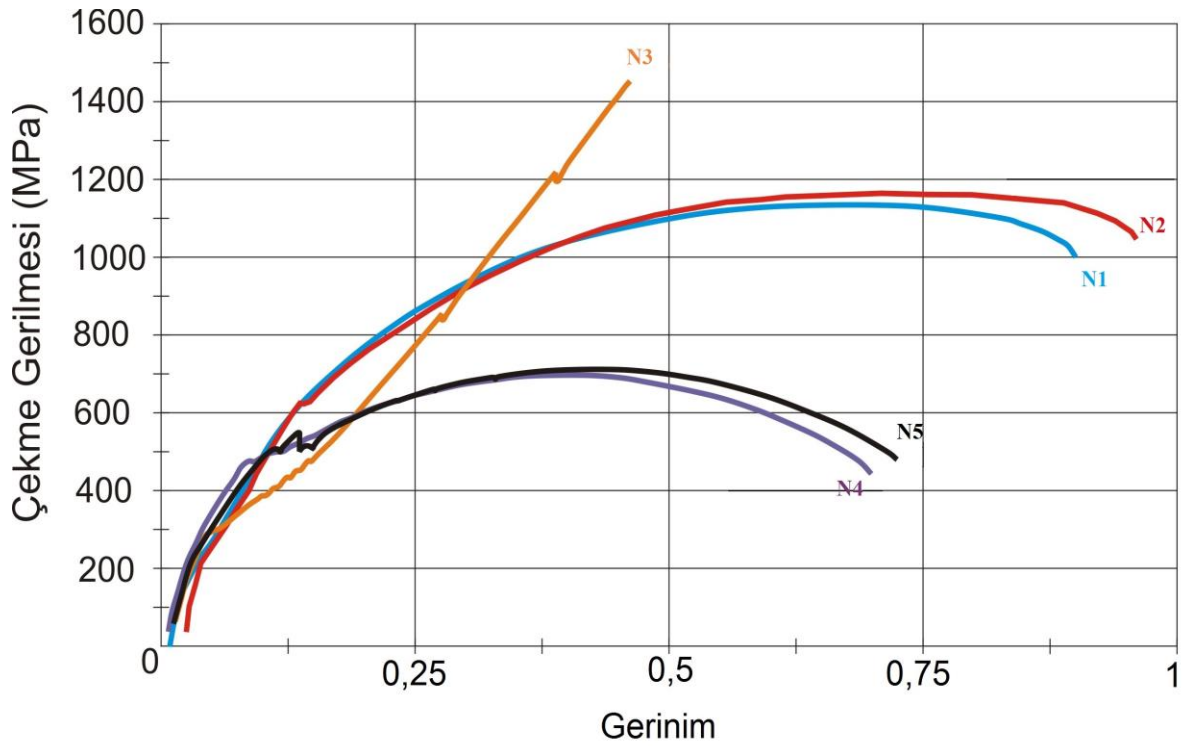
Şekil 7.16. N3 (3S+YS+K+1T) numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği



Şekil 7.17. N4 (K+1T) numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği



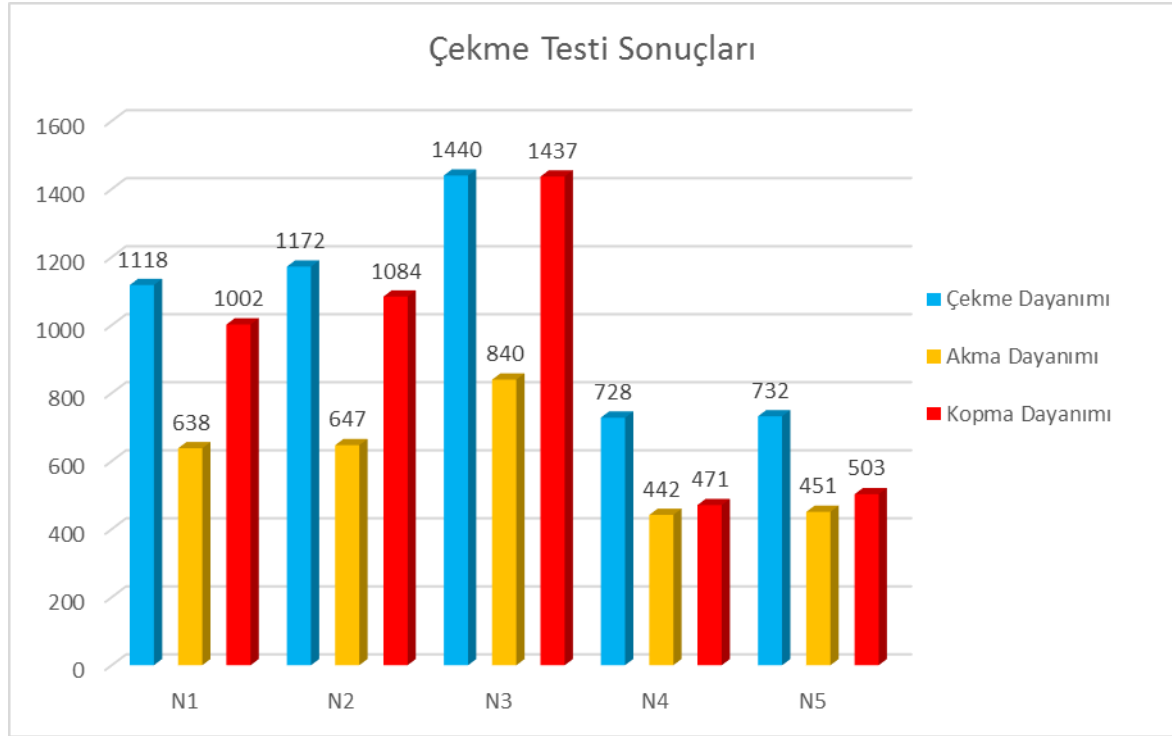
Şekil 7.18. N5 (K+1T) numunesine ait çekme dayanımı testi grafiği



Şekil 7.19. 5 numunenin çekme dayanımı testi grafiği

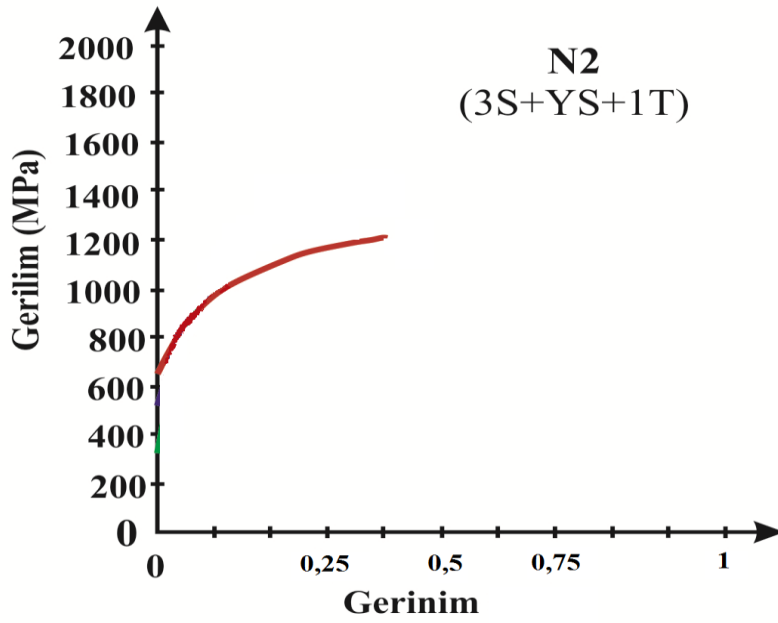
Çizelge 7.3. Numunelerin ortalama akma ve kopma dayanımı

	N1	N2	N3	N4	N5
Kopma Gerilmesi, R _m (N/mm ²)	1002	1084	1437	471	503
Akma Dayanımı, R _t %5 (N/mm ²)	638	647	840	442	451
Çekme dayanımı (N/mm ²)	1118	1172	1440	728	732

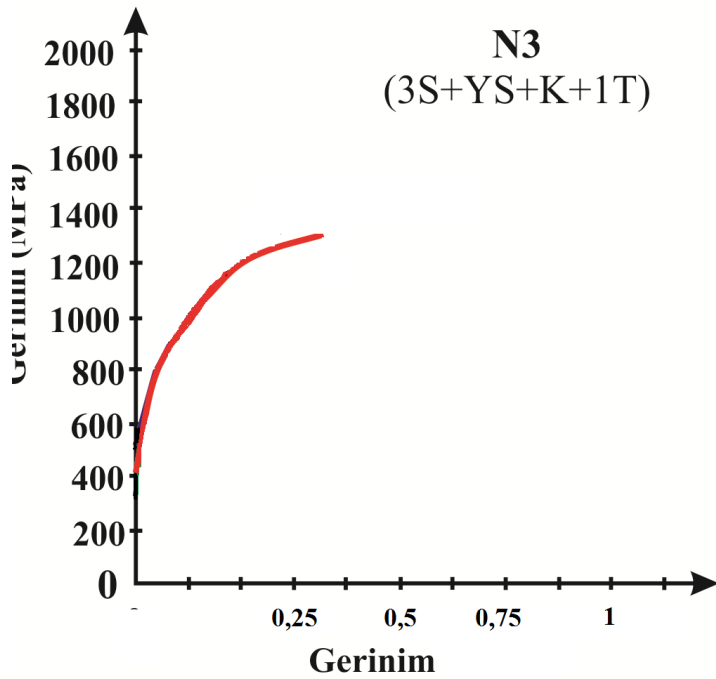


Şekil 7.20. Numunelerin çekme, kopma ve akma dayanımlarının karşılaştırılmalı grafiği

Karşılaştırma zemini oluşturması açısından kaynak yapılmamış ancak aynı ısıtılmalardan geçmiş N2 (3S+YS+1T) ve N3 numunelerine ait çekme testi sonuçları Şekil 7.21-7.22 de gösterilmiştir.



Şekil 7.21. Kaynaksız N2 (3S+YS+1T) numunesine ait çekme testi sonucu



Şekil 7.22. Kaynaksız N3 (3S+YS+K+1T) numunesine ait çekme testi grafiği

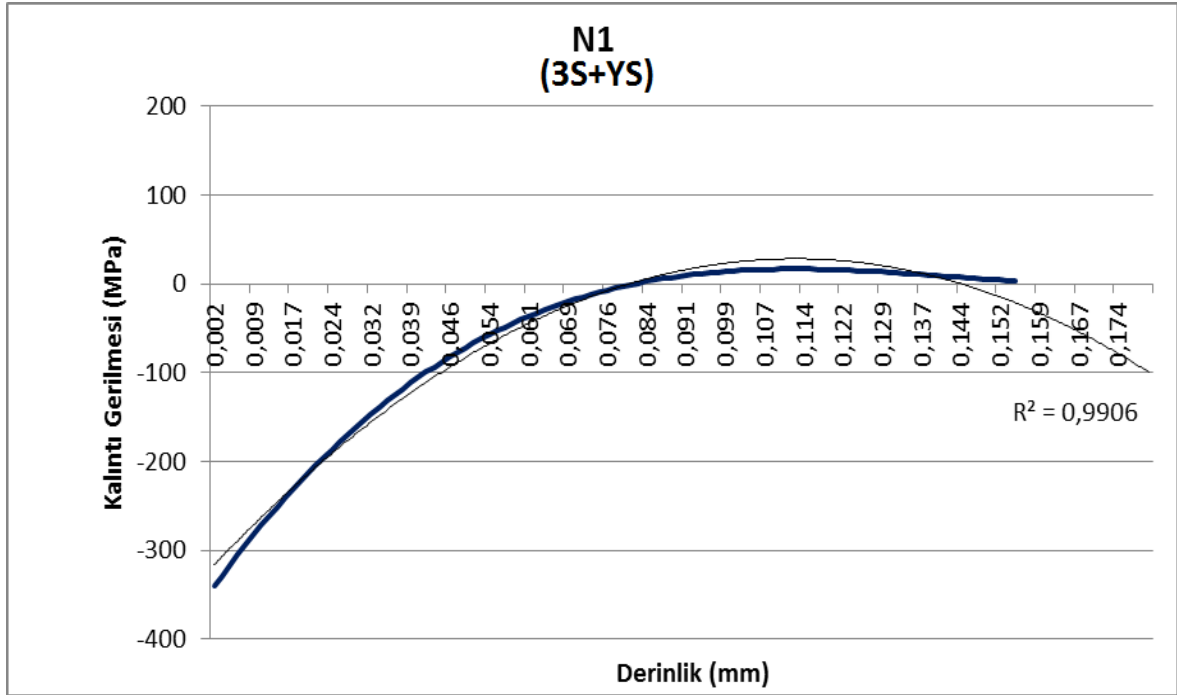
Kaynak yapılmamış N2 ve N3 numunelerine ait çekme grafiklerine bakıldığında N2 numunesinin akma dayanımının ortalama 973 MPa'ya, çekme dayanımının ise ortalama 1298 MPa'ya çıktığı görülmektedir. Temperleme öncesi kriyojenik işlem yapılan

numunede ise (N3) akma dayanımının ortalama 961 MPa'ya düştüğü, çekme dayanımının ise ortalama 1370 MPa'ya çıktığı gözlemlenmiştir. Kaynak yapılmış numunelere ait çekme testi grafiklerine bakıldığında N2 numunesinin akma dayanımının 647 MPa, çekme dayanımının ise 1172 MPa, N3 numunesinin ise akma dayanımının 840 MPa, çekme dayanımının ise 1440 MPa olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler ışığında özellikle kaynaklı N3 numunesinin en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir.

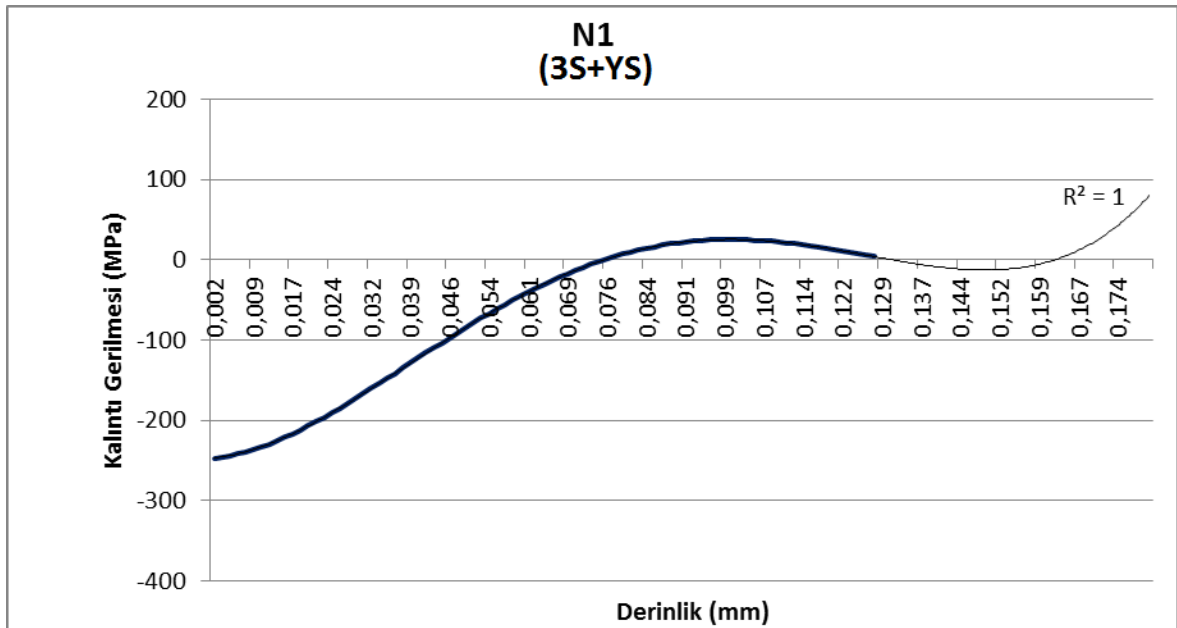
7.4. Kalıntı Gerilmesi Deney Bulguları

Kaynaklı numunelerin katman kaldırma yöntemi ile elde edilen kalıntı gerilme grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafikler kalıntı gerilmelerin derinliğe bağlı olan değişimlerini göstermektedir.

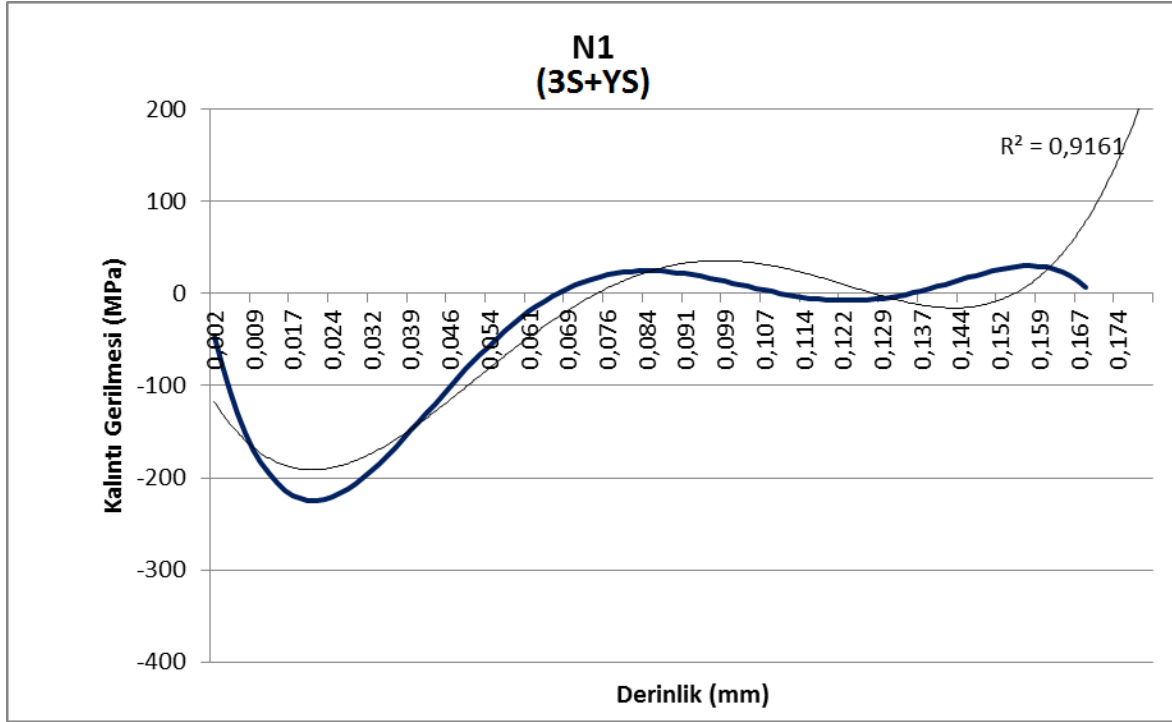
Kalıntı gerilme grafikleri oluşturulurken önemli bir husus da, oluşturulan grafiklerdeki polinom derecesidir. Gerilme grafiklerinde, başlangıç ve kuyruk kısımları en değişken ve belirsiz bölgeler olup hata payları yüksektir. Bu hataları azaltmak için oluşturulacak kalıntı gerilme grafiklerinde, sırasıyla 4. 5. ve 6. dereceden polinomlar kullanılarak en doğru kalıntı gerilme grafikleri elde edilmeye çalışılmıştır (Şekil 7.21-7.35). En doğru polinom derecesini belirlemek için çok değişkenli regrasyon analizi (R^2) sonuçları da grafiklerde gösterilmiştir. $R^2 = 1$ en doğru polinom derecesine işaret etmektedir.



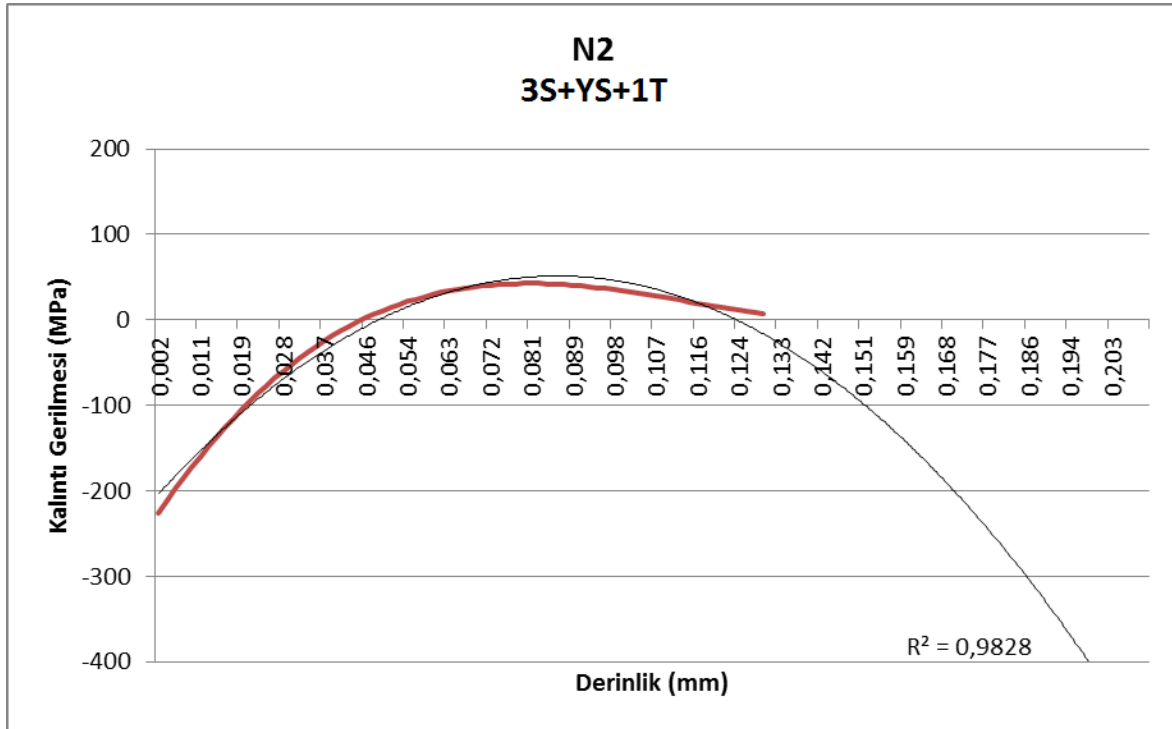
Şekil 7.23 Kaynaklı N1 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



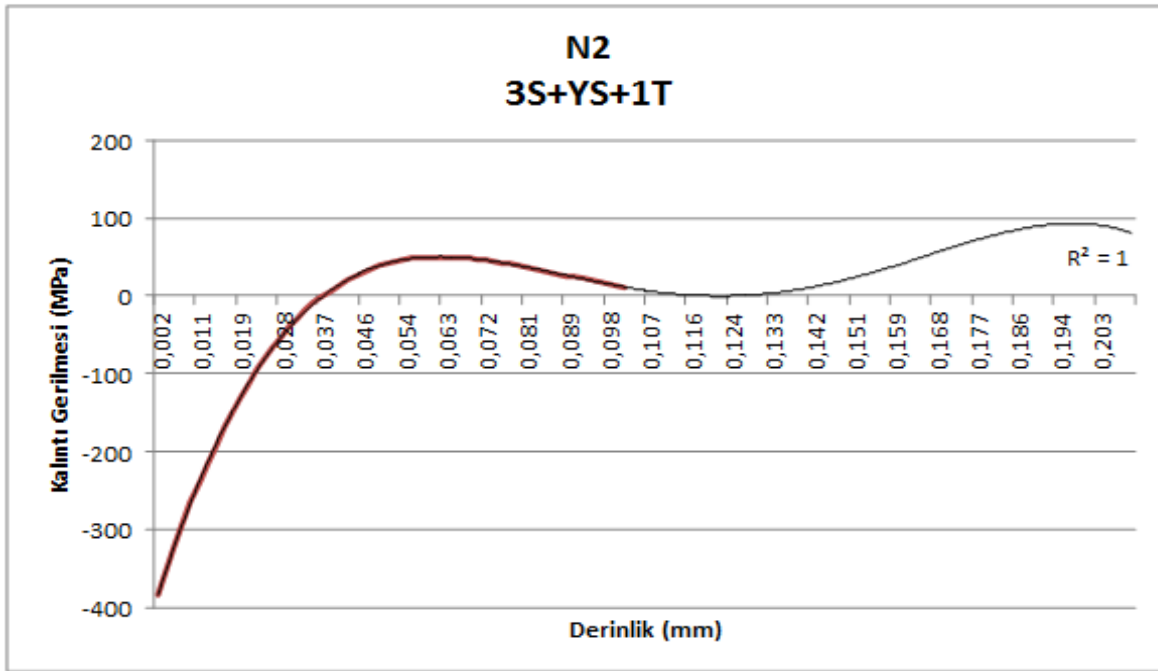
Şekil 7.24. Kaynaklı N1 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



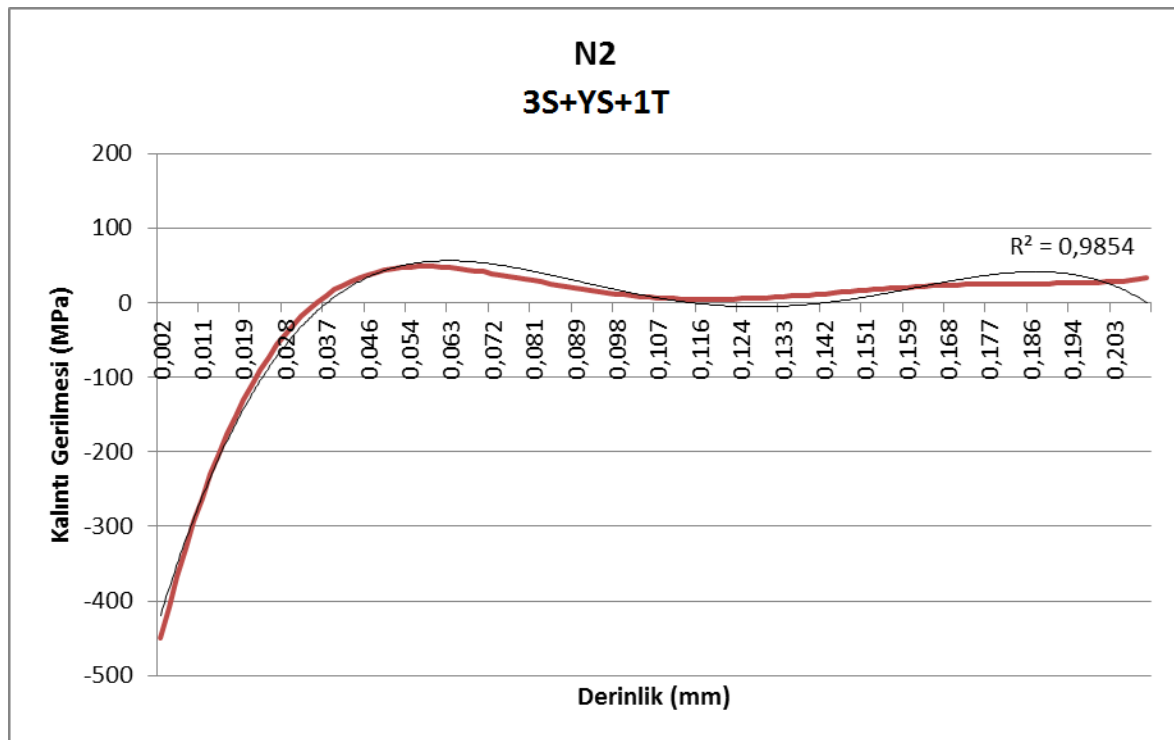
Şekil 7.25. Kaynaklı N1 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



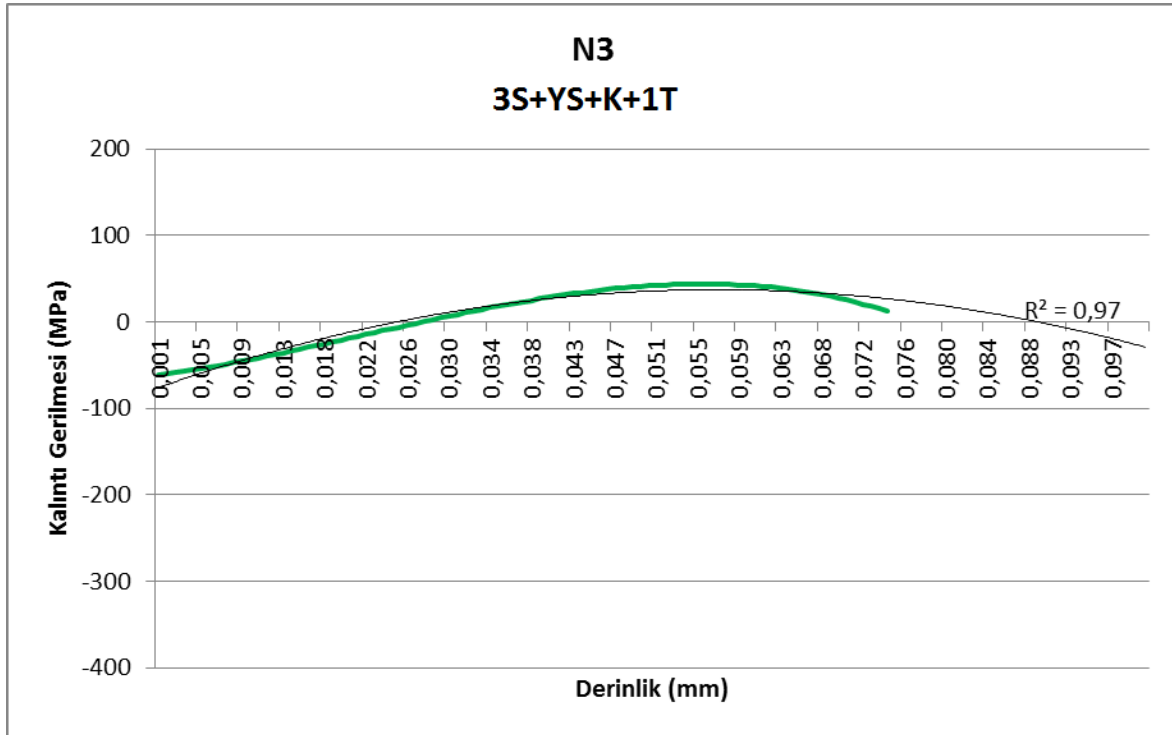
Şekil 7.26. Kaynaklı N2 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



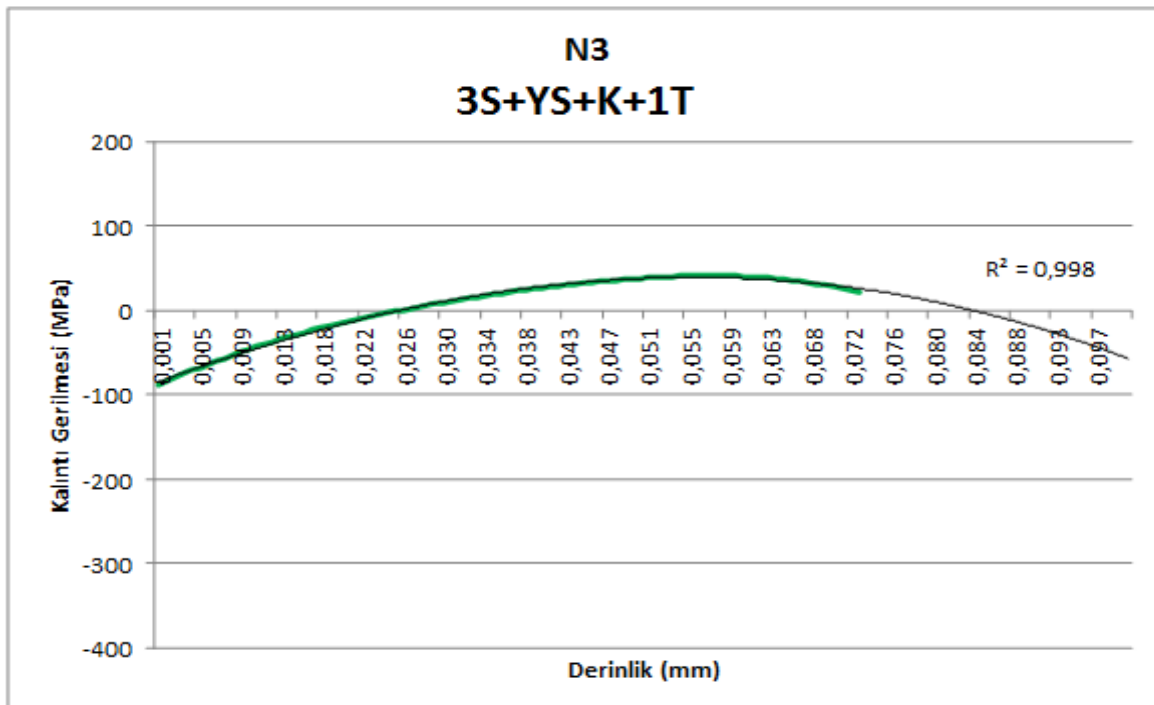
Şekil 7.27. Kaynaklı N2 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



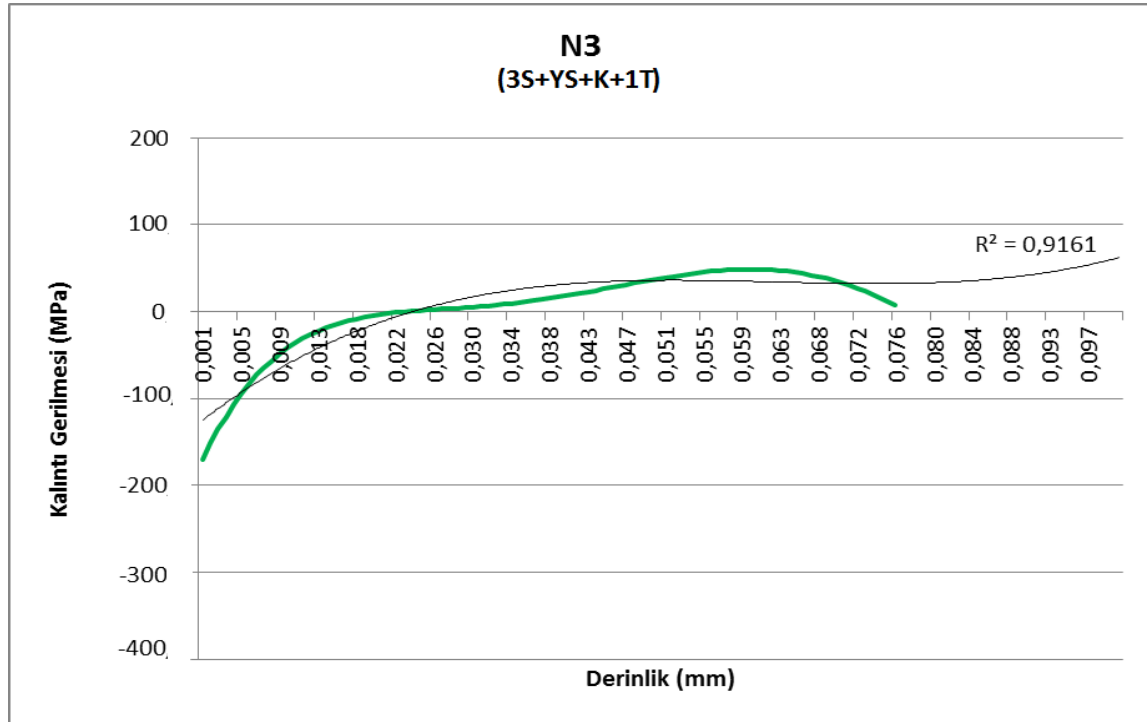
Şekil 7.28. Kaynaklı N2 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



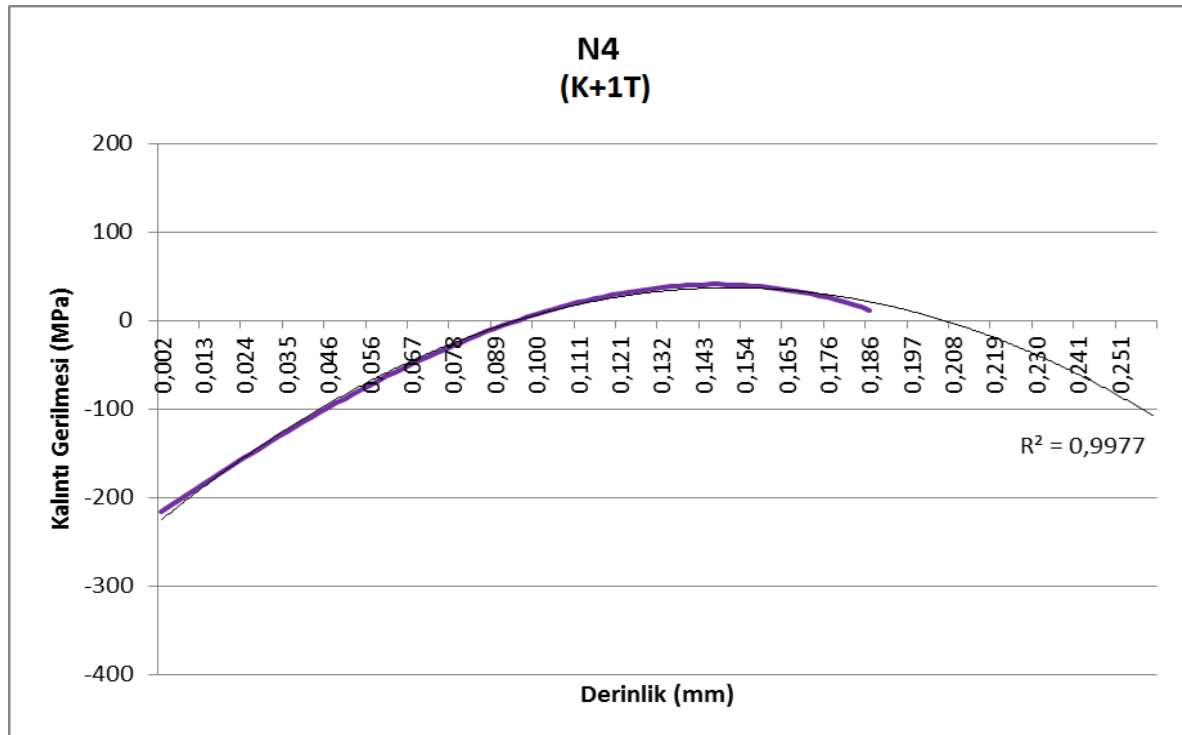
Şekil 7.29. Kaynaklı N3 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



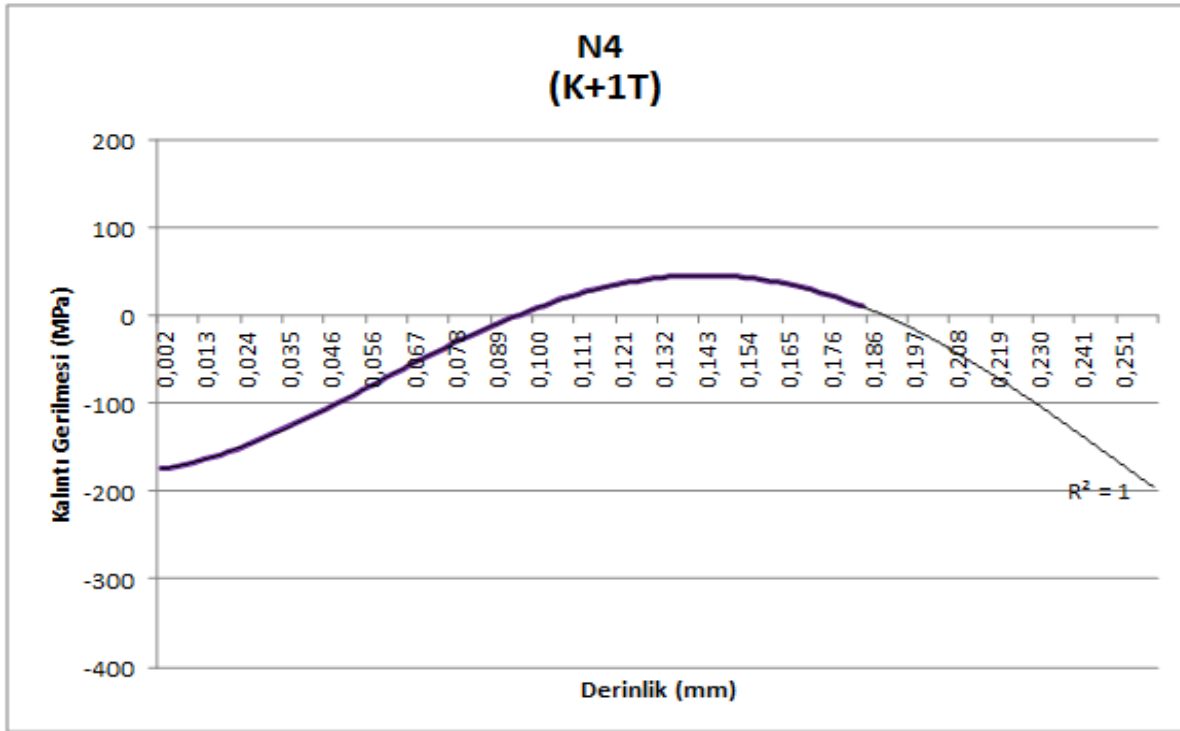
Şekil 7.30. Kaynaklı N3 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



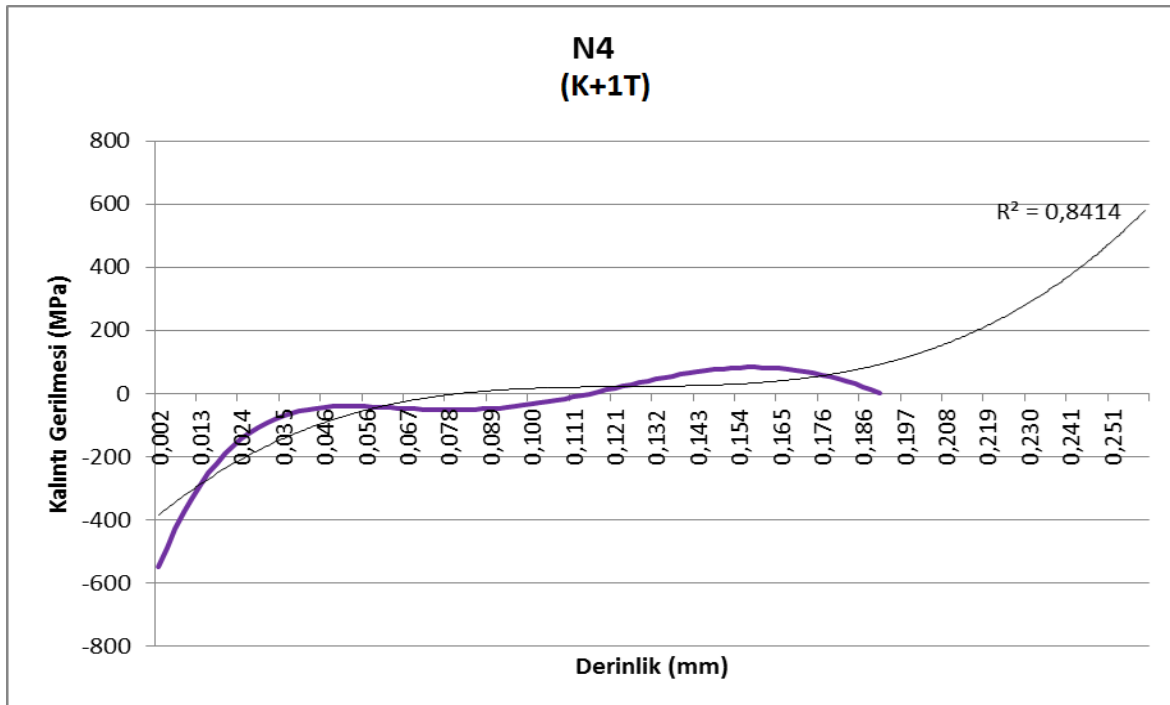
Şekil 7.31. N3 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



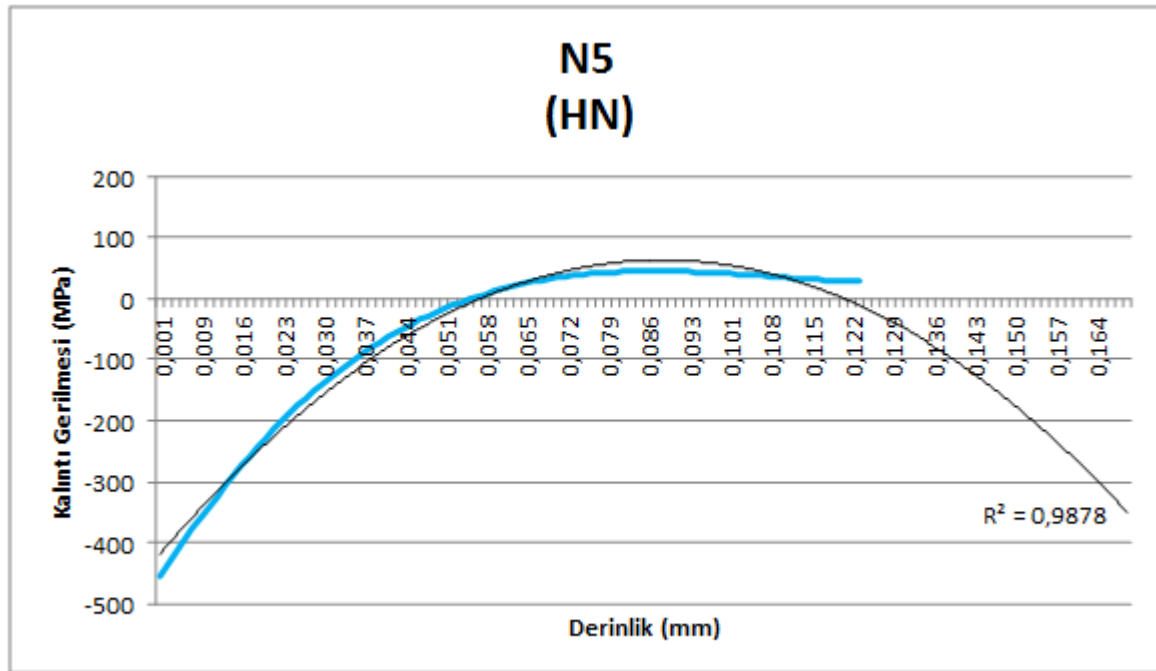
Şekil 7.32. Kaynaklı N4 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



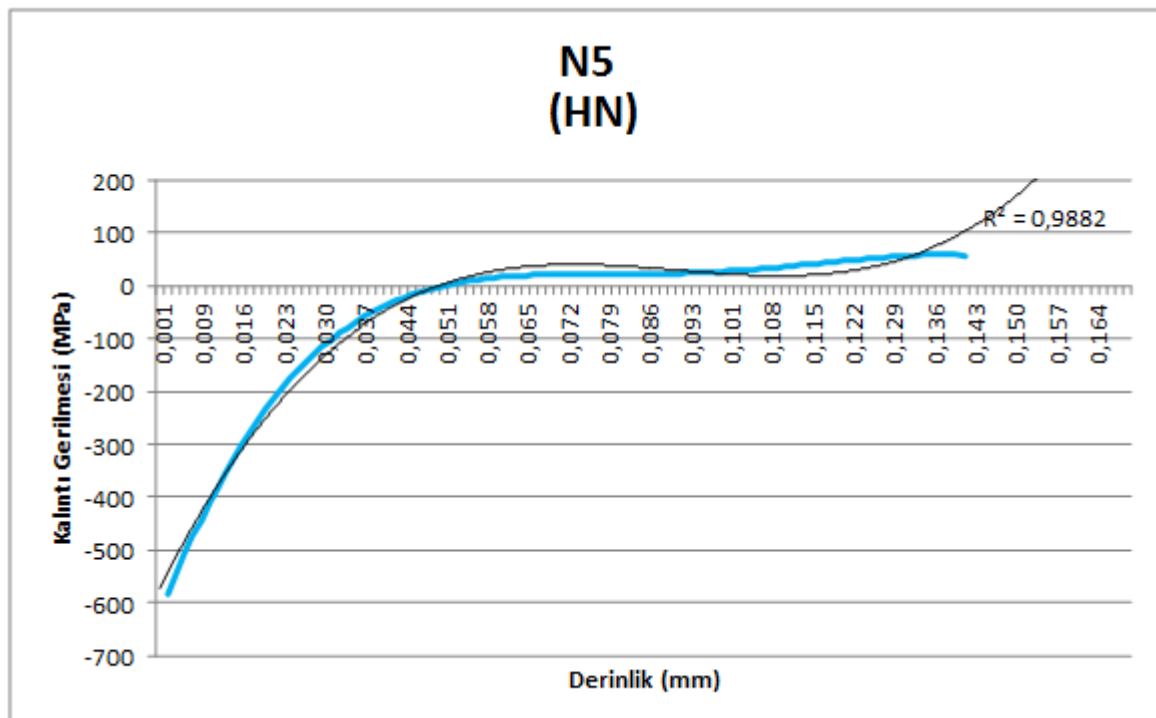
Şekil 7.33. Kaynaklı N4 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



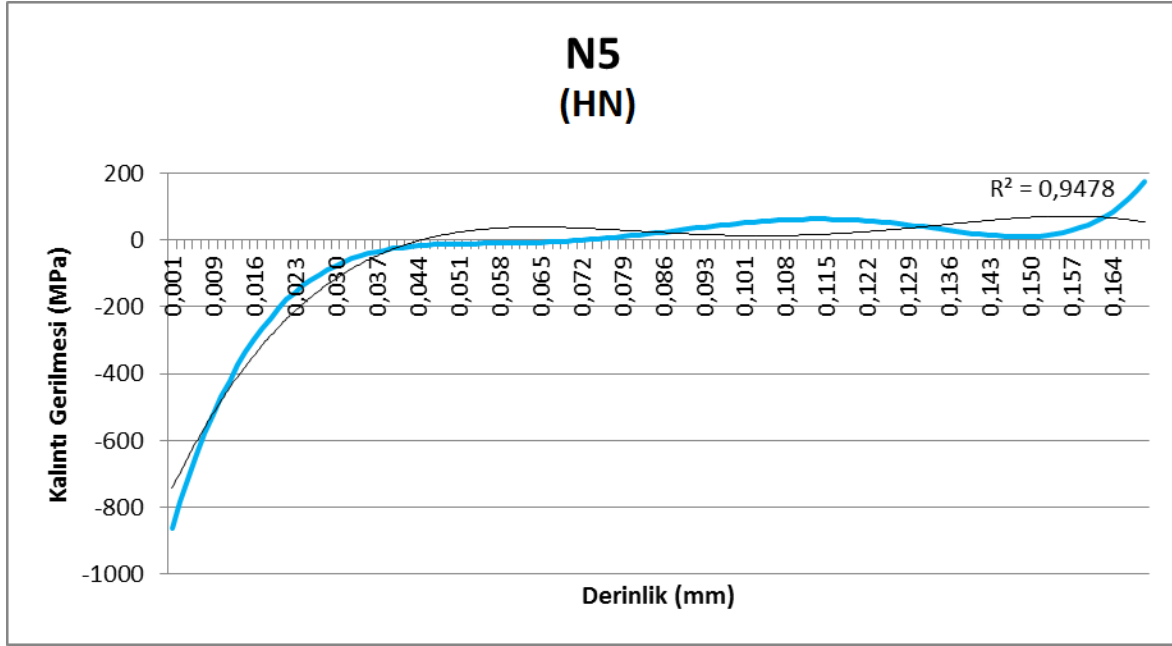
Şekil 7.34. Kaynaklı N4 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



Şekil 7.35. Kaynaklı N5 numunesine ait 4. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



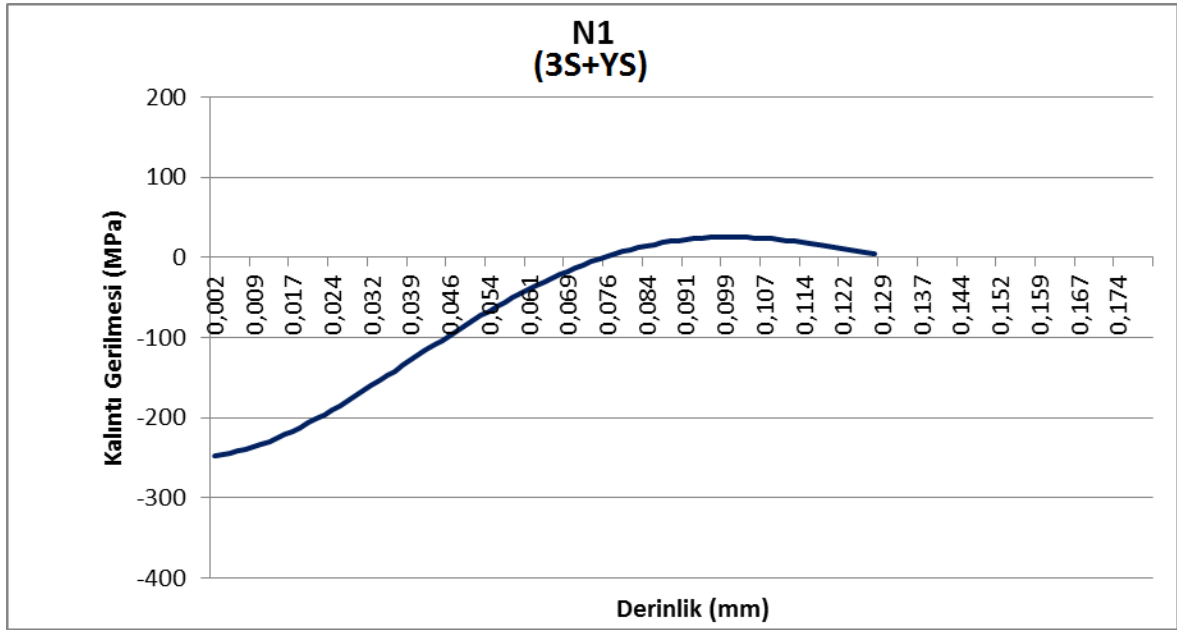
Şekil 7.36. Kaynaklı N5 numunesine ait 5. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu



Şekil 7.37. Kaynaklı N5 numunesine ait 6. derece polinomla elde edilen kalıntı gerilme grafiği ve regresyon doğrusu

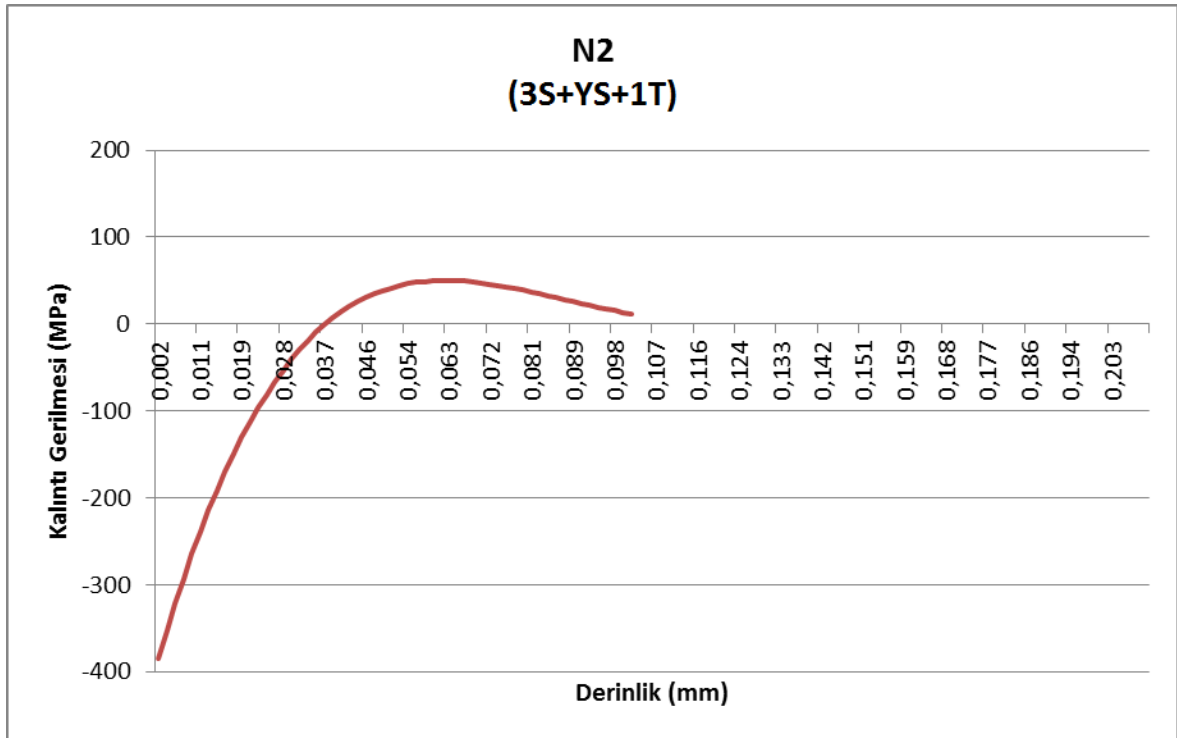
Yukarıda paylaşılan grafiklerden de anlaşılacağı gibi polinom derecesi değiştikçe doğruların değiştiği gözlenmektedir. Elde edilen bulgular sonucunda en ideal grafiklerin 5. dereceden polinomlarla oluşturulmuş kalıntı gerilme grafikleri olduğu anlaşılmıştır.

Sadece sementasyon işlemi yapılan N1 (3S+YS) numunesinin dış yüzeyinde -245 MPa'lık basma yönünde kalıntı gerilmesi, numunenin merkezine gittikçe 62 MPa'lık çekme gerilmesinin oluştuğu görülmektedir.



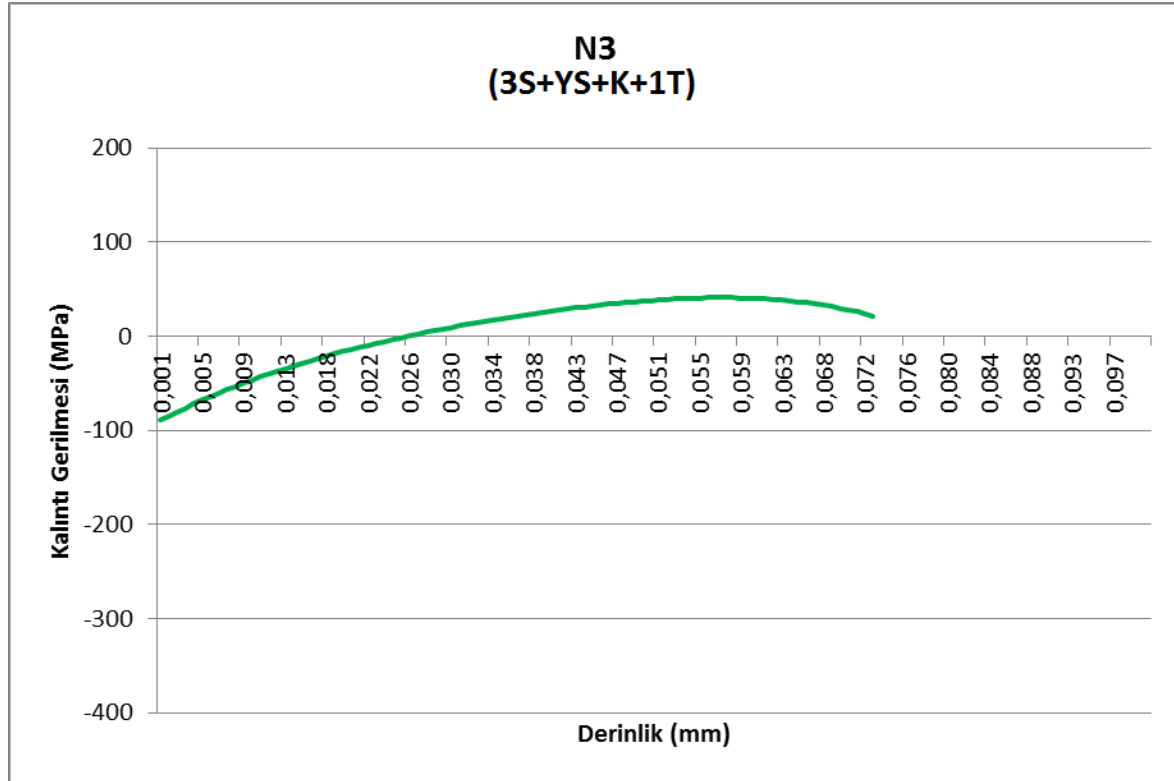
Şekil 7.38. N1 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği

N2 (3S+YS+1T) numunesine bakındığında dış yüzeyde -384 MPa'lık basma gerilmesine karşılık, merkeze gittikçe 50 MPa'lık çekme gerilmesi olduğu görülmüştür.



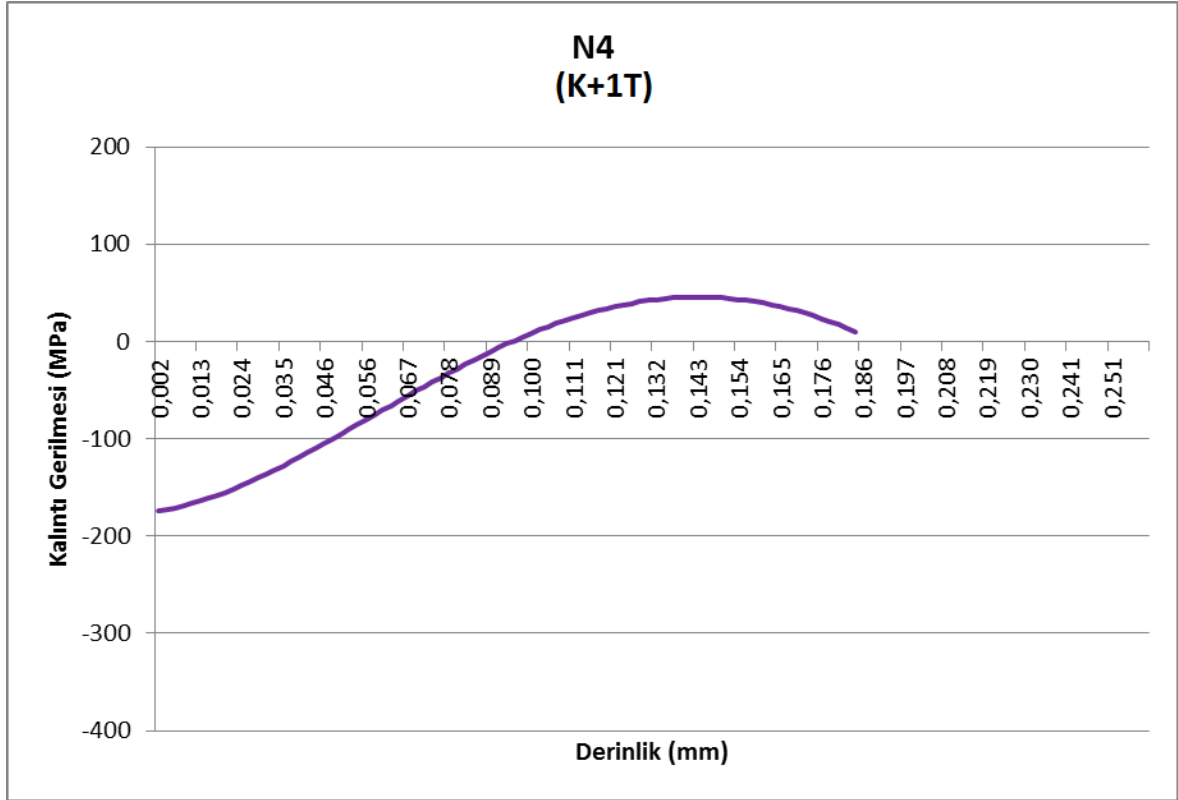
Şekil 7.39. N2 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği

N3 (3S+YS+K+1T) numunesine bakıldığında dış yüzeyde -89 MPa'lık basma gerilmesine karşılık merkeze doğru 40 MPa'lık çekme gerilmesi olduğu görülmüştür.



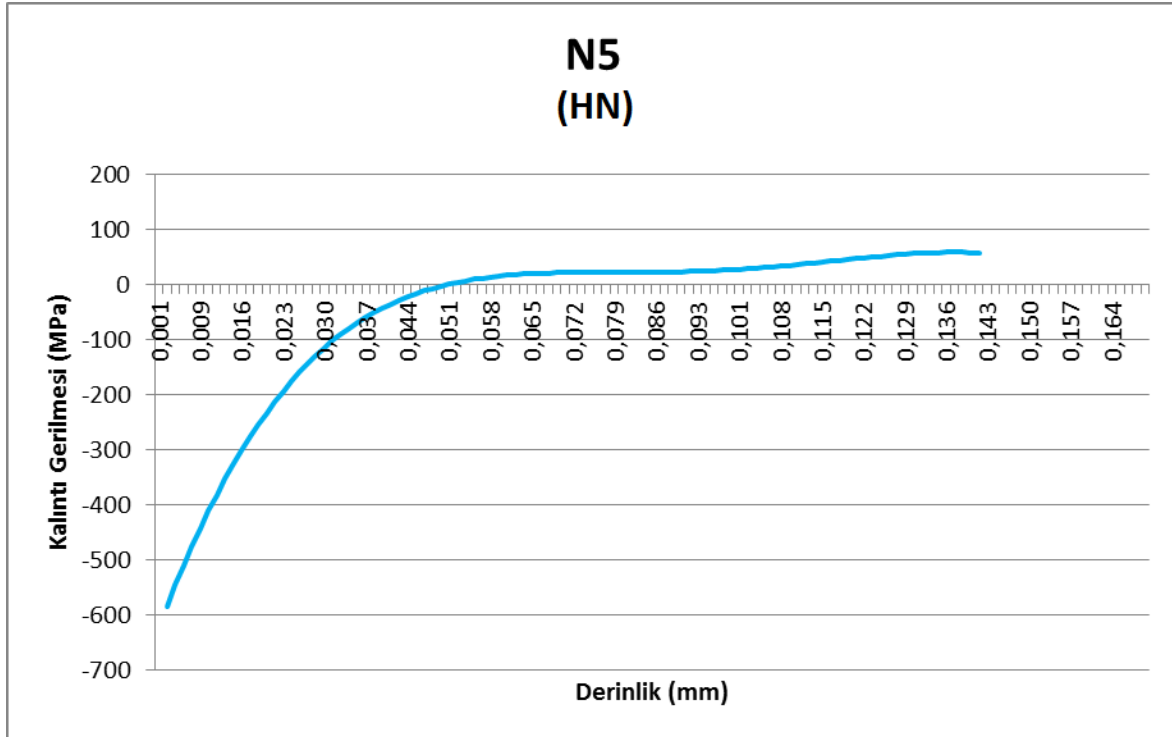
Şekil 7.40. N3 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği

N4 (K+1T) numunesine bakıldığında dış yüzeyde -174 MPa'lık basma gerilmesine karşılık, merkeze gidildikçe 45 MPa'lık çekme gerilmesi olduğu görülmüştür.



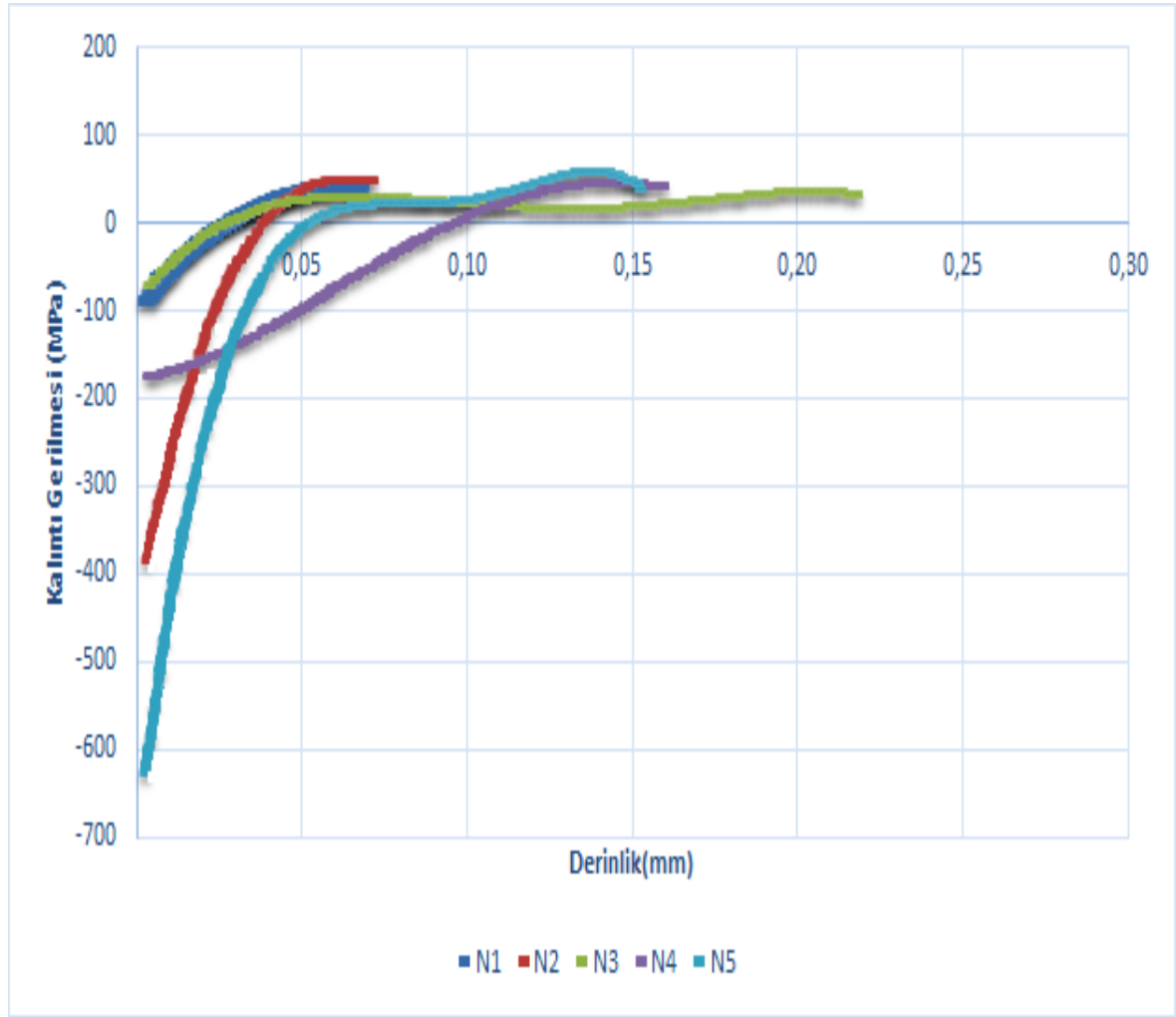
Şekil 7.41. N4 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği

Son olarak N5 (HN) numunesine bakıldığında dış yüzeyde -585 MPa'lık basma gerilmesine karşılık, merkeze doğru 58 MPa'lık çekme gerilmesi görülmüştür.



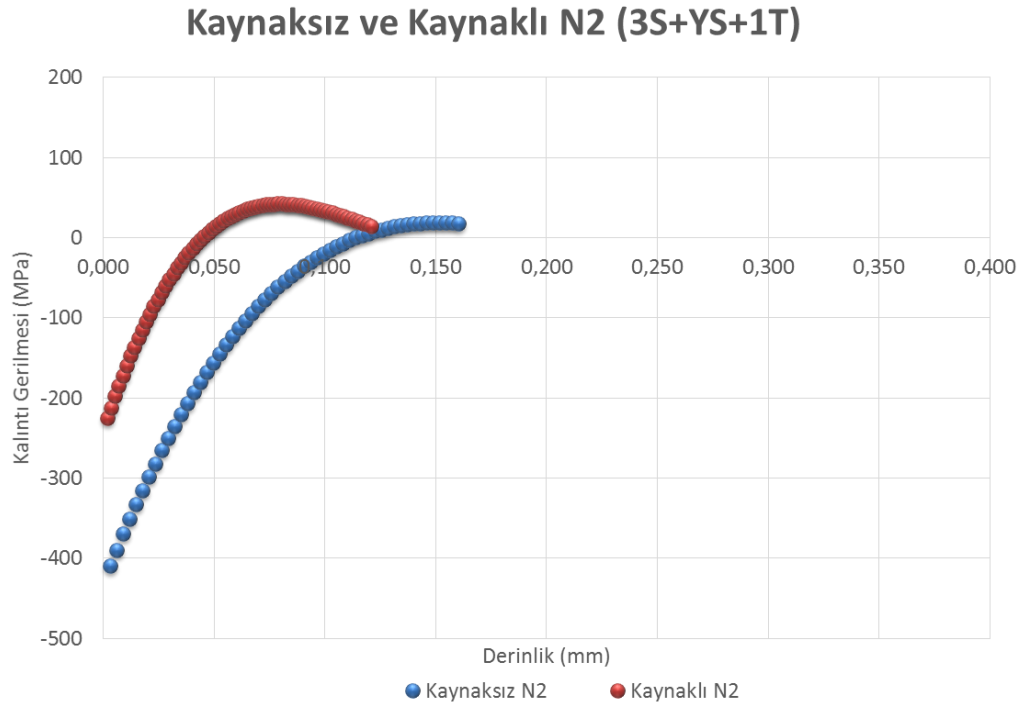
Şekil 7.42. N5 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği

Kalıntı gerilme grafikleri incelendiğinde kriyojenik işlem sonrası (N3, N4) basma gerilmelerinde azalma görülmektedir. Bu durumun kriyojenik işlem sonrası malzemedeki iç gerilmelerin azalması, mikroyapının termodinamik olarak rahatlaması ve atomik hataların azalmasından dolayı olduğu düşünülmektedir [35].

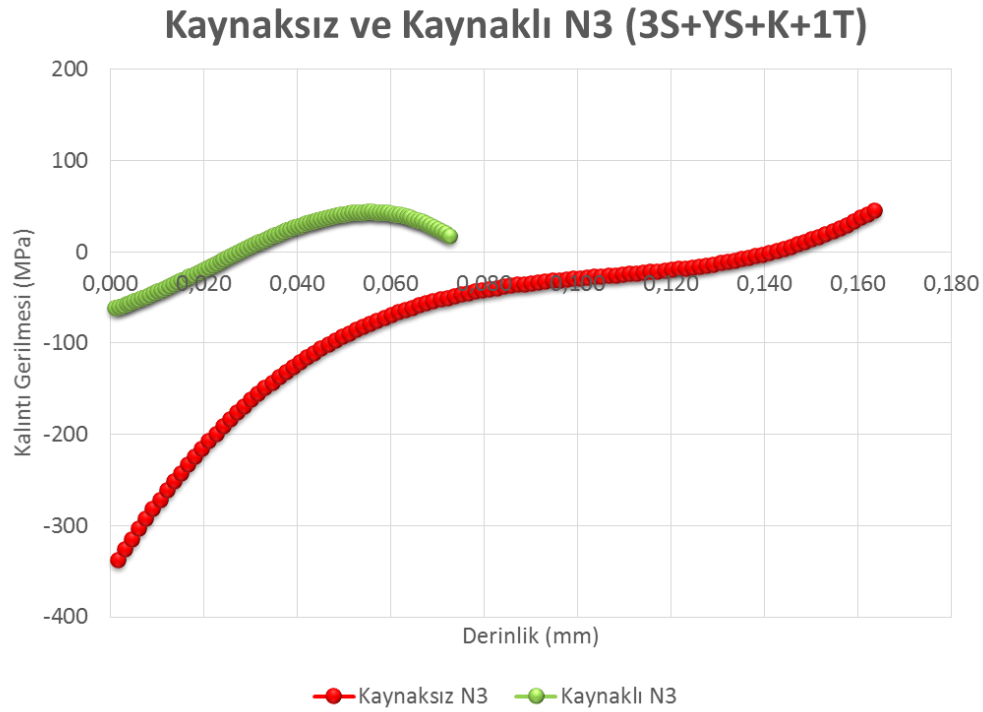


Şekil 7.43. Kaynaklı numunelerin kalıntı gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması

Ayrıca kaynak işlemi yapılmamış ancak kaynaklı numunelerle aynı ısıtma işlemleri görmüş N2 (3S+YS+1T) ile N3 (3S+YS+K+1T) numunelerine ait kalıntı gerilme grafikleri de Şekil 7.44 ve Şekil 7.45'te gösterilmiştir.



Şekil 7.44 Kaynaksız ve kaynaklı N2 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği



Şekil 7.45. Kaynaksız ve kaynaklı N3 numunesine ait kalıntı gerilme grafiği

Kaynaksız N2 ve N3 numunelerine bakıldığında kaynak yapılmış N2 ve N3 numunelerine benzer bir grafik elde edilmiştir. Kaynaklı yapılmış N3 numunesinde olduğu gibi kaynaksız N3 numunesinde de gerilmelerin N2 gerilmelerine nazaran pozitif yöne kaydığı görülmektedir. Bu durumun yukarıda da aktarılan, kriyojenik işlem sonrası malzemedeki iç gerilmelerin azalması, mikroyapının termodinamik olarak rahatlaması ve atomik hataların azalmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

8. YORUM VE SONUÇLAR

1. Takım çeliklerinde özellikle su verme sonrası kalıntı östenit miktarı arttıkça, martenzit dönüşümü zorlaşır ve martenzit miktarının azalması, takip eden temperleme sırasında martenzitte sıkışmış olan C miktarı azalmış olduğu için, Fe_3C parçacıklarının hem oluşma hızı hem de miktarı azalır. Bu durumda çelik istenen sertlik değerlerine çıkamamaktadır. Ancak kriyojenik işlem sırasında ve sonrasında, kalıntı östenit miktarı azalırken, yukarıda bahsedilen olumsuzluklar tersine döner. Martenzit sıfırın altında soğutulduktan sonra malzeme yapısında büzölmeler olur ve kalıntı östenit daha rahat martenzite dönüşür. Sonuç olarak, daha fazla ve daha ince Fe_3C ve/veya ϵ – karbür oluşur. Böylece malzemenin genel davranışı açısından sertlik, aşınma ve yorulma dayanımlarının artması kaçınılmazdır.
2. N2 (3S+YS+1T) ve N3 (3S+YS+K+1T) numunelerine ait mikroyapılara bakıldığında, kalıntı östenit miktarında çok az da olsa bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Aradaki farkın bu kadar az olmasının sebepleri irdelendiğinde, kriyojenik işlemde sonra uzun süre menevişlemenin aradaki farkı kapatmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca literatürde bahsedildiği gibi, kriyojeni işleminde tam olarak ne gibi değişimler olduğu, bazı tahminlere karşın, henüz tam olarak çözümlenmemiştir [18]. Hatta yapılan açıklamalar sıklıkla birbirleriyle çelişki içindedir. Ancak, genelde kriyojenik işleminin soğukluk derecesine bağlı olarak, malzemenin toplam entropi değeri sıfıra doğru azalır ve mikroyapı hatalardan arınarak, daha düzenli ve ince bir tavır sergilemektedir şeklinde açıklamalar bulunmaktadır. Sonuç olarak, kriyojenik işlem sonrası malzemelerdeki değişimlerin nano boyutlarda gerçekleşmesinden dolayı bu değişimleri optik mikroskopla gözlemlemek oldukça güçtür. Bunun için yüksek çözünürlüklü elektron mikroskop incelemeleri yararlı olabilir.
3. Sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin çekme testi verilerine bakıldığında en yüksek çekme dayanımının N3 numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Her ne kadar malzemenin kaynak bölgesi genelde zayıf olarak nitelendirilse de, sementasyon ve bilhassa kriyojenik işlemiyle, kaynaklı bölge güçlenmekte ve kopma kaynak bölgesinin dışında, ana malzeme bölgesi yakınlarında gerçekleşmektedir. Bu duruma yukarıda bahsedilen kriyojenik işlem sonrası kaynak bölgesinde, malzemede daha ince ve

homojenimsi bir yapı oluştuğu sebep olarak gösterilebilir. Kaynak bölgesinde görülen Widmanstatten tipi, iğnems i yapı, kaynak sırasında hızlı ısınma ve soğuma nedeniyle oluştuğu halde, kriyojenik işlemi içyapıdaki iyileştirmeler ve sonrası gerilimleri azalttığı için, kaynak bölgesinin dayanımının özellikle arttığı söylenebilir.

4. Yukarıda bahsi geçtiği gibi, kalıntı gerilme grafikleri incelendiğinde özellikle kriyojenik işlem sonrası yapının daha düzenli olması ve i gerginliklerin azalmasından dolayı kalıntı basma gerilmelerinin azaldığı ve sıfıra yaklaştığı görülmektedir.
5. Kaynak bölgesinde genellikle yapılan tahribatlı kalıntı gerilme çalışmalarında tekniğe bağlı ölçüm hatalarının veya sapmaların çok olduğu söylenmektedir [34]. Bilhassa, katman kaldırmada, kaynak bölgesi ve civarında bir bütün olarak ve kademeli olarak ölçüm yapıldığı için, elde edilen kalıntı gerilmeler bu bölgeyi tüm olarak kapsayan ortalama değerlerdir. Öte yandan, X-ışını kırınım metodu ile yapılan çalışmalarda, bu bölgelerde, kalıntı gerilmelerin kararsız olduğu ve sıkça değiştiği düşünülmektedir. Ölçümleme hatalarının nispeten daha az olması nedeniyle kaynak yapılmış bölgelerde geçerli olan en uygun yöntemin, delik delme metoduyla kalıntı gerilme lme yöntemi olduğu da söylenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Parrich, G. (1977). *Influence of Microstructure on the Properties of Case-Carburised components, part8, post hardening treatments-mechanical*. (No.4). P 107-116.
2. Ertuğ A. (1977). Sürtünme Kaynağı. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 21 (241).
3. Nikolaev G. and Olshansky, N. (1977). *Advanced Welding Processes*, Moscow, 65-81.
4. Yılmaz, M. ve Çöl, M. (2000). Sürtünme Kaynaklı Alüminyum Çelik Bağlantıları, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 41 (488).
5. Yılmaz, M., Çöl, M., ve Acet, M. (2003). Interface Properties Of Aluminum/Steel Friction Welded Components. 154-161.
6. Sulazec A.,(1990), Thermal Effects In Friction Welding, *Int. J. Mech. Sci*, V.32, 467-478.
7. Sluzalec, A. and Sluzalec, A. (1993). Solution of Thermal Problems in Friction Welding. *Int. J. Heat Mass Transfer*, V.36, 1583-1587.
8. Marr S. (2001). Friction Welding Into The Future, *Welding Design and Fabrication*, 74, (34-36)
9. Duffin, F. D. ve Bahrani, A. S. (1973). Friction Behaviour Of Mild Steel Of Friction Welding, 57-73.
10. Yılmaz, M. (1993), *Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi*, Doktora Tezi. YTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
11. Anık, S. ve Gülbahar, B. (1982). Metalik Malzemenin Sürtünme Kaynağı, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 24, (279).
12. Lin, C.B., Mu., C. K., Wu., W.W., Hung., C.H, Marc. (1999). The Effect Of Joint Desing And Volume Fraction On Friction Welding Properties Of A 360/SiC (p) Composites, *Welding Research Suuplement*, P. 100-108.
13. Ates, H. (2008). Investigation of Joining Interface of Dissimilar Steels by Friction Welding Technique, *Metallfizika Noveishie Tekhnologi*, 30, 7.
14. Topbaş, M. A. (1998). *Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı*, İstanbul: Prestij Yayıncılık, 134-168.
15. Van Sciver, S.W. (1986). *Helium Cryogenics*, New York: Plenum Press, 7-9.

16. Kıvak, T. (2012). *Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Ti-6AL-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması*, Yayınlanmış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
17. Arslan, F. K. (2010). *Soğuk iş takım çeliklerinde Kriyojenik işlem derecesinin mekanik özelliklere etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 3-4, 41-53.
18. Cryogenics. (2009) Web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cryogenics>, 10 Mart 2014'de alınmıştır.
19. Yıldız, Y. (2010). *Soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektro erozyon işleme performansına etkileri*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5.
20. Bulgurcu, H. (1996). Kriyojenik soğutma uygulamaları. *Termodinamik Dergisi*, 50, 1-8.
21. Çiçek, A., Kıvak, T., Turgut, Y., Uygur, İ., Ekici, E. (2011). *Derin kriyojenik işlemin kesme kuvvetleri, delik çapları ve takım ömrü üzerine etkileri*. 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, 33-36.
22. Yıldız, Y., Nalbant, M. (2008). A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 947-964.
23. Seah, K. H. W., Rahman, M., Yong, K. H. (2003). Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide cutting tool inserts. *Journal of Engineering Manufacture*, 217, 29-43.
24. Taner, E. (2000 Eylül). Makina parçalarında yeni ıslah yöntemleri. *Mühendis ve Makine*, 488.
25. İnternet: Kriyojenik İşlem, Alper Isıl İşlem. URL: <http://www.alper.com.tr/hizmetler/isil-islem/kriyojenik>. Son Erişim Tarihi: 17.05.2013
26. Tekin, E. (1982). Takım çeliklerinin ısıtma işlemi. *Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi Yayınları*, Ankara, 226, 2228.
27. Kafkas, F. (2001). *Katman kaldırma tekniğine dayalı olarak kalıcı gerilmelerin ölçülmesini sağlayan bilgisayarlı ölçme cihazının tasarımı ve imalatı*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 40-56.
28. Kafkas, F. (2001). *Katman kaldırma tekniğine dayalı olarak kalıcı gerilmelerin ölçülmesini sağlayan bilgisayarlı ölçme cihazının tasarımı ve imalatı*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 40-56.
29. Varol, R., Bedir, F. (1993). Artık Gerilmelerin Önemi ve Yorulma Limiti Üzerine Etkisi. *Mühendis ve Makine*, 34, (406), 38-41.

30. Dülek, E. (2002). *Ç 1020 Malzemedede bilyeli dövme ile oluşturulan yüzeydeki kalıcı gerilmelerin katman kaldırma (Elektro Kimyasal) yöntemiyle incelenmesi*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 55-68.
31. Stephens, I. R., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, O. H. (2000). *Metal Fatigue in Engineering*, New York, John Wily & Sons, 243-266.
32. Lu, J. (1996) *Handbook of Measurement Of Residual Stresses*, Society For Experimental Mechanics, Senlis, The Fairmont Press Inc, 35-48.
33. Dülek, E. (2002). *Ç 1020 Malzemedede bilyeli dövme ile oluşturulan yüzeydeki kalıcı gerilmelerin katman kaldırma (Elektro Kimyasal) yöntemiyle incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 55-68.
34. Edwards, L. (2006). Influence of Residual Stress Redistribution on Fatigue Crack Growth and Damage Tolerant Design, *Materials science*, 524-525.
35. Nirmal, S., Kalsi, Sehgal, R. (2010). Cryogenic Treatment of Tool Materials, *Materials and Manufacturing Processes*, 1077-1100.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KÖYLÜOĞLU, Bilal
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 13.03.1985, Batman
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (0505) 816 41 43
 Faks : -
 e-mail : bilalkoyluoglu@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /F.B.E.	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / T.E.F./ Metal Eğt.	2010
Lise	Batman Anadolu Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	Pampak Sos. Hiz. İnş. San. Tic.	İş Güvenliği Uzmanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Ateş, H., Özdemir, A.T., Demirkaya, Z., Kafkas, F., Köylüoğlu, B., Toktaş, İ., (2014). Effects of Cryogenics and Case Hardening on Mechanical Behavior of Friction Welded 8620 Steel Parts. **3rd International Conference on Welding Technologies and Exhibition (ICWET'14)**, Manisa.

Hobiler

Bilgisayar, Futbol, Kitap

DİZİN

A

akma · vi, ix, xiii, 8, 9, 11, 12, 14, 21, 55, 56, 57

B

basma · 4, 65, 66, 67, 68, 69, 74

Ç

Çekme testi · 8, 9, 11, 13, 33, 40, 50, 51, 55, 56, 57

D

dayanım · iv, 49

G

gerilme · 49, 50, 51, 52

K

kalıntı · iv, xi, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 13, 19, 23, 26, 27, 31, 32, 34, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 54

kopma · ix, xi, 17, 31

kriyojenik · iv, xi, xii, xiii, 1, 2, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 26, 27, 29, 30, 44, 46, 48, 49, 51

M

Mikroyapı · 31, 41, 42, 43, 44, 45, 69, 72, 73

S

Sementasyon · iv, x, xiii, 1, 2, 15, 16, 17, 18, 19, 26, 42, 44, 49

sertlik · iv, xiii, xv, 2, 10, 13, 26, 27, 29, 41, 42, 44, 46, 49

Sürtünme Kaynağı · iv, vii, viii, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 28, 29, 41, 47, 49, 50

T

temperleme · 1, 30, 31, 47, 51, 56, 73

V

Vickers · 32, 46



GAZİ GELECEKTİR...