

**T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOMEKANİK HADDELEME YÖNTEMİ İLE
LEVHA ÜRETİMİ VE KAREKTERİZASYONU**

KADİR KUNDAKÇI.O

**YÜKSEK LİSANS BİTİRME TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
BÖLÜMÜ**

**GEBZE
2010**



T.C.

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOMEKANİK HADDELEME YÖNTEMİ İLE
LEVHA ÜRETİMİ VE KAREKTERİZASYONU**

KADİR KUNDAKÇI.O

**YÜKSEK LİSANS BİTİRME TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
BÖLÜMÜ**

**TEZ DANIŐMANI
Yrd. Doç. Dr. YAHYA K. TÜR**

GEBZE

2010



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JÜRİ ONAY FORMU

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN) : Yrd.Doç.Dr. Yahya K. TÜR

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Mehmet TARAKÇI

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Hasan KURTARAN

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen/...../..... tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans öğrencisi **Kadir KUNDAKÇI.O**'un çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu/...../..... tarih ve .../..../..... sayılı kararıyla **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: TERMOMEKANİK HADDELEME YÖNTEMİ İLE LEVHA ÜRETİMİ VE KAREKTERİZASYONU

YAZARIN ADI: KADİR KUNDAKÇI.O

ERDEMİR'DE yeni ürün geliştirme faaliyetleri kapsamında Termomekanik haddeleme yöntemi ile sıcak haddelenmiş yapı çelik kalitelerinden S355 J0 J2 K2 ve S355 J2W için normalize ısıl işlemlili ve normalize ısıl işlemsiz levhaların mekanik özelliklerinin birbirine yaklaştırılması ve normalize ısıl işlemsiz levhaların düşük sıcaklıktaki darbe dirençlerinin artırılması çalışmaları yapılmıştır.

Termomekanik haddeleme sırasında haddeleme parametreleri ve alaşım elementlerinin levha mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Genel olarak levhaların termomekanik haddeleme yöntemiyle haddelenmesi ve mikro alaşım elementlerinin ilavesi ile oda sıcaklığındaki çekme ve akma mukavemetleri özellikle sıfır altı sıcaklıklardaki darbe enerjisi değerleri artmış ilave olarak yığın soğutma tipi seçilerek % uzama değerleri geliştirilmiştir.

Deneme çalışmaları sırasında her bir adım ele alınarak, haddeleme parametreleri ve alaşım elementlerinin değişimleri ile levha mekanik özelliklerinin standartları sağlayacak şekilde üretim hedefine varılmıştır.

Bütün denemelerde üretilen levha numunelerine çekme testi yapılarak akma, çekme ve % uzama mukavemet değerleri alınmış 0, -20 ve -40 santigrat derecelerde darbe enerjisi testleri yapılarak değerleri kaydedilmiştir. Bu sonuçlara paralel olarak haddeleme parametrelerinin seçilmesi ve kimyasal bileşimin optimize edilerek yeni ürünlerin geliştirilmesi sağlanmıştır.

SUMMARY

TITLE OF THESIS : PLATE PRODUCTION AND CHARACTERIZATION WITH THERMOMECHANICAL ROLLING METHOD

NAME OF THE AUTHOR: KADIR KUNDAKCI.O

In the scope of new production development facilities in ERDEMIR, tasks have performed via thermo mechanical rolling method by drawing near to the mechanical properties of plates with and without normalization process for hot rolled products of structural steels which of S355 J0 J2 K2 and S355 J2W qualities and increasing low temperature impact strength of plates without normalization.

Effects of alloying elements and rolling parameters on plate mechanical properties during thermomechanical rolling are examined. Generally addition of micro alloying elements and using thermomechanical rolling method under the normal circumstances tensile, yield strength and especially subzero impact energy were increased. In addition to these, % elongation value was improved selecting plate pile cooling method.

During the test stages all steps are handled particularly to obtain mechanical properties of rolled plates in the appropriate standards by rolling parameters and micro alloying variation.

Trials were examined and registered by tensile tests of produced plate specimens as well as tensile, yield and % elongation strengths. Beside impact energy test values on the 0, -20 and -40 celsius degrees were recorded. According to these results, rolling parameters and chemical compositions are optimized and new product grades are obtained.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında düşünce ve önerilerinden faydalandığım tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Yahya K. TÜR ile değerli hocam Sayın Prof. Dr. Orhan ŞAHİN'E çok teşekkür ederim.

Türkiye'de sanayi ve üniversite işbirliğinin gelişmesi için üstün çaba gösteren ve bu doğrultuda birçok Erdemir mühendisinin yüksek lisans ve doktora yapmasını teşvik eden, Şirketimiz Erdemir Yöneticilerini ve özellikle Genel Müdürümüz Sayın Oğuz ÖZGEN başta olmak üzere, erdemirde termomekanik haddeleme yöntemi ile levha üretimi deneme ve ticari üretim süreçlerini başlatan ARGE ve Kalite Metalürji Başmüdürü Sayın Abdullah GÜNDÜZ'E, sıcak haddeleme prosesleri konusunda çok değerli ve yönlendirici katkılar sağlayan, Sıcak Haddehaneler Başmüdürü Sayın Hakan KÜNÜÇEN'E, 1.Sıcak Haddehane Müdürü Sayın Aydın DUMAN ile tüm Levha Haddehanesi ve AR-GE ve Kalite Metalürji Müdürlüğü çalışanlarına deneme çalışmaları sırasında yardımcı, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen AR-GE ve Kalite Metalürji Mühendisi Sayın Abdullah SEZER'E, 1.Sıcak Haddehane Müdürlüğündeki tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca, sevgili annem Asiye ve babam Halit KUNDAKÇI.O'ya, sabrını ve desteğini hiç eksik etmeyen sevgili eşim Nejla ve kızım Esila'ya teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xv
1.GİRİŞ	1
2. SICAK HADDELEMENİN TANIMI VE LEVHA ÜRETİM PROSESİ	3
2.1. Sıcak Haddeleme	3
2.1.1. Tavlama	3
2.1.2. Haddeleme	4
2.2. Sıcak Haddelemiş Yassı Çelik Ürün Kaliteleri	4
2.3. Levha Üretim Prosesi	8
2.3.1. Çelik Üretim Prosesi	8
2.3.1.1. Bazık Oksijen Fırını	8
2.3.1.2. İkincil Metalürji İşlemleri	8
2.3.1.3. Sürekli Döküm Tesisleri	9
2.3.2. Levha Haddeleme Prosesi	9
2.3.2.1. Slab Hazırlama	10
2.3.2.2. Slab Isıtma Fırını	11
2.3.2.3. Descale (Tufal Atıcı) Sistemi	11
2.3.2.4. Levha Haddeleme	12
2.3.2.5. Sıcak Doğrultma	15
2.3.2.6. Soğutma Yatağı	15
2.3.2.7. Soğuk Makas	16
3. TERMOMEKANİK YÖNTEM İLE LEVHA HADDELEME	17
3.1. Levha Haddeleme de Termomekanik İşlemler	17
3.1.1. Geleneksel Sıcak Levha Haddele İşlemi	17
3.1.2. Kontrollü Levha Haddeleme İşlemi	17

3.1.2.1. Normalizeli Levha Haddeleme	18
3.1.2.2. Termomekanik Kontrollü Levha Haddeleme	19
3.1.2.3. Hızlandırılmış Su ile Soğutma (ACC)	20
3.1.2.4. Su Verilmiş Ve Menevişlenmiş(QST)	20
3.2. Termomekanik Levha Haddeleme Pratikleri	21
3.2.1. Termomekanik Haddeleme Prosesinin Aşamaları	21
3.2.1.1. Slab Tavlama	22
3.2.1.2. Kaba Haddeleme	22
3.2.1.3. Bekletme Aşaması	23
3.2.1.4. Nihai Haddeleme	25
3.2.2. Termomekanik Haddeleme de Mikro Yapı ve Özellikleri Etkileyen Parametreler	27
3.2.3. Termomekanik Haddelemede Mikro Yapısal Dönüşümler	28
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
4.1. Sürekli Döküm Pratikleri	32
4.2. Levha Haddeleme Pratikleri	32
4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması	34
4.4. Mekanik Testler	36
4.5. Mikro Yapı Karakterizasyonu	37
4.6. Ultrasonik Levha Testi	37
5. DENEY SONUÇLARI	38
5.1. Kimyasal Bileşim Değişim Sonuçları	38
5.2. Mekanik Test Sonuçları	40
5.2.1. S355 J0 J2 K2 Kalite Çekme Testi Sonuçları	40
5.2.2. S355 J2W Kalite Çekme Testi Sonuçları	50
5.2.3. S355 J0 J2 K2 Kalite Darbe Deneyi Sonuçları	55
5.2.4. S355 J2W Kalite Darbe Deneyi Sonuçları	59
5.3. Metalografik İnceleme Sonuçları	61
5.3.1. S355 J0 J2 K2 Kalite Levhaların Mikro Yapıları	63
5.3.2. S355 J2W Kalite Levhaların Mikro Yapıları	63
5.4. Ultrasonik Test (ULT) Sonuçları	64
6. DENEY SONUÇLARININ İRDELEMESİ	67
6.1. Alaşım Elementlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi (Ni, Nb, V,C)	67

6.1.1. Nikelin (Ni) % Uzamaya Etkisi	67
6.1.2. Niyobyumun Akma ve Çekme Mukavemetine Etkisi	69
6.1.3. Vanadyum(V), Molibden (Mo) ve Karbon'un (C) Darbe Mukavemetin Etkisi	71
6.2. Yığın Soğutmanın Mekanik Özelliklere Etkisi	72
6.3. TCR Bekletme Sıcaklığı ve Kalınlığının Mekanik Özelliklere Etkisi	74
6.4. Mikro Yapının Mekanik Özelliklere Etkisi	75
7. GENEL SONUÇLAR	77
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	83
EKLER	
EK-1 LEVHA HADDELEME PARAMETRELERİ	
EK-2 LEVHA MEKANİK TEST SONUÇLARI	
EK-3 MİKRO YAPILAR	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BOF	: Bazık Oksijen Fırını
HAGC	: Hydraulic Automatic Gauge Control
WRB	: Work Roll Bending System
TCR	: Sıcaklık Kontrollü Haddeleme Sonrası Havada Soğutma
N	: Normalize Isıl İşlemi
AR	: As-Rolled
NR	: Normalizeli Levha Haddeleme
TMCR	: Termomekanik Kontrollü Haddeleme
ACC	: Accelerated Cooling
QST	: Quenching and Self-Tempering
YK	: Yeniden Kristalleşme
SM	: Soğutma Yatağında Havada Soğutma
YS	: Soğutma Yatağından İstife Alınarak Havada Soğutma
ULT	: Ultrasonik Levha Testi
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
EN	: European Standard
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CE	: Karbon Eşleniği
J	: Joul
S	: Yapı Çelikleri
J0	: 0 °C 27 Joul Darbe Mukavemeti
J2	: -20 °C 27 Joul Darbe Mukavemeti
K2	: -20 °C 40 Joul Darbe Mukavemeti
W	: Atmosferik korozyona dayanımı
A_{r3}	: $\gamma \rightarrow \alpha$ dönüşümünün başladığı sıcaklık
γ	: Östenit
α	: Ferrit

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Çelik üretimi prosesi akış şeması.	8
2.2. Erdemir levha haddehanesi yerleşim planı.	10
2.3. Slab yüzey kusurları.	10
2.4. Slab fırını şematik görünüşü.	11
2.5. Altlı üstlü bir çift tufal atıcı kolektörü.	11
2.6. Levha hadde ve dik hadde şematik gösterimi.	12
2.7. HAGC Silindirleri ile kalınlık kontrolü.	13
2.8. Haddeleme bending operasyonu şekilsel gösterimi.	13
2.9. Düz haddeleme.	14
2.10. Haddeleme öncesi tek çevirme.	14
2.11. Haddeleme öncesi ve ara pasoda çift çevirme.	14
2.12. TCR aynı anda birden fazla levha haddeleme metodu.	15
2.13. Sıcak doğrultma makinesi.	15
2.14. Doğrultma prosesi.	15
2.15. Soğutma yatağı şematik gösterimi.	16
2.16. Soğuk makas şematik gösterimi.	16
3.1. Normalize ısıtma işlemi.	18
3.2. Sıcaklık kontrollü levha haddeleme.	20
3.3. Termomekanik haddeleme aşamalarının şematik gösterimi.	21
3.4. Normalizeli ve termomekanik haddelemeli mikro yapılar.	27
3.5. Termomekanik haddelemede mikro yapılar.	28
3.6. Termomekanik haddelemede mikro yapısal dönüşümlerinin oda sıcaklığına kadar soğuması sırasındaki değişimi.	28
4.1. Deneme uygulamalarının şematik gösterimi.	33
4.2. Taslak levhadan deney numunelerinin alınması.	35
4.3. Deney numunelerinin hazırlanması ve kodlanması.	36
5.1. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha akma mukavemet değerleri.	41
5.2. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha çekme mukavemet değerleri.	41
5.3. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.	42
5.4. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha akma mukavemet değerleri.	43
5.5. 3. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha akma mukavemet değerleri.	43

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha çekme mukavemet değerleri.	44
5.7. 3. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha çekme mukavemet değerleri.	44
5.8. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.	45
5.9. 3. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.	46
5.10. 4. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha akma mukavemet değerleri.	47
5.11. 5. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha akma mukavemet değerleri.	47
5.12. 4. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha çekme mukavemet değerleri.	48
5.13. 5. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha çekme mukavemet değerleri.	48
5.14. 4. Deneme(S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.	49
5.15. 5. Deneme(S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.	49
5.16. 1. Deneme (S355 J2W) levha akma mukavemet değerleri.	50
5.17. 1. Deneme (S355 J2W) levha çekme mukavemet değerleri.	51
5.18. 1. Deneme (S355 J2W) levha % uzama değerleri.	51
5.19. 2. Deneme (S355 J2W) levha akma mukavemet değerleri.	52
5.20. 2. Deneme (S355 J2W) levha çekme mukavemet değerleri.	52
5.21. 2. Deneme (S355 J2W) levha % uzama değerleri.	53
5.22. 3. Deneme (S355 J2W) levha akma mukavemet değerleri.	54
5.23. 3. Deneme (S355 J2W) levha çekme mukavemet değerleri.	54
5.24. 3. Deneme (S355 J2W) levha % uzama değerleri.	55
5.25. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.	55
5.26. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.	56
5.27. 3. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.	57
5.28. 4. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.	57
5.29. 5. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.	58
5.30. 1. Deneme (S355 J2W) levha darbe deney sonuçları.	59
5.31. 2. Deneme (S355 J2W) levha darbe deney sonuçları.	60
5.32. 3. Deneme (S355 J2W) levha darbe deney sonuçları.	60
5.33. S355 J2W 3. Deneme (3-1 no'lu levha) 16 mm kalınlık için normalizesiz/ normalizeli mikro yapı fotoğrafları.	62
5.34. S355 J2W 3. Deneme (1-2 no'lu levha) 30 mm kalınlık için normalizesiz / normalizeli mikro yapı fotoğrafları.	62
5.35. S355 J2W 3. Deneme (2-1 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz / normalizeli mikro yapı fotoğrafları.	62

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.36. Levha kesme yüzeylerinde görülen merkezi çatlaklar.	64
5.37. Kimyasal bileşimin yüzey çatlaklara etkisi	65
6.1. S355 J0 J2 K2 denemelerinde Ni'lin % uzamaya etkisi	68
6.2. S355 J2W denemelerinde Ni'lin % uzamaya etkisi	69
6.3. S355 J0 J2 K2 denemelerinde Nb'un akma/çekme mukavemetine etkisi	69
6.4. S355 J2W denemelerinde Nb'un akma/çekme mukavemetine etkisi	70
6.5. S355 J0 J2 K2 denemelerinde kimyasal bileşimin darbe mukavemetine etkisi	71
6.6. S355 J2W denemelerinde kimyasal bileşimin darbe mukavemetine etkisi	72
6.7. Yığın soğutmanın % uzamaya etkisi	73
6.8. Bekletme sıcaklığının mekanik mukavemetlere etkisi	74
6.9. Levha kalınlığı ile tane boyutu ve akma/çekme mukavemet ilişkisi	75
Ek-3.1. S355 J0 J2 K2, 1. Deneme (4-3 no'lu) levha 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapı fotoğrafları.	99
Ek-3.2. S355 J0 J2 K2, 1. Deneme (1-3 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	100
Ek-3.3. S355 J0 J2 K2, 2. Deneme (4-2 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	101
Ek-3.4. S355 J0 J2 K2, 2. Deneme (5-3 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	102
Ek-3.5. S355 J0 J2 K2, 3. Deneme (2-2 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	103
Ek-3.6. S355 J0 J2 K2, 3. Deneme (6-2 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	104
Ek-3.7. S355 J0 J2 K2, 4. Deneme (7-1 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	105
Ek-3.8. S355 J0 J2 K2 4. Deneme (9-1 no'lu levha) 75 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	106
Ek-3.9. S355 J0 J2 K2, 5. Deneme (4-2 no'lu levha) 20 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	107
Ek-3.10. S355 J0 J2 K2, 5. Deneme (5-1 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	108
Ek-3.11. S355 J0 J2 K2, 5. Deneme (9-1 no'lu levha) 75 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.	109
Ek-3.12. S355 J2W, 1. Deneme (2-1 no'lu) levha 50 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.	110
Ek-3.13. S355 J2W, 2. Deneme (3-2 no'lu levha) 16 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.	110

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Ek-3.14. S355 J2W, 2. Deneme (4-1 no'lu levha) 20 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.	111
Ek-3.15. S355 J2W, 2. Deneme (1-1 no'lu levha) 30 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.	111
Ek-3.16. S355 J2W, 2. Deneme (5-1 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.	112
Ek-3.17. S355 J2W, 2. Deneme (2-1 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.	112
Ek-3.18. S355 J2W, 3. Deneme (3-2 no'lu levha) 16 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.	113
Ek-3.19. S355 J2W, 3. Deneme (4-1 no'lu levha) 20 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.	114
Ek-3.20. S355 J2W, 3. Deneme (1-1 no'lu levha) 30 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.	115
Ek-3.21. S355 J2W, 3. Deneme (5-1 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.	116
Ek-3.22. S355 J2W, 3. Deneme (2-2 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları	117
Ek-3.23. S355 J2W, 3. Deneme (6-2 no'lu levha) 60 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.	118

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
5.1 Sıcak haddelenmiş yapı çeliği hedef kimyasal bileşimi (%).	38
5.2 S355 J0 J2 K2 deneme üretimleri kimyasal bileşimleri (%).	38
5.3 S355 J2W deneme üretimleri kimyasal bileşimleri (%).	39
5.4 Ortalama tane boyutu ve mekanik özellikler.	61
7.1 Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri S355 J0 J2 K2 yeni çelik kalitesi.	79
7.2 Atmosferik korozyona dirençli sıcak haddelenmiş yapı çeliği S355 J2W yeni çelik kalitesi.	79
Ek-1.1. 1. Deneme (355 J0 J2 K2) haddeleme parametreleri.	84
Ek-1.2. 2. Deneme (355 J0 J2 K2) haddeleme parametreleri.	85
Ek-1.3. 3. Deneme (355 J0 J2 K2) haddeleme parametreleri.	86
Ek-1.4. 4. Deneme (355 J0 J2 K2) haddeleme parametreleri.	87
Ek-1.5. 5. Deneme (355 J0 J2 K2) haddeleme parametreleri.	87
Ek-1.6. 1. Deneme (355 J2W) haddeleme parametreleri.	88
Ek-1.7. 2. Deneme (355 J2W) haddeleme parametreleri.	88
Ek-1.8. 3. Deneme (355 J2W) haddeleme parametreleri.	89
Ek-2.1. 1. Deneme (355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları.	90
Ek-2.2. 2. Deneme (355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları.	91
Ek-2.3. 3. Deneme (355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları.	93
Ek-2.4. 4. Deneme (355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları.	94
Ek-2.5. 5. Deneme (355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları.	95
Ek-2.6. 1. Deneme (S355 J2W) mekanik test sonuçları.	96
Ek-2.7. 2. Deneme (S355 J2W) mekanik test sonuçları.	97
Ek-2.8. 3. Deneme (S355 J2W) mekanik test sonuçları.	98

1. GİRİŞ

Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri DIN EN 10 025 standardına uygun olarak yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerden üretilmektedir. Bu çelikler için istenilen akma dayanımı, darbe direnci ve kaynaklanabilirliği sağlayabilmek amacıyla çok düşük ölçekteki alaşım elementi ilaveleri ve sıcak haddeleme sırasında kullanılan termomekanik haddeleme yöntemi veya haddeleme sonrası normalize ısı işlem yapılması ile üretilmektedir.

Sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinin kimyasal bileşimleri ve termomekanik haddeleme işlem parametreleri istenilen akma dayanımı, darbe direnci ve kaynaklanabilirliğe bağlı olarak belirlenir. İstenilen nihai özellikler belirlenecek çelik kimyasal bileşiminin yaratacağı etki içerisinde gerçekleştirilebilecek termomekanik haddeleme ile elde edilebilmektedir. Bu nedenle istenilen nihai özelliklerin sağlanmasında oldukça kompleks olan “kimyasal bileşim ve haddeleme işlem parametreleri” nin optimizasyonunun sağlanması önem arz etmektedir. Endüstriyel çapta üretim aşamasına geçilmeden önce üretilecek malzemenin “kimyasal bileşim-haddeleme davranışı-mekanik özellik” ilişkisinin belirlenmesi ve mevcut haddeleme hattında üretim parametrelerinin oluşturulması gerekmektedir.

Bu çalışmada, DIN EN 10 025 standardında S355 olarak tanımlanan sıcak haddelenmiş yapı çelik kalitelerinden S355 J0 J2 K2 ve atmosfer korozyonuna dayanımı iyileştirilmiş S355 J2W çelik levha kalitesinin ERDEMİR’DE üretilmesi planlanmaktadır. Üretilmesi planlanan S355 sıcak haddelenmiş çelik kalitesi, min.342 N/mm² akma mukavemetine, min. 479 N/mm² çekme mukavemetine, min. %19 uzama ve -20°C’de min. 27 Joul darbe direncine sahip olmalıdır. Bu mekanik özellikler temel alaşım elementleri ilavesi ile kimyasal bileşimin optimizasyonu ve sıcak haddeleme sırasında uygulanacak termomekanik haddeleme ile sağlanması hedeflenmiştir.

Bir deneme üretimi için minimum 120 ton malzeme ergitilerek ara ürün elde edilmesi ve bu malzemenin daha sonra proses gereği gerekli aşamalardan geçirilmesi gerekmektedir. Proses maliyeti çok yüksek olan çeliğin standart bir üretim haline gelebilmesi mevcut teknolojik alt yapı ile üretilbilirliğinin en düşük maliyetle ve

sorunsuz bir şekilde üretilebilmesi için kimyasal bileşimin optimize edilmesi, belirlenen kimyasal bileşimdeki malzemenin sıcak haddeleme sırasındaki davranışının belirlenmesi ve iç yapısal özelliklerinin (tane boyutu, mevcut fazlar, boyut ve dağılımları vs.) çıkarılması gerekmektedir.

Tüm proses çalışmaları sonucunda mekanik özellikler (çekme ve darbe testi) belirlenecek, iç yapısal karakterizasyon çalışmaları (tane boyutu, mevcut fazlar, boyut ve dağılımları) yapılacaktır. Elde edilen bulgular değerlendirildikten sonra uygun proses koşulları ortaya çıkarılacak ve seri üretim yapılacaktır.

Bu çalışma sonucunda ortaya çıkacak en önemli sonuç ülkemize termomekanik haddeleme yöntemi ile kalın levha üretim teknolojisinin kazandırılmasıdır. Halen üretimi yapılamayan bu malzemeleri üretmekle ülkemizde hem döviz kazancı sağlanacak, hem de önemli bir teknolojik üstünlük elde edilecektir.

2. SICAK HADDELEMENİN TANIMI VE LEVHA ÜRETİM PROSESİ

Yassı hadde mamullerinin üretiminde kullanılan çelik yarı mamulü slabdır. Bugünkü teknolojilerde slab sürekli döküm tesislerinde üretilir. Slab genel olarak 100-300 mm kalınlıkta ve 800-2300 mm genişlikte ve 3-45 ton ağırlıkta bir yarı mamuldür. Slabın tavlanaarak haddelenmesi ile başlıca iki cins yassı haddelenmiş ürün elde edilir. Bunlar levha ve sıcak haddelenmiş rulo şerit ürünleridir.

Levha, yassı hadde mamulleri içinde tanım ve sınıflandırması en karmaşık olan malzemelerdir. Genel olarak kalınlığı 5 mm üzerinde olan ve ileri-geri (reversing) haddelerde üretilen sıcak yassı mamuller sınıfına girmektedir. Ancak, gerek ağır sanayide ve gerekse gemi yapımında levhada istenen özellikler yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Bu bakımdan levha üreten tesislerde özel ikmal ve kontrol hatları gerekmektedir diğer taraftan sıcak haddelenmiş ruloların açılması, doğrultulması ve yüzey iyileştirilmesi ile daha az önemli maksatlar için kullanılan rulodan levha üretimi yapılmaktadır (Koç, 2002).

2.1. Sıcak Haddeleme

2.1.1. Tavlama

Bir malzemenin tavlanaması en genel şekilde “malzemenin belirli bir sıcaklıkta bir süre tutulması” olarak tanımlanabilir. Tavlama işlemi genelde, sıcak işlem için malzemenin özelliklerini değiştirme, gerilme giderme, tane yapısını değiştirme veya malzemede farklı mikro yapıların oluşumunu sağlama gibi çeşitli amaçlarla yapılır. Metalürjik işlemlerde kullanılan fırınlar tav fırınları ve ısı işlem fırınları şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

Tav fırınları, plastik şekil verme işlemlerinde malzemeye istenen mukavemet ve sünekliği kazandırmak amacıyla kullanılırlar. Tavlama işlemlerinde en önemli işlem parametreleri sıcaklık ve ısıtma süresidir. Tavlama için belirli bir sıcaklık

seçildiğinde ısıtma süresi, malzemenin kesitinde istenilen sıcaklığın uniform olarak sağlandığı süre olarak belirlenmelidir (Wusatowski, 1963).

Uygun bir tavlama yapmak için: Atmosfer kontrollü fırın kullanmak, fırın sıcaklık kontrollünü doğru yapmak, sıcaklık bütün kesitte aynı olacak şekilde bir ısıtma hızı kullanmak, tufalleşme (oksitlenme) kaybı ve yakıt sarfiyatı en az olacak şekilde tavlama, homojen sıcaklık için gerekli en kısa zamanda tavlama.

2.1.2. Haddeleme

Haddeleme işlemi malzemeyi eksenleri birbirine paralel ve zıt yönlü dönen merdaneler arasından geçirek yapılan plastik şekil verme işlemidir. Haddeleme sırasında merdaneler aynı hızda ve birbirine zıt yönde dönerlerken, merdaneler arasından geçen malzeme istenilen şekli alır. Plastik şekillendirmede metal bir malzemenin aldığı karakteri belirleyen en önemli etken olarak yeniden kristalleşme anındaki sıcaklık bölgesidir. İşlem sıcaklığına göre, haddelermeyi sıcak ve soğuk haddeleme olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür (Wusatowski, 1963).

Malzemenin yüksek oranlarda plastik deformasyona uğratabileceği sıcak haddeleme ile çeliklerde ingot, slab, blum ve kütük gibi yarı ürünler ile levha, sac, çubuk, ray ve profiller gibi çeşitli ürünler elde edilir (Wusatowski, 1963).

Haddeleme sırasında malzemenin deformasyonu, haddelenen malzeme ile merdane arasında meydana gelen sürtünme sonucu oluşan yüzey kayma gerilmeleri ve merdanelerin malzemeyi sıkıştırması ile sağlanan radyal basma gerilmeleri ile sağlanır. Sürtünme kuvvetleri aynı zamanda malzemenin merdaneler arasında ilerlemesini sağlar. Bu işlemle haddelenen malzemenin kesiti küçülürken boyunda uzama ve genişliğinde bir miktar artma meydana gelir (Wusatowski, 1963).

2.2. Sıcak Haddelenmiş Yassı Çelik Ürün Kaliteleri

Endüstriyel alanda faaliyet gösteren ve her biri farklı istek ve beklenti içerisinde olan müşteri taleplerine karşılık vermek için sıcak haddelenmiş çelik ürünlerinin uygulama alanları geniş bir alana yayılmaktadır.

Mekanik özellikleri garanti edilerek, süneklik ve tokluk optimizasyonu sağlanan genel yapı çelikleri, çoğunlukla inşaat makineleri ve iş makineleri imalatında, genel konstrüksiyon levhalarında, kara ve demiryolu araçları imalatında, depolama tankları ve konteyner imalatında kullanılmaktadır (Erdemir, 2007).

Yassı çelik mamullerin çoğunun kalitesi ya da kimyasal kompozisyonu "saf demir" den (demir dışındaki tüm elementlerin toplamı % 0,3'den daha az) %50'ye kadar alaşım elementi içeren yüksek alaşımlı paslanmaz çeliklere kadar uzanır. Ancak, yassı mamullerin %75'i yaklaşık şu kompozisyondadır:

Karbon : % 0,03-0,12

Mangan : % 0,20-0,60

Fosfor : % max. 0,04

Diğer : mümkün olduğunca az

Çeliklere belirli özellikleri kazandırmak amacıyla, çeliğe karbon haricinde element ilavesi yapılır. Çelik üretim prosesinde elementler temel olarak aşağıdaki gruplarla sınıflandırılmaktadır (Yüksel, 2002).

Temel Alaşım Elementleri: İstenilen metalürjik özellikleri sağlamak amacıyla rafine çeliğe potada ya da benzeri sistemlerde ilave edilen C, Mn ve Si elementleri bu grupta yer almaktadır.

C (Karbon)

Ötektoid sıcaklığında meydana gelen östenit \longrightarrow ferrit + Fe_3C (Demir karbür) reaksiyonu sonucunda oluşan Fe_3C ve dolayısıyla C çeliğin sertlik özelliğini sağlayan temel elementtir. Karbon çeliğin çekme mukavemetini artırırken, şekillendirilebilirliğini olumsuz yönde etkiler. Ancak bu etki uygun ısıl işlemlerle çoğu kez giderilebilmektedir.

Mn (Mangan)

Çelik mikro yapısında karbür bileşiklerinin özellikle de demir karbür (Fe_3C) oluşumu çeliğin yüksek metalürjik performansını sağlamada anahtar rolü üstlenir. Mangan çelikte karbür oluşturuçu olarak rol alır. Çelikte mangan kükürtten kaynaklanan sıcak yırtılmayı önlemede etkilidir. Mangan çeliğin sertleşme derinliği, tokluk ve çekme mukavemetini iyileştirmede kullanılmakla birlikte şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir.

Si (Silisyum)

Si tane küçültücü özelliğe sahip değildir. Çekme mukavemetini artırır ancak silikat enklüzyonları oluşumundan dolayı çeliğin işlenebilirliğini olumsuz yönde etkiler. Silisyum, geçirgenlik özelliğini ve elektriksel direnci artırıp manyetik özellikleri iyileştirdiğinden transformatör ve jeneratörlerde kullanılan elektrik çeliklerinde temel alaşım elementi olarak kullanılmaktadır.

İkincil Alaşım Elementleri: Çeliğin özelliklerini ve performansını geliştirmek amacıyla temel alaşım elementleriyle birlikte potaya ya da benzeri sistemlerde ilave edilen Cu, Ni, Cr, Mo, Al, V, Nb, Ti, B, Co, ve W elementleri bu grupta yer almaktadır (Yüksel, 2002).

Cu (Bakır)

Çelik içerisinde tamamen çözünen bakır çelikte herhangi bir oksit, sülfür ya da karbür fazı oluşturmaz. Katı çözültü içerisindeki bakır ferrit fazını sertleştirir ve dolayısıyla şekillendirilebilirliği azaltır. Bakır, atmosferik korozyon direncini artırmada kullanılmaktadır. Oksitlerin yüzeye yapışmasını artırdığından asitleme prosesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Ni (Nikel)

Nikel sertleşme derinliğini özelliğini iyileştirmektedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda tokluk özelliğini artıran nikel, kaynaklanabilirlik, plastik deformasyon ve yorulma özelliğini geliştirmektedir. Yüzey sertleştirilebilirliğini artıran nikel korozyon direncini de geliştirir.

Mo (Molibden)

Güçlü bir karbür oluşturunca olan molibdenin sertleşme derinliği üzerindeki etkisi büyüktür. Katı çözültü içerisindeki molibden ferrit fazını sertleştirir ve dolayısıyla şekillendirilebilirliği azaltır. Perlit gibi çeşitli mikro yapıların oluşmasını önleyerek ısıl işlem kontrolünü iyileştirir. Yüksek sıcaklık korozyon direncini, tokluk ve yorulma özelliklerini geliştirebilmektedir.

V (Vanadyum)

Etkili bir tane küçültücü (Östenit tane büyümesi sınırlamakla) olan vanadyum, güçlü bir karbür ve nitrür oluşturunca. Akma mukavemetini, tokluğu ve yüksek sıcaklıkta malzemenin sertliğini iyileştiren vanadyum, temperleme sırasında çeliğin

"soften" olmasına karşı direnci önemli ölçüde artırmaktadır. Azotla bir araya gelerek uzama yaşlanması özelliğini zayıflatır.

Nb (Niyobyum)

Etkili bir tane küçültücü (Östenit tane büyümesi sınırlamakla) olan Niyobyum, güçlü bir karbür oluşturunucudur. Akma-çekme mukavemetini ve yüksek sıcaklıkta malzemenin sertliğini iyileştiren niyobyum, azotla bir araya gelerek uzama yaşlanması özelliğini zayıflatır.

Kalıntı Elementler: Bu kapsamda değerlendirilen elementler çelik üretim şartlarında tamamen sıvı çelik banyosunda kalırlar. Herhangi bir kalite için çelikte olması gereken minimum değerleri söz konusu olmamakla birlikte, çelik spesifikasyonuna göre maksimum değer sınırlaması olabilmektedir (Yüksel, 2002).

Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri levha üretiminin önemli kısmını içermektedir. Ayrıca bu tezin konusunu da teşkil eden termomekanik haddeleme yöntemi ile levha üretimine yönelik yapılan çalışmalarda sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinden S355 J0 J2 K2 ve S355 J2W kaliteleri esas alınmıştır.

Sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinin üretim şartları, kimyasal kompozisyon içerikleri, mekanik mukavemet sınır aralıkları, müşteri teslim şartları gibi özellikleri DIN EN 10 025-2006 standartlarında aşağıda verilen 5 ana başlık altında ayrıntılı olarak açıklanmaktadır (Türk Standartları Enstitüsü (TSE), 2006).

- Alaşımız yapı çelikleri, (S185, S235, S275, S355, S450, E295, E335 ve E360).
- Normalize Isıl İşlemlili (N) / Normalizeli haddeleme (NR) ile normalize edilmiş ince taneli yapı çelikleri (S275 N, S355N, S420N ve S460N).
- Termomekanik olarak haddelenmiş ince taneli yapı çelikleri (S275 M, S355M, S420M ve S460M).
- Atmosferik korozyona dayanımı geliştirilmiş yapı çelikleri (S235 J2W, S355 J2W).
- Suverilmiş ve temperlenmiş durumdaki yüksek akma dayanımlı yapı çelikler (S460QL, S500 QL).

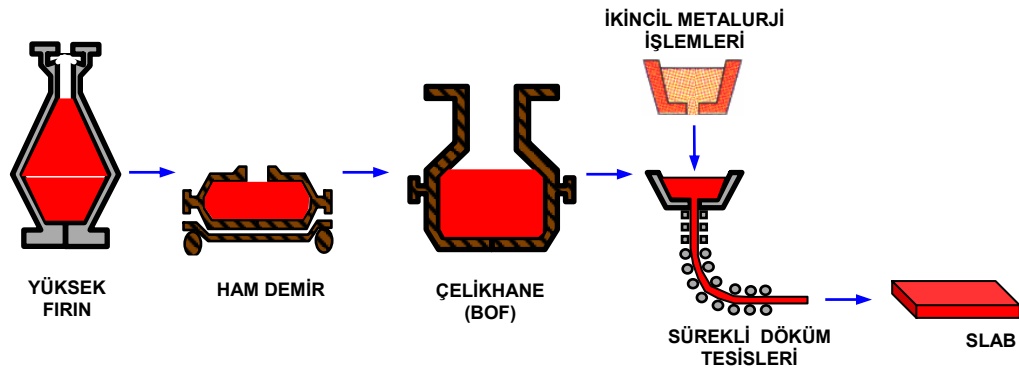
2.3. Levha Üretim Prosesi

2.3.1. Çelik Üretim Prosesi

2.3.1.1. Bazık Oksijen Fırını

Çelik üretim işlemleri Bazık Oksijen Fırını'nda (BOF) gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.1). Yüksek fırın da üretilen ham demir, BOF'a şarj edilir içerisinde saf oksijen üflenir ve sonra rafinasyon işlemine tabi tutularak çeliğe dönüştürülür. Ham demir, BOF işleminden önce desülfürizasyon işlemine tabi tutulur ve kükürt miktarı % 0.080 - 0.050'den % 0.03 - 0.008'e düşürülür. Bu işlemde ham demir içerisinde yüksek oranda bulunan C, Si, Mn, P ve S gibi temel elementler oksidasyon neticesinde düşürülerek istenilen seviyelere çekilir. Oksijen üfleme sonrası oksijen aktivitesi çok yüksek olan çeliğin Al ya da Si ilavesi deoksidasyonu sağlar (Özdabak, 2004).

Mikro alaşımlı çelikler az miktarda V, Ti, Nb ve Mo içerirler. Bu çeliklerde çelik kalitesine bağlı olarak % 0.60 - 1.60 Mn da bulunur. Ferro-alaşım formunda olan mikro alaşım elementleri, fırından potaya döküm yapılırken potaya ilave edilirler.



Şekil 2.1. Çelik üretim süreci akış şeması (Erdemir, 2007).

2.3.1.2. İkincil Metalürji İşlemleri

Bu işlemler, alaşımlanmış sıvı çeliğin özelliklerinin geliştirilmesi için gerekli iyileştirme faaliyetlerini içerir. İkincil Metalürji İşlemleri'nde üç istasyon vardır. Bunlar sırasıyla Pota Fırını, Kimyasal Isıtma İstasyonu ve RH-Vakum Tesisi'dir (Özdabak, 2004).

a) Pota Fırını:

Sıvı çelik, hem kimyasal açıdan hem de sıcaklık açısından heterojendir. Bu nedenle, çelik ikinci bir pota işlem istasyonunda argon gazı ile karıştırılarak sıcaklık homojenizasyonu ve kimyasal homojenizasyon işlemlerine tabi tutulur .

b) Kimyasal Isıtma İstasyonu:

Kimyasal Isıtma İstasyonu'nda Al (Alüminyum) ve Si (Silis) elementleri oksijenle yakılır. Ayrıca, kalıntı yüzdürme ve Ca (Kalsiyum) ilavesi ile inklüzyon küreselleştirme işlemleri yapılır. Kalıntı küreselleştirme işleminin yeterli bir derecede olması için 20-30 ppm Ca değerinin sağlanması gereklidir .

c) RH-Vakum Tesisi:

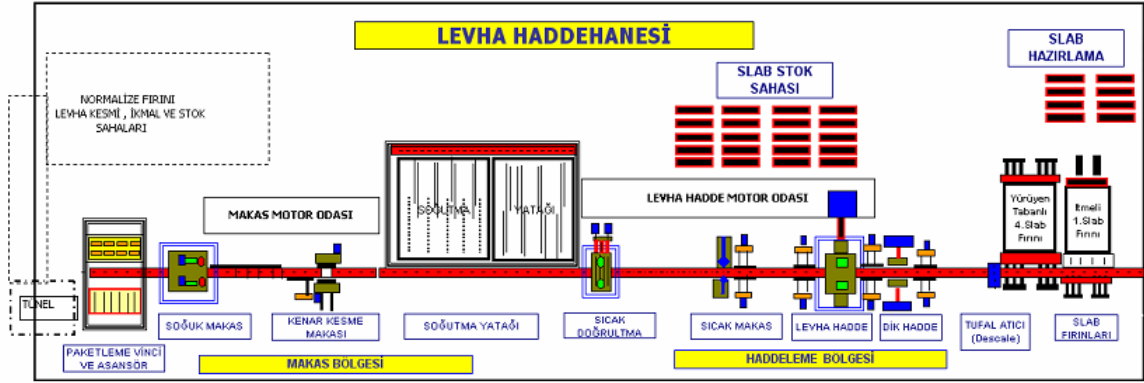
Vakum İstasyonu ise, çok düşük oranda C (Karbon), N (Azot) ve H (Hidrojen) içeren çeliklerin üretiminin yapıldığı, tamamen farklı ve ayrı bir çelik üretim prosesidir. Sıvı çelik, bir vakum kazanı içerisinde ve çok düşük vakum basınçlarında (1 milibar) işlem görür .

2.3.1.3. Sürekli Döküm Tesisleri

İkincil Metalürji İstasyonları'nda sıcaklığı ve kimyasal kompozisyonu ayarlanan sıvı çeliğin hareketli bir kalıp boşluğundan geçirilip dinamik olarak katılaştırıldıktan sonra slab haline dönüştürüldüğü tesislerdir. Potadaki sıvı çelik slabın fiziksel olarak oluşmasını sağlayan kalıp boşluğuna dökülmeden önce drenajının düzenlendiği ve kalıntıların yüzdürüldüğü tandiş denilen ikinci bir refrakter kaba refrakter bir tüp vasıtası ile dökülür. Sıvı çelik bir nozul vasıtası ile tandiştan kalıp boşluğuna akıtılır ve slab olarak katılaştırılması sağlanır (Koç, 2002).

2.3.2. Levha Haddelme Prosesi

Gemi imalatında kullanılan levhalar, yapılarda (köprü, bina, üst geçit, raylı sistemler gibi) kullanılacak levhalar, kazan imalatında kullanılan bir kısım levhalar, aşınmaya dayanıklı levhalar, savunma sanayinde kullanılan levhalar, makine ve imalat sanayisinde kullanılan uzun dayanımlı levhalar, yüksek mukavemetli ve uzun ömürlü özel alaşımlı levhalar. Şekil 2.2'de Erdemir levha haddehanesi genel yerleşim planı örneği verilmiştir.

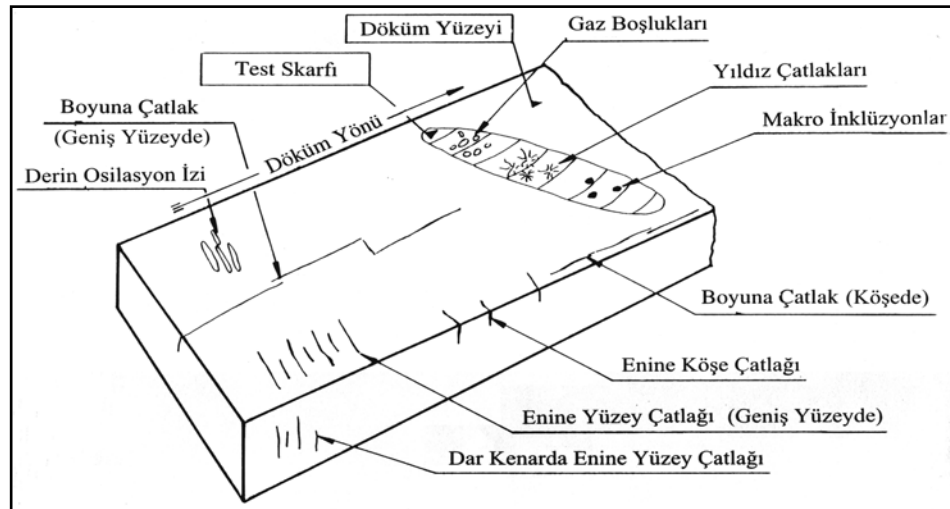


Şekil 2.2. Erdemir levha haddehanesi yerleşim planı.

2.3.2.1. Slab Hazırlama

Slab hazırlama, slabların kesilmesi ve slablara skarf yapılması işlemini kapsar. Her bir levha üretimi için levhanın kalınlık, genişlik ve uzunluğuna bağlı olarak slab ölçülerinin belirlenmesi gerekir. Levha üretimi için yarı mamul olarak slab kullanılır. Sürekli dökümden gelen slab veya levha hadde de haddelenerek elde edilen Levha Slabı önceden tespit edilen ölçülere kesilmesi ile kullanılır .

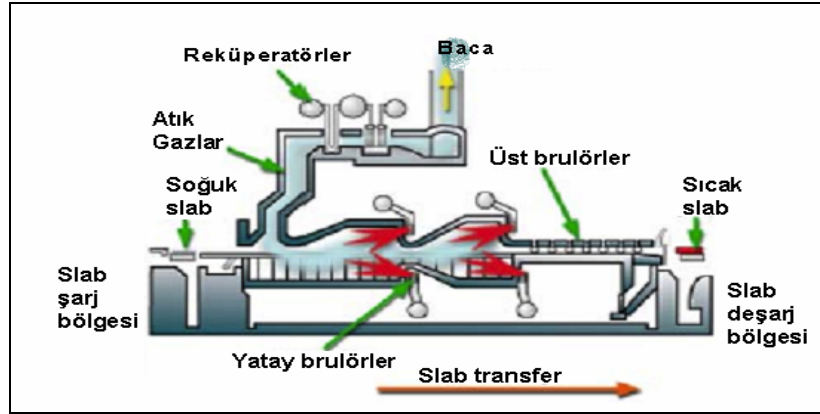
Skarf prosesi çelik slab yüzeyinden ince bir tabakanın (2-3 mm) oksijen ile ergitilerek atılması işlemidir. Slab yüzeyinden doğrudan görülemeyen kusurları açığa çıkarmak ve şekil 2.3’ de gösterildiği gibi slab yüzeyinde oluşan kusurları gidermek için slablara skarf işlemi uygulanır .



Şekil 2.3. Slab yüzey kusurları.

2.3.2.2. Slab Isıtma Fırını

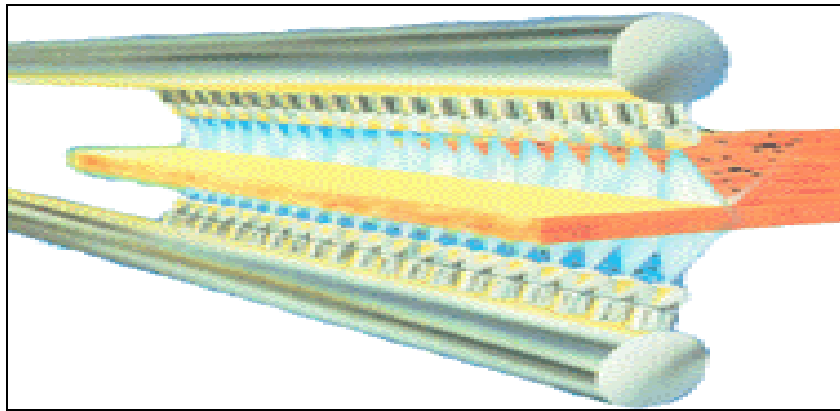
Levha Haddehanesi için kullanılan slab fırını (Şekil 2.4) itmeli tip olup, üç bölgedir. Isıtma kapasitesi soğuk şarj için 13 ton/saat, sıcak şarj için 150 ton/saattir. Haddelenecek slablar üretim planlama tarafından belirli esaslar çerçevesinde hazırlanan haddelene programına göre itici ünitesi tarafından fırına şarj edilir. Slab fırınında yaklaşık 1200-1250°C aralığına kadar tavlanan slablar haddelenmek üzere transfer masasına düşürülür (Pamuk ve ark., 2008).



Şekil 2.4. Slab fırını şematik görünüşü.

2.3.2.3. Descale Sistemi (Tufal Atıcı)

Tavlama sonrası slab fırınından düşen slab\slabcığın alt ve üst yüzeyine 220 bar basınçlı su ile fırın tufalı atılması; ayrıca Levha Hadde giriş ve çıkışında bulunan descale sistemi ile haddelene sırasında pasolar arasında ve alt ve üst yüzeyine 220 bar basınçlı su ile ikincil tufalın atılması için kullanılır. Tüm hederlerin uçlarında belli aralıklarla şekil 2.5'de gösterildiği gibi sıralanmış özel nozullar mevcuttur.



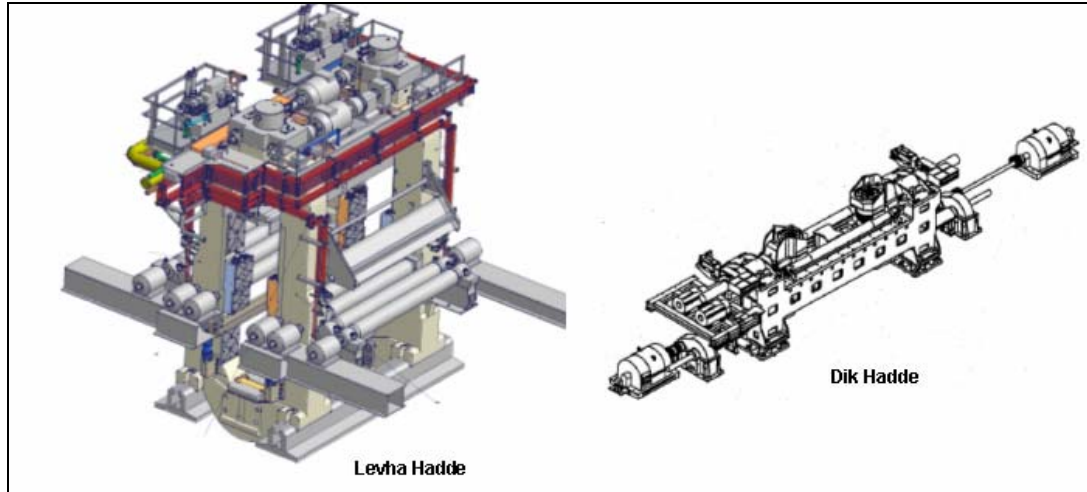
Şekil 2.5. Altı üstlü bir çift tufal atıcı kolektörü.

Descale (yüksek basınçlı su) ile su verme pratikleri:

- Tufal atıcı ünitesinde tavlama sonrası bütün levha slablarına
- Haddeleme sırasında ilk 2 paso da bütün slablara
- Dik Haddeleme işlemi verilen pasolardan sonra
- Termomekanik haddeleme sırasında bekletme sonrası pasolarda.

2.3.2.4. Levha Haddeleme

1250 °C kadar 2-3 saat süre ile tavlanan slablar transfer masaları yardımı ile levha hadde bölgesine taşınır. Tavlama sırasında slab yüzeylerinde oluşan oksit tabakası basınçlı su püskürterek temizlenir. Daha sonra dik hadde ile genişlik, levha hadde ile de kalınlık ezmesi (slabın ileri-geri geçirilmesi) yapılır. Levha hadde ve dik hadde şekil 2.6’da şematik gösterimleri verilmiştir (Pamuk ve ark., 2008).

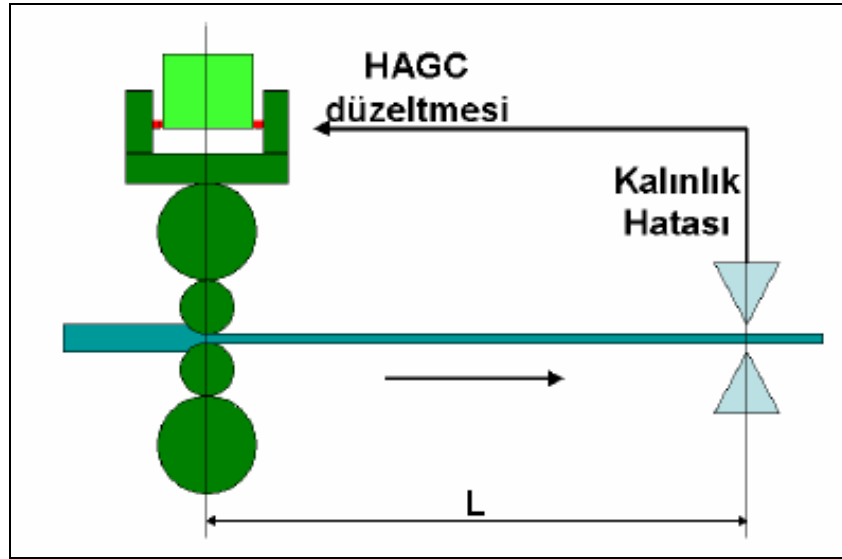


Şekil 2.6. Levha hadde ve dik hadde şematik gösterimi.

A- Levha Hadde Kalınlık Kontrolü

a) Otomatik Kalınlık Kontrol (Automatic Gauge Control, HAGC) Sistemi

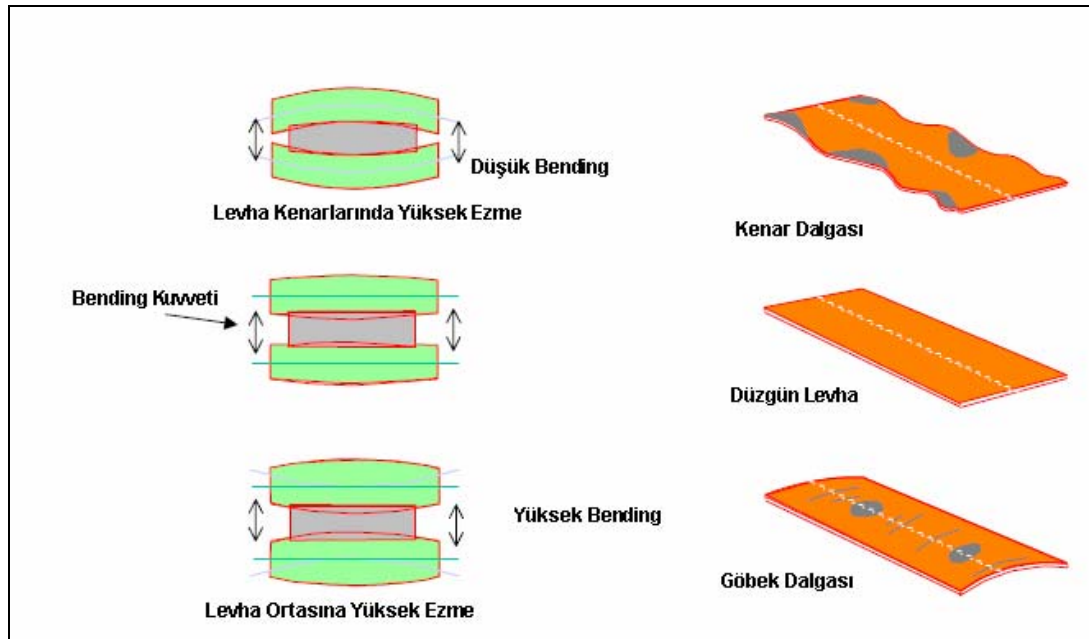
Haddeleme esnasında, otomasyon sistemleri tarafından belirlenen levha kalınlık değerini sağlamak için ağırlıklı olarak “otomatik kalınlık kontrolü” hadde gövdesi üzerinde her iki tarafa yerleştirilmiş iki adet elektro-mekanik tahrikli vida ve onun altına, destek merdane yatakları üzerine yerleştirilmiş iki adet hidrolik silindir ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.7’de HAGC sistemi çalışması şematik gösterimi verilmiştir (Keskinçılıç, 2006).



Şekil 2.7. HAGC Silindirleri ile kalınlık kontrolü.

b) Levha Hadde Bending Sistemi (WRB)

Haddelenen levhanın enine kesiti boyunca düzgün bir kalınlık dağılımı, sağlanması amacıyla kullanılır. Haddeleme sırasında bending sisteminin çalışmasına göre levhaya etkileri şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Haddeleme bending operasyonu şekilsel gösterimi.

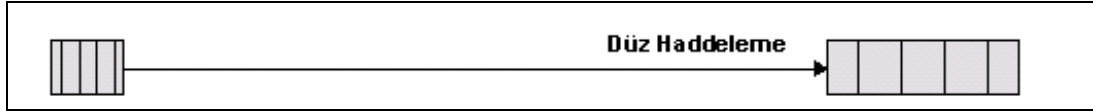
B- Levha Haddeleme Yöntemleri

Levha haddede, sipariş genişliğine bağlı olarak çevirmesiz, çevirmeli ayrıca sıcaklık kontrollü levha haddeleme (TCR) olarak ayrılır (Kundakçı, 2007).

a) Düz Levha Haddelme

Levha genişliği slab genişliğinden büyük olmayan levhalar bu yöntem ile haddelenir. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi düz olarak haddelenen slabın kalınlığı levha hadde de düşürülür slab da oluşan yayılma dik hadde tarafından verilen ezme ile kontrol altına alınır .

Çevirme yok (düz haddelme), slab düz olarak haddelenir.

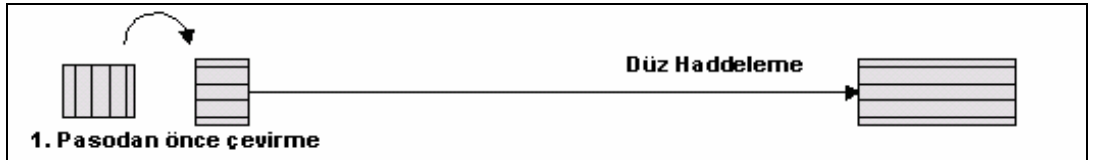


Şekil 2.9. Düz haddelme.

b) Çevirmeli Levha Haddelme

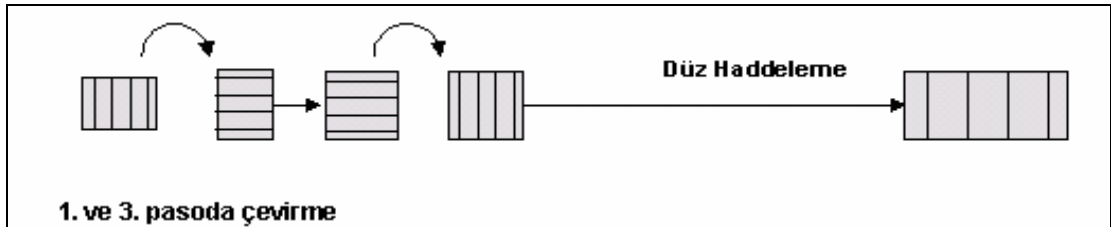
Haddelenecek levha genişliği slab genişliğinden büyük ise slabın boyu, levhanın genişliği olacak şekilde hadde giriş ve çıkışında çevirmeli masalarda çevrilerek haddelenme işlemidir. Haddelme sırasında levhanın kalınlığı Otomatik Kalınlık Kontrol (HAGC) sistemi ile levha hadde de levhanın genişliği dik hadde ile kontrol edilir .

1- Şekil 2.10'da gösterildiği gibi Slab 1. Pasodan önce levha çevrilir, slab şarj uzunluğu, levha genişliği olarak haddelenir.



Şekil 2.10. Haddelme öncesi tek çevirme.

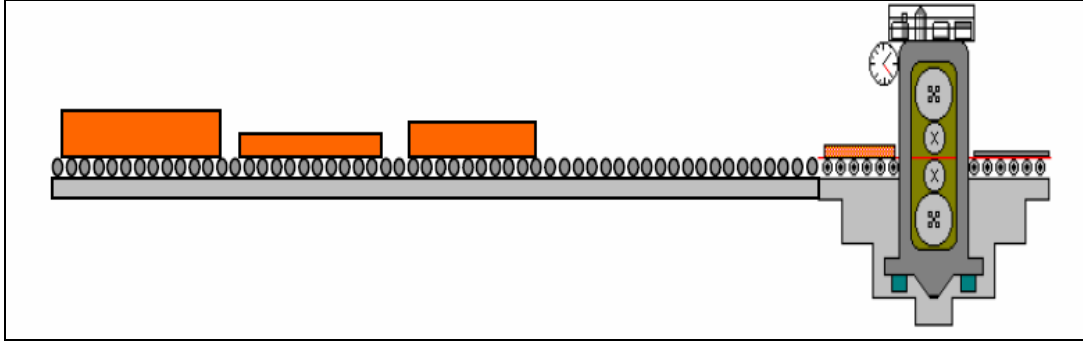
2- Şekil 2.11 'de gösterildiği gibi Slab 1. pasodan önce çevrilir genişliği boyunca haddelenir, 2. çevirme gelir ve hademeye devam edilir.



Şekil 2.11. Haddelme öncesi ve ara pasoda çift çevirme.

c) Sıcaklık Kontrollü Haddeme (TCR)

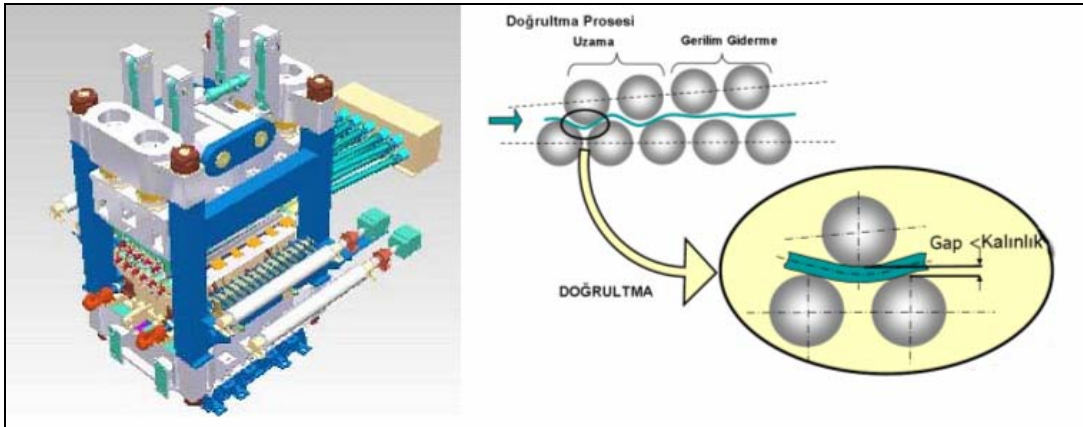
Düz veya çevirmeli haddeme yöntemlerinden biri kullanılarak, kaba haddeme, bekletme ve nihai haddeme olmak üzere 3 aşamadan oluşan kontrollü haddemedir. Bu metot ile aynı anda birden fazla levha haddeme işlemi şekil 2.12 'de gösterildiği gibi yapılabilir.



Şekil 2.12. TCR aynı anda birden fazla levha haddeme metodu.

2.3.2.5. Sıcak Doğrultma

Doğrultma Makinesi şematik gösterimi şekil 2.13 'de verilmiştir. Haddelenen levhalarda oluşan şekil bozukluğunun giderilerek yüzey düzgünlüğünün sağlanması için (Şekil 2.14) doğrultma makinesi kullanılır. Şekil bozukluğu olarak, kenar dalgası göbek dalgası, haddeme sırası oluşan olumsuzluklar sonucu sıcak levhada oluşan yüzey bozukluklarını sıralayabiliriz (Pamuk ve ark., 2008).



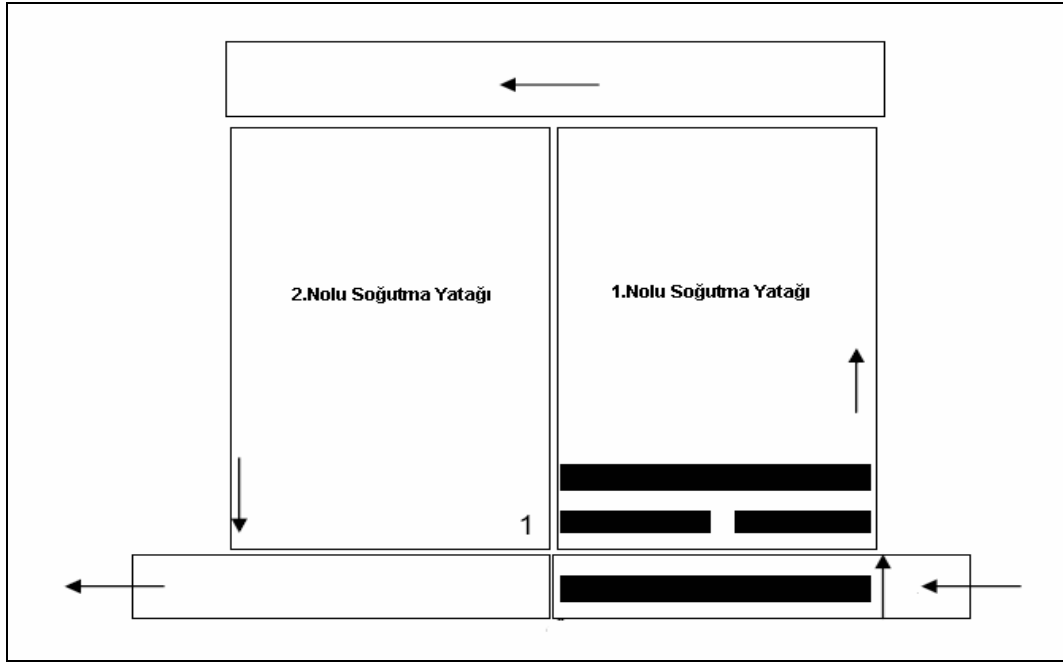
Şekil 2.13. Sıcak doğrultma makinesi.

Şekil 2.14. Doğrultma prosesi.

2.3.2.6. Soğutma Yatağı

Haddelenmiş ve doğrultulmuş levhaların, nihai kenar ve boy kesme işleminden önce soğutulması amacıyla kullanılır. Şekil 2.15'de şematik gösterimi verildiği gibi,

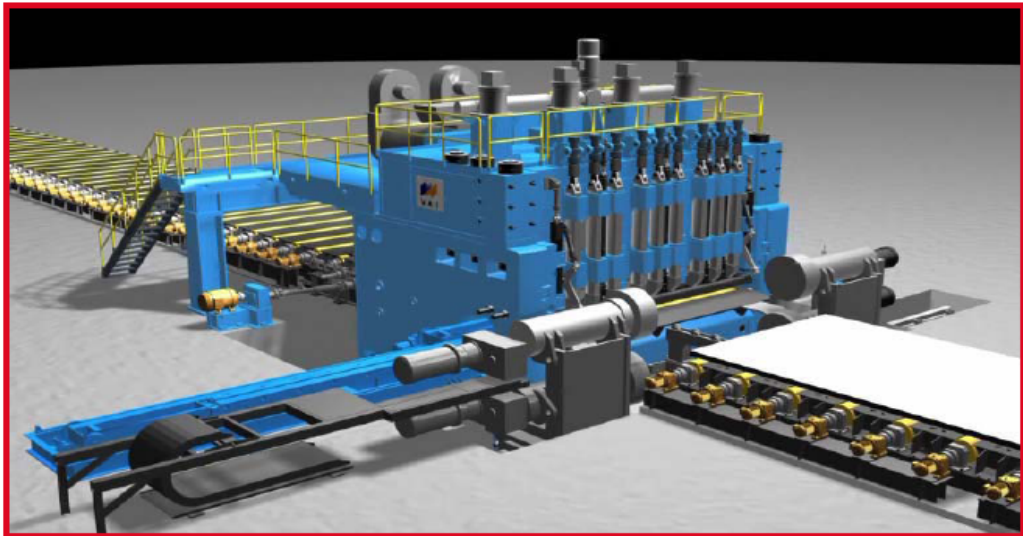
hidrolik silindirler vasıtasıyla yürüyen tabanlı bir sisteme sahip olup 56 metre genişliğinde 32 metre uzunluğunda bir alanı kaplamaktadır (Pamuk ve ark., 2008).



Şekil 2.15. Soğutma yatağı şematik gösterimi.

2.3.2.7. Soğuk Makas

Soğutulmuş levhaların baş ve kuyruklarının kesilerek sipariş uzunluğu ölçülerine kesilmesi amacıyla kullanılır. Şekil 2.16'da soğuk makasın şematik gösterimi verilmiştir .



Şekil 2.16. Soğuk makas şematik gösterimi.

3. TERMOMEKANİK YÖNTEM İLE LEVHA HADDELEME

3.1. Levha Haddelemede Termomekanik İşlemler

Levha haddeleme prosesi, geleneksel sıcak haddeleme ve kontrollü haddeleme olarak iki gruba ayrılabilir. Geleneksel sıcak haddeleme üretilecek levhanın son şekli minimum pasoda (haddeleme ezmesi) verilir kontrollü haddelemede ise haddeleme sırasında deformasyon ve sıcaklık kontrolü ile levhanın mukavemeti ve tokluğu artırılır (Barsom, 1995).

3.1.1. Geleneksel Sıcak Levha Haddeleme İşlemi

Haddeleme işleminin yüksek sıcaklıklarda yani A_{r3} kritik sıcaklığının üstünde sıcaklık hedeflemesi yapılmadan ve müsaade edilen yüksek ezme oranlarında sürekli olarak yapılan haddeleme yöntemidir. Ezme işlemi yalnızca östenit fazında başlar ve tamamlanır. Yüksek sıcaklık nedeni ile hızlı yeniden kristalleşme ve tane büyümesi haddeleme sırasında meydana gelir ve sonuç olarak düzenli tane yapısı oluşmaz. Bu metot günümüzde gevrek kırılmaya karşı kaba haddeleme ve alaşım elementi içermeyen C-Mn çelikleri için uygun olup mukavemet ve sertlik aranmayan yerlerde kullanılır (Barsom, 1995).

3.1.2. Kontrollü Levha Haddeleme İşlemi

Talep edilen yapı çelik bileşenleri iyi kaynak özelliği, korozyona karşı dirençli olması vs. durumları karşılaması açısından geleneksel haddeleme prosesi ile istenen bu özellikleri karşılaması mümkün olmadığından, kontrollü haddeleme ile istenen malzeme özelliklerine ulaşmak için haddeleme parametrelerinden olan sıcaklık ve deformasyon'un kontrolü ile istenen özellik de malzeme üretimi sağlanması işlemidir (Barsom, 1995).

Kontrollü levha haddeleme aşağıdaki işlemleri kapsamaktadır :

- Normalizeli Levha Haddeleme (NR), Normalize Isıl İşlemi (N).

- Termomekanik Kontrollü Levha Haddeleme.
- Hızlı Soğutma.
- Su Verme ve Menevişlenme.

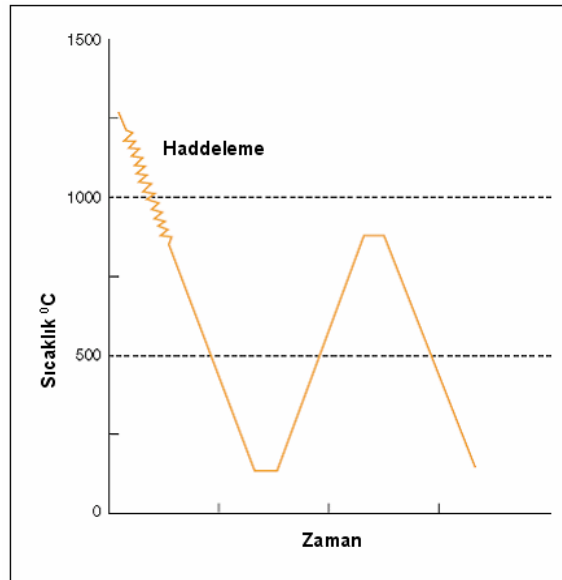
3.1.2.1. Normalizeli Levha Haddeleme

a) Normalizeli Haddeleme (NR)

Termomekanik haddeleme yöntemi olan bu işlem haddeleme son pasosunun normalize sıcaklık aralığında ($\approx 920^{\circ}\text{C}$) verilmesidir. Haddeleme sırasında östenit faz tamamen yeniden kristalleşir fakat düşük sıcaklıklarda tane büyümesi olmaz sonuç olarak malzeme son pasodan sonra normalize ısıtma işlemi sonrası havada soğuma koşulları ile eşit şartları sağlamış olur. Haddeleme ve yük oranlarına bağlı olarak haddeleme çıkış sıcaklığı $\geq 900^{\circ}\text{C}$ olduğundan normalizeli haddeleme bütün levha haddehanelerinde kullanılır.

b) Normalize Isıl İşlemi (N)

Geleneksel haddeleme işlemi uygulanıp havada soğuma sonrası Normalize Isıl işlemi (A_{r3} sıcaklığı $>900^{\circ}\text{C}$ de östenitleme) uygulanıp sonrası havada soğutma işleminin yapıldığı proses şeklidir. Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Normalize ısıtma işlemi .

Bu ısıtma işleminin amacı haddeleme sonrası plastik şekil verme işlemlerinin oluşturduğu tane şekli bozulması sonucu ortaya çıkan iri taneli yapıları yok ederek düzgün dağılmış ve ince taneli bir mikro yapı elde etmektir. Mikro yapı olarak eş

eksenli ferrit/perlit yapısındadır. Yüksek akma ve çekme mukavemetli normalize edilmiş çelikler için ancak yüksek alaşım elementleri ile ulaşılabilmektedir. Benzer özellikler normalizeli haddeleme ile de sağlanabilmektedir (Xler Plate Steelintouch, 2008).

3.1.2.2. Termomekanik Kontrollü Levha Haddeleme

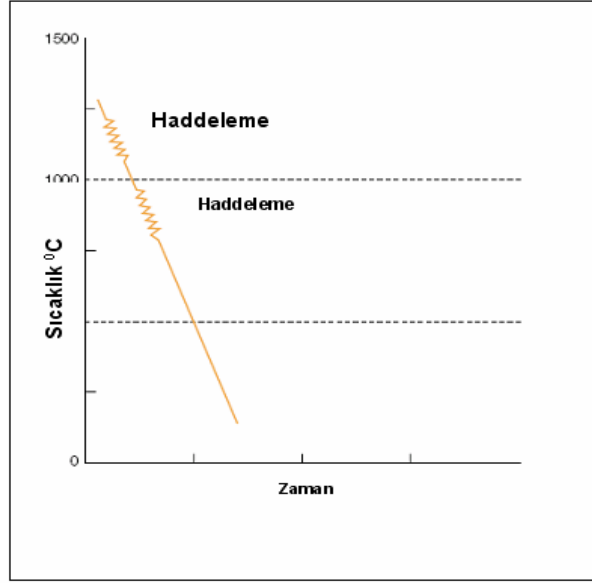
Termomekanik Kontrollü Haddeleme (Thermomechanical Controlled Rolling-TMCR) son deformasyonun östenitin yeniden kristalleşme olmadığı sıcaklık aralığında gerçekleştiği termomekanik işlemdir. Soğuma sonrası deformasyon östenit yapısının ince taneli ferrit perlit yapısında olmasına neden olur. Son paso işlemi östenitin ferrite dönüşüme başladığı sıcaklığın az üstünde verilir.

Termomekanik kontrollü haddeleme ile malzemeye ısıl işlem yapılarak elde edilebilecek özellikler kazandırılmış olur. Düşük haddeleme sıcaklıkları ile çok iyi tokluğun sağlanması çeliğin tane yapısının küçüldüğünü gösterir. Klasik prostenen en temel farkı, şekillendirme prosesi yanında istenen özellik kombinasyonunun sağlanmasıdır (Barsom, 1995; Sezer, 2008).

Termomekanik haddelemenin esas yararı, mikro alaşım elementleri etkisi üzerinde kurulmuştur. Anahtar element ise Nb (Niyobyum)'dur. Nb yeniden kristalleşme sıcaklığını yükselterek haddeleme sırasında östenitin pankek yapısında ezilmesini neden olur ve uygulanan soğutma işlemi ile ince taneli mikro yapının oluşumunu sağlamaktadır. Nb ayrıca çökelme sertleşmesi ile mukavemetin artmasını sağlamaktadır (Sezer, 2008).

Haddelemede verilen deformasyon, zaman ve sıcaklık kontrolü ile son paso sıcaklığının A_{r3} faz dönüşüm sıcaklığının üzerinde bitirildiği haddeleme şeklidir. Düşük sıcaklıkta deformasyonun bitirilmesi ile istenen akma mukavemetine ulaşmak mümkündür. Şekil 3.2'de şematik gösterimi verilmiştir. Sonrasında havada soğutma yapılıyor ise "normalizeli haddeleme" olarak tanımlayabiliriz.

Haddelemede verilen deformasyon, zaman ve sıcaklık kontrolü ile son pasonun A_{r3} faz dönüşüm sıcaklığının altında çift fazlı bölgede ($\alpha+\gamma$) bitirildiği haddeleme şeklidir. Düşük sıcaklıkta deformasyonun bitirilmesi ile istenen akma mukavemetine ulaşmak mümkündür.



Şekil 3.2. Sıcaklık kontrollü levha haddeleme.

3.1.2.3. Hızlandırılmış Su ile Soğutma (ACC)

Nihai haddeleme sonrası hızlandırılmış soğutma (Accelerated Cooling-ACC) işleminin yapıldığı üretim şeklidir. Su ile soğutma yapılarak çeliğin tane yapısının küçültülmesi ile mekanik özelliklerin geliştirilmesi sağlanır. Bu proses, tokluk özelliğini geliştirdiği gibi, alaşım içeriğinin de düşürülmesini sağlamaktadır. Su soğutmalı malzeme yapısı, ince taneli ferrit/ perlit ve ferrit / beynit şeklinde olur, bu sayede istenen özelliklere ulaşılabilir (Barsom, 1995).

3.1.2.4. Su Verilmiş Ve Menevişlenmiş (QST)

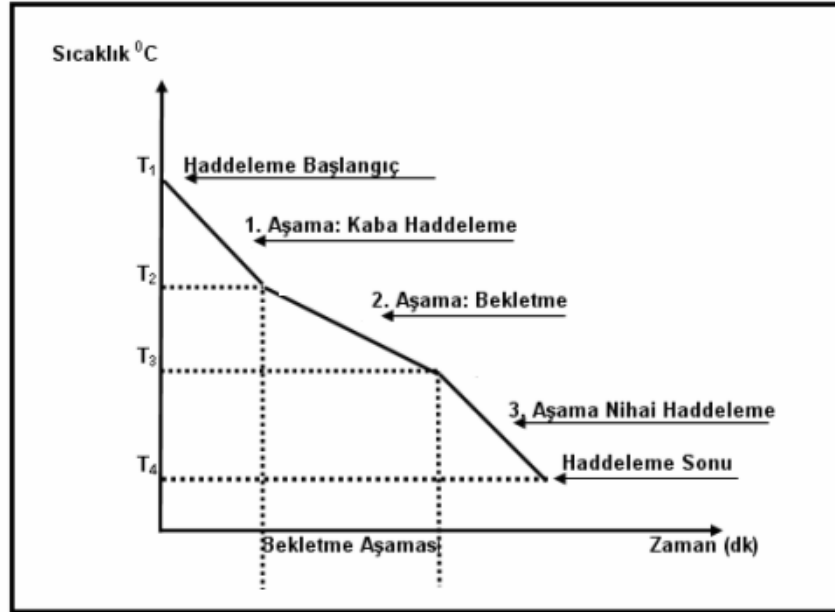
Su verme ve menevişleme (Quenching and Self-Tempering QST) prosesi, nihai haddeleme sonrası su püskürtme ile malzemenin yüzeyinin hızlı soğutulma işlemidir. Böylece, malzeme yüzeyi soğutulur malzemenin çekirdeği soğumadan etkilenmediğinden malzemenin çekirdeğinden yüzeye doğru ısı akışı ile dış yüzeyi menevişlenir. QST prosesi ile akma mukavemeti 520 N/mm^2 üstünde düşük sıcaklıkta haddeleme ile çok iyi tokluk ve kaynaklanabilirlik özelliği içeren ürünler daha düşük maliyetler ile üretilmesi sağlanır (Barsom, 1995).

3.2. Termomekanik Levha Haddeme Pratikleri

Çeliklerde istenilen yüksek tokluk ve süneklik özellikleri ancak tane boyutunu çok küçültmeyle elde edilebilmektedir. Termomekanik Haddeme malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla mekanik işlem ile ısıtım işlemin kontrollü bir şekilde bir arada uygulandığı işlemleri belirtmektedir. Bu işlemlerle, geleneksel ısıtım işlem ve mekanik işlemlerin ayrı ayrı uygulamasıyla elde edilenden daha üstün mikro yapı ve mekanik özellikler sağlanmaktadır (Hulka, 1994).

3.2.1. Termomekanik Haddeme Prosesinin Aşamaları

Tavlama sonrası Haddeme işlemleri üç aşamalı sürdürülür şekil 3.3'de şematik olarak gösterilmiştir. (Gorni et al., 2006).



Şekil 3.3. Termomekanik haddeme aşamalarının şematik gösterimi .

1. Aşama : Hızlı yeniden kristalleşmenin yapıldığı 1000 °C üzerindeki bölgede kaba haddeme. Bu aşamada oluşan Östenit taneleri büyüktür ve bunlar, göreceli olarak büyük α ve beynit tanelerine dönüşürler.

2. Aşama: Malzeme sıcaklığının 900-920 °C sıcaklığa kadar düşmesi için bekletme. Bu bekleme ile malzemenin, yeniden kristalleşmenin olmadığı bölgeye gelmesi istenir.

3. Aşama: Yeniden kristalleşmenin olmadığı bölgede yapılan haddeleme işlemidir. Bu bölgede yapılan nihai haddeleme, malzemenin sıcak işlenmesine yol açar ve böylelikle küçük taneli α yapısı elde edilir.

3.2.1.1. Slab Tavlama

Sürekli döküm işlemiyle elde edilen slablar, slab ısıtma fırınında, kolay haddelenebilmesi için östenit sıcaklıklarına çıkarılmaktadır. Bu sıcaklık, östenit tane boyutu üzerinde önemli bir etkidir. Aşırı yüksek ısıtma sıcaklıklarında östenit taneleri büyümekte, çökeltiler (NbC, TiC, VC, Nb(CN), vs.) de östenit içerisinde çözünmektedir. Bunun tersi olarak, çok düşük sıcaklıklarda ise, çökeltme tane sınırlarında olduğu için çökeltiler bünyeye alınmamaktadır (Hulka, 1994).

Slab ısıtma sıcaklığı karbürleri ve karbonitrürleri “tamamen çözüdürecektir” kadar yüksek olmamalıdır. Aksi takdirde, tane sınırlarının ilerlemesini engelleyen çökeltilerin hepsi çözüdüreceği için östenit taneleri irileşecektir. Bu nedenle, slab ısıtma sıcaklığı ve süresi, östenit tane boyutu kontrol edilerek Mikro alaşım elementlerinin belli bir oranda çözünebileceği şekilde seçilmelidir. Bunun için en düşük slab ısıtma sıcaklığı, Mikro alaşım elementlerinin C ve N miktarına göre tespit edilmelidir (Gray and DeAdro, 1985; Adamczyk, 2005).

3.2.1.2. Kaba Haddeleme

Termomekanik haddelemenin 1. aşaması kaba haddeleme olarak tanımlanır. Yüksek sıcaklık (östenitin rekristalize olduğu sıcaklık) aralığında yapılan deformasyondur. Yüksek sıcaklıklarda (1100-1200 °C) östenit tane boyutu, birbirini izleyen deformasyon ve rekristalizasyon ile mümkün olduğu kadar küçültülür.

Östenitleştirme sıcaklığı ve mikro alaşım elementlerinin çözünürlüğü ilk östenit tane boyutunu ve östenitin rekristalizasyonu kuvvetli bir şekilde etkiler. Östenitleştirme sıcaklığına bağlı olarak, mikro alaşım elementleri ya tane küçültücü yada çökeltme sertleştiricisi olarak etki eder. Artan östenitleştirme sıcaklığı ile mikro alaşım elementleride artarak östenitte çözünür. Ancak yüksek östenitleştirme sıcaklıkları tane büyümesine neden olabilir. Düşük sıcaklıklarda ise, daha fazla miktarda mikro alaşım çökeltileri östenitte çözünmeden kalacaktır. Bu çökeltiler tane sınırı hareketine engel teşkil ederek daha küçük tane boyutunu mümkün kılar. Deformasyon etkisiyle oluşan

çökeltelerde çözünmemiş çökeltelerde olduğu gibi rekristalize olmamış östenitin tane büyümesini engeller (Mahmutoğlu, 2003).

Rekristalize olmuş tane boyutunu küçültmek, rekristalizasyon için gerekli kritik değerin üzerinde deformasyon uygulamasıyla mümkündür. Son rekristalize olmuş östenit tane boyutunu, başlangıç tane boyutu, deformasyon şartları ve tane sınırı hareketini engelleyen çökelti dağılımı belirler.

Kaba haddeleme, düzenli ve ince taneli östenit yapısı elde etmek için östenitin yeniden kristalleştiği bölgede yapılan bir işlemdir. Her paso arasında gerçekleşen yeniden kristalleşme, yüksek sıcaklıklarda hızlı, düşük sıcaklıklarda ise çok yavaş olmaktadır.

Kaba haddelemede, tanelerin yönlendirilmesini ve boyutunu etkileyen önemli faktörler; haddelemedeki ezme (deformasyon) oranı, ezme süresi ve sıcaklık değerleridir (Mahmutoğlu, 2003).

3.2.1.3. Bekletme Aşaması

Termomekanik Haddelemenin 2. aşamasının ana parametreleri kaba haddeleme son kalınlığı (bekletme kalınlığı) ve nihai haddeleme başlama sıcaklığı (bekletme bitiş sıcaklığı) dir.

A- Bekletme Kalınlığı

Termomekanik Haddeleme de kaba haddeleme sonrası bekletme aşamasında bekletme kalınlığı önemlidir. Metalürjik olarak, bu parametredeki herhangi bir farklılık nihai haddeleme ve kaba haddeleme aşamaları arasında toplam gerinim dağılımının değişimine işaret eder. Bekletme kalınlığı arttığında gerilim uygulaması (ezme yükleri, ezme oranı) kaba haddelemede düşer nihai haddelemede ise artar (Gorni et al., 2000).

Nihai haddeleme aşaması sırasında gerinme derecesi Östenitin yeniden kristalleşme olmadığı bölgede en fazladır. Haddelemeden sonra sertleştirilmiş yapı daha fazla gerinimi yansıtacaktır. Böylece, son östenit yapısı daha incelikli böylece östenitin ferrite dönüşümü için, tane, alt tane sınırlarına daha fazla sahip olacaktır. Gerinim derecesi Kaba Haddeleme aşaması sırasında aynı veya % 60 dan daha fazla ise bu yapı tane boyutunu küçültür.

Kaba Haddeleme aşamasından sonra mikro yapı, östenitin yeniden kristalleşmesi ile küçük tane boyutu meydana getirir. Haddeleme sırasında Bekletme aşamasındaki kalınlığın mekanik özelliklere, ne oranda etki ettiği tam olarak bilinmemekle birlikte prensip olarak daha inceltilmiş bir mikro yapı da mekanik özellikler ve tokluğun arttığı bir gerçektir (Gorni et al., 2000).

Mikro yapısal etkiler, bileşenlerin morfolojisinde potansiyel sertleştirme ile ferritin azalması gibi değişiklikler beklenilmedik sonuçlara yol açabilir. Böylece, bu Termomekanik haddeleme prosesindeki parametrelerdeki herhangi bir değişiklik ihtiyatla yapılmalı mikro alaşımlı çeliğin her çeşidi için olası etkileri hakkında yeterince tecrübe edinilmelidir.

Verimlilik açısından bakıldığında, ortalama bekletme kalınlığının artırılması kaba haddeleme ve nihai haddeleme aşamaları arasındaki bekletme sırasında kısa sürede levha haddelemenin gerekliliğini ortaya çıkarır. Yani bekletme kalınlığı arttıkça haddeleme süresi artar bu yüzden çoklu termomekanik haddeleme yapılması zorunluluğu ortaya çıkar. Fakat, nihai haddeleme için ideal başlama sıcaklığına ulaşmak ve levha haddeleme için soğuma zamanını kısaltmak için kaba haddeleme aşaması erken bitirilmelidir. Bekletme kalınlığı arttığında soğuma oranı ince bekletme kalınlığına göre daha yavaş olur.

Termomekanik haddeleme sırasında izin verilebilir maksimum verimlilik ve ortalama bekletme kalınlığı ile bekletme bitiş sıcaklığı arasındaki çelişkili durum için optimum kalınlık aralığının yakalanması gereklidir (Gorni et al., 2000).

B- Bekletme Bitiş Sıcaklığı

Bekletme aşamasının 2. parametresi Nihai haddeleme başlama sıcaklığıdır (bekletme bitiş sıcaklığı). Bekleme ile malzemenin östenitin yeniden kristalleşmenin olmadığı bölgeye gelmesi sağlanır. Bu sıcaklık normalize işlem sıcaklığı da olan 900-940 °C aralığıdır.

Kaba haddeleme aşamasın Östenitleme sıcaklıklarının biraz üzerindeki sıcaklık alanlarında gerçekleştirilir. Deformasyon başlangıcı için çözünmüş, kısmen çözünmüş ve çözünmemiş çökeltilere sahip bir östenit mevcuttur.

Kaba haddeleme boyunca çelik dislokasyon blokajı ve yeni dislokasyon oluşumundan dolayı pekleşir. Mikro alaşımsız çeliklerde bekletme zamanlarında toparlanma görülür. Kritik deformasyonun aşılmasından sonra çelik dinamik olarak yeniden kristalleşmeye başlar.

Bekletme sırasında Ar_3 'ün üzerindeki sıcaklıklara veya ikinci faz bölgesine kadar soğutulur. Bu zamanda mikro alaşım elementlerinin çökeltme işlemleri gerçekleşir (Taş, 2006).

Homojen Östenit Oluşumu: Sementit ve diğer fazların çözünmesinden kaynaklanan homojensizlikler östenitte difüzyon olaylarıyla dengelenmelidir.

Çökeltilerin Çözünmesi: Mikro alaşım elementlerinin çözünürlükleri belirli termodinamik çözünürlüğe sahiptir. Amaca uygun ısı iletimi ile çözünen kısım kontrol edilir buna paralel olarak henüz çözünmemiş partiküllerin kabalaşması da gerçekleşebilir. Tamamen çözülmüş, kısmen çözülmüş ve hiç çözünmemiş partiküllerin oranı deformasyon ve dönüşüm öncesinde, esnasında ve sonrasında tekrar çökeltme olaylarına aşırı derecede etki etmektedir.

Östenit Tane Büyümesinin Sınırlandırılması: Belli bir dağılımda partiküllerin mevcut olması durumunda tane sınırlarının bloke edilmesinden dolayı östenitte tane büyümesi engellenir veya tamamen bastırılır. Bir tane sınırı blokese için her hacim elemanı başına belli bir partikül sayısı gereklidir (Taş, 2006).

Malzeme yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde tamamen yeniden kristalleşmekte aşağısında ise artık yeniden kristalleşme olmamakta veya kısmen olmaktadır. Nihai malzeme yapısı gerçekleşen soğutmadan sonra önemli oranda, östenitin o anki faz dönüşümünden önce yeniden kristalleşip kristalleşmediğine bağlı olduğundan, bu sıcaklığın belirlenmesi önem arz etmektedir (Elkoca, 2007).

3.2.1.4. Nihai Haddeleme

Bekletme sonrası yeniden kristalleşmenin olmadığı bölgede yapılan haddeleme işlemidir. Bu bölgede yapılan haddeleme malzemenin sıcak işlenmesine yol açar ve böylelikle küçük taneli ferrit (α) yapısı elde edilir. Östenitin (γ) yeniden kristalleşmediği ve/veya iki faz ($\gamma + \alpha$) bölgesinde yapılan bir işlemdir. Bu işlemin

amacı $\gamma \rightarrow \alpha$ dönüşümü neticesinde, ince ve düzgün dağılımlı ferrit tanelerinin oluşumunu sağlayacak östenit yapısı elde etmektir (Bakkaloğlu, 2002).

Kontrollü olarak yapılan haddeleme işleminde; γ tane sınırları kadar tane içinde de oluşmaktadır. Çünkü bu deformasyon bantları, α taneleri oluşumu için aynen bir tane sınırı işlevi görür, bir başka deyişle bir γ kristale, bu bantlarla birden çok tane bloklarına bölünmüş gibidir. Bu bölünme sayesinde, tane yapıları daha rafine bir biçim almış olur. Alt tane yapıları ne denli küçük olursa, bunun yol açtığı mukavemet artırıcı etki o denli güçlü olmaktadır.

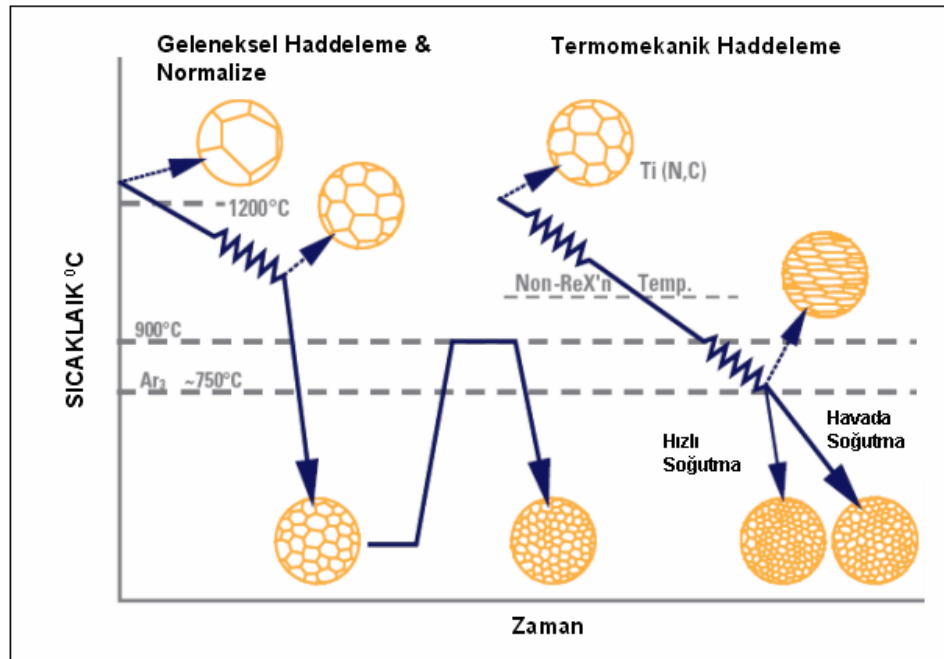
Başlangıç östenit tane boyutunun küçük olması, deformasyonun düşük sıcaklıklarda yapılması ve malzeme gerinmesinin yüksek olması rekristalize olmuş tane boyutunu inceltir.

Nihai haddelemede, yeniden kristalleşmenin engellenmesiyle östenit taneleri hadde yönünde uzar ve tane sınırı yoğunluğu artar. Ayrıca, östenit taneleri içerisinde dislokasyon ve deformasyon bantları gibi yüksek çekirdeklenme yerleri (hata yoğunlukları) oluşur. Çekirdeklenme yörelerindeki bu artış haddeleme neticesinde ferrit tanelerinin oldukça ince yapılı olmasını sağlar. Bu nedenle nihai haddelemedeki deformasyon miktarı oldukça yüksek olmalıdır. Deformasyon miktarının artması ile östenit taneleri incelerek uzar. Buna paralel olarak artan mikro yapısal hata miktarıyla dağılım düzgün bir hale gelir (Taş, 2006; Bakkaloğlu, 2002).

Nihai haddeleme sonrası, sakın havada doğal soğutma veya oda sıcaklığına hızlı soğutma seçilir. Nihai haddelemede oluşan mikro yapı yeniden kristalleşme ve çökeltme kinetiğine bağlıdır. Mikro alaşım elementlerinin miktarına göre östenitin yeniden kristalleşmesi gecikirken diğer taraftan çökeltme hızlanmaktadır. Mikro alaşım elementleri miktarı artırılarak yüksek sıcaklıklarda bile yeniden kristalleşme geciktirilebilmektedir. Mikro alaşım elementleri, yeniden kristalleşmeyi katı çözültü etkisiyle bir miktar engellemektedir. Fakat burada, esas engelleyici etki, deformasyon etkisi ile oluşmuş mikro alaşım elementlerinin çökeltilerinden kaynaklanmaktadır (Taş, 2006).

Nihai kontrollü haddelemenin normalize tav sıcaklıklarında yapılmasıyla normalize edilmiş duruma benzer bir ferritik/perlitik mikro yapı elde edilir. Ancak mikro alaşım elementlerinin rekristalizasyonun durduğu sıcaklığı yükseltmeleriyle

işlem rekristalizasyonsuz gerçekleşir ve böylece incelen östenit ince taneli ferrit + perlit mikro yapısı oluşmasına neden olur. Şekil 3.4 de şematik olarak verilmiştir.

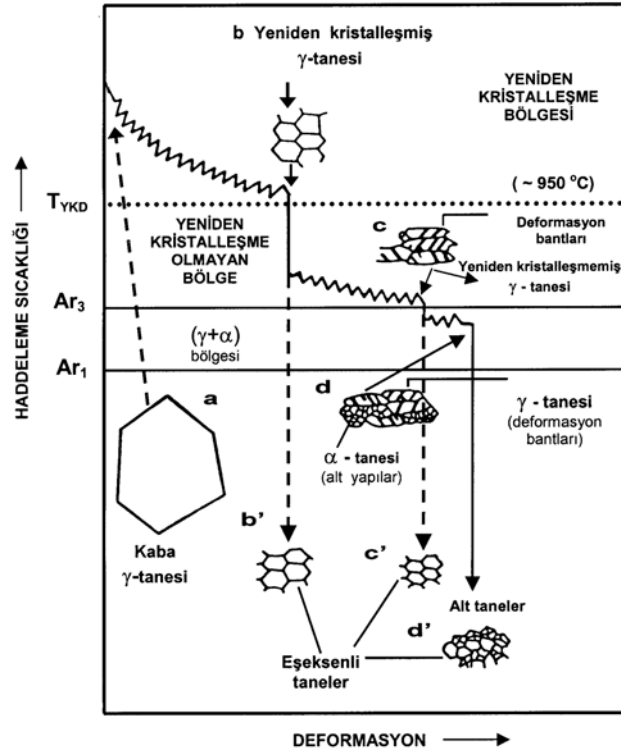


Şekil 3.4. Normalizeli ve termomekanik haddelemeli mikro yapılar .

3.2.2. Termomekanik Haddelemede Mikro Yapı ve Özellikleri Etkileyen Parametreler

- Haddeleme çıkış sıcaklığı, haddeleme ezme oranları, son üründe tane büyüklüğünün etkisi,
- yeniden kristalleşme olmayan bölgede (TMCR prosesi) küçük taneli yapı,
- haddeleme sıcaklığının üstündeki bölgede (sıcak haddeleme) kaba taneli yapı,
- haddeleme sonrası malzemenin soğutma oranı, malzeme iç yapısı ve tane büyüklüğü (Barsom, 1995).

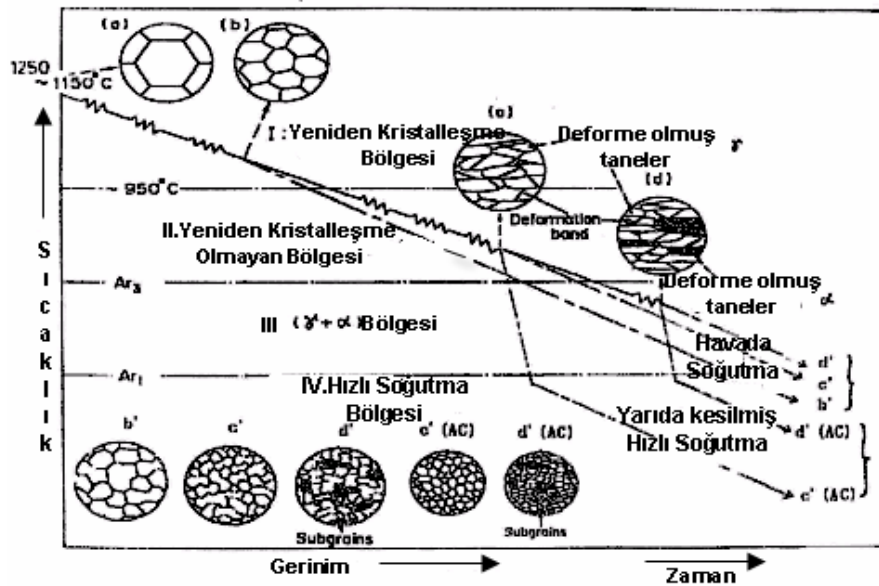
Geleneksel haddeleme yönteminde yüksek alaşım elementleri kullanımı yanında, kalın levha üretimlerinde (≤ 60 mm) de mekanik özellikleri sağlaması zordur. Aşağıda şekil 3.5'de termomekanik haddeleme ile elde edilen mikro yapıları gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Termomekanik haddelemede mikro yapılar .

3.2.3. Termomekanik Haddelemede Mikro Yapısal Dönüşümler

Termomekanik haddeleme esnasında görülen mikro yapıdaki dönüşümler şekil 3.6' da şematik olarak özetlenmiştir. Bu dönüşümler üç ayrı bölgede gerçekleşen deformasyon ile ilgilidir (Panigrahi, 2001).



Şekil 3.6. Termomekanik haddelemede mikro yapısal dönüşümlerinin oda sıcaklığına kadar soğuması sırasındaki değişimi .

- Yeniden kristalleşme bölgesinde yapılan deformasyon ($T > 1000$ °C):

Tekrarlanan yeniden kristalleşmenin olduğu bu bölgede, kaba östenit (γ) tanesi (**a**), deformasyon ile küçültülür ve yeniden kristalleşmiş γ tanesine (**b**) dönüşür. Bu yapı da, soğutma işleminden sonra nispeten büyük ferrit (α) tanelerine (**b'**) dönüşür (Elkoca, 2007; Ganoshenka et al., 2003).

- Yeniden kristalleşme olmayan bölgede deformasyon (900 -1000 °C):

Bu bölgede, uzamış ve yeniden kristalleşmemiş γ tanesi (**c**) içerisinde deformasyon bantları oluşur. α taneleri, soğutma esnasında, deformasyon bantlarında ve γ tane sınırlarında çekirdeklenerek ince α tanelerine (**c'**) dönüşür (Elkoca, 2007; Ganoshenka et al., 2003).

- İki fazlı ($\gamma + \alpha$) bölgede yapılan deformasyon ($A_{r3} - A_{r1}$):

Bu bölgede, deformasyon bantlarının oluşumu devam eder ve deformasyona uğramış α tanelerinde alt yapılar (**d**) oluşur. Soğutma esnasında, yeniden kristalleşmemiş γ tanesi, eşeksizli α tanelerine dönüşürken, deformasyona uğramış α tanelerinde alt taneler (**d'**) oluşur (Elkoca, 2007; Ganoshenka et al., 2003).

Termomekanik haddelemenin ilk safhası tekrarlı ezmeler ve yeniden kristalleşme (YK) ile mümkün olduğunca küçük ve homojen ferrit (α) taneleri elde etmektir. Bu amaca ulaşmak için başlangıç östenit (γ) tane boyutu küçük ve homojen olmalıdır. Bu koşul pratikte tane kabalaşmasının olmayacağı bir slab ısıtma sıcaklığı seçilerek gerçekleştirilir. Tane kabalaşma sıcaklığı çelikte mevcut çökeltilerin kilitleme etkisiyle saptanmaktadır. Kilitleme etkisi bir kez kaybolduğunda γ taneleri kaba bir tane yapısı oluşturacak şekilde hızla irileşir. Tane kabalaşma sıcaklığı mikro alaşım elementlerinin kilitleme etkisiyle belirgin bir şekilde değişir. Ti'un (Titanyum) oldukça yüksek sıcaklıklarda bile tane kabalaşmasını bastırmada çok etkin olduğu, Nb'un ise ancak belirli bir kritik sıcaklığın altında tane büyümesini engellediği ön görülmektedir (Elkoca, 2007; Ganoshenka et al., 2003).

Genel olarak deformasyon bantlarının oluşumu termomekanik haddelemenin başlıca ayırd edici özelliklerinden birisidir. Deformasyon bantları östenit ve tane sınırları kadar tane içinde de oluşmasıdır. Bu deformasyon bantları, ferrit taneleri oluşumu için aynen bir tane sınırı işlevi görür, bir başka deyişle bir östenit kristali, bu bantlarla birden çok tane bloklarına bölünmüş gibidir. Bu bölünme sayesinde, tane

yapıları daha rafine bir biçim almış olur. Termomekanik haddelenenin amacı geleneksel işlemlerden daha ince ferrit tanesi üretmektir.

Termomekanik haddeleme üç safhadan oluşmaktadır:

1) Östenitin (γ) yeniden kristalleştiği bölgede deformasyon.

2) Östenitin (γ) yeniden kristalleşmediği bölgede deformasyon.

3) Ferrit (α) ve östenitin (γ) aynı anda bulunduğu çift fazlı bölgede deformasyon ve oda sıcaklığına kadar soğutmanın mikro yapısı şekil 3.6'da gösterilmiştir. Buna göre;

1. Safhada, Sıcak haddeleme için slabların yeniden ısıtılmasıyla oluşan iri γ taneleri tekrarlı deformasyon sonucunda eş eksenli α tane yapısına (b') dönüşmektedir (Elkoca,2007; Ganoshenka et al., 2003).

2. Safhada çelik yeniden kristalleşmenin olmadığı bölgede haddelendiğin de içerisindeki γ taneleri uzatılır ve bu tanelerin içerisinde deformasyon bantları oluşturulur (c). α ve γ tane sınırları ve γ taneleri içerisindeki deformasyon bantlarında çökeler ve bu şekilde çok ince α tanelerinden (c') oluşan bir içyapı oluşur (Elkoca,2007; Ganoshenka et al., 2003).

3. Safhada, iki fazlı bölgedeki deformasyon 2. safhadaki gibi devam eder ve altyapılar (d) oluşturacak şekilde α tanelerini ezer. Deformasyondan sonraki soğuma sırasında deforme edilmiş γ eşeksenli α tanelerine dönüşürken deforme edilmiş α alt tanelere (d') dönüşür.

Tekrarlı yeniden kristalleşme ile tane inceltmesi sonsuza kadar devam etmeyip bu yöntemle elde edilecek tane boyutunun bir sınırı (b) vardır. Bu yüzden α taneleri nispeten iridir (b'). Bu sınırı aşmanın aracı γ tanelerini bölmektir. Sıcak haddeleme sırasında yeniden kristalleşen γ taneleri kalıcı deformasyon bantları ile bölünürse (c) sonuçta oluşan α tane yapısı çok daha incedir (c'). İki fazlı bölgedeki deformasyon yalnızca daha fazla tane incelmeye neden olmaz aynı zamanda eşeksenli taneler ve alttanelerden oluşan karışık bir yapıya yol açar. Buradaki ilave dayanım artışı alttane sertleşmesi ile elde edilmektedir (Elkoca,2007; Ganoshenka et al., 2003).

4. Safhada, termomekanik haddelemenin son safhası havada soğutmanın optimum bir sıcaklıkta sona erdiği ve bunu havada soğutmanın takip ettiği kesintili bir soğutmadır. 2. Safhada üretilen deforme edilmiş γ ve havada soğutmanın birleşik etkisi kalan östeniti C ve N ile zenginleştirecek şekilde α 'e dönüşümünü iyileştirir. Karbon (C) ve Azotça (N) zenginleşmiş γ kararlı olmakta ve martenzit ve/veya beynite dönüşmektedir. Yani havada soğutmanın çelik α ve γ dönüşümü şeklinde çift dönüşüm sergilemekte ve sonuçta arasında martenzit ve/veya beynit adalarının yer aldığı ince α tanelerinden oluşan bir içyapı ortaya çıkmaktadır. Termomekanik haddelenmiş çelikte yalnızca yaygın karakterli dönüşümler ortaya çıktığından yapıdaki α taneleri büyüklük açısından daha fazla değişim sergilerken havada soğutulmuş çelik ince ve çok homojen bir α tane yapısı sergilemektedir (Elkoca, 2007; Ganoshenka et al., 2003).

Sonuç olarak termomekanik haddeleme ile;

- 1. Safhada mümkün olduğunca küçük ve homojen dağılmış yeniden kristalleşmiş γ taneleri üretilmelidir (Elkoca, 2007).
- 2. Safha termomekanik haddelemenin temelini oluşturmakta ve esas olarak geleneksel haddelemeden farkını yaratmaktadır. Bu safhadaki her bir adımda yüksek ezme oranlarının deformasyon bantları, bağlaşıklık olmayan ikizlenme sınırları ve dislokasyon hücrelerinin oluşturulmasında daha etkin olduğu gözlenmiştir. Ayrıca 1.safhanın bitişi ile 2. safhanın başlangıcı arasındaki gecikme süresi kontrol edilmelidir. Gecikme süresi çok uzun olursa karışık α tane yapısı oluşturacak şekilde yeniden kristalleşmiş γ taneleri bölgesel olarak kabalaşacaktır (Elkoca, 2007).
- 2. Safhadaki kritik sıcaklıklar arası haddelemenin amacı östenitin altyapı ve/veya alt tane oluşumuyla sertliğinin artırılmasıdır. Kritik sıcaklıklar arası haddelemenin deforme olmuş γ ve deforme olmuş α tanelerinden oluşan karışık bir tane yapısı ortaya çıkar. Deforme olmuş γ eşeksenli α 'ya dönüşürken deforme olmuş α yeniden toparlanma derecesine bağlı olarak hücre yapısı ve/veya alt tanelerden oluşan bir içyapı oluşturur. Mikro alaşımlı çeliklerde deforme olmuş α ' in yeniden kristalleşmesi hücre yapısı ve/veya alttaneler oluşturacak şekilde çok ağır bir süreç sergiler. Pratik açıdan dayanım ve tokluk arasında iyi bir denge oluşturmak için bu safhada %10-20 ezme arzu edilmektedir (Elkoca, 2007).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Haliç Metro Geçiş Köprüsü projesi kapsamında kullanılmak üzere DIN EN 10025 standardına göre sıcak haddelenmiş yapı çeliği S355 J0 J2 K2 ve S355 J2W kalitelerinin termomekanik haddeleme yöntemi kullanılarak geliştirilmesi amacı ile 8 adet deneme levha üretimleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Sürekli Döküm Pratikleri

Sürekli döküm tesisleri'nde kalınlığı 200 mm, genişliği 1535 mm ve uzunluğu 6000 mm olan slablar üretilmiştir. Denemeler için sürekli döküm tesislerinde üretilen her dökümden elde edilen fiili kimyasal bileşim değerleri kaydedilmiştir. Özel olarak yapılan her dökümün 2. slablarından birer adet sülfür-print numunesi alınmıştır. Kullanılan tüm slablar slab hazırlama sahasında kontrol edilmiştir, kusur görülmesi durumunda % 100 skarf yapılmıştır.

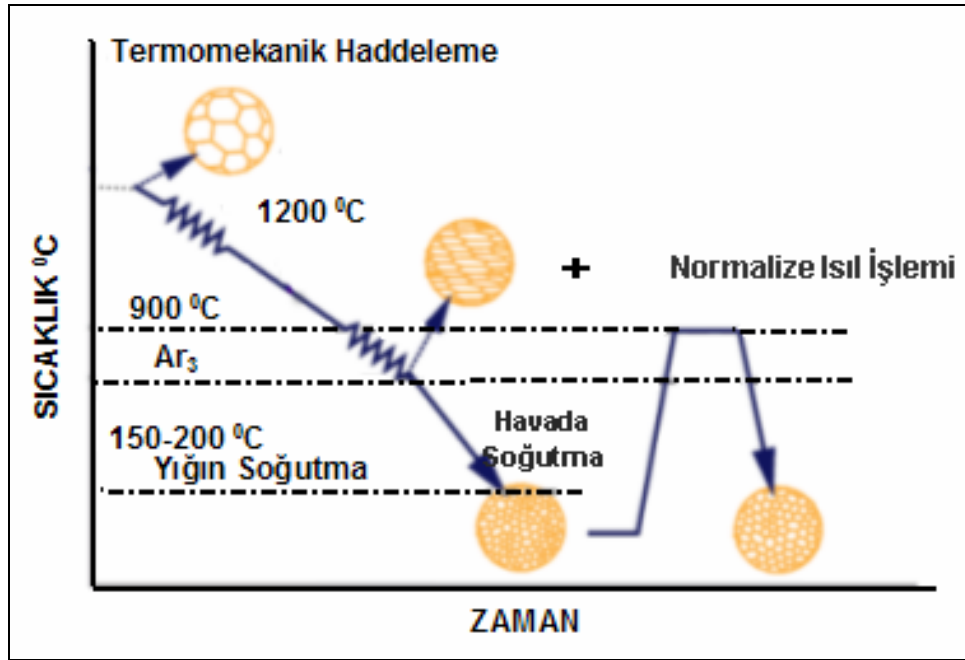
4.2. Levha Haddeleme Pratikleri

Levha haddehanesinde tüm slablar 1250 °C'de 150 dakika slab fırınında tavlandıktan sonra yüzeydeki tufalları kırılarak levha haddede termomekanik haddeleme yöntemi olarak sıcaklık kontrollü haddeleme sonrası havada soğutma yöntemi (TCR) diğer adıyla Normalizeye Eşdeğer Haddeleme (NR) metodu kullanılarak farklı kompozisyonlarda levhalar haddelenmiştir. Bu iki metot haddeleme açısından aynı olup tek fark TCR'da bekletme kalınlığı (2xt/2,5xt) ve bekletme sıcaklığını (850-950 °C) kendimiz belirlerken Normalizeye eşdeğer haddeleme de (NR) ise haddeleme modelinin belirlediği bekletme sıcaklığı (900-920 °C) ve bekletme kalınlıklarında (2xt) haddeleme yapılmasıdır.

Bazı levhalara termomekanik haddelemenin farkının görülmesi amacı ile sıcaklık hedeflemesi olmadan haddelendiği gibi (AR) geleneksel haddeleme yöntemi uygulanmıştır. TCR/NR haddelemede bekletme kalınlığı olarak 2,5xt (40 mm kalınlık için 100 mm) veya 2xt (40 mm kalınlık için 80 mm) kullanılırken bekletme sıcaklığı için 850-950 °C arasında sıcaklıklar seçilmiştir. Malzemeler bekletme

kalınlığına kadar haddelenmiş bu aşamada hedef sıcaklığına kadar soğuması hat üzerinde (325-640sn arasında) gerçekleşmiştir. Hedef bekletme sıcaklığına gelen levha tekrar haddelemeye başlanarak nihai kalınlığa kadar haddelenmiştir.

Haddelenen levhalar soğutma yatağı üzerinde (SM) veya 150-200 °C de 1. no'lu soğutma yatağından istife alınıp yığın soğutma (YS) yapılarak ortam sıcaklığına ulaştıktan sonra sipariş boyuna kesim işlemi yapılmıştır. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi haddelenen tüm levhalara mekanik özelliklerin karşılaştırılması için normalize ısıtma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.1. Deneme uygulamalarının şematik gösterimi.

Termomekanik haddeleme hedef parametreleri.

- Slab fırını ısıtma süresi : 150 dak.
- Slab fırını sıcaklığı : 1250 °C
- Slab fırını çıkış sıcaklığı : 1200 °C
- TCR bekletme sıcaklığı : 850/940 °C
- Hedef Çıkış Sıcaklığı : 850-930 °C

Her bir haddeleme işlemi esnasında gerçekleşen bekleme sıcaklığı, ikmal sıcaklığı, haddeleme şekli, ve soğutma tipleri için elde edilen değişkenler kayıt altına alınmıştır. Böyle bir pratiğin ilk kez yapılmasından dolayı, bazı değerlerde bekletme ve ikmal sıcaklıklarında farklı değerler gerçekleşmiştir. Haddeleme pratiğine ait

bekletme bitiş sıcaklığı olarak levha hadde giriş sıcaklığı ikmal sıcaklığı olarak son paso levha hadde çıkış sıcaklığı bu çalışmadaki değişken parametreler olarak değerlendirilmiştir.

EK 1'deki tablolarda (Ek-1.1-Ek-1.8) her bir levha için gerçekleşen termomekanik haddeleme parametreleri sonuç değerleri verilmiştir. Deney sonuçları ve irdelemesi bu tablolarda verilen değerlere göre yapılmıştır.

Haddeleme çıkışında tüm levhalara numune alınacaktır ibaresi yazılmıştır. Haddelenen levhalardan yığın soğutmaya (YS) alınanlar kaydedilmiştir. Levhaların yüzey ve ultrasonik test (ULT) kontrolleri yapılanlar raporlanmış ve kayıtları alınmıştır.

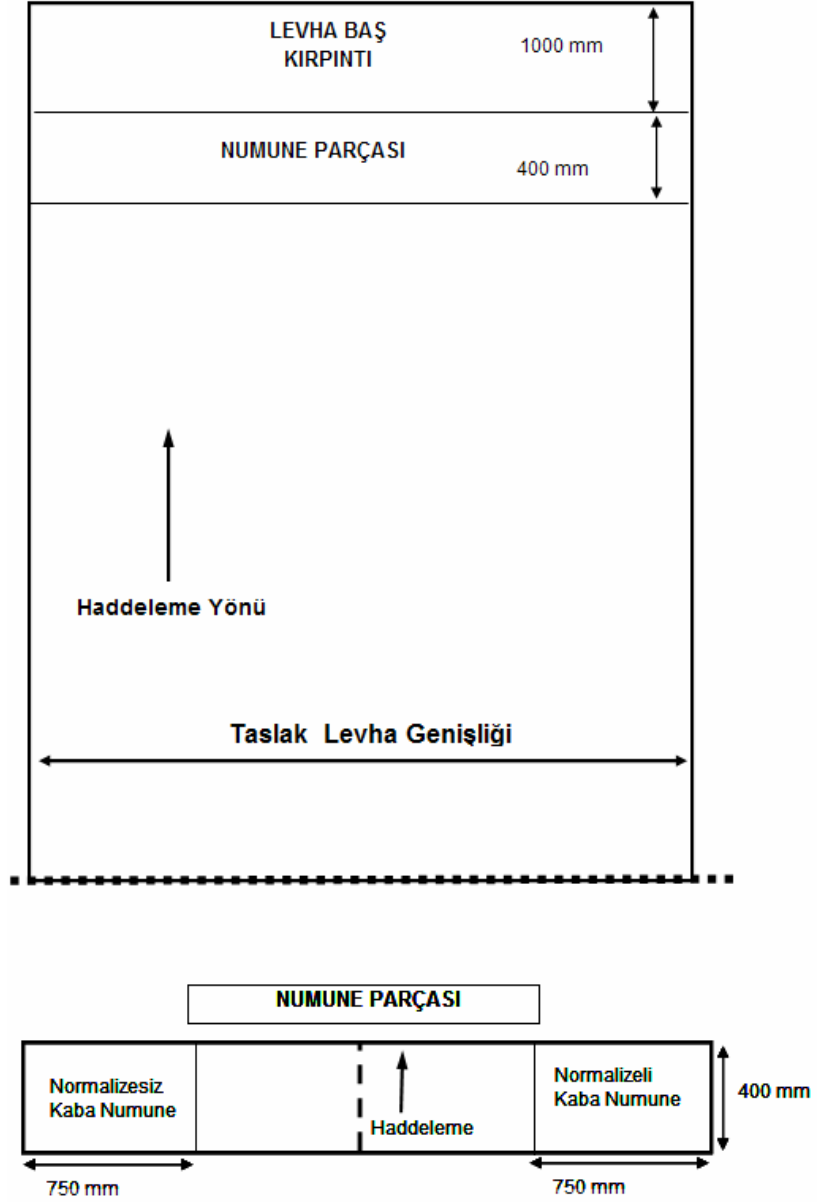
Soğuk makasta ve/veya levha kesim sahasından kesim işlemi sırasında her levha slabından üretilen levhadan 2 şer adet numune alınmıştır.

Her levhanın sağ ve sol yanından 400x750 mm ebatlarında birer adet numune alınmıştır. 1.Numune üzerine levha numarası, kalınlık ve N1 (Normalizesiz) yazılarak markalanmıştır. 2. Numune üzerine levha numarası, kalınlık ve N2 (Normalizeli) yazılarak markalanmıştır. Markalanan numuneler asıl levhası ile beraber Normalize ısıtma işlemi uygulanması sağlanmıştır.

4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

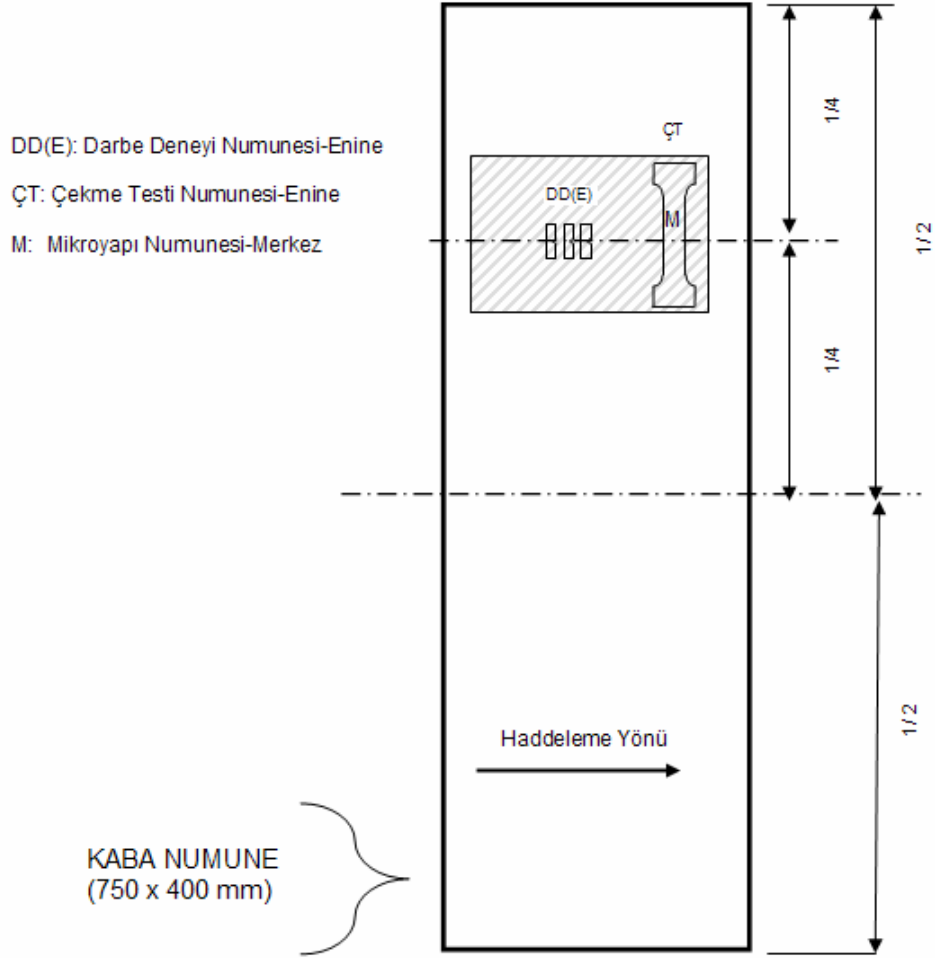
Üretilen her bir levhanın baş kısmından 1 metre içerden olacak şekilde levha başından krop kısmı kesildikten sonra, levha baş kısmı 400 mm genişliğinde kesilerek, şekil 4.2'de gösterildiği gibi normalizeli ve normalizesiz olacak şekilde 2 şer adet metalografik inceleme, çekme ve darbe deneyi numuneleri alınmıştır.

Normalizeli numuneler, levha ile beraber normalize fırınında normalize ısıtma işlemi yapılmıştır. Mekanik test sonuçlarına göre seçilen numunelerden mikro yapı incelemeleri için çekme testi numunelerinden parçalar alınmıştır.



Şekil 4.2. Taslak levhadan deney numunelerinin alınması.

Çekme, darbe testi numunelerinin hepsi levhanın enine yani haddelenme yönüne dik olacak şekilde DIN EN 10 002-2004 spesifikasyonuna göre alınmıştır (Türkiye Standartlar Enstitüsü (TSE), 2004). Şekil 4.3’de deney numunelerinin alınma şekli ve yerleri görülmektedir.



Şekil 4.3. Deney numunelerinin hazırlanması ve kodlanması.

4.4. Mekanik Testler

Levhaların mekanik özellikleri çekme ve darbe testleri ile belirlenmiştir. Çekme deneyleri, DIN EN 10 002 spesifikasyonuna göre Satec marka çekme testi cihazında gerçekleştirilmiş olup her numune için 1 adet test yapılmıştır.

Darbe testleri, TS EN ISO 14556 spesifikasyonuna göre V-çentik açıldıktan sonra haddelme sonrası numuneler için $-0,-20$ ve -40 °C'de Normalize ısıtım işlemi sonrası numuneler için -20 ve -40 °C de yapılmıştır. Testler, WPM Darbe Cihazı'nda gerçekleştirilmiştir. Düşük sıcaklıklara ulaşmak için mgw-LAUDA ETK-70 soğutucusu ve içerisinde chlorodifluoromethane ve chloropentafluoroethane olan Friogas-502 soğutma gazı kullanılmıştır. Test edilen her bir sıcaklık için 3 adet test yapılmıştır. Elde edilen tüm test sonuçları EK.2 'deki (Ek-2.1-Ek-2.8) tablolarda verilmiştir.

4.5. Mikro Yapı Karakterizasyonu

Metalografik incelemede numuneler, haddeme doğrultusuna dik yönde çekme testi numunelerinden çıkarılmıştır. Sıcak presleme yöntemiyle bakalit kalıba alınan numuneler sırasıyla 80-120-240-400-600-800-1200 gritlik SiC aşındırıcıdan geçirilmiş ve sonrasında 9-6-3-1 mikronluk elmas süspansiyonlar yardımıyla parlatılmıştır. % 2 'lik Nital (%2 Nitrik Asit + % 98 etil/metil alkol) çözeltisi ile dağlanan numuneler optik mikroskopta incelenerek farklı büyütmelemlerde fotoğraflanmıştır. Ortalama tane boyutu ASTM E112 standartlarına göre değerlendirilmiştir (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2004).

4.6. Ultrasonik Levha Testi (ULT)

ULT yapılacak levhalara fiziksel yüzey kontrolü yapılmıştır, levhalar;

- Yüzey kusuru içermemesi (Hadde yaralı, kabuk yaralı, çatlak vs.)
- Levha yüzeyi temiz, yüzey düzgünlüğü toleransları içerisinde olmasına dikkat edilmiştir.

Levhaların ULT testi, KRAUT KRAMER USK 7D marka cihaz ile, kenar kontrolü için; kenarlardan 50 mm içeride levhanın tüm kenarlarına. Yüzey kontrolü için; levha haddeme yönüne paralel aralarındaki mesafe 75 mm olan paralel hatlar üzerinde ve haddeme yönüne dik olacak şekilde tarama yapılmıştır. Levhaların ultrasonik teste göre değerlendirilmesi ASTM-A435-90 standardına göre yapılmıştır (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2001).

5. DENEY SONUÇLARI

5.1. Kimyasal Bileşim Değişim Sonuçları

Tablo 5.1'deki hedef kimyasal bileşimi "Sıcak Haddelenmiş Yapı Çeliği Spesifikasyonu" esas alınarak çelik üretimi şartlarına göre hazırlanmıştır.

Tablo 5.1. Sıcak haddelenmiş yapı çeliği hedef kimyasal bileşimi (%).

KİMYASAL ANALİZ										
	C	Mn	Si	Cr	Cu	Mo	Ti	V	Ni	Nb
Min.	0,15	1,30	0,30	-		-	0,015	0,08	-	-
Max.	0,18	1,50	0,50	0,08	0,12	-	0,025	0,12	0,10	0,008

Bu hedef kimyasal bileşime göre çelikhane'de S355 J0 J2 K2 ve S355 J2W kaliteleri için deneme dökümler yapılmıştır. Her bir deneme için hedef kimyasal bileşimdeki alaşım elementi değişiklikleri aşağıda tablolarda gri renkte belirtilmiştir.

S355 J0 J2 K2 kalite denemeleri kapsamında 5 adet farklı kimyasal bileşimde deneme üretimler yapılmıştır. Bu denemeler için kimyasal bileşim değişimleri tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. S355 J0 J2 K2 deneme üretimleri kimyasal bileşimleri (%).

KİMYASAL ANALİZ (S355 J0 J2 K2)										
Deneme No	C	Mn	Si	Cr	Cu	Mo	Ti	V	Ni	Nb
1	0,170	1,363	0,384	0,019	0,022	0,002	0,019	0,085	0,025	0,000
2	0,150	1,321	0,368	0,021	0,025	0,003	0,016	0,010	0,228	0,001
3	0,157	1,449	0,164	0,027	0,026	0,002	0,018	0,765	0,227	0,037
4	0,132	1,397	0,335	0,038	0,048	0,052	0,020	0,054	0,517	0,000
5	0,126	0,136	0,338	0,029	0,047	0,004	0,023	0,111	0,531	0,000

- Deneme üretimlerine standartlarda belirtilen hedef kimyasal bileşim ile başlanmıştır.

- 2. Deneme üretimin kimyasal bileşimi: % uzama değerinin artırılması amacıyla Ni (Nikel) (%0,228) içeriği artırılmıştır.

- 3. Deneme üretimin kimyasal bileşimi: Akma mukavemetinin arttırılmasına yönelik olarak Nb (Niyobyum) (%0,037) içeriği ve Ni (%0,227) içeriği arttırılmış bunun yanında Si (Silisyum) ve V (Vanadyum) içeriği azaltılmıştır.

- 4. Deneme üretimin kimyasal bileşimi: Mekanik özellikleri azaltmadan darbe mukavemetinin artırılması amacı ile C (Karbon) (%0,13) oranı düşürülmüş ve Ni (%0,517), Mo (molibden) (%0,05), V (%0,054) içerikleri arttırılmıştır.

- 5. Deneme üretimin kimyasal bileşimi: C (%0,12) oranı düşürülmüş ve Ni (%0,531), V(%0,054) içerikleri arttırılmış ve Mo ‘süz yapılmıştır.

S355 J2W kalite denemeleri kapsamında farklı kimyasal bileşimlerde 3 adet deneme üretimi yapılmıştır. Atmosfer korozyonuna direnci arttırmak için yüksek Cu/Cr (bakır/kromlu) olarak tasarlanmış bu denemeler için kimyasal bileşim değişimleri tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3. S355 J2W deneme üretimleri kimyasal bileşimleri (%).

KİMYASAL ANALİZ (S355 J2W)										
Deneme No	C	Mn	Si	Cr	Cu	Mo	Ti	V	Ni	Nb
1	0,136	1,310	0,302	0,495	0,410	0,003	0,02	0,008	0,036	0,044
2	0,116	0,141	0,361	0,457	0,309	-	0,018	0,077	0,298	0,001
3	0,134	1,299	0,372	0,455	0,284	-	0,021	0,047	0,147	0,023

- 1. Deneme üretimin kimyasal bileşimi: Kontrollü haddelemenin doğru sonuç vermesi için mikro alaşım elementli olarak % 0,044 Nb’lu olarak yapılmıştır. Karbon eşleniği (CE) 0,485 olarak gerçekleşmiştir. Nb yeniden kristalleşme sıcaklığını yükselterek, östenitin pankek yapısında ezilmesini sağlamakta ve uygulanan soğutma hızı ile ince taneli mikro yapının oluşumunu sağlamaktadır. (Barsom, 1995; Sezer, 2008)

- 2. Deneme üretimin kimyasal bileşimi: % uzama değerini geliştirmek, yüzey çatlaklarını engellemek amacıyla, Mn (Mangan) içeriği azaltılmış, Cu içeriği % 0,45-0,55 aralığından % 0,28-0,8 aralığına azaltılmıştır. Ni (%0,298), oranında ilave edilmiş, Nb ve Mo elementleri kaldırılmıştır. Mn elementinin azaltılması Nb elementinin kaldırılması ile mekanik değerlerde beklenen düşmeyi karşılamak

amacıyla, çökelme sertleşmesi mekanizması ile mukavemet artışı sağlanması için V (%0,077) ilavesi yapılmıştır. Karbon eşleniği (CE) 0,454 olarak gerçekleştirilmiştir.

- 3. Deneme üretimin kimyasal bileşimi: Akma mukavemetini geliştirmek ve kimyasal bileşimi optimize etmek amacıyla, Mn değeri % 1,05-1,25 aralığından % 1,25-1,45 aralığına artırılmış, Sİ (Silisyum) elementi alt sınırdan gelme ihtimaline karşın % 0,30-0,45 aralığından % 0,35-0,45 getirilmiş, Nb elementi % 0,02-0,03 aralığında tekrar ilave edilmiştir. V elementi % 0,07-0,09 aralığından % 0,04-0,05 aralığına düşürülmüş, Ni elementi % 0,25-0,35 aralığından % 0,10-0,20 aralığına düşürülmüştür. 2. Deneme üretimin kimyasal bileşimine göre, Mn elementi yaklaşık aynı seviye getirilmiş, Nb elementi azaltılarak % 0,02-0,03 aralığında tekrar ilave edilmiştir. V elementi % si azaltılarak kullanıma devam edilmiştir. Karbon eşleniği (CE) değeri 0,479 olarak gerçekleştirilmiştir.

5.2. Mekanik Test Sonuçları

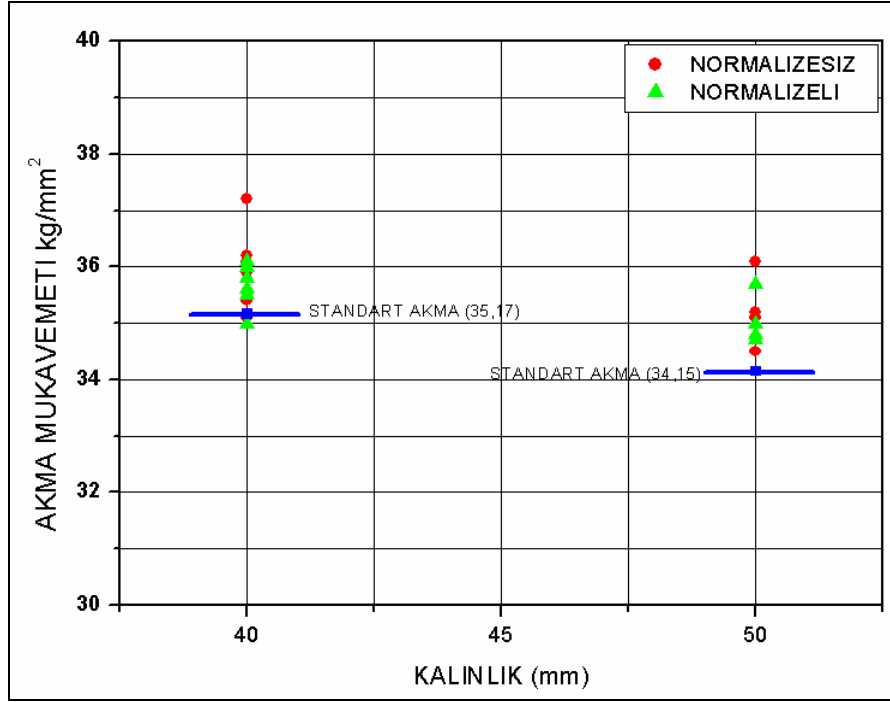
S355 J0 J2 K2 kalite için 5 adet ve S355 J2W kalite için 3 adet olmak üzere toplam 8 adet farklı kimyasal bileşimde deneme üretimler gerçekleştirilmiş olup üretilen levhalara normalizesiz ve normalizeli olarak mekanik çekme testleri ve normalizesiz levhalara 0, -20 ve -40°C de normalizeli levhalara ise -20 ve -40 °C ler için darbe testleri yapılmıştır.

Tüm levhalara ait mekanik test ve darbe testi sonuçları EK.2 'de (Tablo.Ek-2.1-Ek-2.8) verilmiş olup grafik ve değerlendirmeler bu tablolarda verilen değerlere göre yapılmıştır.

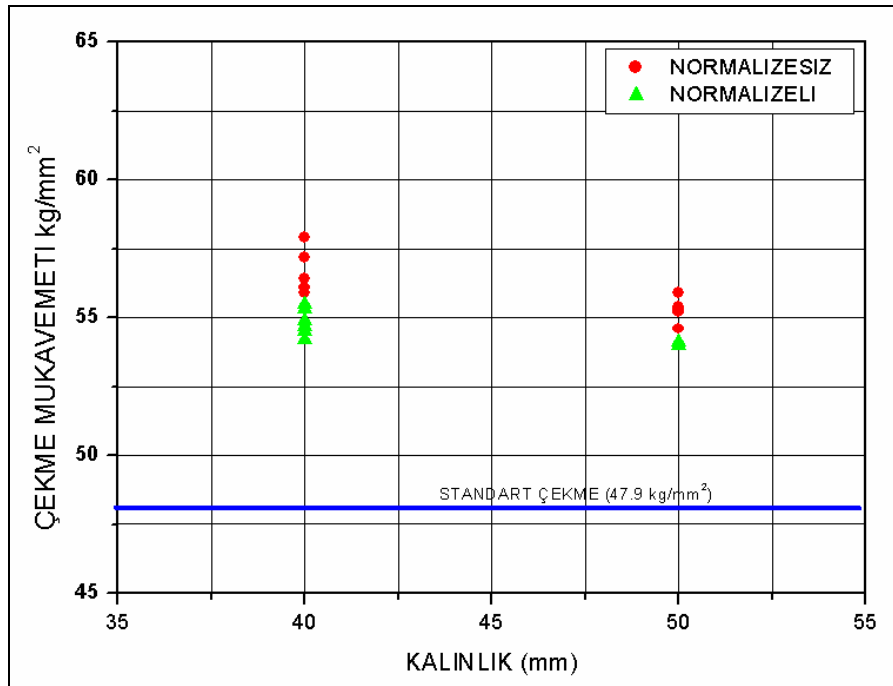
5.2.1. S355 J0 J2 K2 Kalite Çekme Testi Sonuçları

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi 1. Deneme de 40 mm kalınlılar için normalizesiz levha numunelerin akma mukavemet değerleri genel olarak alt sınıra yakın gelmiştir. Normalizesiz ve normalizeli 1'er adet olmak üzere toplam 2 adet levha standardın altında gelmiştir. 50 mm kalınlıklarda ise tüm levhalar standardı sağlamıştır.

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi normalizeli ve normalizesiz tüm numunelerin çekme mukavemet değerleri standardı sağlamıştır.

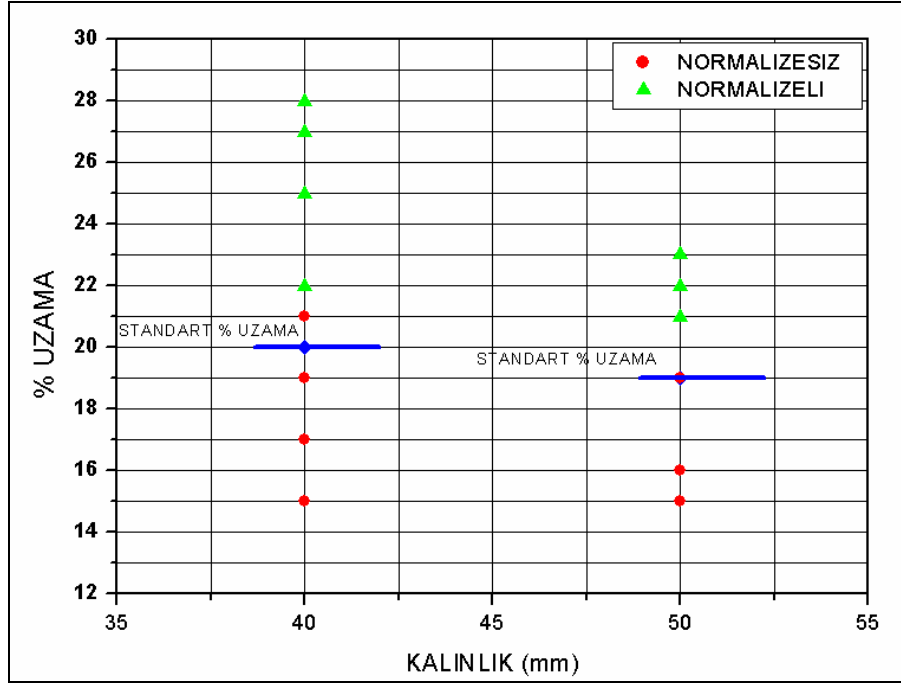


Şekil 5.1. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha akma mukavemet değerleri.



Şekil 5.2. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha çekme mukavemet değerleri.

Şekil 5.3'de görüldüğü gibi normalizesiz levha numunelerinde 40 mm'de 3 levha ve 50 mm de 2 levha haricinde % uzama değerlerinin çok düşük geldiği buna karşın normalizeli tüm levhaların standardı sağladığı tespit edilmiştir.



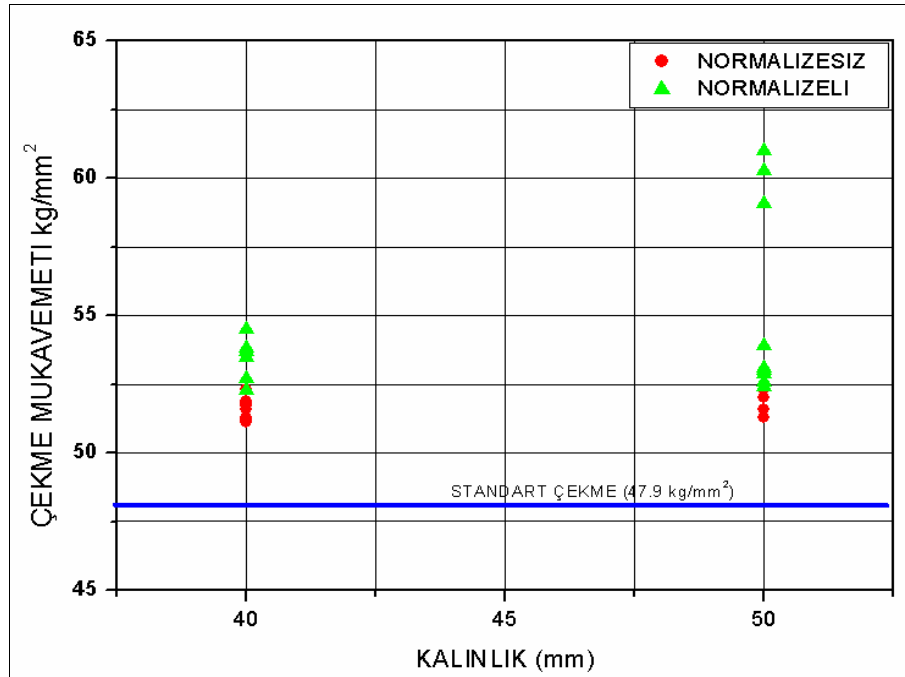
Şekil 5.3. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.

Elde edilen bulgulara göre % uzama değerlerinin çok düşük geldiği görülmüştür. Levhalara yapılan ultrasonik test (ULT) sonuçlarına göre malzemelerin merkezi segregasyon bölgelerinde mikro laminasyon kusurları ihtiva ettiği tespit edilmiştir. Çekme testinde, mikro laminasyonlu bölgeler çatlak başlangıcı olarak davrandığı ve % uzama değerinin düşük gelmesine neden olduğu, normalize sonrası mikro yapının homojen haline gelmesi ile birlikte mikro laminasyonlardan kaynaklı çatlak ilerleme hızının azaldığı ve % uzama değerinin standardın üzerinde çıktığı görüşüne varılmıştır.

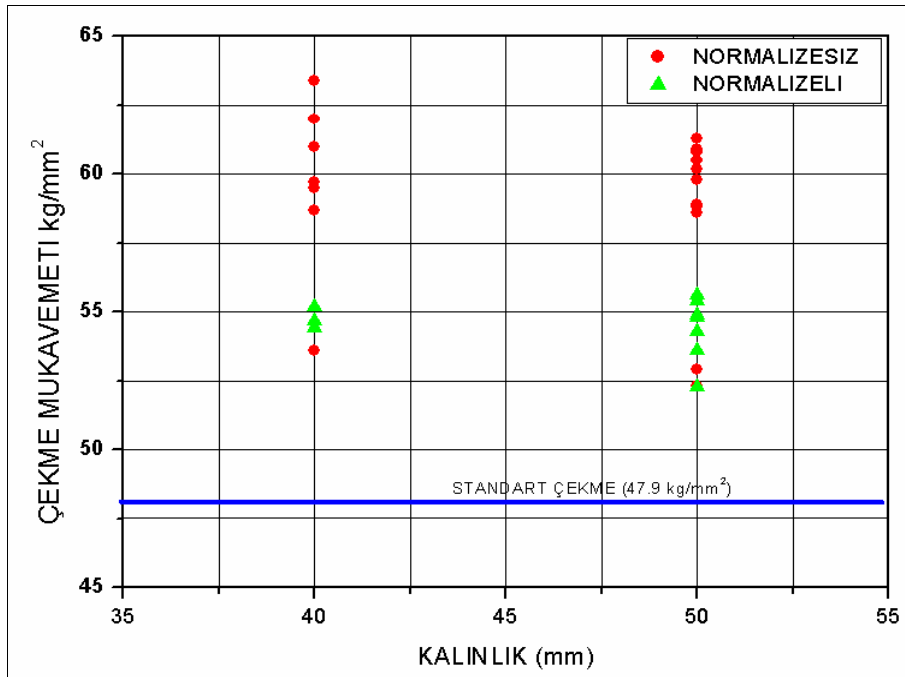
1. Denemede elde edilen düşük % uzama değerinin artırılması amacı ile 2. deneme ve akma mukavemetinin artırılmasına yönelik olarak 3. deneme üretimleri yapılmıştır (bkz. Tablo 5.2). Ayrıca bu denemede ilk olarak üretilen levhaların bazılarında yığın soğutma şekli uygulanmıştır.

Şekil 5.4'de görüldüğü gibi 2. deneme üretiminin 40 mm ve 50 mm kalınlığındaki normalizeli ve normalizesiz levhaların akma mukavemet değerleri genel olarak alt sınıra yakın veya altında gelmiştir.

Şekil 5.6 ve 5.7’de görüldüğü gibi her iki deneme için normalizeli ve normalizesiz tüm numunelerin çekme mukavemet değerleri standardı sağlamıştır.

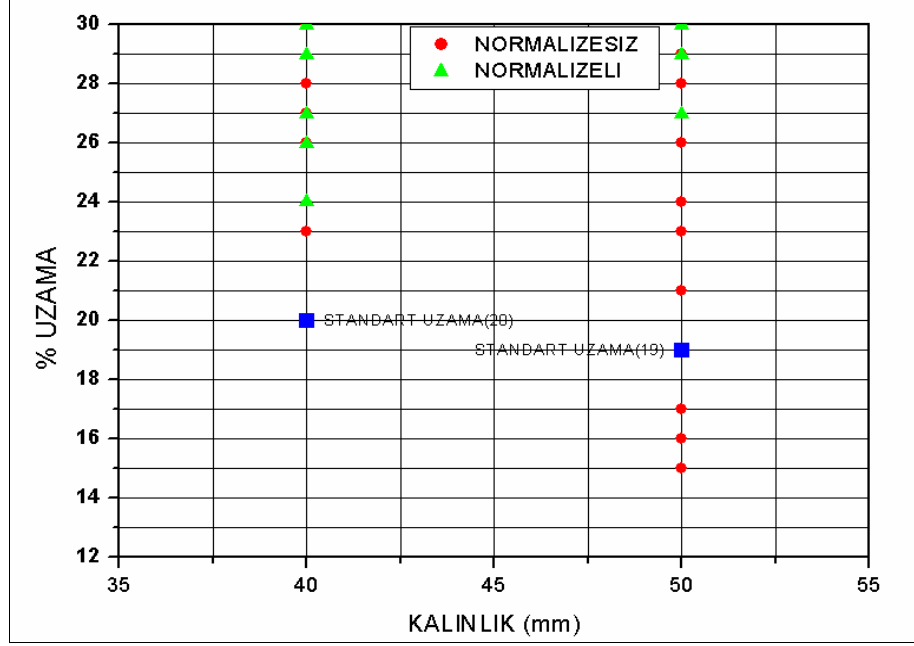


Şekil 5.6. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha çekme mukavemet değerleri.



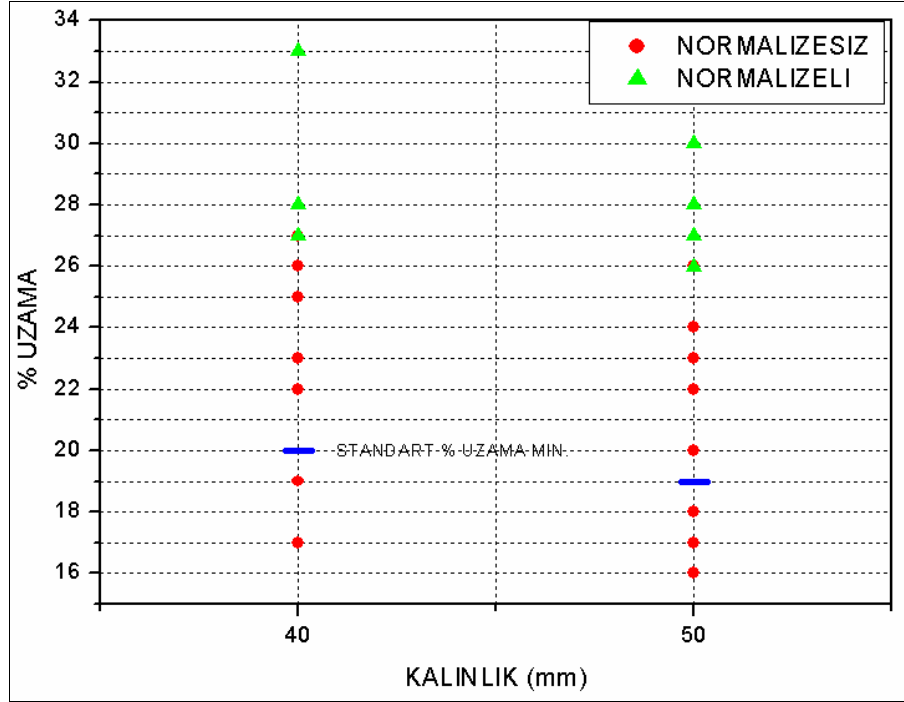
Şekil 5.7. 3. Deneme (S355 J0 J2 K2) çekme mukavemet değerleri.

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi 2. denemeden elde edilen normalizesiz levhaların % uzama değerlerinin standardı sağlamakla birlikte yığın soğutma yapılmadan soğutma yatağında hızlı soğuyan 50 mm kalınlığındaki malzemelerde standardın altında kalan değerler görülmüştür. 1.Deneme normalizeli levha numuneleri %20-25 aralığında gelen % uzama değerleri 2. deneme de ise %25-30 aralığında gelmiştir.



Şekil 5.8. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi 3. denemede elde edilen normalizesiz levha numunelerinde % uzama değerleri 2 adet 40 mm ve 3 adet 50 mm kalınlığındaki levha standardı sağlamamıştır, soğutma yatağında hızlı soğuyan levha numunelerinin çoğunluğunda % uzama değerleri standardın altında kalmıştır. Standardın üstünde kalan levhaların 1 adet dışında tamamı yığın soğutmalıdır. Test yapılan normalizeli levha numunelerinin tamamı % 28-33 aralığında gelerek standardı sağlamıştır.

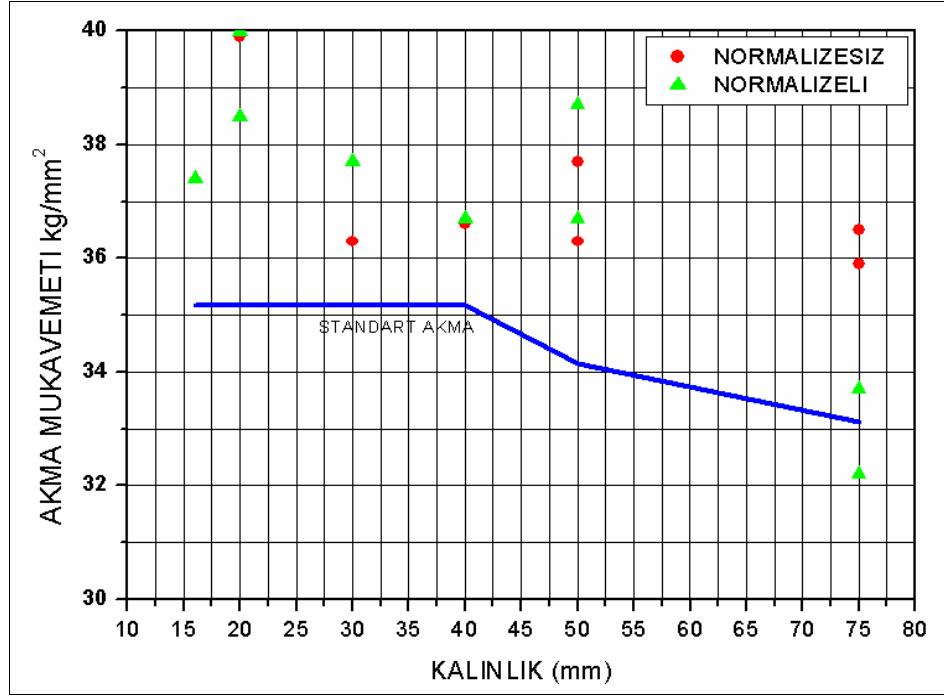


Şekil 5.9. 3. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.

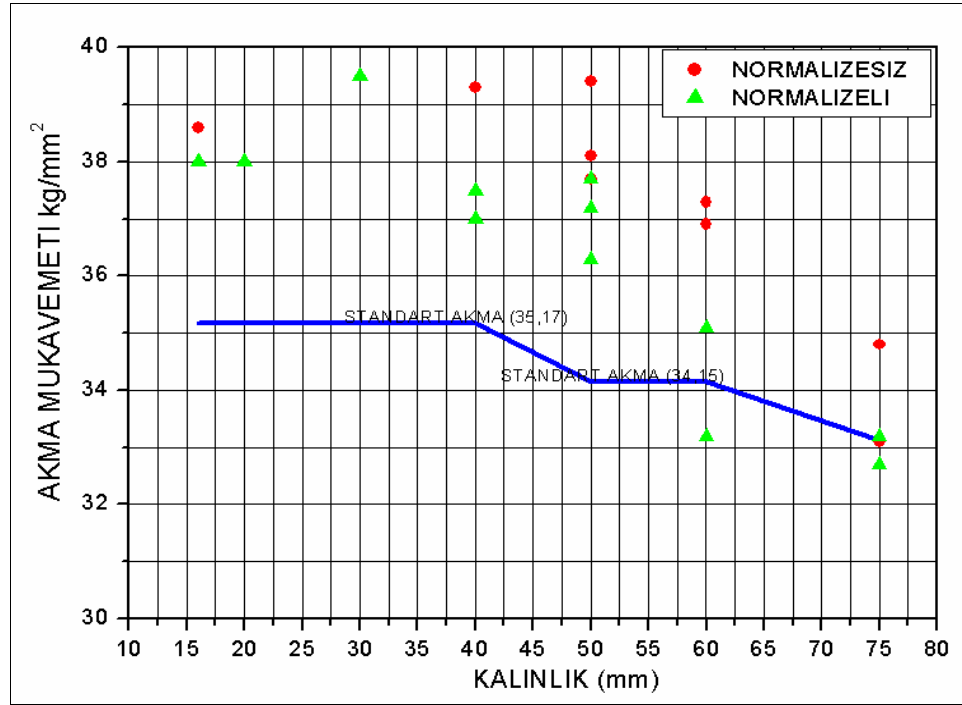
S355 J0 J2 K2 kalitesi için bir önceki deneme üretimde elde edilen mekanik özellikleri azaltmadan darbe mukavemetinin artırılması amacı ile kimyasal bileşimin optimize edilmesi için 4. ve 5. deneme üretimleri yapılmıştır.

Yığın soğutma yapılmayan levhaların tamamında laminasyon kusuru görülmesine rağmen, uygun şartlarda yığın soğutma ile soğutulan levhalarda laminasyon kusuruna rastlanmamıştır. Yığın soğutmalı üretilen bütün levhaların ultrasonik testinden (ULT) geçmesi, malzemelerin yığın soğutma ile üretilmesinin ULT için gerekli olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Şekil 5.10 ve 5.11’de görüldüğü gibi her iki denemede 60 mm kalınlığa kadar, normalizeli ve normalizesiz numunelerde akma mukavemeti genel olarak istenen özellikleri sağlamakla birlikte 60 mm ve yukarısında normalize sonrası standardın altına düşen değerler görülmüştür.

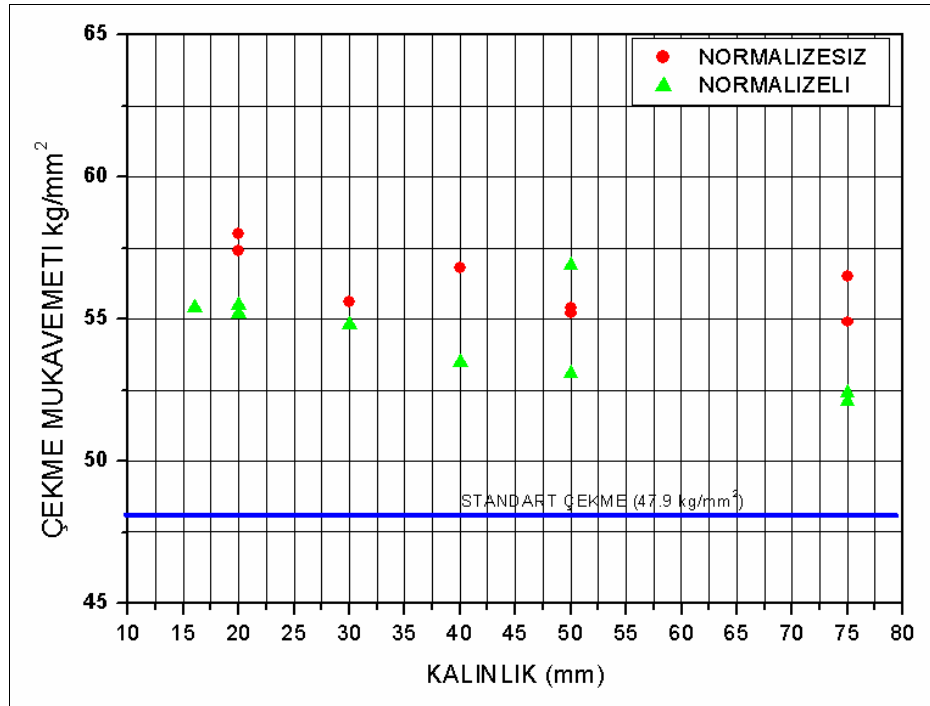


Şekil 5.10. 4. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha akma mukavemet değerleri.

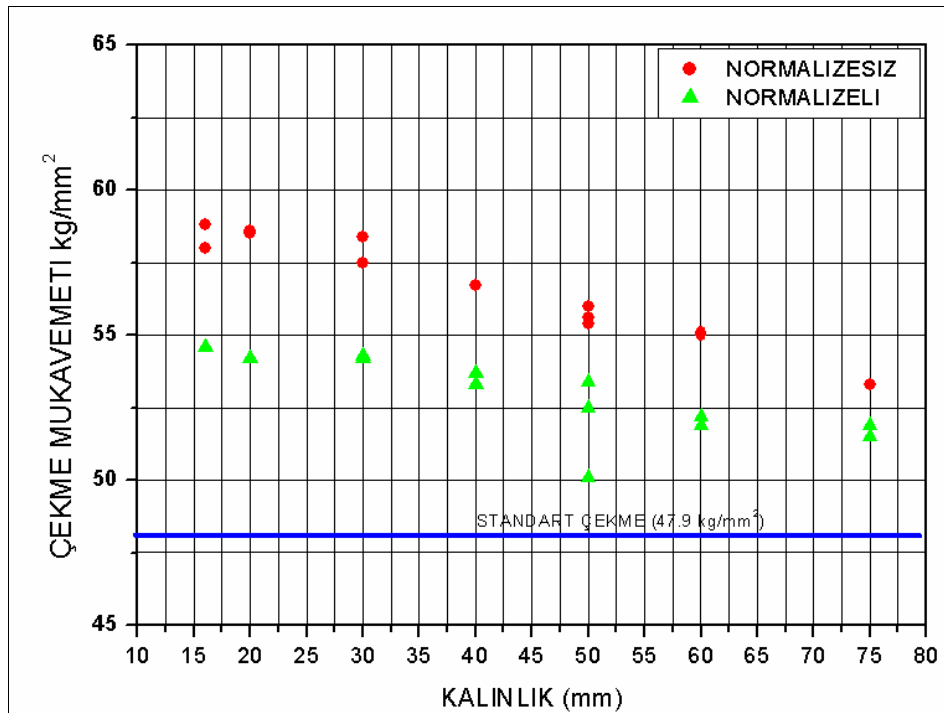


Şekil 5.11. 5. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha akma mukavemet değerleri.

Şekil 5.12 ve 5.13’de görüldüğü gibi her iki denemede de normalizeli ve normalizesiz tüm numunelerin çekme mukavemet değerleri standartları sağlamıştır.

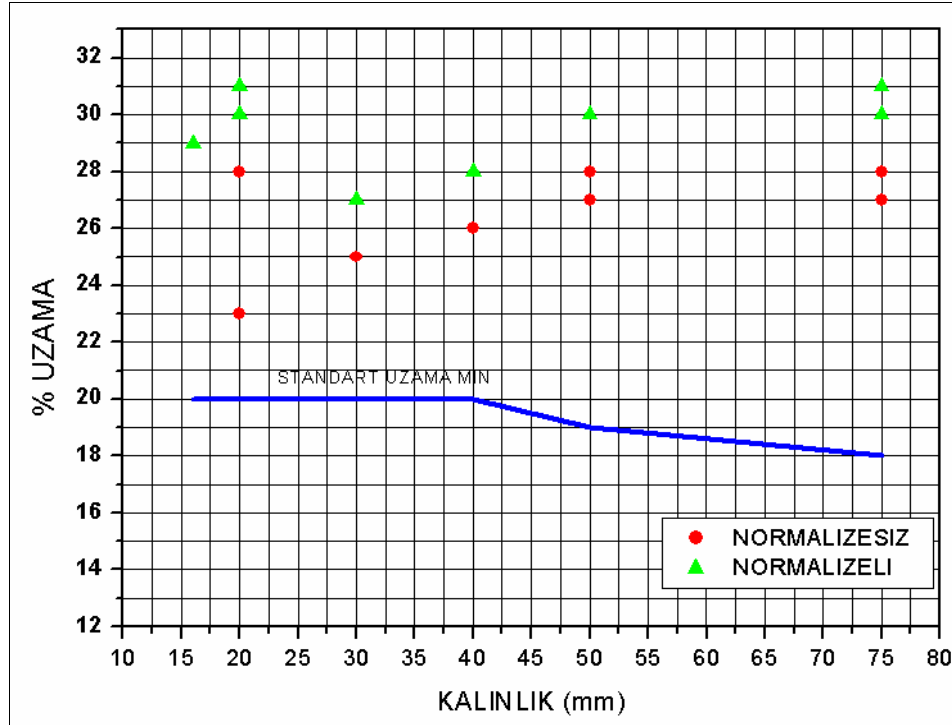


Şekil 5.12. 4. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha çekme mukavemet değerleri.

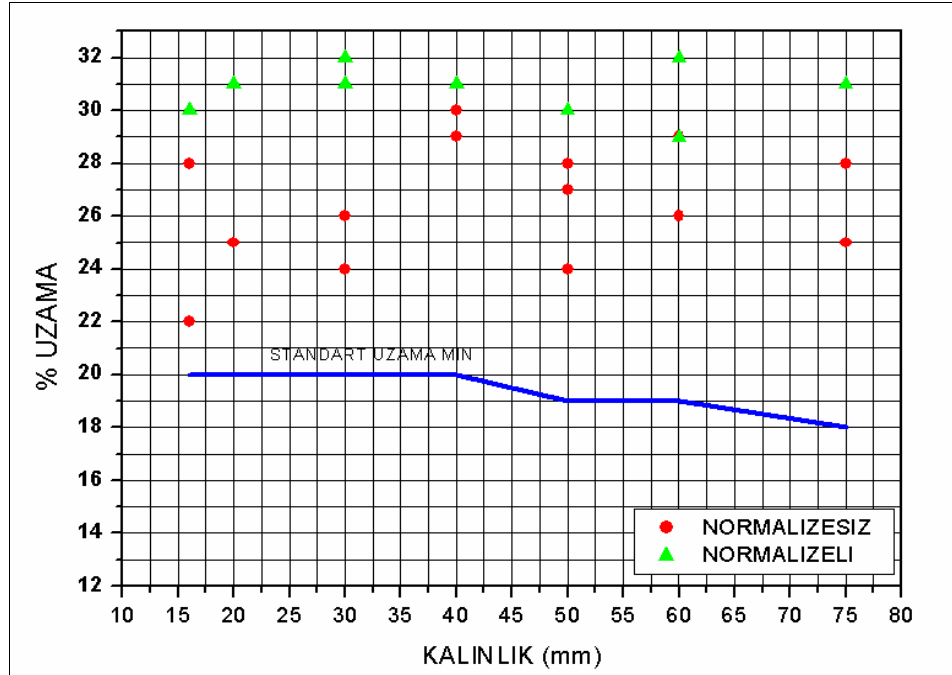


Şekil 5.13. 5. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha çekme mukavemet değerleri.

Şekil 5.14 ve 5.15’de görüldüğü gibi standardın istediği % uzama değerleri son iki deneme de 16-75 mm kalınlık aralığında normalizeli ve normalizesiz olarak sağlanmıştır.



Şekil 5.14. 4. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.

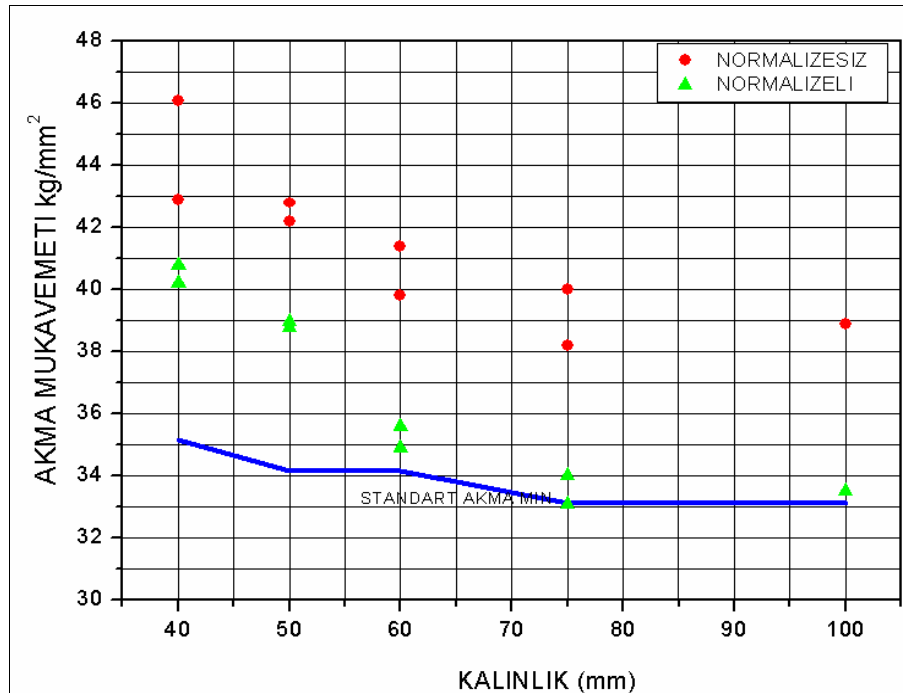


Şekil 5.15. 5. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha % uzama değerleri.

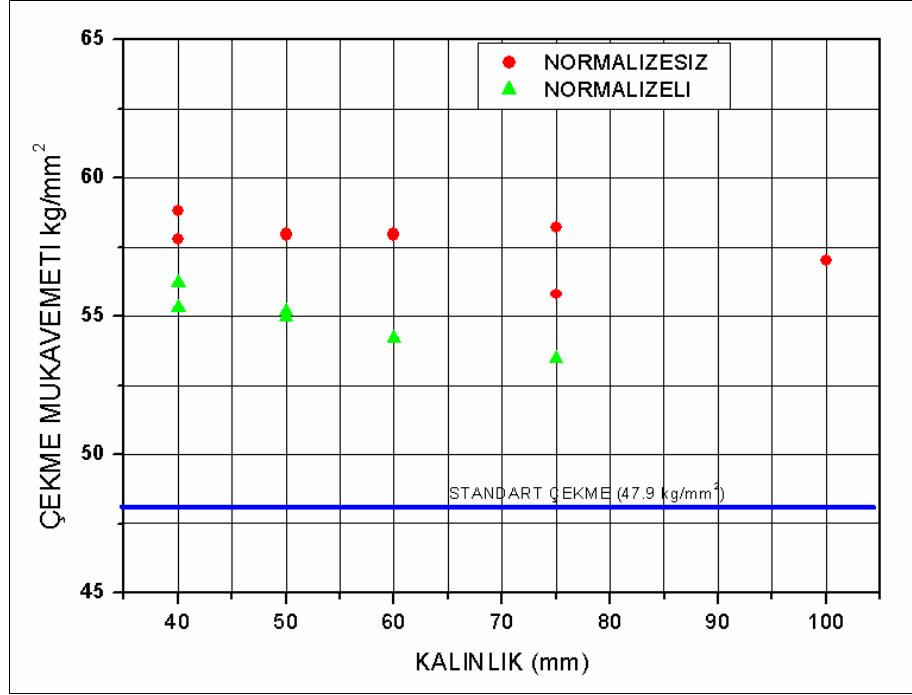
5.2.2. S355 J2W Kalite Çekme Testi Sonuçları

S355J2W (Atmosfer korozyonuna dayanımı iyileştirilmiş çelik) kalitesi denemelerine korozyon direncinin artırılması için yüksek bakır/kromlu ve termomekanik haddelemenin mekanik özelliklere etkisinin görülmesi için mikro alaşımlı olarak tasarlanmış 1. deneme üretimin hedef kimyasal bileşimi ile başlanmıştır.

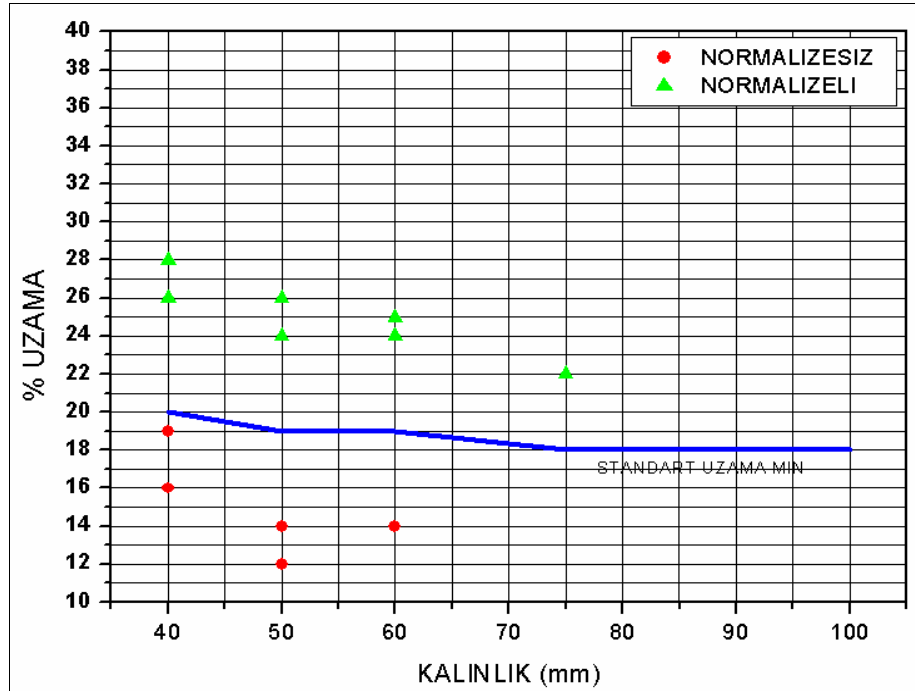
1. Deneme üretiminden elde edilen levhalara ait şekil 5.16'da akma mukavemeti, 5.17'de çekme mukavemeti ve şekil 5.18'de % uzama grafikleri verilmiştir. Grafikler de görüldüğü gibi normalizesiz levha numunelerin çekme testinde akma ve çekme mukavemet değerleri minimum değeri sağlarken % uzama değerlerinin çok düşük geldiği görülmüştür. Normalizeli levha numunelerin çekme testinde 60 mm kalınlığa kadar akma-çekme ve % uzama değerleri mekanik özellikleri sağladığı görülmüştür. 75-100 mm kalınlığındaki levha numunelerinde akma mukavemet değerlerinin minimumum altında kaldığı görülmektedir. Tüm kalınlıklarda bu kimyasal bileşimde (bkz. Tablo 5.3) termomekanik haddeleme sonrası % uzama değerleri için standardın karşılanamadığı normalize edilmiş levha numunelerinde akma ve çekme mukavemetlerinde toparlanma ve % uzama değerlerinin standartlar içersinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.16. 1. Deneme (S355 J2W) levha akma mukavemet değerleri.



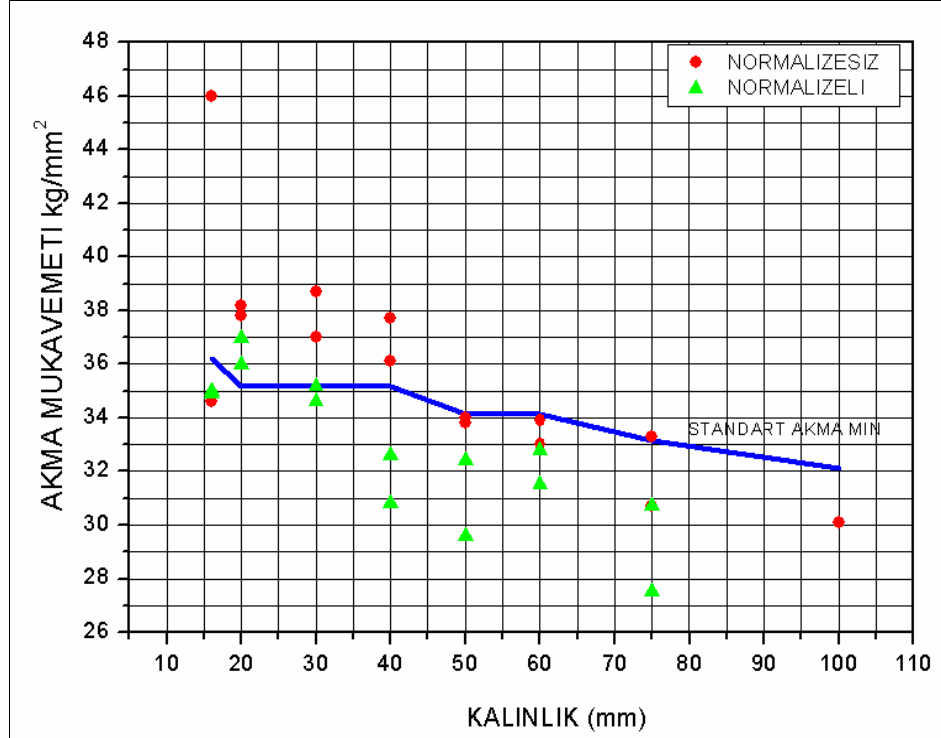
Şekil 5.17. 1. Deneme (S355 J2W) levha çekme mukavemet değerleri.



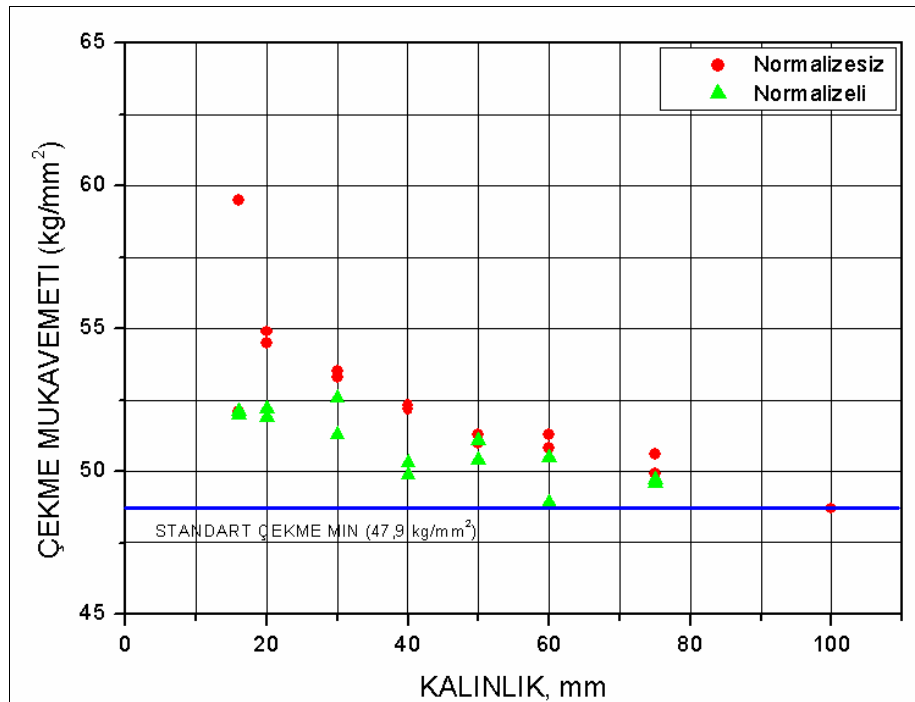
Şekil 5.18. 1. Deneme (S355 J2W) levha % uzama değerleri.

Haddeleme sonrası % uzama değerlerinin çok düşük çıkması ve Ultrasonik Test (ULT) sonuçlarının bozuk çıkması sonucunda yığın soğutma ile üretilmesine karar verilmiştir.

Bir önceki denemeye göre mekanik özelliklerin geliştirmesi amacı ile 2. deneme yapılmıştır. Şekil 5.19’da gösterildiği gibi 50 mm dahil altı kalınlıklarda normalizesiz ve 40 mm kalınlık dahil altında normalizeli levha numunelerinde akma mukavemeti istenen özellikleri sağlamıştır.



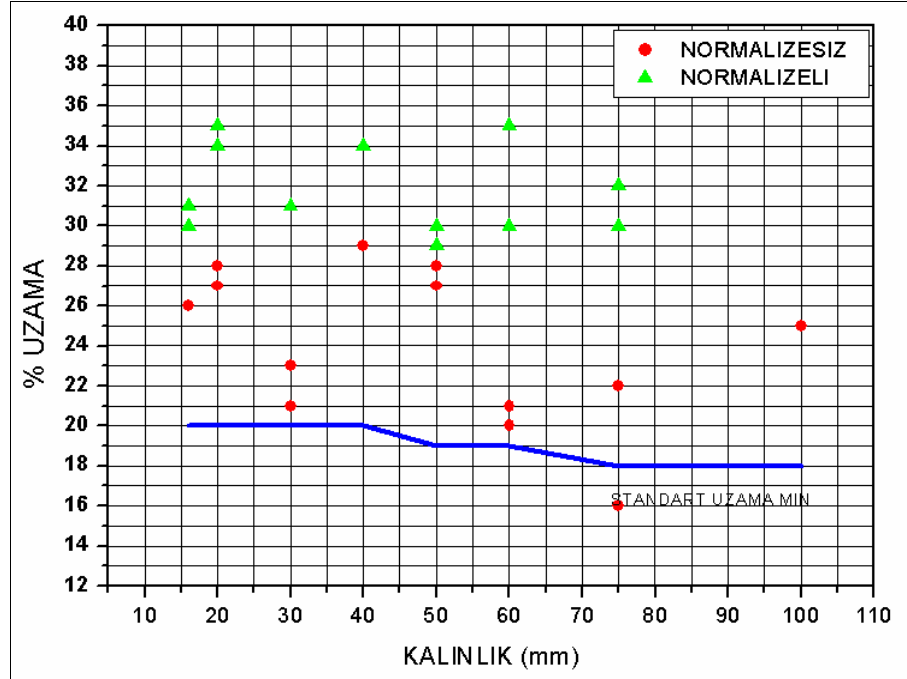
Şekil 5.19. 2. Deneme (S355 J2W) levha akma mukavemet değerleri.



Şekil 5.20. 2. Deneme (S355 J2W) levha çekme mukavemet değerleri.

Şekil 5.20’de gösterildiği gibi, tüm kalınlıklarda normalizesiz ve normalizeli levha numunelerinde çekme mukavemet değerleri standardı sağlamıştır.

Şekil 5.21’de gösterildiği gibi normalizesiz numunelerde % uzama değerleri, istenen minimum %19 değerini 1 levha dışında (75mm %16) %20-%28 aralığında sağlamıştır. Normalizeli levha numunelerinde % uzama değerleri ise tüm kalınlıklarda %29-%35 aralığında gelmiştir.

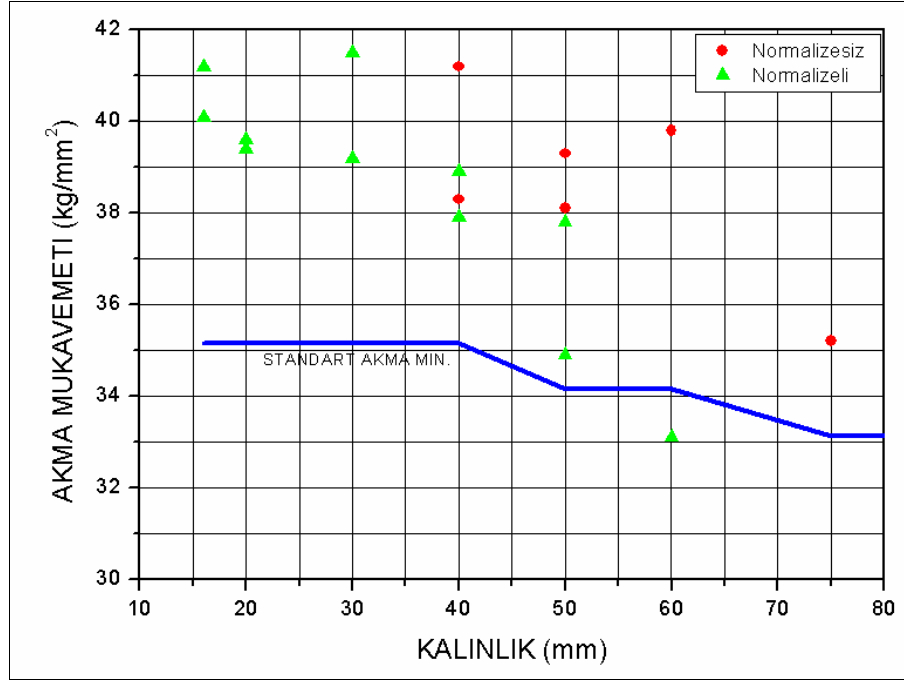


Şekil 5.21. 2. Deneme (S355 J2W) levha % uzama değerleri.

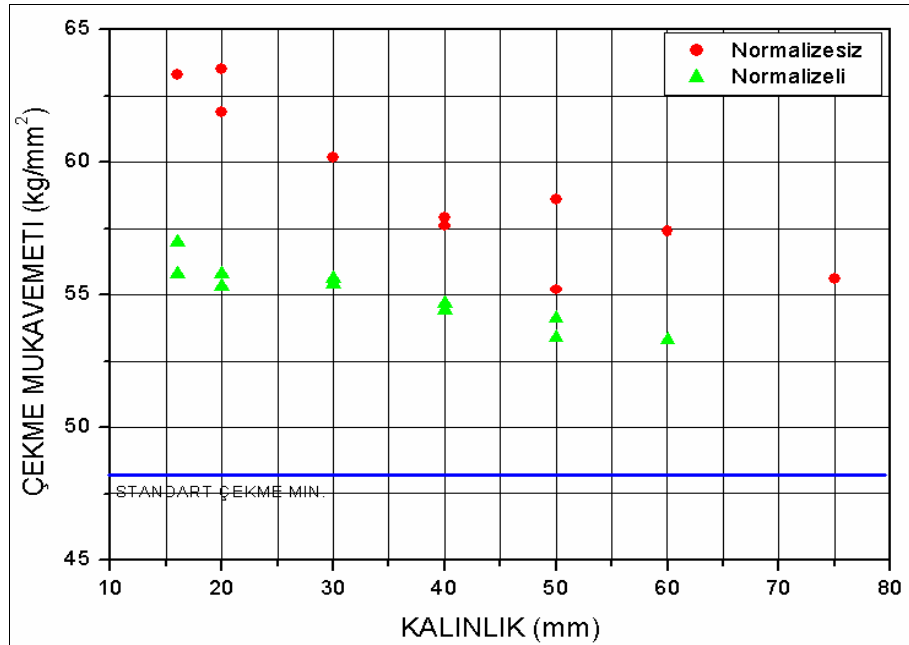
S355 J2W kalitesinin akma mukavemetini geliştirmek ve kimyasal bileşimi optimize etmek amacıyla son 3. deneme üretimi yapılmıştır.

Şekil 5.22’de görüldüğü gibi, 3. deneme normalizesiz levha numunelerin çekme testinde, tüm kalınlıklardaki levha numunelerin akma mukavemeti değerleri standardı sağlarken, 75 mm kalınlılar için standardı karşılamakla birlikte alt sınıra yakın sonuçlar çıkmıştır. Normalizesiz levha numunelerinde sadece 60 mm kalınlıktaki levha numunelerinde akma mukavemetinin minimum değerinin altında kaldığı görülmüştür.

Şekil 5.23’de görüldüğü gibi normalizesiz ve normalizeli levha numunelerin tamamı çekme mukavemet değerlerini sağladığı görülmüştür.

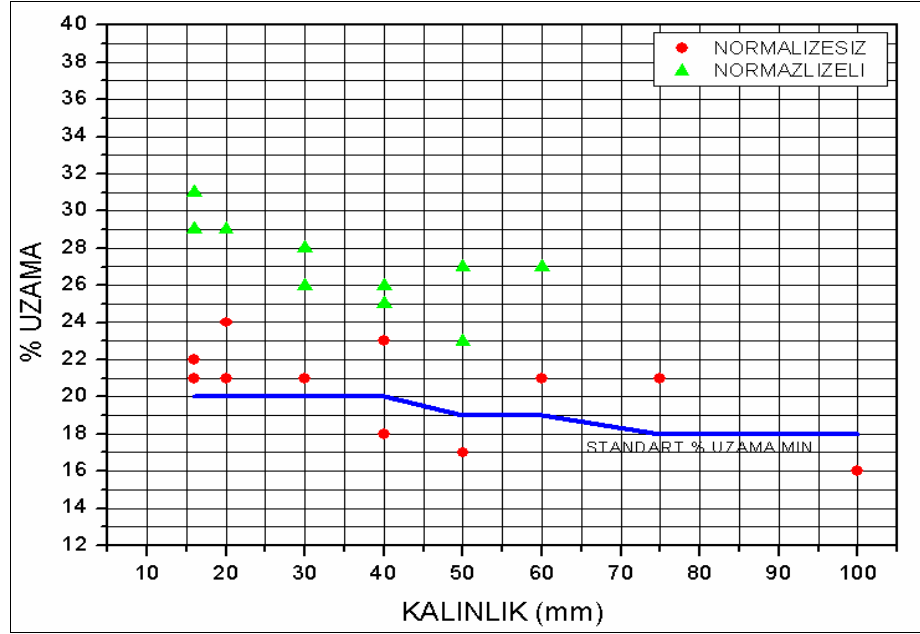


Şekil 5.22. 3. Deneme (S355 J2W) levha akma mukavemet değerleri.



Şekil 5.23. 3. Deneme (S355 J2W) levha çekme mukavemet değerleri.

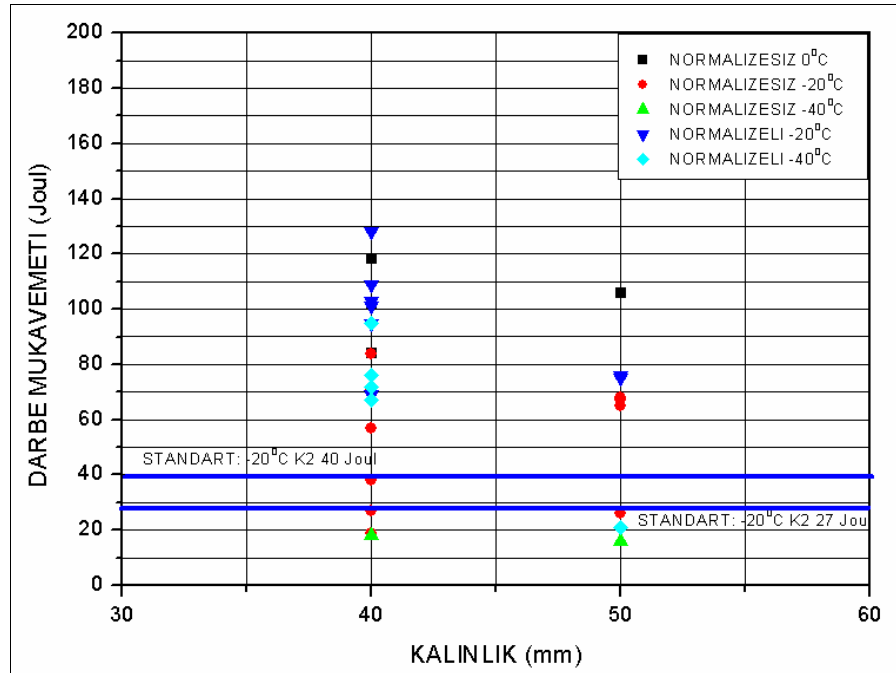
Şekil 5.24'de görüldüğü gibi, normalizesiz levha numunelerinde % uzama değeri olarak 40 mm kalınlığa kadar minimum standart değerine yakın ve 40 mm sonrasında standardın altında kalan levhalar olduğu görülmüştür. Normalizeli levha numunelerinde % uzama değerleri tüm levhalarda %23-%31 arasında gelmiştir.



Şekil 5.24. 3. Deneme (S355 J2W) levha % uzama değerleri.

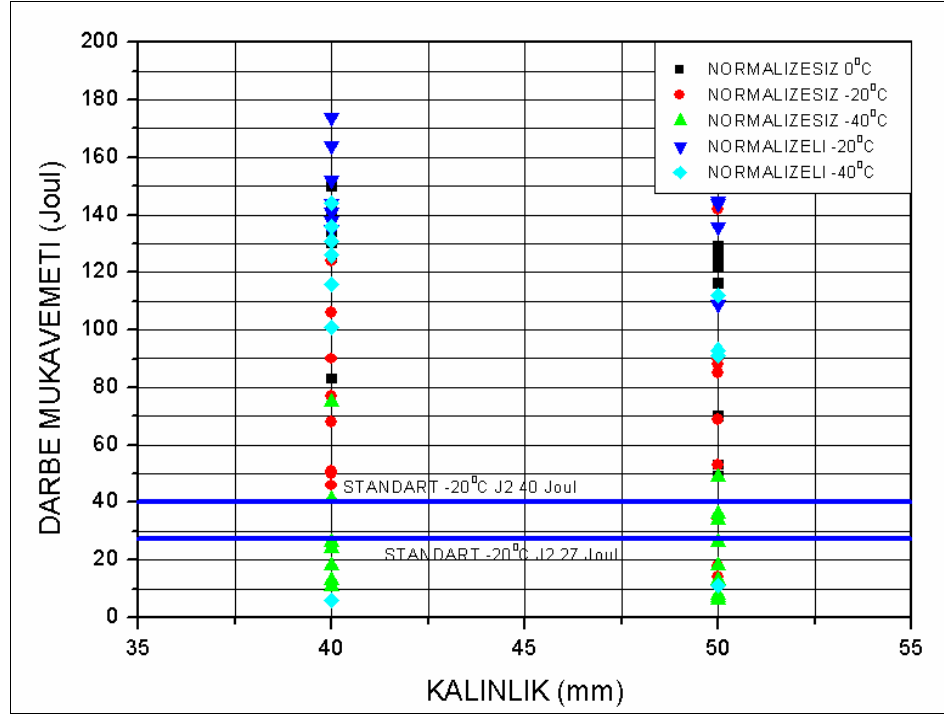
5.2.3. S355 J0 J2 K2 Kalite Darbe Deneyi Sonuçları

1. Deneme üretim için şekil 5.25’de görüldüğü gibi normalizesiz levha numunelerinde 0 °C değerleri uygun -20 ve -40 °C de standardın altında değerler tespit edilmiştir. Normalizeli levha numunelerinde -20°C de J2 (27 Joul) ve K2 (40 Joul) için standart minimum değerleri sağlanmış fakat -40 °C de standardın altında gelen değerler görülmüştür.



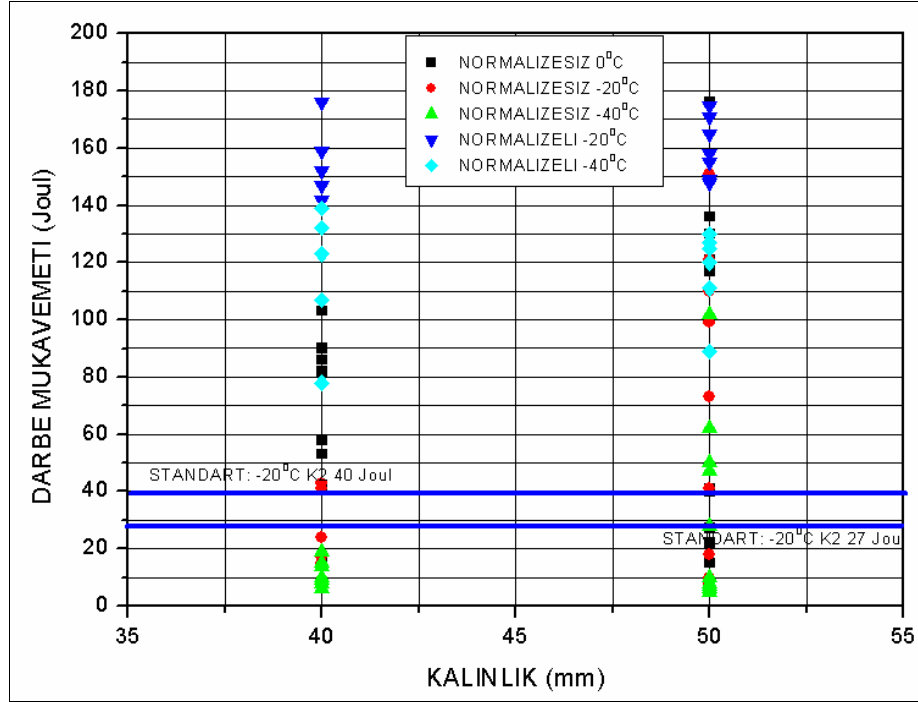
Şekil 5.25. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.

2. Deneme'ye ait darbe deneyi sonuçları Şekil 5.26'da verilmiştir. Darbe mukavemetlerine bakıldığında normalizesiz 0°C değerleri standardı sağlamakta birlikte -20 ve -40 °C de standardın altında gelen değerler tespit edilmiştir. Normalize sonrasında ise -20 °C de J2 (27 Joul) ve K2 (40 Joul) değerleri sağlanmış fakat -40°C değerlerinde düşük gelenlerin olduğu görülmüştür.



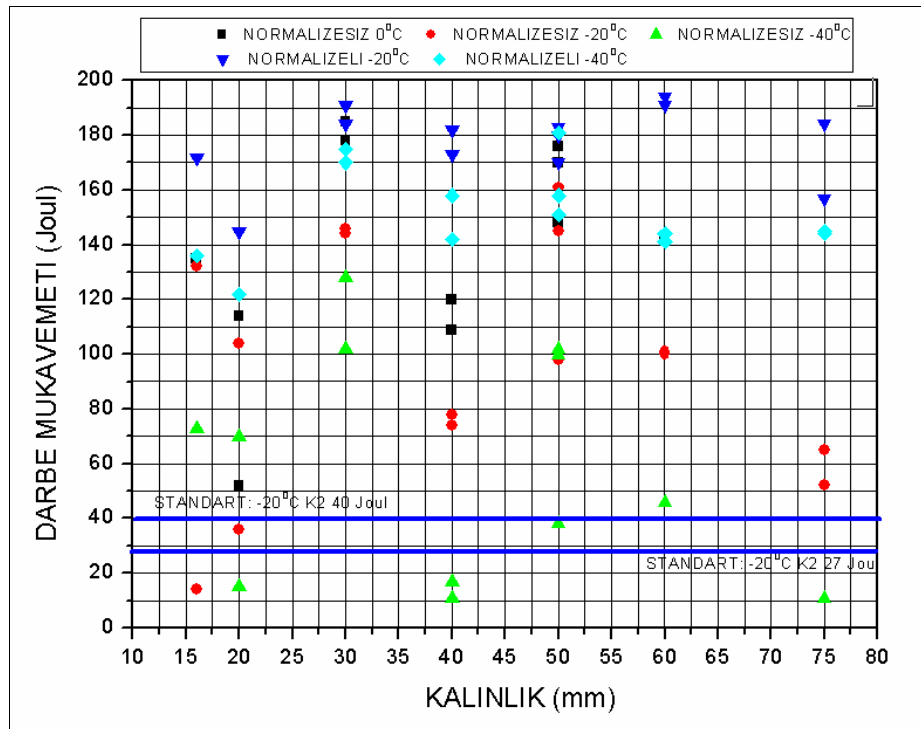
Şekil 5.26. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.

3. Deneme de elde edilen levhaların darbe deneyi sonuçları Şekil 5.27'de verilmiştir Normalizesiz 0, 20 ve -40°C de standardın altında gelen değerler tespit edilmiştir. Normalize sonrasında ise -20°C da J2 ve K2 değerleri sağlanmış ve -40°C değerler düşmekle birlikte standardı sağlamıştır.



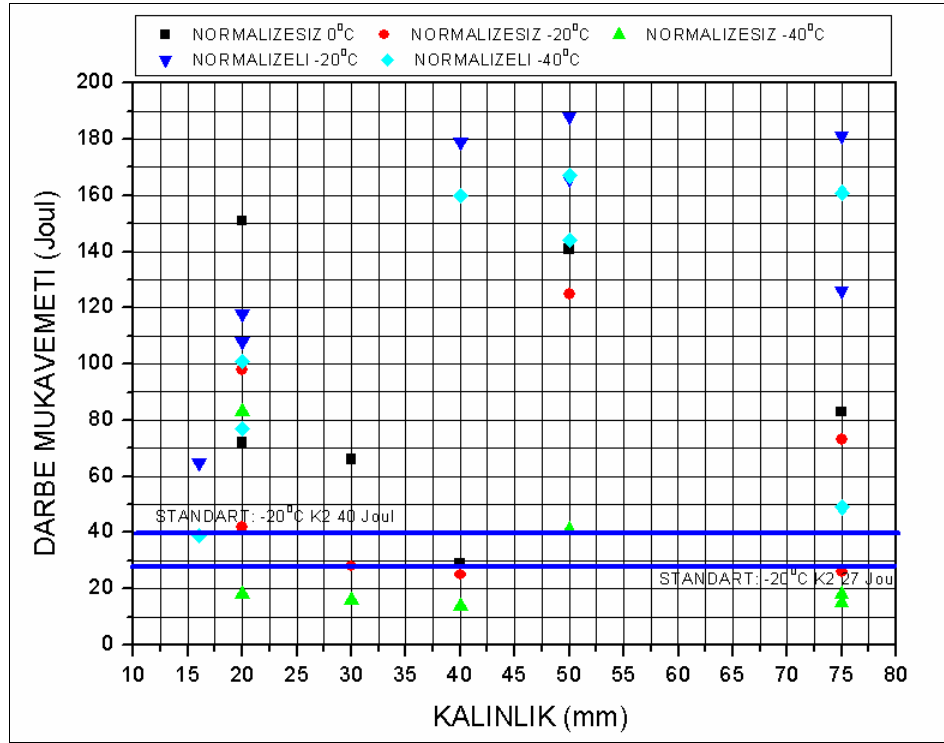
Şekil 5.27. 3. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.

Şekil 5.28 ve 5.29'da sırası ile 4. ve 5. Deneme levhalara ait darbe deneyi sonuçları verilmiştir. 4. Denemenin normalizesiz levha numunelerine yapılan darbe mukavemeti sonuçlarında, standardın altında değerler çıkmıştır.



Şekil 5.28. 4. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.

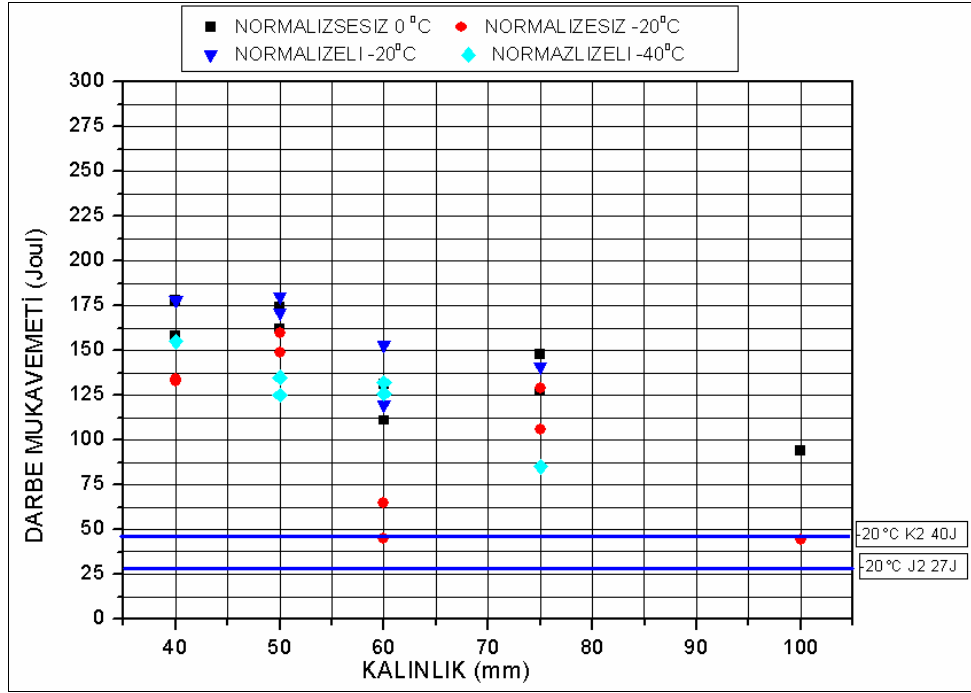
Şekil 5.29’da da görüldüğü gibi 5. deneme üretiminden elde edilen levhaların darbe deneyi sonuçlarında -20°C de nispeten daha iyi sonuçlar alınmasına karşı S355 J0 ve S355 K2 kaliteleri için garantili bölgede kalınması amacıyla mutlaka normalizeli olarak üretilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. S355 J0 için normalize yapılması, ancak üretim programına bağlı olarak normalizesiz de üretim yapılabileceği belirlenmiştir.



Şekil 5.29. 5. Deneme (S355 J0 J2 K2) levha darbe deney sonuçları.

5.2.4. S355 J2W Kalite Darbe Deneyi Sonuçları

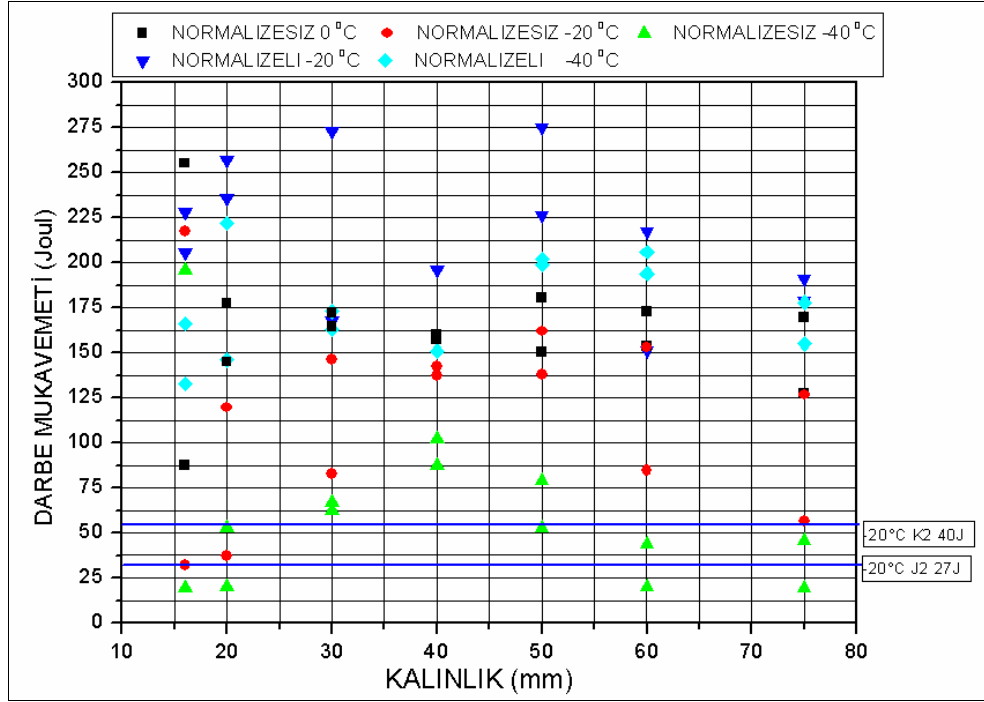
Şekil 5.30'da görüldüğü gibi 1. deneme üretimin normalizesiz levha numunelerinin 0 °C darbe değerleri uygun -20°C de 60 ve 100mm kalınlık levha numunelerinde düşme görülmektedir. Normalize sonrasında ise -40 °C da bile tüm levha numunelerinde değerler 100 J üzerine gelmiştir.



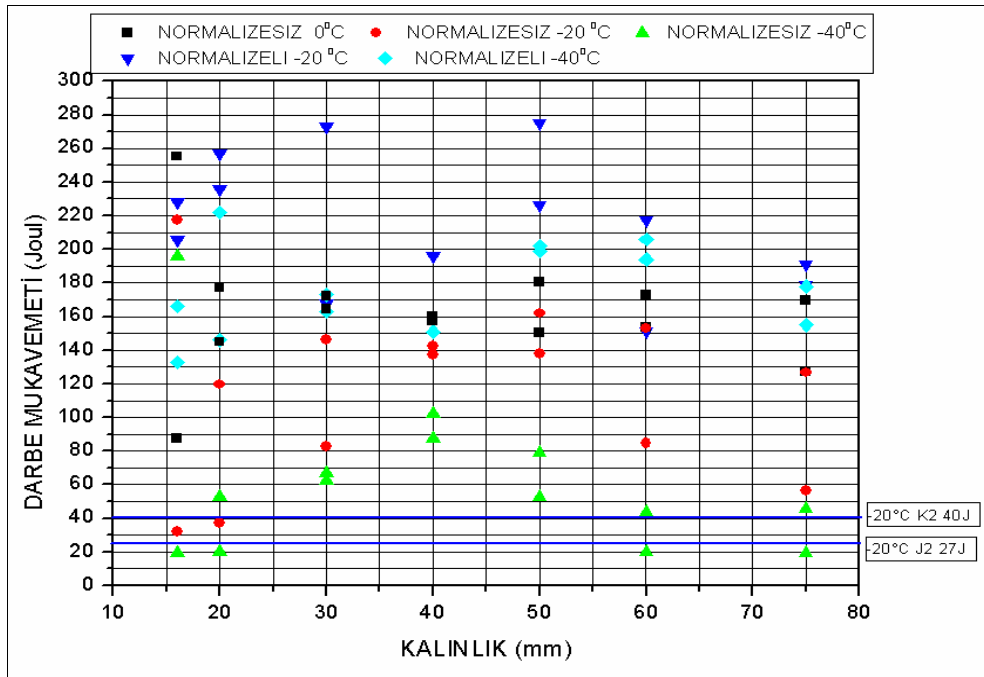
Şekil 5.30. 1. Deneme (S355 J2W) levha darbe deney sonuçları.

2. Deneme için şekil 5.31'de görüldüğü gibi normalizesiz levha numunelerine yapılan darbe testinde -20°C de düşük gelen değerler bulunurken, -40°C de standardın altına düşen değer oldukça fazladır. Normalizeli levha numunelerine yapılan darbe testinde ise -40 °C ye kadar olan tüm darbe değerleri oldukça yüksek gelmiştir.

3. Deneme için şekil 5.32 'de görüldüğü gibi normalizesiz levha numunelerine yapılan darbe testine -20°C de 30 mm kalınlığa kadar ortalama darbe değeri 57 J gelmiştir. Normalizeli levha numunelerinde aynı kalınlık aralığında ortalama 196 Joul gelmektedir. -20°C de S355 J2W kaliteleri için garantili bölgede kalınması amacı ile mutlaka normalizeli olarak üretilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. S355 J0W için normalize yapılması, kullanım yerine göre bağlı olması uygun olacaktır.



Şekil 5.31. 2. Deneme (S355 J2W) levha darbe deney sonuçları.



Şekil 5.32. 3. Deneme (S355 J2W) levha darbe deney sonuçları.

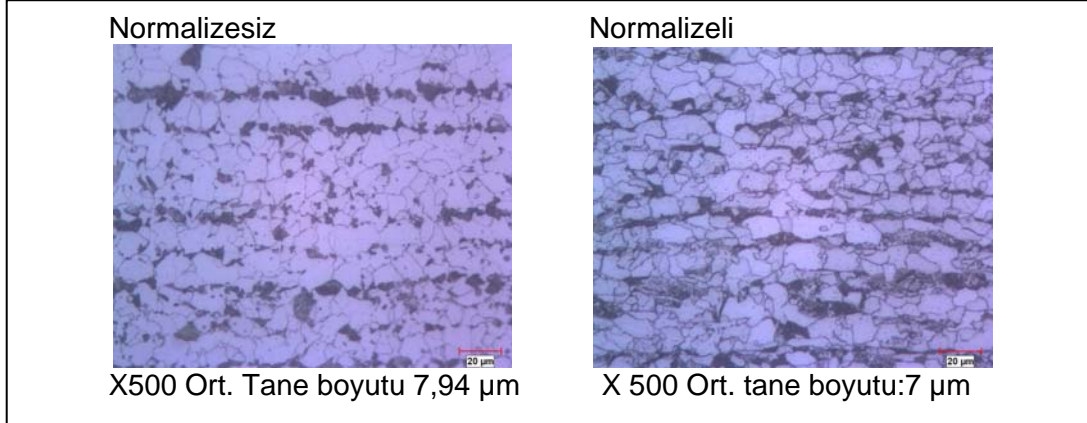
5.3. Metalografik İnceleme Sonuçları

Denemeler sonucunda alınan numunelerin bazılarında mikro yapı görüntüleri alınmıştır. ASTM E-112'ye göre tane boyutu tespiti yapılmış olup ortalama tane boyut değerleri tablo 5.4'de verilmiştir. Ortalama tane boyutunun, haddeleme parametrelerinin, kimyasal bileşimdeki mikro alaşım elementlerinin etkisine bağlı olarak değiştiği anlaşılmaktadır.

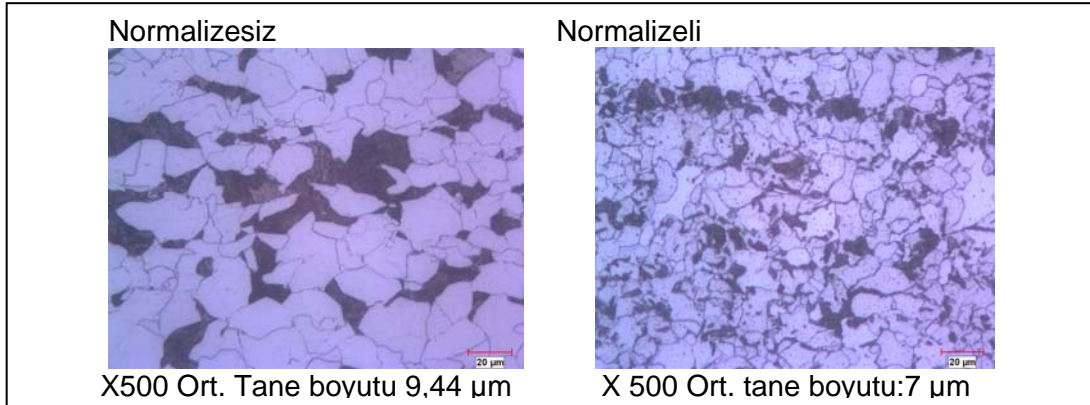
Tablo 5.4. Ortalama tane boyutu ve mekanik özellikler.

Deneme/ Levha No	Kalınlık (mm)	Normalizesiz Ort. Tane Boyutu (μm)	Normalizeli Ort. Tane Boyutu (μm)	Normalizesiz Akma M. (kg/mm^2)	Normalizesiz Çekme M. (kg/mm^2)
S355 J0 J2 K2 1/ 4-3	40	12	11,2	36	55
1/ 1-3	50	13,4	12	35	54
2/ 4-2	40	13,4	11,2	35	53
3/ 2-2	40	10	7,94	41	60
3/ 6-2	50	11,2	9	37	58
4/ 7-1	50	9	9	37	55
4/ 9-1	75	9,44	9	36	55
5/ 4-2	20	9	9	42	58
5/ 5-1	40	9,44	9,44	39	56
5/ 9-1	75	11,2	11,2	34	53
S355 J2W 1/ 2-1	50	9,44	-	42	58
2/ 3-2	16	7	-	46	59
2/ 4-1	20	13,4	-	38	54
2/ 1-1	30	13,4	-	37	53
2/ 5-1	40	13,4	-	37	53
2/ 2-1	50	13,4	-	34	51
3/ 3-2	16	9	7,94	43	66
3/ 4-1	20	9,44	7,94	41	61
3/ 1-1	30	11,2	7,94	44	60
3/ 5-1	40	11,2	7,94	38	57
3/ 2-2	50	11,2	9,44	38	55
3/ 6-2	60	13,4	9,44	39	55

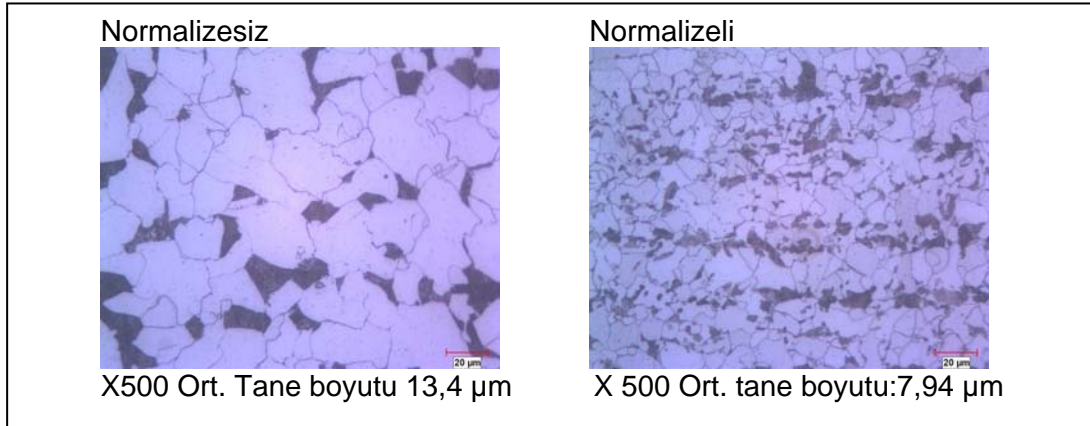
Aynı kimyasal bileşimde haddeleme kalınlığı arttıkça ortalama tane boyutunun arttığı ve normalize ısıl işlem sonrası ortalama tane boyutunun küçüldüğü görülmüştür. Örnek olarak S355 J2W kalite 3. Deneme üretimine ait 16, 30 ve 50 mm kalınlığındaki levhalara yapılan X500 büyütmede mikro yapı fotoğrafları aşağıda verilmiştir (Şekil 5.33, 5.34 ve 5.35).



Şekil 5.33. S355 J2W 3. Deneme (3-1 no'lu levha) 16 mm kalınlık için normalizesiz / normalizeli mikro yapı fotoğrafları.



Şekil 5.34. S355 J2W 3. Deneme (1-2 no'lu levha) 30 mm kalınlık için normalizesiz/ normalizeli mikro yapı fotoğrafları.



Şekil 5.35. S355 J2W 3. Deneme (2-1 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz/ normalizeli mikro yapı fotoğrafları.

5.3.1. S355 J0 J2 K2 Kalite Levhaların Mikro Yapıları

S355 J0 J2 K2 kaliteleri için yapılan 5 adet denemeden farklı kalınlıklarda normalizeli ve normalizesiz levha numunelerine yapılan X500 büyütmedeki mikro yapı fotoğrafları şekil EK 3 'de (Şekil Ek-3.1-Ek-3.10) verilmiştir ASTM E-112'ye göre tane boyutu ASTM 10 olarak tespit edilmiş olup, ortalama tane boyutu yaklaşık 9-14 μm arasındadır. Normalizeli levha numunelerinin tane boyutu normalizesiz levha numunelerine göre daha ince geldiği ayrıca, normalize sonrası daha homojen bir yapı elde edildiği görülmüştür.

5.3.2. S355 J2W Kalite Denemeleri Mikro Yapıları

S355 J2W kaliteleri için yapılan 3 adet denemeden farklı kalınlıklarda normalizesiz ve/veya normalizeli levha numunelerine yapılan X500 büyütmedeki mikro yapı fotoğrafları Ek 3'de (Şekil Ek-3.11-Ek-3.23) verilmiştir. ASTM E-112'ye göre tane boyutu ASTM 9,5 olarak tespit edilmiş olup, ortalama tane boyutu yaklaşık 7-14 μm arasındadır.

2. Deneme için normalizesiz levhaların 16-75 mm kalınlık aralığında mikro yapı fotoğrafları alınmıştır. Kalınlık arttıkça, deformasyon oranının azalması ve soğuma hızının düşmesi nedeni ile tane boyutu ve Perlit/Ferit oranının arttığı görülmektedir.

3. Deneme üretimin 16-60 mm arasında normalizeli ve normalizesiz levhaların mikro yapı fotoğrafları alınmıştır. Normalize sonrası daha homojen bir yapı elde edildiği görülmüş. Denemeler sonrası kimyasal bileşimin optimizasyonu ve haddeleme parametrelerinin stabil hale getirilmiş olmasından dolayı 2. deneme levha mikro yapı tane boyutları daha ince gelmiştir.

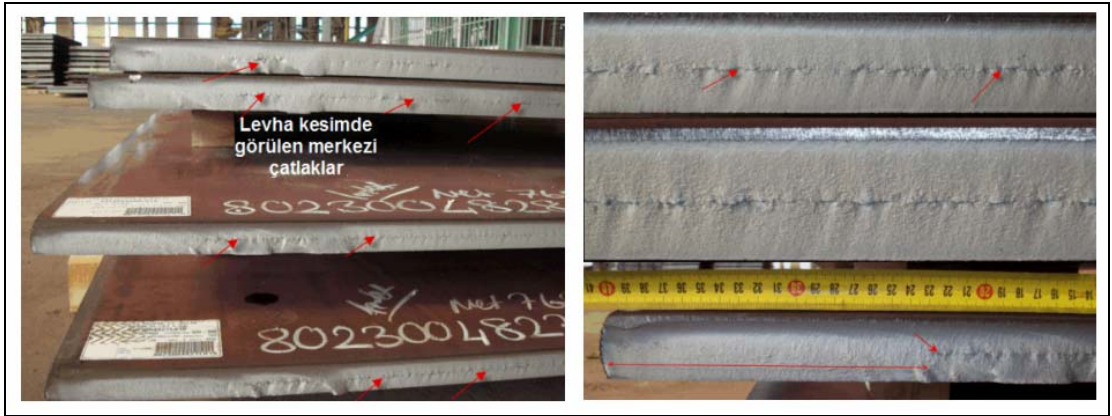
5.4. Ultrasonik Test (ULT) Sonuçları

Levhalara yapılan ultrasonik test (ULT) sonuçlarına göre yığın soğutma işlemi uygulanmayan malzemelerin merkezi segregasyon bölgelerinde mikro laminasyon kusurları ihtiva ettiği tespit edilmiştir. Çekme testinde, mikro laminasyonlu bölgeler çatlak başlangıcı olarak davrandığı ve % uzama değerinin düşük gelmesine neden olduğu, normalize sonrası mikro yapının homojen haline gelmesi ile birlikte, mikro laminasyonlardan kaynaklı çatlak ilerleme hızının azaldığı, % uzama değerinin standardın üzerinde çıktığı görüşüne varılmıştır.

Elde edilen bulgulara göre % uzama değerleri iyileşmekle birlikte akma mukavemeti için istenen güvenli bölgeye çıkılamamıştır. Levhalara yapılan ULT testlerinde yığın soğutma yapılmayan levhalarda merkezi segregasyon bölgelerinde mikro laminasyon kusurları olduğu tespit edilmiştir.

a) S355 J0 J2 K2 Denemeleri ULT Test Sonuçları

Termomekanik haddeme sonrası yığın soğutma yapılmayan levhaların mekanik test sonuçlarında % uzama değerleri çok düşük çıkmış darbe değerlerinde homojensizlikler görülmüştür. Levhaların ultrasonik test (ULT) sonuçlarına göre şekil 5.36' da görüldüğü gibi malzemelerin merkezi segregasyon bölgelerinde mikro laminasyon kusurları ihtiva ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.36. Levha kesme yüzeylerinde görülen merkezi çatlaklar.

1. Deneme üretiminde yığın soğutma işlemi uygulanmamıştır, 40 ve 50 mm kalınlıklarda haddeme yapılan tüm levhaların ULT testlerinde merkezi çatlaklar tespit edilmiştir.

2. ve 3. Deneme üretimlerinde, termomekanik olarak 40 ve 50 mm kalınlıklarda levha haddelemesi yapılmış ve sonrası yığın soğutmalı ve yığın soğutmasız olarak soğutma şekli seçilmiştir. Yığın soğutma yapılan levhaların ULT test sonuçlarında merkezi çatlaklar görülmemiştir.

4. ve 5. Deneme üretimlerinde, termomekanik haddeleme sonrası tüm levhalara yığın soğutma işlemi uygulanmış, ULT test sonuçlarında merkezi çatlak ve laminasyonlara rastlanmamıştır.

b) S355 J2W Denemeleri ULT Test Sonuçları

Bu denemelerde korozyon direncinin artırılması için kullanılan Cu (bakır)-Cr (krom) alaşım elementleri ilave edilmiştir. Malzemede bulunan yüksek Cu ve Cr elementinin etkisi ile fırın çıkışında yapışkan fırın tufalı görülmüş ve descale (basınçlı su) ile % 100 atılamadığı tespit edilmiştir. Her pasoda descale basılmasına rağmen kalın levhaların termomekanik haddeleme ile üretilmesinde 300-600 sn arasında bekletme zamanları ortaya çıkmasından dolayı batık tufal kusuru ile karşılaşmıştır. Yapılan yüzey muayenelerinde dökümün tüm slablarında yüzey çatlakları olduğu görülmüştür. Kusur resmi şekil 5.37’de verilmiştir.



Şekil 5.37. Kimyasal bileşimin yüzey çatlaklara etkisi.

1. Deneme üretiminde yığın soğutma işlemi uygulanmamıştır, 40 ve 50 mm kalınlıklarda haddeleme yapılan tüm levhaların ULT testlerinde merkez bölgelerinde yoğun mikro laminasyon kusuruna rastlanmıştır.

2. Deneme üretiminde termomekanik haddeleme sonrası uygun şartlarda yığın soğutma ile soğutulan levhaların ULT sonuçlarında laminasyon kusuruna rastlanmamış ve kesme yüzeylerinde merkezi çatlaklar görülmemiştir.

3. Deneme üretiminde termomekanik haddeme sonrası tüm levhalara yığın soğutma işlemi uygulanmış, ULT test sonuçlarında merkezi çatlak ve laminasyonlara rastlanmamıştır. Levhaların yığın soğutma ile üretilmesi ultrasonik test için gerekli olduğu görülmüştür.

Haddeme sonrası soğutma yatağında soğumaya başlayan levhalar yığın istif alanına ulaştığında kalın levha yüzey sıcaklıkları 150 °C üstündedir. Hidrojen gevrekliği nedeni ile oluşabilecek iç yapı hataları karşımıza merkezi çatlak, laminasyon olarak çıkmaktadır ki ultrasonik test cihazı ile kontrol edildiğinde, makas hatlarından geçen levhalarda ağır laminasyon görülürken yaklaşık 150 °C de yığın istife alınarak yavaş soğumaya bırakılan levhaların ultrasonik testlerinde problem görülmemiştir.

Başlangıç denemelerin mekanik mukavemet test sonuçlarında da ortaya koyulduğu gibi akma ve çekme mukavemet değerleri standartları sağlarken buna karşın % uzama değerlerinin ise çok düşük çıktığı görülmüştür. Kaliteli ve standartlar içinde kalın levha üretimi için özel kalitelerde, sürekli döküm tesislerinde slabların özel döküm yöntemi olan vakum ile döküm yönteminin tercih edilmesi ve haddeme sonrası soğutma yatağı çıkışından yığın istif yapılarak oda sıcaklığına kadar bu şekilde soğuması sağlanması sonucuna varılmıştır.

6. DENEY SONUÇLARININ İRDELEMESİ

Sıcak haddelenmiş yapı çeliği S355 J0 J2 K2 ve S355 J2W kalitelerinin termomekanik haddeleme ve sonrası havada soğutma yöntemi ile levha üretimi denemeleri yapılmıştır. Yapılan tüm denemelerde elde edilen sonuçlar önceki bölümde (bkz. Bölüm 5) ayrıntılı olarak verilmiştir. Her bir deneme sonrası elde edilen mekanik test sonuçlarına göre standartları sağlayamayan özellikler göz önünde bulundurularak bir sonraki denemenin kimyasal bileşimi, haddeleme parametreleri, soğutma tipi vs. gibi etkenler tekrar gözden geçirilerek yapılan değişimlerin levha mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

6.1. Alaşım Elementlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi (Ni, Nb, Mo, V, C)

6.1.1. Nikelin (Ni) % Uzamaya Etkisi

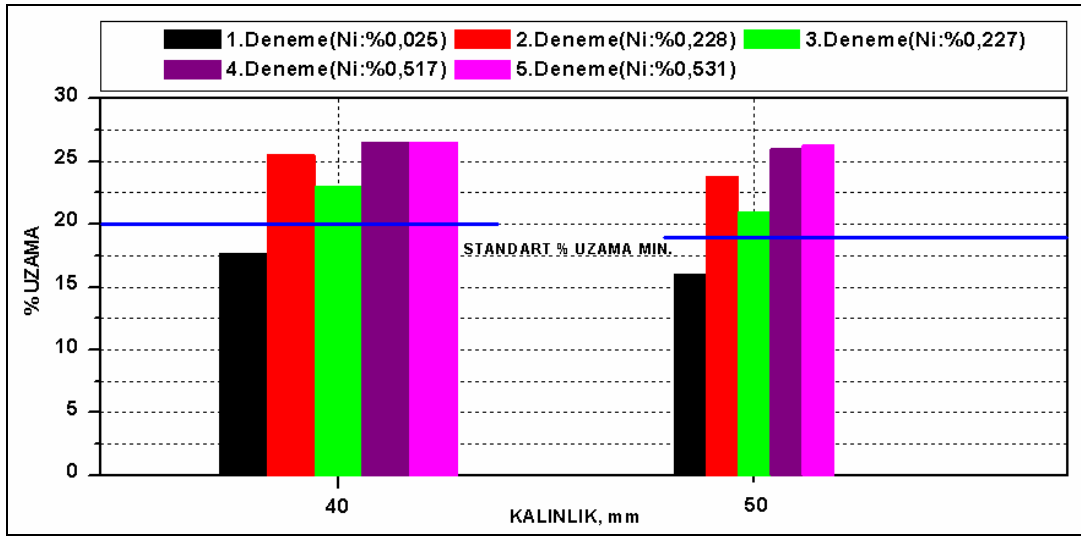
S355 J0 J2 K2 denemelerinde, termomekanik haddeleme sonrası 1. deneme üretime ait levhaların ortalama % uzama değerleri % 16 - 18 aralığında standartların altında çıkmıştır. Bu deneme üretimin kimyasal bileşiminde Ni (Nikel) alaşım elementi tasarlanmamış ve üretilen levhalara yığın soğutma işlemi uygulanmamıştır.

Ni alaşım elementi, 2.ve 3. deneme üretimlerinde %0,20-0,25 aralığında ilave edilmiş ve ayrıca bu deneme üretimlerde levhaların bir kısmına yığın soğutma uygulanmıştır. 4. ve 5. Deneme üretimlerde ise Ni alaşım elementi %0,50-0,55 aralığında ilave edilmiş ve bu denemelerde levhaların tamamına yığın soğutma işlemi uygulanmıştır.

S355 J0 J2 K2 ve S355 J2W kalite deneme üretimleri için mekanik mukavemet değerlerine kimyasal bileşimin etkisini göstermek amacı ile aşağıda verilen grafikler EK-1 Mekanik test sonuçlarındaki tüm denemelerde kullanılan 40 ve 50 mm kalınlığındaki levhaların termomekanik haddeleme sonrası normalize ısılsız işlemsiz tüm verileri kullanılarak levha kalınlığına bağlı olarak ortalama % uzama, akma, çekme ve darbe mukavemet değerleri esas alınarak hazırlanmıştır.

Kimyasal bileşimde Ni alaşım elementinin % uzamaya etkisi şekil 6.1’de verilmiştir. Ni alaşım elementi oranı arttıkça % uzama değeri artmaktadır.

4. ve 5. Deneme üretimlerinden elde edilen levhalarda yüksek % uzama değerleri sağlanmıştır. Bu durum Ni alaşım elementinin plastik deformasyona katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca bu iki denemenin bu kalınlıktaki levhalarına yığın soğutma işlemi uygulanarak, hızlı soğumadan dolayı oluşabilecek mikro laminasyonlar engellenerek %uzama değerlerine olumlu etki sağladığını göstermiştir.

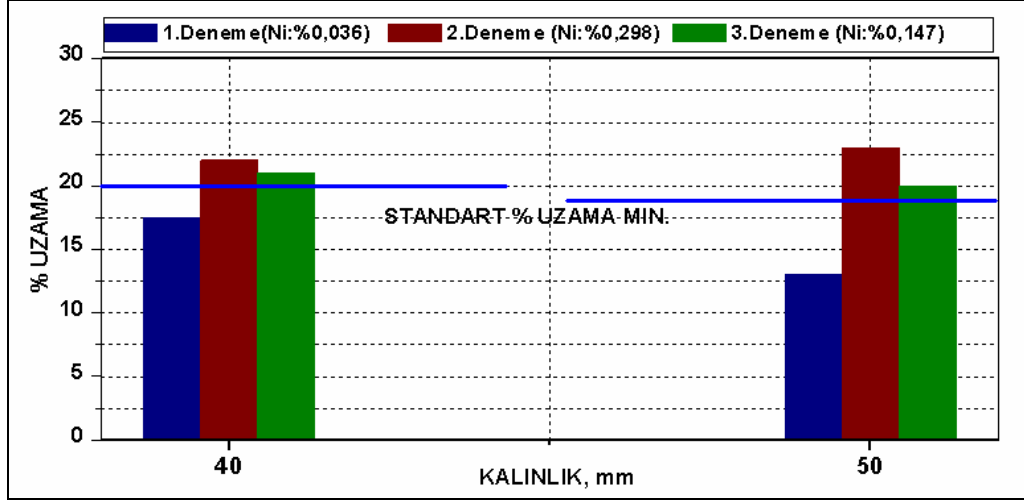


Şekil 6.1. S355 J0 J2 K2 denemelerinde Ni’lin % uzamaya etkisi.

S355 J2W kalite deneme üretimlerinde korozyon direncinin artırılması için Cu/Cr (Bakır/Krom) mikro alaşım element içerikli olarak tasarlanmıştır.

Termomekanik haddeleme sonrası 1.deneme üretime ait levhaların ortalama % uzama değerleri standartların oldukça altında çıkmıştır. Bu deneme üretimin kimyasal bileşiminde Ni alaşım elementi tasarlanmamış ve üretilen levhalara yığın soğutma işlemi uygulanmamıştır.

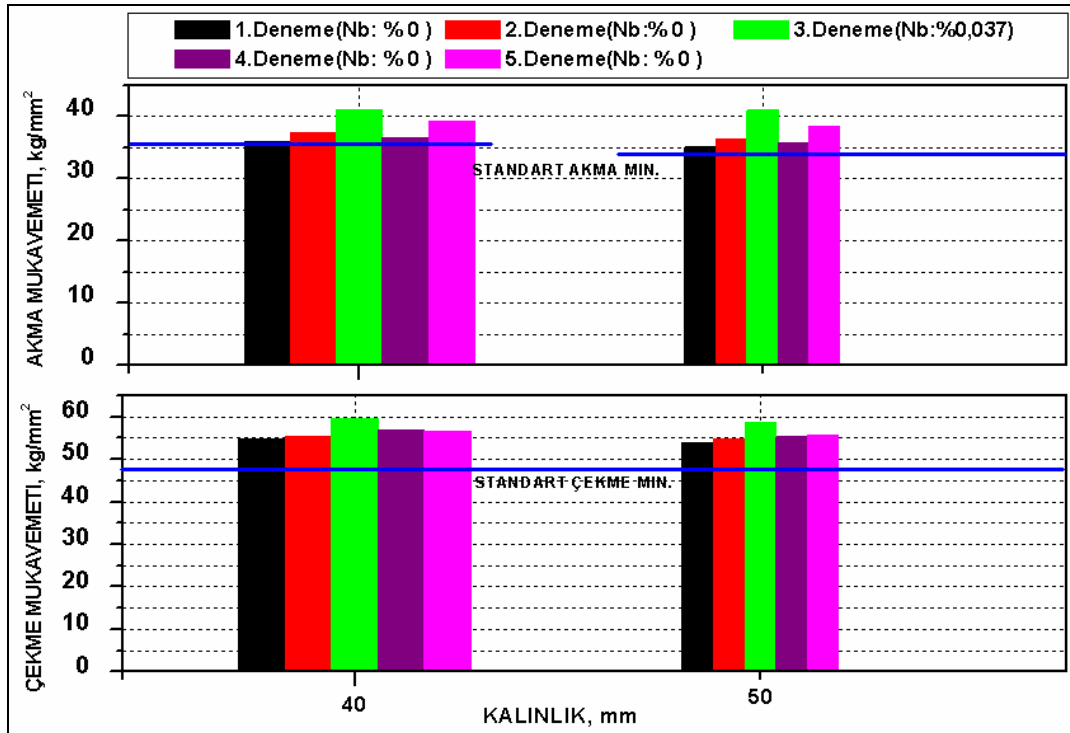
2. Deneme üretimde Ni alaşım elementi % 0,30 , 3. deneme üretimde %0,15 civarında ilave edilmiş ve ayrıca bu deneme üretimlerde levhaların tamamına yığın soğutma işlemi uygulanmıştır. Kimyasal bileşimde Ni alaşım elementinin % uzama değerlerine etkisi şekil 6.2’de verilmiştir. Ni alaşım elementi oranı arttıkça % uzama değeri arttığı bu kaliteler için de teyit edilmiştir.



Şekil 6.2. S355 J2W denemelerinde Ni'nin % uzamaya etkisi.

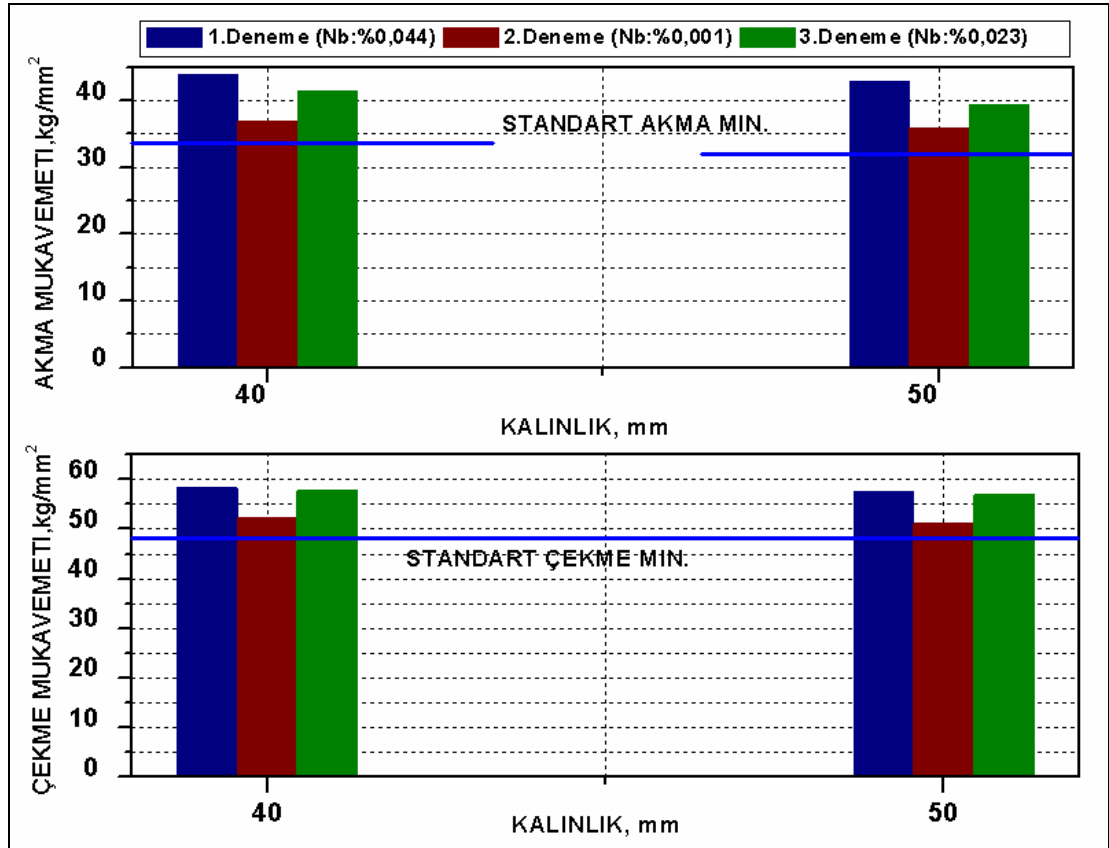
6.1.2. Niyobyum'un (Nb) Akma ve Çekme Mukavemetine Etkisi

S355 J0 J2 K2 Kalite denemeleri için kimyasal bileşimde alaşım elementlerinin akma ve çekme mukavemetlerine etkisi şekil 6.3'de verilmiştir. Bütün denemelerde akma ve çekme mukavemet değerleri standartların üzerinde yakalanmış olsa da, %0,035-0,040 aralığında Nb kullanılan 3. deneme üretime ait levhalarda en yüksek akma ve çekme mukavemet değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.3. S355 J0 J2 K2 denemelerinde Nb'un akma/çekme mukavemetine etkisi.

S355 J2W kalitesi için yapılan bütün denemelerde akma ve çekme mukavemet değerleri standartların üzerinde yakalanmıştır. Şekil 6.4'de görüldüğü gibi %0,044 Nb'lu olarak tasarlanmış olan 1. deneme üretim de termomekanik haddelenme ile en yüksek akma ve çekme mukavemet değerleri elde edilmiştir. 1. Deneme üretime göre Nb alaşım element ilavesi yarı yarıya kullanılan 3. Deneme üretiminde de standardın oldukça üstünde akma ve çekme mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu durum Nb alaşım elementinin termomekanik haddelenme ile akma ve çekme mukavemet değerlerine belirgin katkı sağladığını göstermektedir.

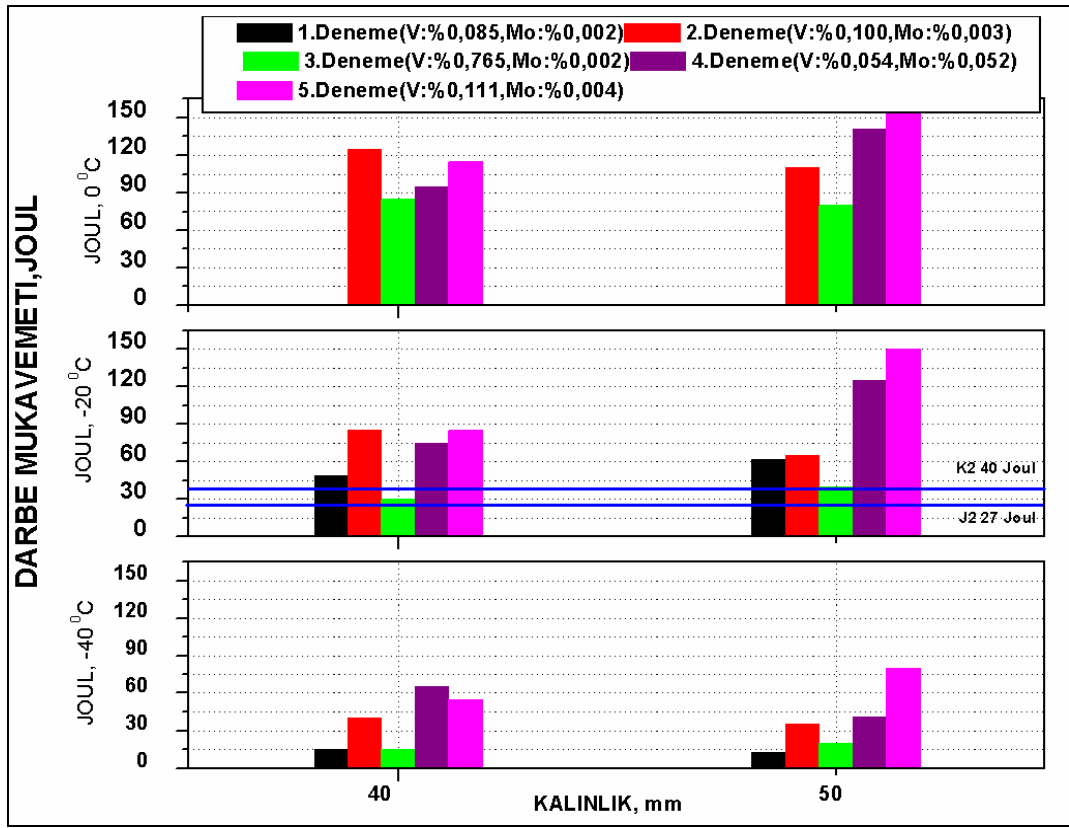


Şekil 6.4. S355 J2W denemelerinde Niyobyumun akma/çekme mukavemetine etkisi.

Termomekanik haddelenenin esas yararı mikro alaşım elementlerinin etkisi üzerinde kurulmuştur. Nb, yeniden kristalleşme sıcaklığını yükselterek, östenitin pankek yapısında ezilmesini sağlamakta ve soğutma hızına bağlı olarak ince taneli mikro yapının oluşumunu sağlamaktadır. V, Nb, ve Ti elementleri çökeltme sertleşmesi ile mukavemetin artmasını sağlamaktadır. Ni ve Mo elementleri düşük karbon bileşimlerinde mukavemet ve tokluk değerlerine ulaşılabilirliği sağlamaktadır (Barsom, 1995; Sezer, 2008).

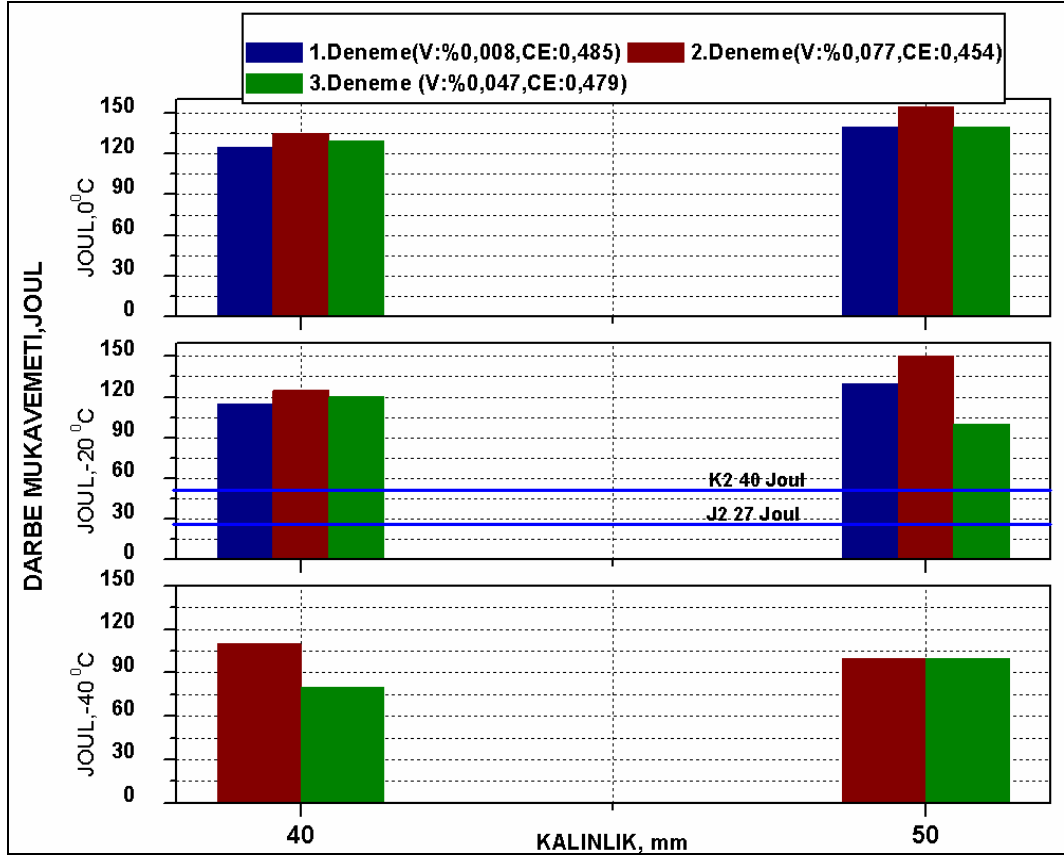
6.1.3. Vanadyum (V), Molibden (Mo) ve Karbon'un (C) Darbe Mukavemetine Etkisi

S355 J0 J2 K2 kaliteleri için şekil 6.5'de kimyasal bileşimin 0, -20 ve -40 °C'lerde darbe mukavemetine etkisi verilmiştir. Bu kalitenin en yüksek değerler 4. ve 5. deneme üretimlerinde yakalanmıştır. Bu denemelerde mekanik özellikleri azaltmadan darbe mukavemetinin artırılması amacı ile C oranı düşürülerek 4. deneme üretiminde Mo' nin ve 5. deneme üretiminde V alaşım elementlerinin içerikleri artırılarak darbe mukavemetine etkisi ortaya konulmuştur.



Şekil 6.5. S355 J0 J2 K2 denemeleri kimyasal bileşimin darbe mukavemetine etkisi.

S355 J2W kalitesi için şekil 6.6'da kimyasal bileşimin 0, -20 ve -40 °C'lerde darbe mukavemetine etkisi verilmiştir. Bu kalite için tüm denemelerin kimyasal bileşiminde C oranı düşük tutularak karbon eşleniğinin (CE) 0,45-0,48 aralığında gelmesi sağlanarak termomekanik haddeme sonrası darbe mukavemet değerlerinin standartlarda istenen değerleri sağlayabileceği ortaya konulmuştur. Darbe mukavemeti en yüksek gelen 2. Deneme üretiminde V içeriği artırılmış karbon eşleniği 0,454 olarak gelmiştir.



Şekil 6.6. S355 J2W denemeleri kimyasal bileşimin darbe mukavemetine etkisi.

Deneme üretimleri sonucunda kimyasal bileşim optimize edilerek termomekanik haddelenme yöntemi kullanılarak S355 sıcak haddelenmiş yapı çelik kaliteleri için standartların istediği mekanik özelliklerin sağlanabileceği kimyasal bileşimin optimizasyonu son deneme üretim sonuçları ile sağlanmıştır.

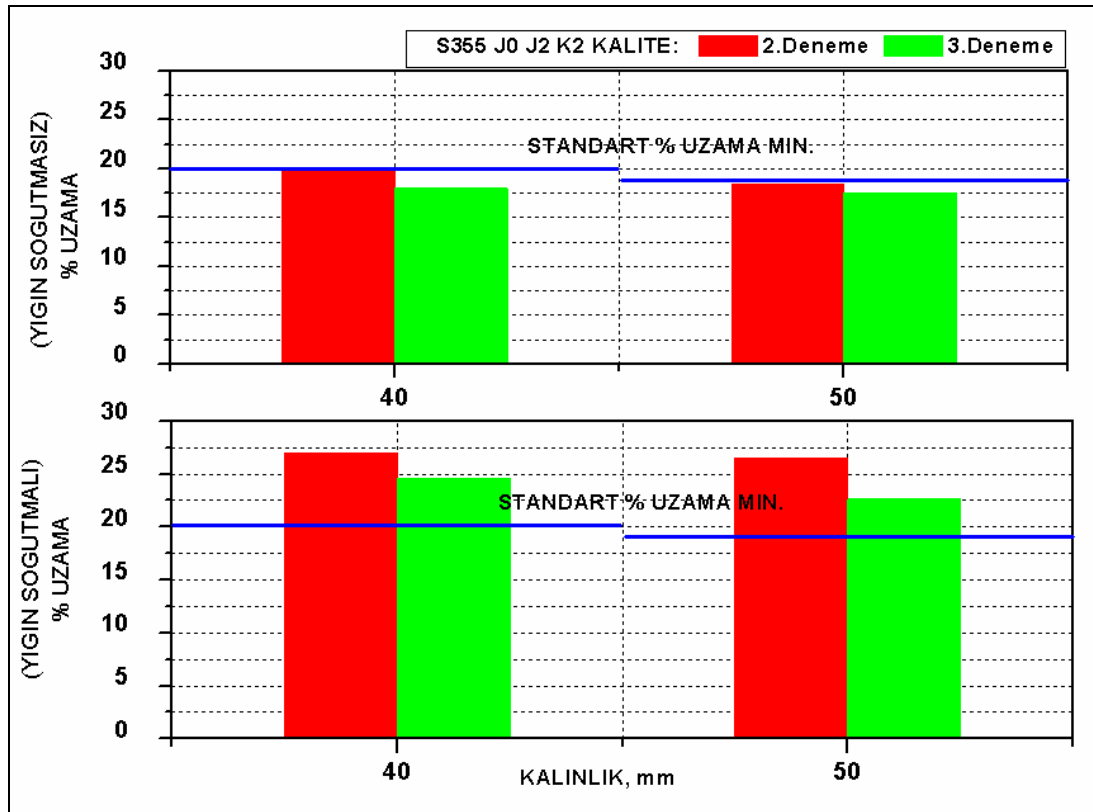
Termomekanik haddelenme sonrası levhalara yapılan darbe testi sonuçlarında, son yapılan denemelerde nispeten daha iyi sonuçlar alınmasına karşı -20 ve -40 °C' ler de standardın altında değerler çıkmış olması. S355 J0 J2 K2 ve S355 J2W kaliteleri için garantili bölgede kalınması amacıyla mutlaka normalizeli olarak üretilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

6.2. Yiğın Soğutmanın Mekanik Özelliklere Etkisi

Yiğın soğutmanın mekanik özelliklere etkisini belirlemek amacı ile S355 J0 J2 K2 kalitesinin 2. ve 3. denemelerin de levhaların yarısına termomekanik haddelenme sonrası 150 °C civarında soğutma yatağından alınarak yiğın soğutma işlemi

uygulanmış, diğer yarısı hat üzerinde soğutularak doğrudan kesme hatlarına gönderilmiştir. Şekil 6.7’de görüldüğü gibi yığın soğutma yapılmayan levhaların % uzama değerlerinin standartların altında gelmiştir.

Hidrojen gevrekliği nedeni ile oluşabilecek iç yapı hataları karşımıza merkezi çatlak, laminasyon olarak çıkmaktadır ki yığın soğutma yapılmayan levhaların ultrasonik test (ULT) sonuçlarına göre malzemelerin merkezi segregasyon bölgelerinde mikro laminasyon kusurları ihtiva ettiği tespit edilmiştir. Çekme testinde, mikro laminasyonlu bölgeler çatlak başlangıcı olarak davrandığı ve % uzama değerinin düşük gelmesine neden olduğu ortaya çıkarılmıştır.

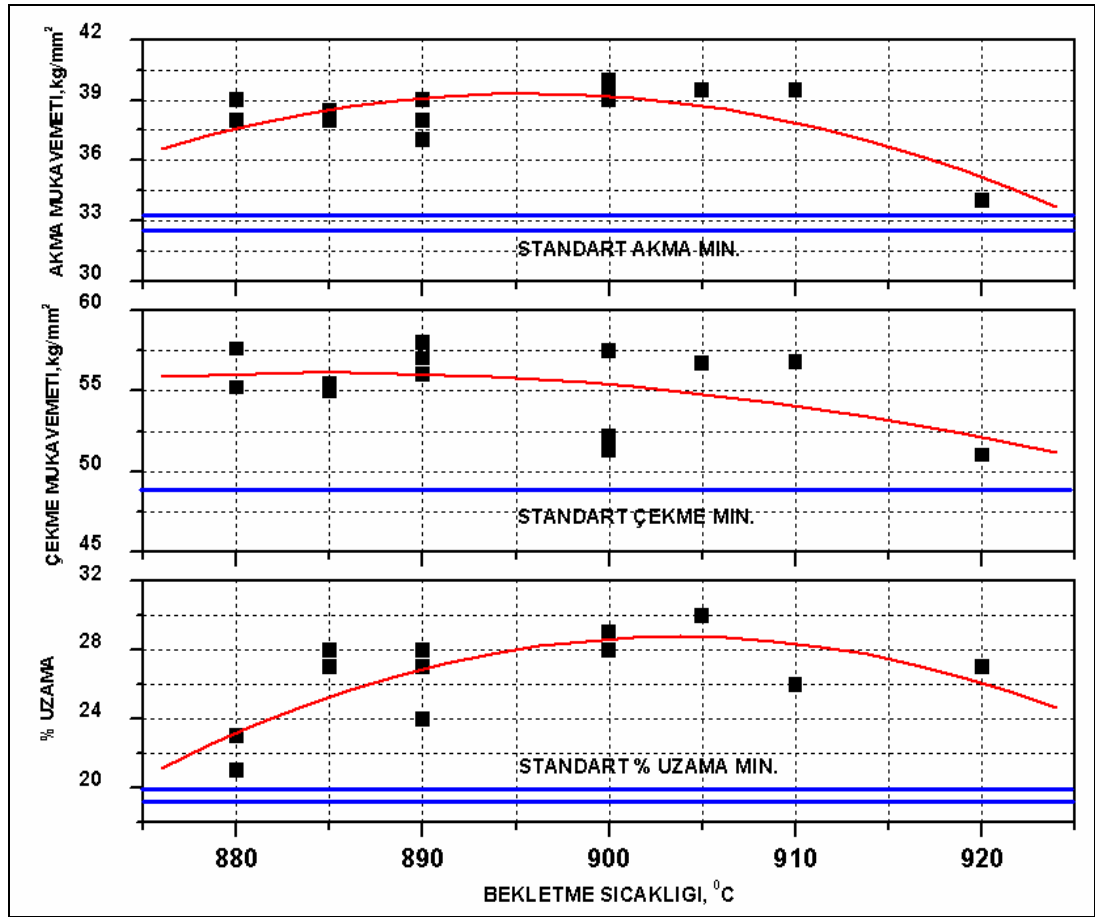


Şekil 6.7 Yığın soğutmanın % uzamaya etkisi.

Kalın levha üretimi için özel kalitelerde, sürekli döküm tesislerinde slabların özel döküm yöntemi olan vakum ile döküm yönteminin tercih edilerek hidrojen seviyesinin 2 ppm’in altında olacak şekilde üretilmesi ve haddeleme sonrası yığın soğutma yapılarak oda sıcaklığına kadar yavaş olarak soğuması sağlanması sonucunda standartlarda istenen levha % uzama değerlerinin sağlanabileceği ortaya konulmuştur.

6.3. TCR Bekletme Sıcaklığı ve Kalınlığının Mekanik Özelliklere Etkisi

TCR bekletme sıcaklığının akma-çekme mukavemeti ve % uzama değerlerine etkisi şekil 6.8’de verilmiştir. EK-1 Mekanik test sonuçlarındaki S355 J0 J2 K2 kalitesi için 4. ve 5. denemelerinin, S355 J2W kalitesi için 2. ve 3. denemelerinin 40 ve 50 mm kalınlığındaki termomekanik haddeme sonrası yığın soğutma işlemi uygulanan tüm levhalarının verileri kullanılarak bekletme sıcaklığına bağlı olarak ortalama akma- çekme mukavemeti ve % uzama değerleri esas alınarak hazırlanmıştır.



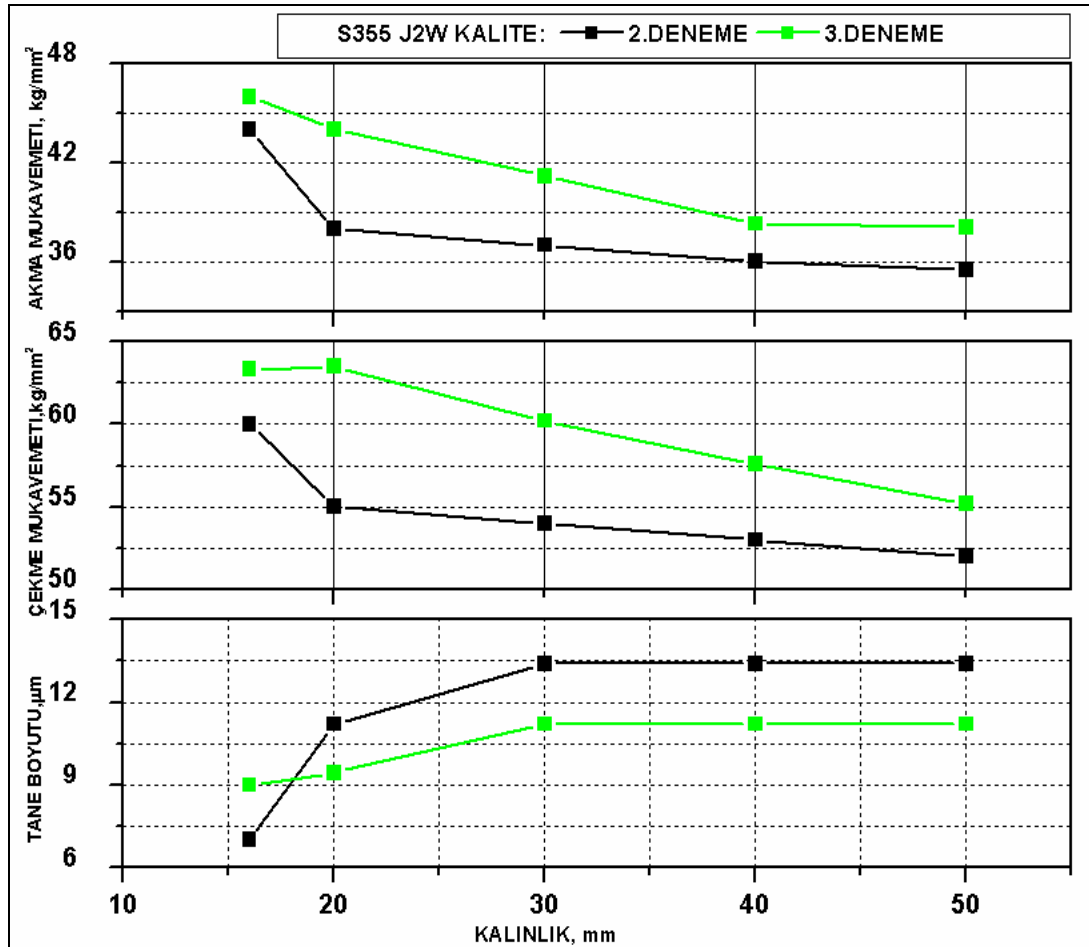
Şekil 6.8. Bekletme sıcaklığının mekanik mukavemetlere etkisi.

S355 J0 J2 K2 ve S355 J2W kalite denemelerin de termomekanik haddeme bekleme sıcaklığı için normalize ısı işlem sıcaklık aralığı hedef seçilerek uygulanmıştır. Şekil 6.8 ‘de görüldüğü gibi 880-920 °C sıcaklık aralığında mekanik mukavemet değerlerinin standartların üstünde ve birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Başlangıç deneme üretimlerinde TCR bekletme kalınlığı olarak 2,5xt (50 mm kalınlık için bekletme kalınlığı 125 mm) ve 2xt (50 mm kalınlık için bekletme kalınlığı 100 mm) seçilmiş fakat termomekanik olarak haddelenen levha kalınlıkları yüksek olduğundan mekanik özelliklere etkisi ihmal edilecek kadar düşük olmuş olup daha sonraki denemelerde bekletme kalınlığı olarak haddeleme modelinin hesap ettiği levha kalınlığının iki katı olan 2xt esas alınmıştır.

6. 4. Mikro Yapının Mekanik Özelliklere Etkisi

Haddelenen levha kalınlığı ve levha mikro yapılarındaki tane boyutu'nun mekanik özelliklere etkisi arasında bir ilişki olduğu ortaya çıkmıştır. Haddelenen levha kalınlığının tane boyutu ve akma/çekme mukavemeti'ne etkisi şekil 6.9'da verilmiştir. Bu grafikte S355 J2W kalite denemesinin yığın soğutma yapılan levhaları ve EK-3'de mikro yapıları verilen kalınlıklar esas alınarak hazırlanmıştır.



Şekil 6.9. Levha kalınlığı ile tane boyutu ve akma/çekme mukavemet ilişkisi.

Levha kalınlığı artıkça haddeleme sonrası havada soğuma hızının yavaş olması, levha mikro yapısında daha iri taneli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Tane boyutu küçüldükçe akma ve çekme mukavemeti artmaktadır. Bu durum, tane boyutunun küçülmesi neticesinde tane sınırlarının yoğunluğunun artarak dislokasyon hareketlerini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Kalınlık arttıkça ise akma ve çekme mukavemetinin azaldığı diğer bir deyişle haddeleme kalınlığı azaldıkça ortalama tane boyutunun küçüldüğü buna bağlı olarak akma ve çekme mukavemetinin arttığı sonucu çıkmıştır.

7. GENEL SONUÇLAR

Levhaların kontrollü haddeme ve sonrası havada soğutma yöntemi ile sıcak haddelenmiş yapı çelik (S355 J0 J2 K2 ve S355 J2W) kalitelerinde levha üretimleri yapılmıştır. Levha mekanik özelliklerinin normalize ısı işlemsiz olarak standartlarda istenen mekanik değerleri termomekanik haddeme yöntemi ile; diğer bir deyişle levha üretim prosesinde haddeme sonrası ısı işlem aşamasını ortadan kaldırarak üretilebileceği ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada levha mekanik özelliklerinin sağlanması için kimyasal bileşimde mikro alaşım elementlerinin etkisi ile standartların istediği mekanik özellikleri sağlama hedefine gidilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda belirlenen kimyasal bileşim esas alınarak çeliğin yeniden kristalleşme sıcaklık aralığının tespiti yapılması buna bağlı olarak ısıtma süresi ve fırın çıkış sıcaklığının kontrolü, haddeme başlangıç sıcaklığı, haddeme sırasında ezme miktarı ve oranı, bekletme sıcaklığı ile ikmal sıcaklığının kontrolü ve haddeme sonrası soğuma hızının artırılması gibi değişkenleri kontrol ederek çeliğin mukavemetine, tokluğuna ve kaynaklanabilme özelliklerine etkileri incelenebilir.

Daha yüksek mekanik mukavemet değerlerine sahip levha çelik kalitelerin termomekanik haddeme ile üretiminin gerçekleştirilmesi için, ileri bir teknoloji olan su soğutmalı tip termomekanik haddemenin uygulanabileceği hızlandırılmış soğutma (ACC) sistemini içeren ilave yatırımlar yapılarak, daha spesifik alanlar için yüksek mukavemet, tokluk yada yeni özelliklerde talep edilen gemi inşa, deniz içi yapılar, boru hatları ve bina inşaatlarında kullanılan levha çelik kalitelerinin geliştirilmesi sağlanabilir ve halen üretimi yapılamayan bu malzemeleri üretmekle ülkemizde önemli bir teknolojik üstünlük sağlana bilinir.

(I) DIN EN 10 025 standardına göre S355 J0 J2 K2 yüksek mukavemetli yapı çeliği kalitesinin normalize ısı işlemsiz geliştirilmesi amacı ile yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Denemeler sonucunda optimize edilen kimyasal bileşimde S355 J0 J2 K2 için yeni kalite oluşturulabilir (Tablo 7.1).

2. Haddeleme yöntemi olarak 900-920 °C de termomekanik haddeleme yöntemi kullanılmalıdır.

3. S355J2 (-20°C darbe 27J) ve S355K2 (-20°C darbe 40J) kaliteler için, garantili bölgede kalınması için normalize ısıtılı işlemlerle üretilmesi uygun olacaktır.

4. S355J0 için üretim programına bağlı olarak normalizesiz de üretilebileceği belirlenmiştir.

5. Malzemelerin yığın soğutma ile üretilmesi çekme mukavemet değerlerinin standartları sağlaması ve laminasyon oluşumunun engellenmesi için gerekli olduğu görülmüştür.

(II) ASTM A709W (345W) kalitesinin muadili DIN EN 10025 standardına göre S355 J2W atmosfer korozyonuna dayanımı geliştirilmiş köprü çelik kalitesinin geliştirilmesi amacı ile 16-100 mm kalınlıklar arasında yapılan denemelerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Denemeler sırasında optimize edilen kimyasal bileşimde S355 J2W için yeni kalite oluşturulabilir (Tablo 7.2.).

2. Haddeleme yöntemi olarak 900-920 °C de termomekanik haddeleme yöntemi kullanılmalıdır.

3. Darbe mukavemetleri ve % uzama değerleri açısından S355J2W kalitelerin normalize ısıtılı işlemlerle üretilmesi uygun olacaktır.

4. Haddeleme sonrasında tüm levhalara yığın soğutma işlemi uygulanmalıdır.

Tablo 7.1. Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri S355 J0 J2 K2 yeni çelik kalitesi

KALİTE	Kimyasal Sınırlar	C Max			Mn Max.	P Max.	S Max.	Si Max.	Al Min.	N Max.	Cu Max.
		Kalınlık (mm)									
		≤16	>16 ≥ 40	>40							
S355 J0 J2 K2	Standart	0,20	0,20	0,22	1,60	0,030	0,030	0,55	0,20	0,12	0,55
	Hedef	0,20	0,20	0,21	1,60	0,025	0,025	0,50	0,20	0,12	0,20

Tablo 7.2. Atmosfer korozyonuna dirençli sıcak haddelenmiş yapı çeliği S355 J2Wyeni çelik kalitesi

KALİTE	Kimyasal Sınırlar	C Max.	Mn	P Max.	S Max.	Si Max.	Al Min.	N Max.	Cu	Cr	Ni Max.	V
S355 J2W	Standart	0,16	0,50-1,50	0,030	0,030	0,50	0,020	-	0,25-0,55	0,40-0,80	0,65	0,02
	Hedef	0,16	1,00-1,40	0,025	0,020	0,45	0,020	0,12	0,25-0,40	0,40-0,70	0,40	0,01-0,09

Kimyasal Bileşimlerde:

- 1- Al toplam $\geq 0,20$ Nb: $0,015-0,060$, V: $0,02-0,12$, Ti: $0,02-0,10$ elementlerinden biri kullanıldığı gibi bunların kombinasyonu şeklinde kullanılabilir. Bu durumda bu elementlerden en azından bir tanesi minimum değerde olmalıdır.
- 2- Max. $0,30$ Mo içerebilir,
- 3- $CE = C + Mn/6 + (Cr+Mo+C)/5 + (Ni+Cu)/15$ formülüne öre pota analizinde hesaplanır. CE: değeri tüm kalınlıklar için max. $0,52$ olmalıdır.

KAYNAKLAR

- Adamczyk, J. (2005). Development of the microalloyed constructional steel, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 14, Issue 1-2, s. 13-19.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2004). *ASTM E-112 - 96 Standart Test Methods For Determining Average Grain Size*.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2001). *ASTM A435/A435M - 90 Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Steel Plates*.
- Bakkaloğlu, A. (2002). Effect of processing parameters on the microstructure and properties of an Nb microalloyed steel, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul. *Materials Letters*, vol.56, Issue 3, s.263-272.
- Barsom, J. M. (1995). *High Performance Steels and Their Use in Structures*, Proceedings of the International Symposium on High Performance Steels for Structural Applications, USX Corporation, U.S.Steel Group, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- Elkoca, O. (2007). *Kontrollü Haddeleme, Normalize Eşdeğeri Haddeleme, Termomekanik Haddeleme*, Kalite Metalurji ve Ar-Ge Müdürlüğü ERDEMİR, Kdz. Ereğli, TMMOB Makine Mühendisleri Odası IV. Demir Çelik Kongresi.
- Erdemir. (2007). *Ürün Kataloğu*, ERDEMİR, Kdz.Ereğli.
- Ganoshenka, I.V., Volodarskii, V.V, Matrosov, Y.I. (2003). Production of Rolled Plate for Large- Diameter Pipes of Strength Class X70. *Metallurgist*, Vol.47, s.7-8.
- Gorni A.A, Reis J.S.S, Dolabela da Silveira, J. H. (2000). *Recent Developments on Controlled Rolling Technology*, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Brasil
- Gorni, A.A., Paula Silva, C.N., Viana de Freitas, F., Dolabela da Silveira, J.H., Pereira, M. M., Pardo Alves, R. (2006). *Product and hot rolling process development of NV40 steel plates* Companhia Siderurgica Paulista - COSIPA, Brasil

Gray, J. M., DeArdo, A. J. (1985). *Austenite Conditioning Alternatives for Microalloyed Steel Products*, Proceedings of an International Conference on HSLA Steels'85, 4-8 November 1985, Beijing, China, s. 83-96.

Hulka, K. (1994). Fundamentals of the Controlled Rolling Processes, Niobium Products Company GmbH, Düsseldorf, Germany, *Niobium Information No-7/94*.

Keskinkılıç, İ. (2006). *Thickness Optimization in Hot Rolling of Steel Plates*, Ph.D.Thesis M.E.T.U (Yayımlanmamış), Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Koç, M. (2002). *Çelik Üretim Prosesi*, ERDEMİR, Kdz.Ereğli.

Kundakçı, K. (2007). *Levha Haddehanesi Levha Slabı ve Slabdan Levha Haddeleme Eğitim Kitabı* ERDEMİR, Kdz.Ereğli.

Mahmutoğlu, M.Z. (2003). *Niyobyum ve Vanadyumlu Bir Boru Hattı Çeliğinde Mikroyapı Mekanik Özellik Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, İ.T.Ü. (Yayımlanmamış) Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özdabak, A. (2004). Demir Çelik Ve Enerji, *Erdemir Bilim/ Teknoloji Serisi* ERDEMİR, Kdz. Ereğli, s.72-82.

Pamuk, U., Kundakçı, K., Özkan, A. (2008). Plate Mill Presentation for Plate Steel Laiwu China, *Levha Haddehanesi Tanıtım Semineri* , Kdz.Ereğli.

Panigrahi, B.K. (2001). Processing of low carbon steel plate and hot strip- an overview, Indian Academy of Science, *Bulletin of Materials Science, Vol,24, No.4, s.361-371*.

Sezer, A. (2008). *Levha Haddehanesinde API Kalite Levhaların Üretim Deneme Sonuçları Raporu*, Kalite Metalurji ve Ar-Ge Müdürlüğü ERDEMİR, Kdz. Ereğli.

Taş, Z. (2006). Çeliklerde Termomekanik İşlem Uygulamaları, *GYTE Mühendislik Fakültesi Gebze, KOCAELİ, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 22 (1-2) s.171-178*.

Türk Standartlar Enstitüsü. (2006). *EN 10 025 Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri*, TSE, Ankara.

Türk Standartlar Enstitüsü. (2004). *EN 10 002 Çekme Deneyi- Ortam Sıcaklığında Deney Metodu*, TSE, Ankara.

Wusatowski, Z.(1963). *Grundlagen des Walzens*. (Çeviren: İnceyan, T. (1989). *Haddeleme Tekniğinin Esasları-I Türkiye Demir ve Çelik İşletmeleri Eğitim Yayınları*, Ankara. s.1-6, 174.).

Xler plate steelintouch. (2008). *Steel's Suply Condition, Issue 12, Blue scop steel*.

Yüksel, M. (2002). *Avrupa Çelikleri 1. Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi, 3-5 Ekim 2001, Kdz. Ereğli-Zonguldak, Bildiriler Kitabı-2 s. 905*.

ÖZGEÇMİŞ

Kadir KUNDAKÇI.O 1974 Sakarya-Hendek'te doğmuştur. İlk ve Orta öğrenimini Sakarya-Hendek'de tamamlamıştır. 1998 yılında İ.T.Ü. Metalürji Mühendisliği bölümü lisans programını tamamlamıştır. 1998-2003 yılları arasında Karabük Demir Çelik Fab. T.A.Ş (KARDEMİR) Haddehane İşletme Baş Mühendisi olarak görev yapmıştır. 2004 yılında çalışmaya başladığı Ereğli Demir ve Çelik Fab. T.A.Ş. (ERDEMİR) 1.Sıcak Haddehane'de, Levha Haddehanesi İşletme Baş Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.

EK-1. LEVHA HADDELEME PARAMETRELERİ.

Tablo Ek-1.1. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) haddeleme parametreleri.

levha No	Kalınlık	Bekletme Kalınlığı	Hedef Bekletme Sıcaklığı	Fiili Bekletme Sıcaklığı	Fiili İkmal Sıcaklığı	Haddeleme Şekli	Soğutma Tipi
	mm	mm	°C	°C	°C		
4-3	40	100-2,5t	880	880	860	TCR	SM
6-3	40	100	850	850	840	TCR	SM
6-2	40	100	850	850	838	TCR	SM
2-1	40	80-2t	940	-	918	TCR	SM
2-2	40	80	920	920	900	TCR	SM
2-3	40	80	880	875	850	TCR	SM
3-1	50	100-2t	940	930	-	TCR	SM
1-2	50	100	940	935	925	TCR	SM
3-2	50	100	900	900	875	TCR	SM
1-3	50	100	920	900	880	TCR	SM
1-1	50	100	880	870	845	TCR	SM

Tablo Ek-1.2. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) haddeleme parametreleri.

Levha No	Kalınlık	Bekletme Kalınlığı	Hedef Bekletme Sıcaklığı	Fiili Bekletme Sıcaklığı	Fiili İkmal Sıcaklığı	Haddeleme Şekli	Soğutma Tipi
	mm	mm	°C	°C	°C		
837938-2-2	40	-	-	-	963	AR	SM
837938-4-1	40	82	920	920	910	NR	SM
837938-4-2	40	82	920	930	900	NR	SM
837938-1-2	40	100	940	937	890	TCR	SM
837938-1-3	40	100	920	925	885	TCR	SM
837938-3-3	40	100	900	896	878	TCR	SM
837938-3-1	40	-	-	984	968	AR	YS
837938-2-1	40	-	930	927	905	NR	YS
837938-2-3	40	82	920	921	903	NR	YS
837938-1-1	40	100	940	939	920	TCR	YS
837938-3-2	40	100	920	920	903	TCR	YS
837938-4-3	40	100	900	899	877	TCR	YS
837938-5-1	50	-	-	-	989	AR	SM
837938-7-3	50	102	920	925	903	NR	SM
837938-5-3	50	125	940	950	930	TCR	SM
837938-8-3	50	125	920	920	915	TCR	SM
837938-8-1	50	125	900	900	897	TCR	SM
837938-8-2	50	-	-	-	991	AR	YS
837938-5-2	50	101	950	950	957	NR	YS
837938-6-2	50	125	920	950	897	NR	YS
837938-6-1	50	125	900	902	902	TCR	YS
837938-7-1	50	125	940	940	931	TCR	YS
837938-6-3	50	125	920	920	904	TCR	YS

Tablo Ek-1.3. 3. Deneme (S355 J0 J2 K2) haddelme parametreleri.

Levha No	Kalınlık	Bekletme Kalınlığı	Hedef Bekletme Sıcaklığı	Fiili Bekletme Sıcaklığı	Fiili İkmal Sıcaklığı	Haddelme Şekli	Soğutma Tipi
	mm	mm	°C	°C	°C		
837945-3-3	40	-	920	917	908	NR	SM
837945-2-1	40	100	920	920	909	TCR	SM
837945-3-1	40	100	900	896	900	TCR	SM
837945-4-1	40		975	995	975	NR	YS
837945-4-2	40	82	920	918	907	NR	YS
837945-2-2	40	100	940	937	922	TCR	YS
837945-2-3	40	100	920	901	912	TCR	YS
837945-3-2	40	100	900	899	883	TCR	YS
837945-7-1	50	-	-	-	-	AR	SM
837945-7-2	50	101	950	962	947	NR	SM
837945-7-3	50	-	920	919	906	NR	SM
837945-6-1	50	125	940	945	937	TCR	SM
837945-6-2	50	125	920	937	927	TCR	SM
837945-5-1	50	125	900	920	908	TCR	SM
837945-5-3	50	-	-	1005	1005	AR	YS
837945-8-1	50	102	950	965	952	NR	YS
837945-8-3	50	100	920	910	904	NR	YS
837945-5-2	50	125	940	930	948	TCR	YS
837945-6-3	50	125	920	917	913	TCR	YS
837945-8-2	50	125	900	900	897	TCR	YS

Tablo Ek-1.4. 4. Deneme (S355 J0 J2 K2) haddelenme parametreleri.

Levha No	Kalınlık	Bekletme Kalınlığı	Hedef Bekletme Sıcaklığı	Fiili Bekletme Sıcaklığı	Fiili İkmal Sıcaklığı	Haddelenme Şekli	Soğutma Tipi
	mm	mm	°C	°C	°C		
839148-3-1	16	-	-	-	812	AR	YS
839148-4-1	20	42	900	890	860	NR	YS
839148-4-2	20	42	900	890	840	NR	YS
839148-1-2	30	-	-	-	876	AR	YS
839148-5-2	40	-	-	-	920	AR	YS
839148-7-1	50	102	900	890	860	NR	YS
839148-7-2	50	102	900	890	860	NR	YS
839148-9-1	75	-	-	-	948	AR	YS
839148-9-2	75	-	-	-	957	AR	YS
817234 1-3	50	100	920	900	880	TCR	SM
817234 1-1	50	100	880	870	845	TCR	SM

Tablo Ek-1.5. 5. Deneme (S355 J0 J2 K2) haddelenme parametreleri.

Levha No	Kalınlık	Bekletme Kalınlığı	Hedef Bekletme Sıcaklığı	Fiili Bekletme Sıcaklığı	Fiili İkmal Sıcaklığı	Haddelenme Şekli	Soğutma Tipi
	mm	mm	°C	°C	°C		
839150-3-1	16	-	-	-	804	AR	YS
839150-3-2	16	-	-	-	-	AR	YS
839150-4-1	20	40	900	910	890	NR	YS
839150-4-2	20	42	900	890	880	NR	YS
839150-1-1	30	62	900	890	875	NR	YS
839150-1-2	30	62	900	890	880	NR	YS
839150-5-1	40	80	900	900	890	NR	YS
839150-5-2	40	83	900	905	900	NR	YS
839150-2-1	50	103	900	890	880	NR	YS
839150-7-1	50	102	900	895	880	NR	YS
839150-7-2	50	102	900	895	880	NR	YS
839150-6-1	60	124	900	900	880	NR	YS
839150-6-2	60	124	900	910	890	NR	YS
839150-9-1	75	-	-	-	960	AR	YS
839150-9-2	75	-	-	-	993	AR	YS

Tablo Ek-1.6. 1. Deneme (S355 J2W) haddeleme parametreleri.

Levha No	Kalınlık	Bekletme Kalınlığı	Hedef Bekletme Sıcaklığı	Fiili Bekletme Sıcaklığı	Fiili İkmal Sıcaklığı	Haddeleme Şekli	Soğutma Tipi
	mm	mm	°C	°C	°C		
827262 1-2	40	100	850	844	827	TCR	SM
827262 1-1	40	100	850	840	822	TCR	SM
827262 2-1	50	125	850	845	830	TCR	SM
827262 2-3	50	125	880	890	872	TCR	SM
827262 2-2	60	120	900	895	869	TCR	SM
827262 2-1	60	130	900	895	867	TCR	SM
827262 3-1	75	140	900	895	880	TCR	SM
827262 3-3	75	140	900	890	910	TCR	SM
827262 3-3	100	125	900	900	920	TCR	SM

Tablo Ek-1.7. 2. Deneme (S355 J2W) haddeleme parametreleri.

Levha No	Kalınlık	Bekletme Kalınlığı	Hedef Bekletme Sıcaklığı	Fiili Bekletme Sıcaklığı	Fiili İkmal Sıcaklığı	Haddeleme Şekli	Soğutma Tipi
	mm	mm	°C	°C	°C		
839151-3-1	16	-	900	910	848	TCR	YS
839151-3-2	16	-	920	925	900	TCR	YS
839151-4-1	20	42	900	890	860	TCR	YS
839151-4-2	20	42	920	910	870	TCR	YS
839151-1-1	30	62	920	915	895	TCR	YS
839151-1-2	30	62	900	880	865	TCR	YS
839151-5-1	40	82	900	890	875	TCR	YS
839151-5-2	40	82	920	920	900	TCR	YS
839151-2-1	50	103	920	910	890	TCR	YS
839151-2-2	50	103	900	900	891	NR	YS
839151-6-1	60	124	900	910	890	NR	YS
839151-6-2	60	124	920	920	885	NR	YS
839151-7-1	75	154	920	930	910	NR	YS
839151-7-2	75	94	920	925	895	NR	YS
839151-8-1	100	-	-	-	-	NR	YS

Tablo Ek-1.8. 3. Deneme (S355 J2W) haddeme parametreleri.

Levha No	Kalınlık	Bekletme Kalınlığı	Hedef Bekletme Sıcaklığı	Fiili Bekletme Sıcaklığı	Fiili İkmal Sıcaklığı	Haddeme Şekli	Soğutma Tipi
	mm	mm	°C	°C	°C		
931594-3-1	16	-	900	900	880	TCR	YS
931594-3-2	16	-	900	880	870	TCR	YS
931594-4-1	20	42	900	890	875	TCR	YS
931594-4-2	20	42	900	905	865	TCR	YS
931594-1-1	30	62	900	850	840	TCR	YS
931594-1-2	30	62	900	870	850	TCR	YS
931594-5-1	40	83	900	885	880	TCR	YS
931594-5-2	40	83	900	880	870	TCR	YS
931594-2-1	50	103	900	879	889	TCR	YS
931594-2-2	50	103	900	870	860	TCR	YS
931594-6-2	60	122	900	890	870	TCR	YS
931594-9-2	75	93	900	900	885	TCR	YS
931594-7-1	100	160	910	900	880	TCR	YS

EK-2. LEVHA MEKANİK TEST SONUÇLARI

Tablo Ek-2.1. 1. Deneme (S355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları.

Levha No	Kalınlık (mm)	Haddelme Şekli	Soğutma Tipi	ÇEKME TESTİ (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)									Darbe (J) (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)														
				Akma kg/mm ²			Çekme kg/mm ² Min.47,9		Uzama (%)				Sıcaklık 0°C			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C Min.			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C		
				Standart Akma	nmz'siz	nmz'li	nmz'siz	nmz'li	Standart Uzama(%)	nmz'siz	nmz'li	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
				4-3	40	TCR	SM	35,17	37,2	35,6	57,2	55,5	20	17	27	-	-	-	75	60	78	-	-	-	88	101	96
6-3	40	TCR	SM	35,17	35,4	35,8	56,4	54,7	20	19	27	-	-	-	78	29	64	-	-	-	118	134	132	63	68	98	
6-2	40	TCR	SM	35,17	36,1	36,1	57,9	55,3	20	21	28	-	-	-	52	98	102	-	-	-	108	106	96	96	97	91	
2-1	40	TCR	SM	35,17	35,1	35,5	55,9	54,9	20	15	22	98	106	102	32	10	15	-	-	-	72	131	99	81	48	72	
2-2	40	TCR	SM	35,17	35,9	35,0	56,1	54,2	20	15	22	87	107	59	61	22	32	13	13	27	93	49	65	-	-	-	
2-3	40	TCR	SM	35,17	36,2	36,0	55,9	54,5	20	19	25	125	113	116	30	11	40	-	-	-	116	122	88	-	-	-	
3-1	50	TCR	SM	34,15	35,2	34,8	55,4	54,0	19	19	22	85	79	108	53	99	17	11	11	24	84	103	81	-	19	50	
1-2	50	TCR	SM	34,15	35,1	34,7	55,9	54,0	19	15	22	-	-	-	38	83	68,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3-2	50	TCR	SM	34,15	34,5	35,0	54,6	54,1	19	15	22	32	43	96	-	-	-	7	12	17	-	-	-	-	10	13	
1-3	50	TCR	SM	34,15	34,5	34,7	55,2	54,0	19	15	23	-	-	-	73	86	46	-	-	-	82	58	86	-	-	-	
1-1	50	TCR	SM	34,15	36,1	35,7	55,3	54,1	19	16	21	101	116	102	77	46	72	18	9	20	85	56	87	-	17	24	

Tablo Ek-2. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları. (Sayfa-1)

Levha No	Kalınlık (mm)	Haddelene Şekli	Soğutma Tipi	ÇEKME TESTİ (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)									Darbe (J) (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)														
				Akma kg/mm ²			Çekme kg/mm ² Min.47,9		Uzama (%)				Sıcaklık 0°C			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C Min.			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C		
				Standart Akma	nmz'siz	nmz'li	nmz'siz	nmz'li	Standart Uzama(%)	nmz'siz	nmz'li	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
2-2	40	AR	SM	35,17	35,8	-	53,8	-	20	23	-	129	109	153	41	75	87	15	21	43							
4-1	40	NR	SM	35,17	-	33,8	-	51,7	20	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	167	154	85	179	127	126	
4-2	40	NR	SM	35,17	-	34,5	-	51,1	20	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	180	139	136	134	93	150	
1-2	40	TCR	SM	35,17	-	36,4	-	51,8	20	-	26	145	136	148	86	58	86	23	21	27	154	130	131	120	37	147	
1-3	40	TCR	SM	35,17	-	34,8	-	51,9	20	-	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	181	166	174	117	166	126	
3-3	40	TCR	SM	35,17	-	36,3	-	52,3	20	-	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	169	102	160	8	4	6	
3-1	40	AR	YS	35,17	34,4	-	52,3	-	20	26	-	106	148	148	117	127	75	74	122	30	-	-	-	-	-	-	
2-1	40	NR	YS	35,17	34,2	-	53,5	-	20	28	-	148	147	132	103	60	107	10	12	12	-	-	-	-	-	-	
2-3	40	NR	YS	35,17	34,9	35,5	54,5	51,6	20	30	29	103	43	102	67	11	59	11	19	8	129	145	148	127	118	149	
1-1	40	TCR	YS	35,17	36,2	32,4	52,7	51,2	20	26	29	148	139	132	116	135	120	12	17	11	-	-	-	-	-	-	
4-3	40	TCR	YS	35,17	34,6	35,0	53,8	51,3	20	27	30	130	122	122	99	12	38	56	53	15	166	160	165	88	139	120	
3-2	40	TCR	YS	35,17	36,8	-	53,7		20	28	-	149	150	152	87	46	21	20	20	13	-	-	-	-	-	-	

Tablo Ek-2. 2. Deneme (S355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları. (Sayfa-2/Devam ediyor)

Levha No	Kalınlık (mm)	Haddeleme Şekli	Soğutma Tipi	ÇEKME TESTİ (NORMALİSESİZ_ NORMALİZELİ)									Darbe (J) (NORMALİSESİZ_ NORMALİZELİ)														
				Akma kg/mm ²			Çekme kg/mm ² Min.47,9		Uzama (%)				Sıcaklık 0°C			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C Min.			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C		
				Standart Akma	nmz'siz	nmz'li	nmz'siz	nmz'li	Standart Uzama(%)	nmz'siz	nmz'li	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
5-1	50	AR	SM	34,15	43,1	-	61,0	-	19	17	-	19	78	51	11	13	18	8	6	5	-	-	-	-	-	-	
7-3	50	NR	SM	34,15	42,3	-	60,3	-	19	15	-	87	30	93	22	22	61	7	6	8	-	-	-	-	-	-	
5-3	50	TCR	SM	34,15	33,8	-	52,6	-	19	23	-	141	138	97	11	68	24	14	53	10	-	-	-	-	-	-	
8-3	50	TCR	SM	34,15	40,8	-	59,1	-	19	16	-	48	80	32	15	18	20	8	10	5	-	-	-	-	-	-	
8-1	50	TCR	SM	34,15	34,8	-	52,6	-	19	21	-	-	-	-	108	12	39	11	10	17	-	-	-	-	-	-	
8-2	50	AR	YS	34,15	35,0	35,3	53,0	52,0	19	28	29	134	139	92	19	101	86	19	62	66	130	158	143	125	93	62	
5-2	50	NR	YS	34,15	36,7	35,1	53,9	51,6	19	24	29	117	129	103	138	147	140	88	49	10	138	149	120	106	114	117	
6-2	50	NR	YS	34,15	33,5	-	52,9	-	19	29	-	139	102	139	127	47	96	31	12	12	-	-	-	-	-	-	
6-1	50	TCR	YS	34,15	33,4	34,6	52,4	52,0	19	26	27	132	143	111	73	35	147	22	12	68	138	163	134	118	53	103	
7-1	50	TCR	YS	34,15	33,5	35,3	52,4	52,3	19	26	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	113	91	122	8	15	11	
6-3	50	TCR	YS	34,15	34,0	34,5	53,1	51,3	19	26	30	98	136	138	123	21	120	10	55	43	-	-	-	-	-	-	

Tablo Ek-2.3. 3. Deneme (S355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları.

Leyha No	Kalınlık (mm)	Haddelene Şekli	Soğutma Tipi	ÇEKME TESTİ (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)									Darbe (J) (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)														
				Akma kg/mm ²			Çekme kg/mm ² Min.47,9		Uzama (%)				Sıcaklık 0°C			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C Min.			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C		
				Standart Akma	nmz'siz	nmz'li	nmz'siz	nmz'li	Standart Uzama(%)	nmz'siz	nmz'li	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
				3-3	40	NR	SM	35,17	41,1		59,0	-	20	19	-	53	56	65	52	27	44	19	11	16	-	-	-
2-1	40	TCR	SM	35,17	42,0		61,0	-	20	17	-	60	42	25	20	11	11	8	8	10	-	-	-	-	-	-	
3-1	40	TCR	SM	35,17	41,5		58,0	-	20	19	-	93	90	63	12	42	18	8	12	10	-	-	-	-	-	-	
4-1	40	NR	YS	35,17	43,0	41,0	63,4	61,0	20	22	27,0	14	14	16	6	10	6	7	6	5	211	152	165	144	126	99	
4-2	40	NR	YS	35,17	43,4	38,0	59,0	54,0	20	23	27,0	97	102	60	13	9	24	6	8	11	167	161	150	148	101	167	
2-2	40	TCR	YS	35,17	41,6	38,5	62,0	55,0	20	27	28,0	131	80	97	7	10	26	5	8	6	149	139	139	112	136	148	
2-3	40	TCR	YS	35,17	34,6		53,0		20	26		125	78	67	61	27	42	26	17	15	160	150	147	79	36	120	
3-2	40	TCR	YS	35,17	40,8	38,0	59,0	54,0	20	25	33	49	40	70	19	16	16	10	17	15	177	134	129	97	102	123	
7-2	50	NR	SM	34,15	43,0	-	60,0	-	19	18	-	20	18	29	15	23	15	12	7	5	-	-	-	-	-	-	
7-3	50	NR	SM	34,15	36,9	-	52,0	-	19	20	-	123	132	104	112	107	144	24	44	73	-	-	-	-	-	-	
6-1	50	TCR	SM	34,15	41,7	-	60,0	-	19	16	-	16	24	40	9	9	6	6	5	5	-	-	-	-	-	-	
6-2	50	TCR	SM	34,15	42,0	-	60,0	-	19	16	-	178	170	180	154	150	148	77	96	134	-	-	-	-	-	-	
5-1	50	TCR	SM	34,15	42,0	-	58,0	-	19	16	-	108	94	150	19	15	88	24	46	15	-	-	-	-	-	-	
5-3	50	AR	YS	34,15	42,8	40,0	61,0	55,4	19	24	30,0	18	12	14	8	12	11	6	5	7	175	180	170	143	108	108	
8-1	50	NR	YS	34,15	41,9	40,0	59,0	55,0	19	17	26,0	18	60	41	12	11	7	8	7	6	174	177	163	84	136	112	
8-3	50	NR	YS	34,15	35,3	35,2	52,9	52,3	19	26	28,0	138	131	122	120	84	92	13	10	8	160	152	135	125	117	140	
5-2	50	TCR	YS	34,15	42,5	38,0	60,0	54,0	19	23	27,0	13	11	21	9	6	7	4	6	7	132	167	145	79	80	109	
6-3	50	TCR	YS	34,15	41,1	38,0	58,0	54,0	19	22	28,0	19	24	80	8	9	8	6	9	7	153	175	167	114	139	123	
8-2	50	TCR	YS	34,15	41,6	38,6	58,8	54,0	19	24	28,0	101	136	125	112	42	66	111	20	54	160	152	163	126	134	131	

Tablo Ek-2.4. 4. Deneme (S355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları .

Levha No	Kalınlık (mm)	Haddelene Şekli	Soğutma Tipi	ÇEKME TESTİ (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)									Darbe (J) (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)														
				Akma kg/mm ²			Çekme kg/mm ² Min.47,9		Uzama (%)				Sıcaklık 0°C			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C Min.			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C		
				Standart Akma	nmz'siz	nmz'li	nmz'siz	nmz'li	Standart Uzama(%)	nmz'siz	nmz'li	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
3-1	16	AR	SM	35,17	-	37,4	-	55,4	20	-	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	67	38	49	38	31	
4-1	20	NR	YS	35,17	39,9	38,5	57,4	55,2	20	28	31	64	66	85	26	51	49	15	24	14	99	120	106	98	87	45	
4-2	20	NR	YS	35,17	45,5	40,0	58,0	55,5	20	23	30	141	150	162	88	80	127	39	112	97	126	122	107	111	79	112	
1-2	30	AR	YS	35,17	36,3	37,7	55,6	54,8	20	25	27	70	47	80	34	18	32	11	26	12	-	-	-	-	-	-	
5-2	40	AR	YS	35,17	36,6	36,7	56,8	53,5	20	26	28	26	37	24	31	16	27	11	12	18	190	166	181	156	165	160	
7-1	50	NR	YS	34,15	36,3	38,7	55,4	56,9	19	28	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	194	185	185	175	161	166	
7-2	50	NR	YS	34,15	37,7	36,7	55,2	53,1	19	27	39	148	138	136	145	97	132	37	34	52	167	157	175	141	145	147	
9-1	75	AR	YS	33,13	35,9	33,7	54,9	52,4	18	27	31	-	-	-	71	42	106	11	25	18	179	186	179	158	162	163	
9-2	75	AR	YS	33,13	36,5	32,2	56,5	52,1	18	28	30	121	60	68	14	27	36	24	11	9	150	129	98	52	31	63	

Tablo Ek-2.5. 5. Deneme (S355 J0 J2 K2) mekanik test sonuçları.

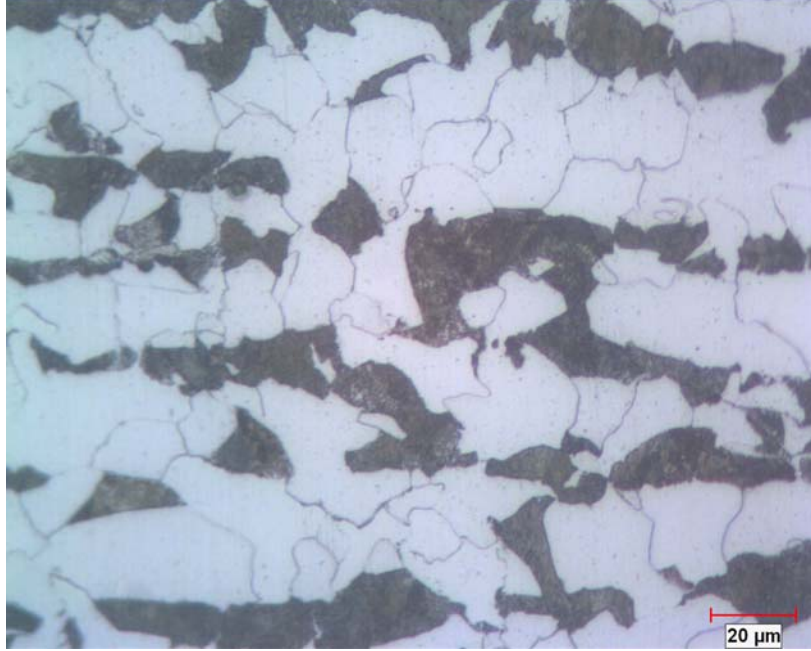
Levha No	Kalınlık (mm)	Haddelene Şekli	Soğutma Tipi	ÇEKME TESTİ (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)									Darbe (J) (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)														
				Akma kg/mm ²			Çekme kg/mm ² Min.47,9		Uzama (%)				Sıcaklık 0°C			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C Min.			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C		
				Standart Akma	nmz'siz	nmz'li	nmz'siz	nmz'li	Standart Uzama(%)	nmz'siz	nmz'li	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
3-1	16	AR	SM	35,17	38,6	38,0	58,0	54,6	20	22	30	-	-	-	12	14	17	-	-	-	192	160	164	135	141	133	
3-2	16	AR	SM	35,17	41,7	-	58,8	-	20	28	-	122	134	149	130	145	120	75	90	55	-	-	-	-	-	-	
4-1	20	NR	YS	35,17	42,4	-	58,5	-	20	25	-	91	123	129	126	88	97	90	71	48	-	-	-	-	-	-	
4-2	20	NR	YS	35,17	40,4	38,0	58,6	54,2	20	25	31	38	87	31	27	21	60	14	12	18	153	146	136	90	135	140	
1-1	30	NR	YS	35,17	45,3	40,5	58,4	54,3	20	24	32	188	177	169	132	154	151	120	133	130	192	200	180	167	169	173	
1-2	30	NR	YS	35,17	40,7	39,5	57,5	54,2	20	26	31	199	187	169	130	152	149	122	58	125	188	202	161	179	177	169	
5-1	40	NR	YS	35,17	39,3	37,5	56,7	53,7	20	29	31	122	121	85	15	104	104	14	9	10	167	190	190	136	135	155	
5-2	40	NR	YS	35,17	39,3	37,0	56,7	53,3	20	30	31	139	88	132	88	116	31	30	15	6	163	165	191	122	174	179	
2-1	50	NR	YS	34,15	38,1	36,3	56,0	52,5	19	24	30	169	169	171	144	150	142	110	94	102	192	186	172	184	191	169	
7-1	50	NR	YS	34,15	39,4	37,7	55,6	53,4	19	28	37	177	190	161	175	161	147	28	97	174	183	175	181	157	154	143	
7-2	50	NR	YS	34,15	37,7	37,2	55,4	50,1	19	27	37	140	152	153	104	103	86	21	12	81	181	158	172	160	160	154	
6-1	60	NR	YS	34,15	37,3	33,2	55,1	51,9	19	26	32	145	123	160	80	88	133	62	56	20	192	186	196	136	142	145	
6-2	60	NR	YS	34,15	36,9	35,1	55,0	52,2	19	29	29	123	160	145	80	88	135	62	56	20	191	201	189	160	153	120	
9-1	75	AR	YS	33,13	33,1	33,2	53,3	51,5	18	25	31	-	-	-	15	90	90	10	15	8	156	152	162	152	126	153	
9-2	75	AR	YS	33,13	34,8	32,7	53,3	51,9	18	28	41	-	-	-	18	71	66	11	10	13	180	171	200	129	165	140	

Tablo Ek-2.8. 3. Deneme (S355 J2W) mekanik test sonuçları.

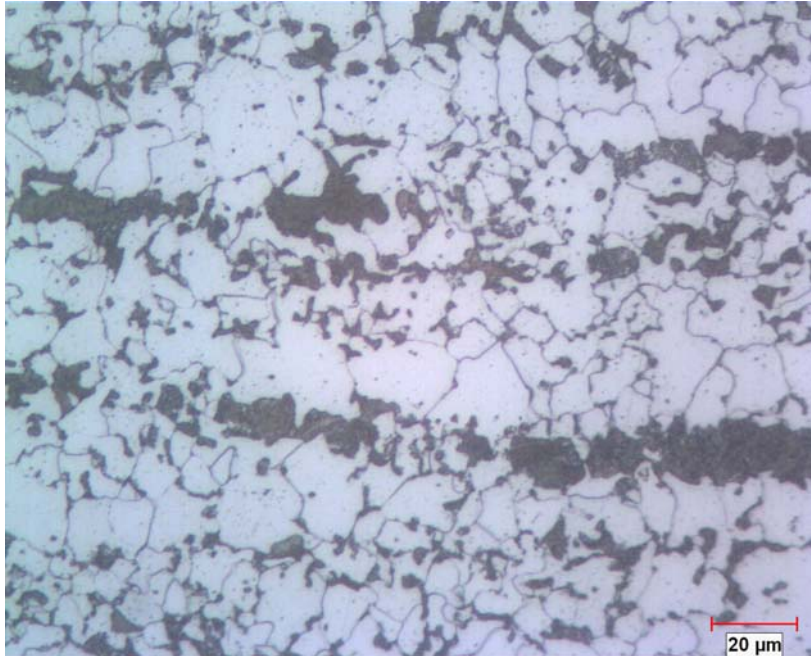
Levha No	Kalınlık (mm)	Haddelene Şekli	Soğutma Tipi	ÇEKME TESTİ (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)									Darbe (J) (NORMALİZESİZ_ NORMALİZELİ)														
				Akma kg/mm ²			Çekme kg/mm ² Min.47,9		Uzama (%)				Sıcaklık 0°C			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C Min.			Sıcaklık -20°C Min. J2:27J K2:40J			Sıcaklık -40°C		
				Standart Akma	nmz'siz	nmz'li	nmz'siz	nmz'li	Standart Uzama(%)	nmz'siz	nmz'li	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
3-1	16	NR	SM	36,19	43,5	41,2	66,9	57,0	20	21	29	85	98	90	52	55	61	44	19	27	195	205	197	162	149	174	
3-2	16	NR	SM	36,19	46,0	40,1	63,3	55,8	20	22	31	88	74	77	39	58	46	25	41	36	205	153	136	169	138	172	
4-1	20	NR	SM	35,17	45,0	39,4	61,9	55,3	20	21	29	68	82	63	43	77	82	34	16	33	186	201	211	165	158	155	
4-2	20	NR	SM	35,17	44,0	39,6	63,5	55,8	20	24	29	111	98	65	68	68	55	35	52	48	183	219	256	174	163	194	
1-1	30	NR	YS	35,17	44,5	41,5	60,2	55,4	20	21	28	105	57	78	55	64	38	29	39	40	211	185	198	162	155	177	
1-2	30	NR	YS	35,17	-	39,2	-	55,6	20	-	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	208	205	193	182	165	172	
5-1	40	NR	YS	35,17	41,2	38,9	57,9	54,7	20	18	26	149	158	102	79	134	33	40	26	21	218	211	206	156	155	164	
5-2	40	NR	YS	35,17	38,3	37,9	57,6	54,4	20	23	25	65	94	160	125	93	123	17	71	18	196	222	204	142	174	161	
2-1	50	NR	YS	34,15	39,3	37,8	58,6	54,1	19	17	27	144	162	141	123	101	130	96	106	120	200	185	198	188	148	152	
2-2	50	NR	YS	34,15	38,1	34,9	55,2	53,4	19	17	23	176	158	169	158	144	152	135	145	107	170	172	214	158	171	150	
6-2	60	NR	YS	34,15	39,8	33,1	57,4	53,3	19	21	27	122	134	149	129	147	125	75	92	54	209	192	178	152	166	165	
9-2	75	NR	YS	33,13	35,2	-	55,6	-	18	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7-1	100	NR	YS	32,11	36,7	-	55,1	-	18	16	-	94	24	47	17	38	85	7	17	8	-	-	-	-	-	-	

EK- 3. MİKRO YAPILAR

A-S355 J0 J2 K2 Kalite Levha Mikro Yapıları

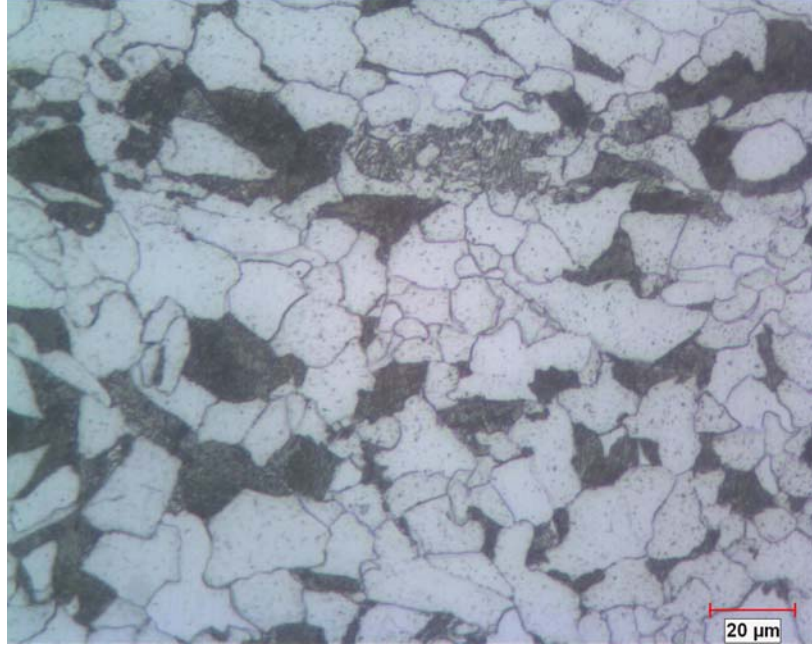


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 12 µm

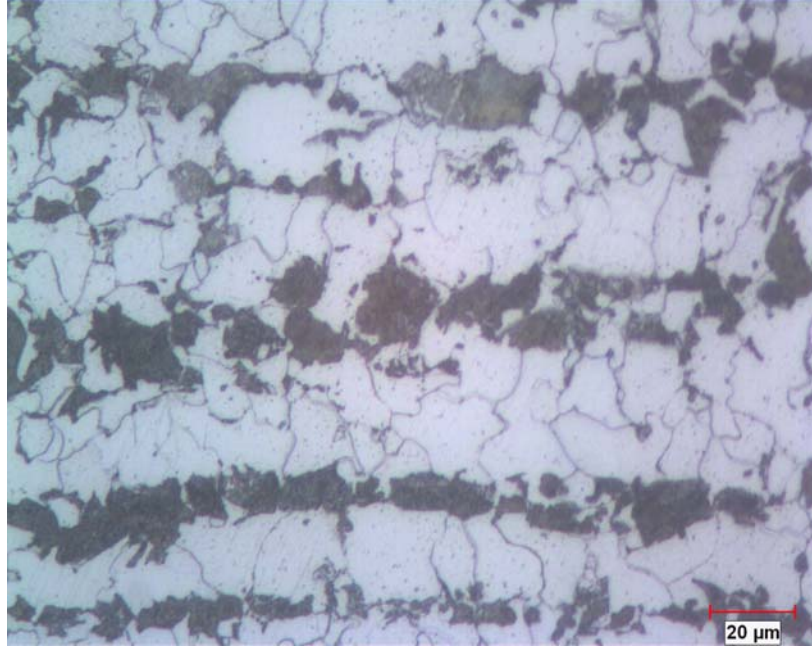


Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 11.2 µm

Şekil Ek-3.1. S355 J0 J2 K2, 1. Deneme (4-3 no'lu) levha 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.

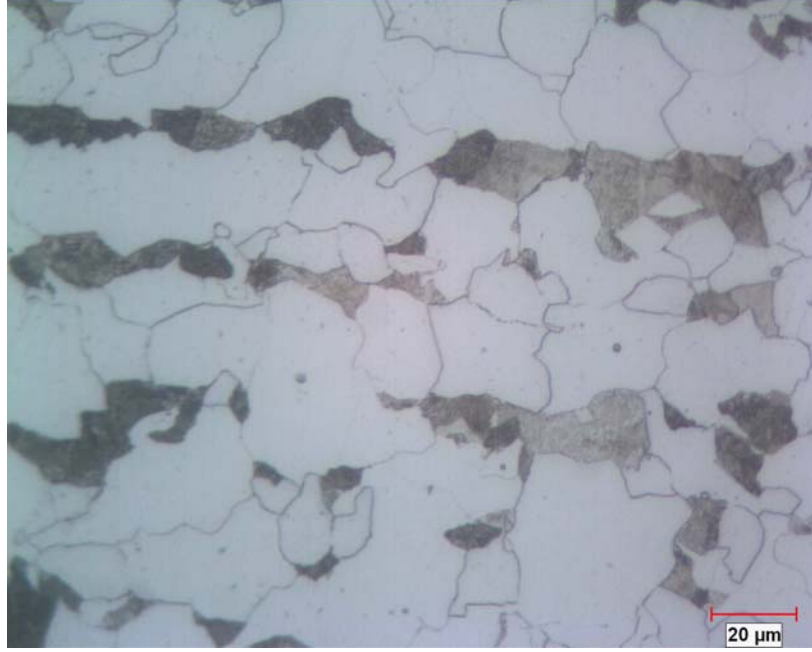


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 13,4 μm

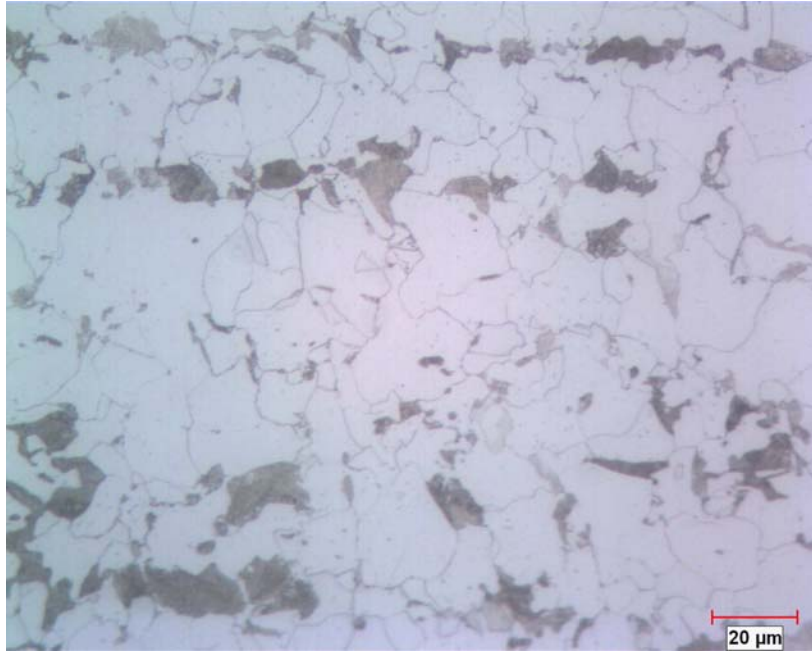


Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 12 μm

Şekil Ek-3.2. S355 J0 J2 K2, 1.Deneme (1-3 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.

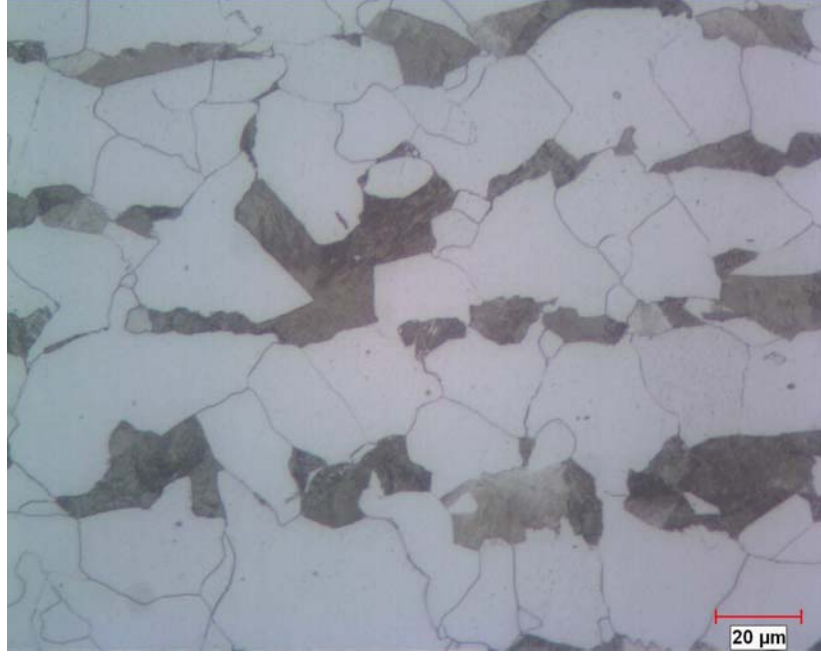


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu:13,4 µm

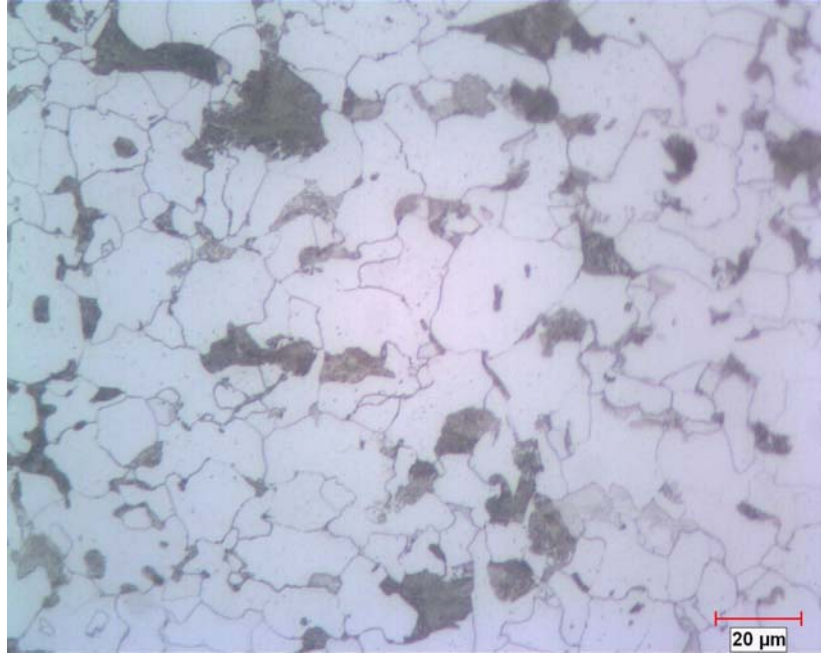


Normalizeli, Ortalama tane boyutu:11,2 µm

Şekil Ek-3.3. S355 J0 J2 K2, 2. Deneme (4-2 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.

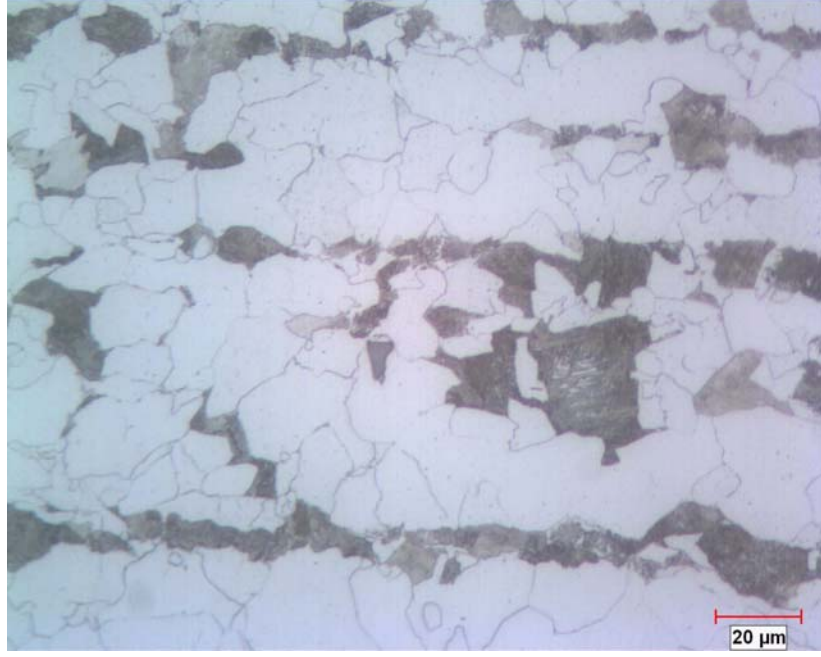


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 12,9 μm

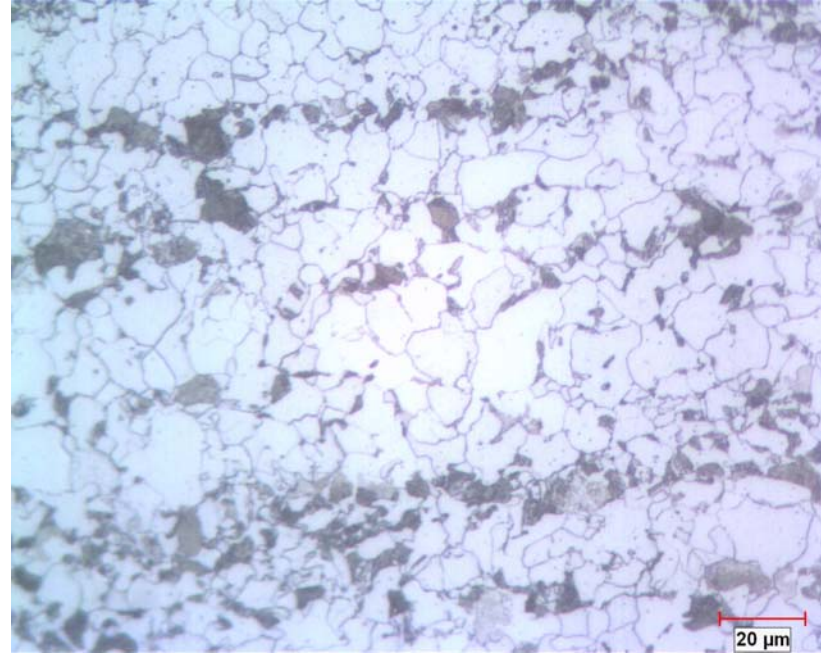


Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 11 μm

Şekil Ek-3.4. S355 J0 J2 K2, 2. Deneme (5-3 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.

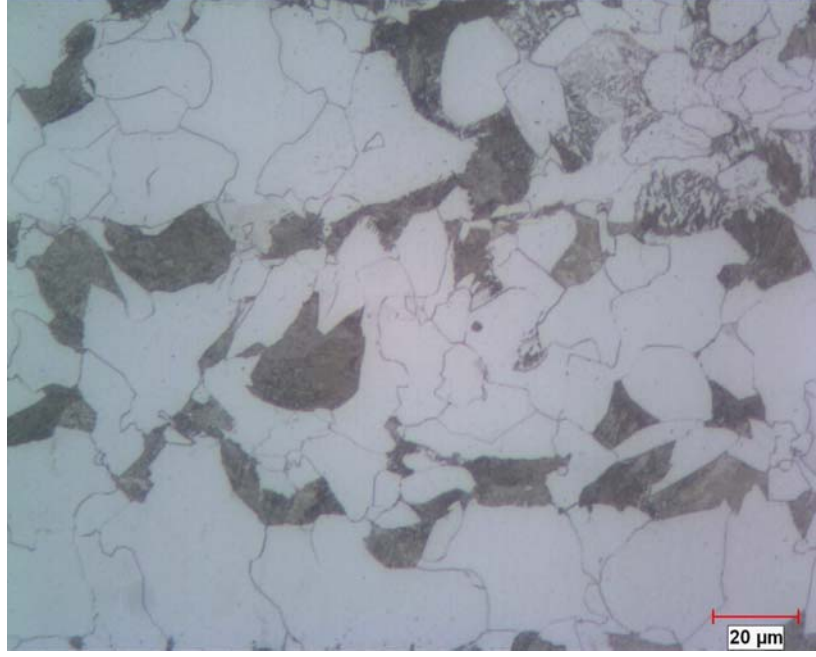


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu:10 µm

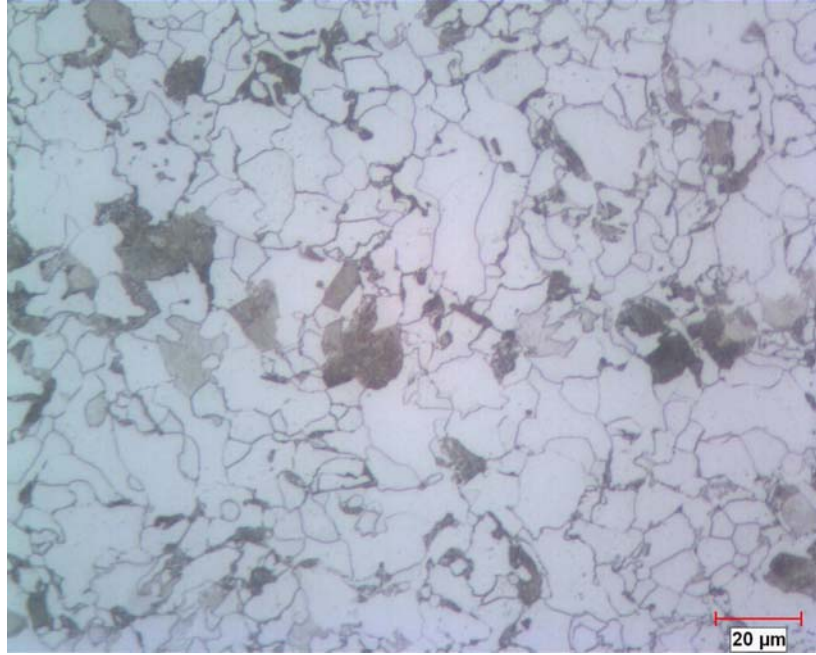


Normalizeli, Ortalama tane boyutu:7,94 µm

Şekil Ek-3.5. S355 J0 J2 K2, 3.Deneme (2-2 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.

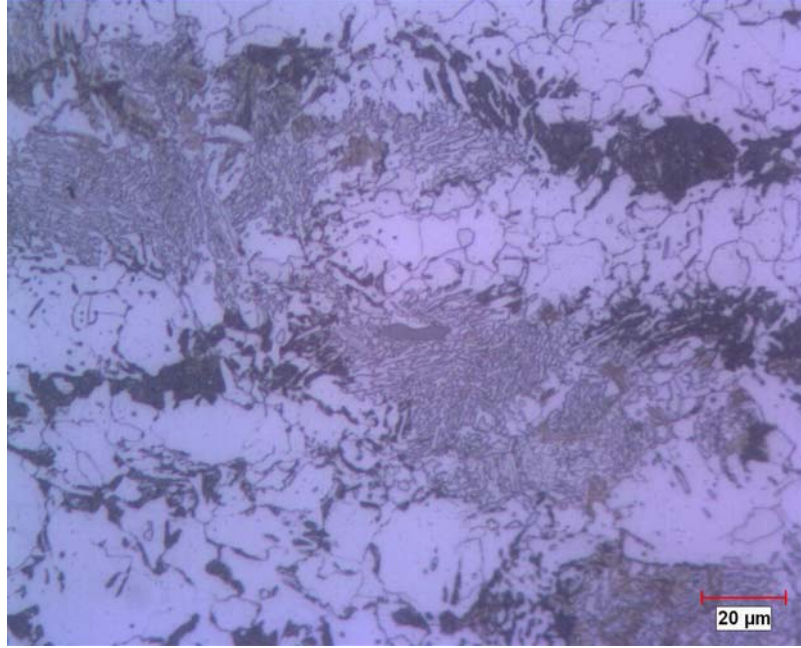


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu:11,2 µm

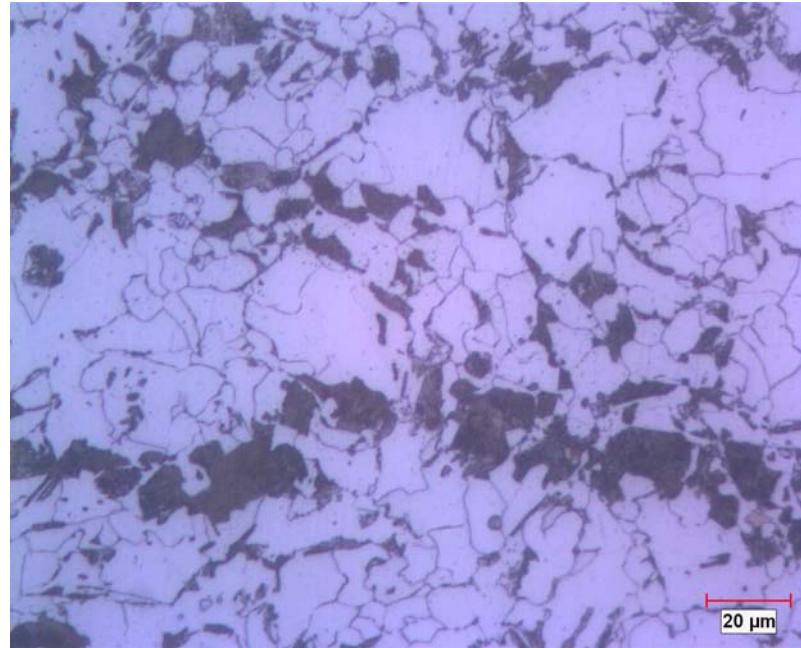


Normalizeli, Ortalama tane boyutu:9 µm

Şekil Ek-3.6. S355 J0 J2 K2, 3. Deneme (6-2 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.

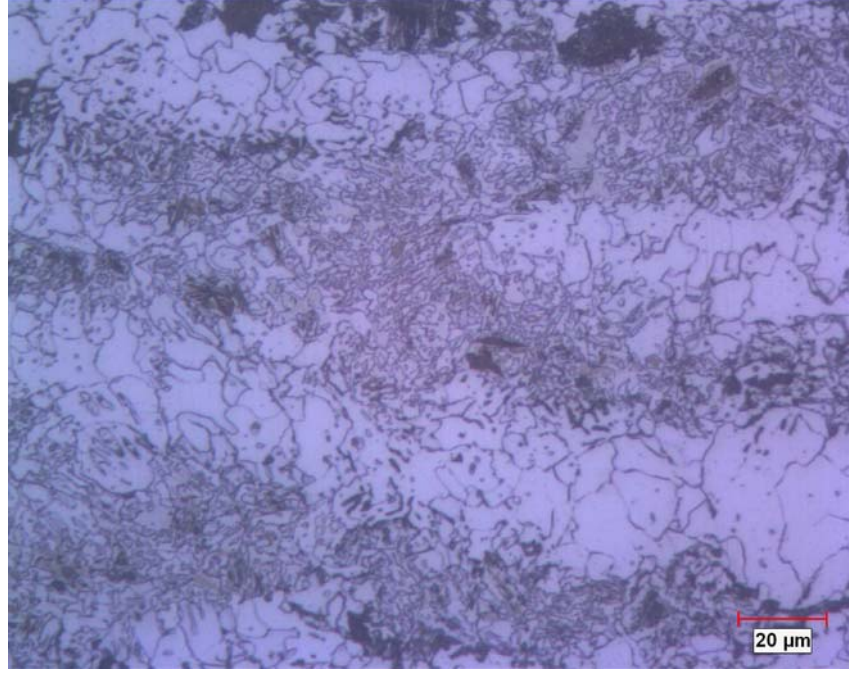


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu:9 μm

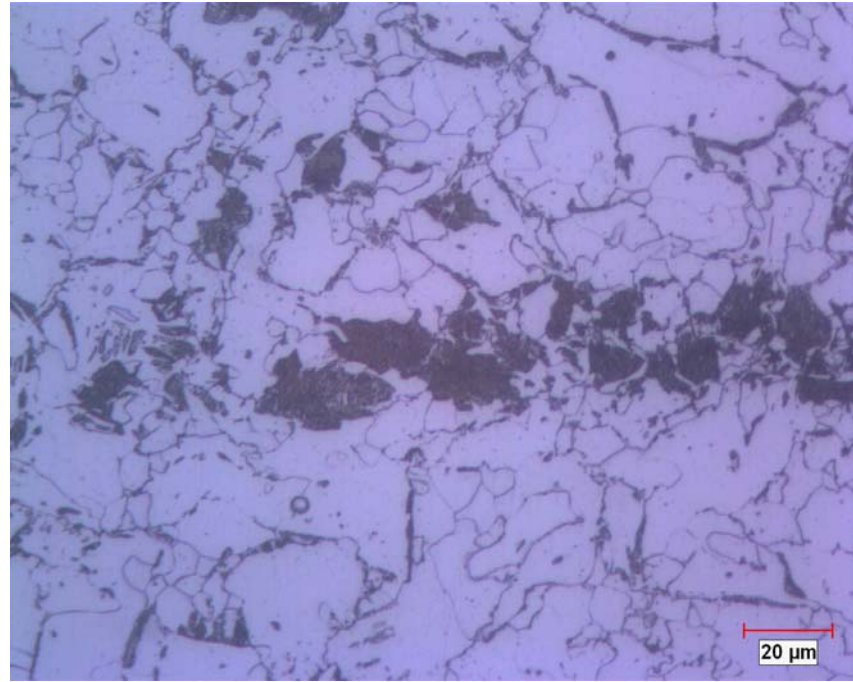


Normalizeli, Ortalama tane boyutu:9 μm

Şekil Ek-3.7. S355 J0 J2 K2, 4. Deneme (7-1 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.

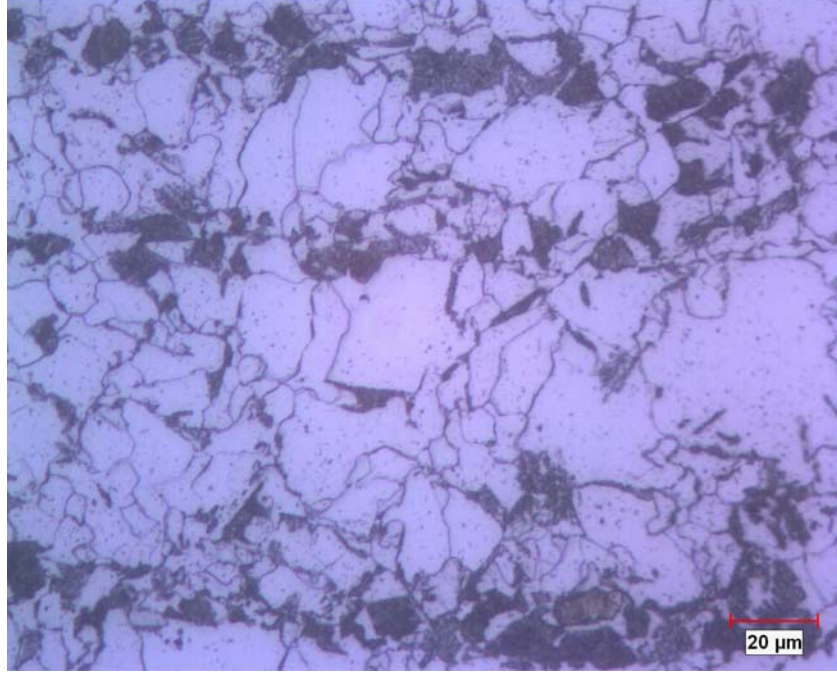


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu:9,44 µm

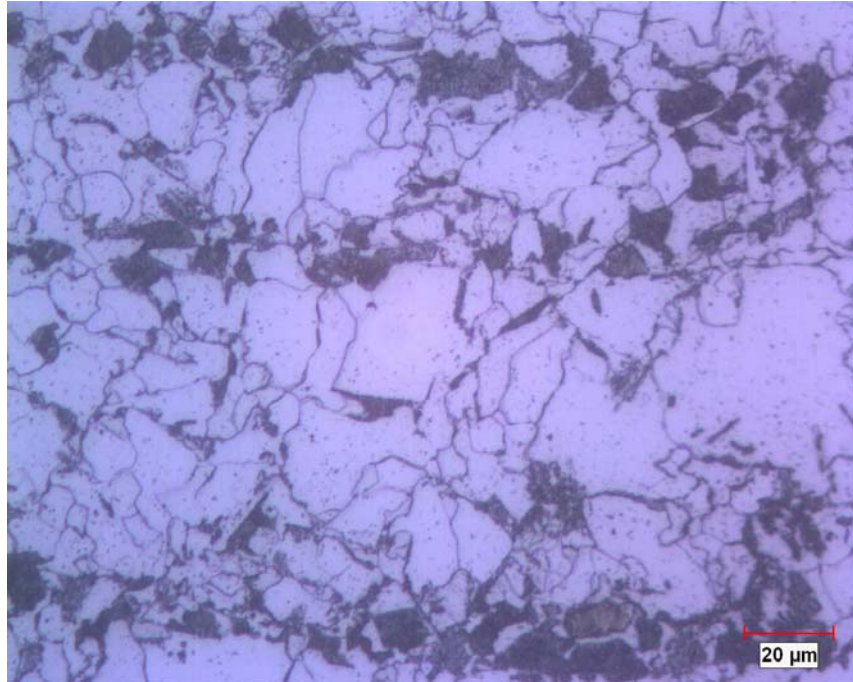


Normalizeli, Ortalama tane boyutu:9 µm

Şekil Ek-3.8. S355 J0 J2 K2, 4. Deneme (9-1 no'lu levha) 75 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.

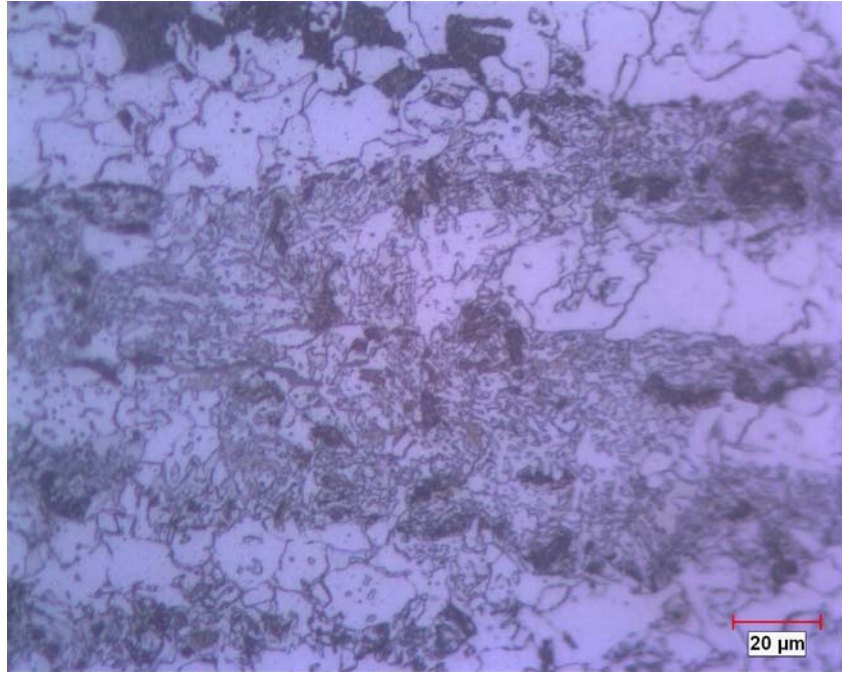


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu:9 μm

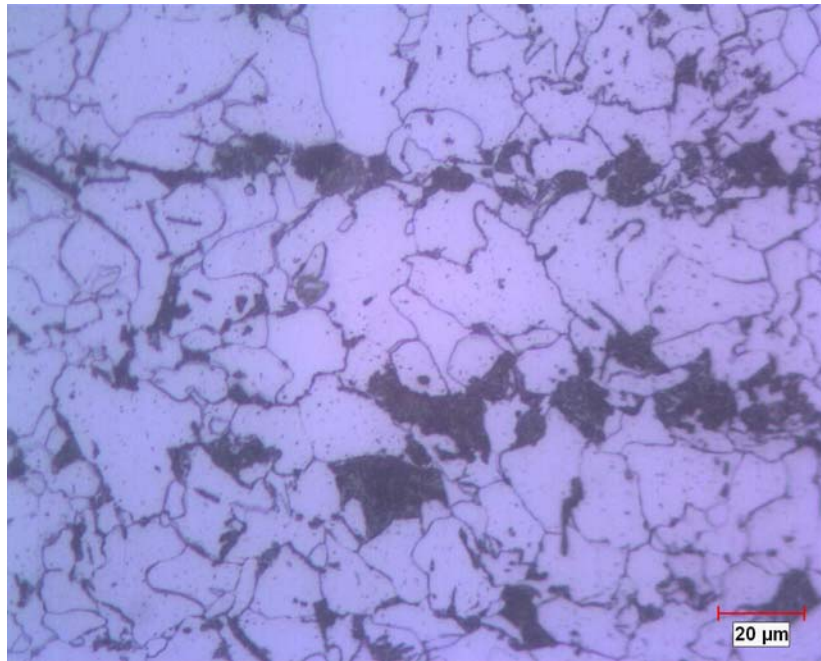


Normalizeli, Ortalama tane boyutu:9 μm

Şekil Ek-3.9. S355 J0 J2 K2, 5. Deneme (4-2 no'lu levha) 20 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli mikro yapıları.

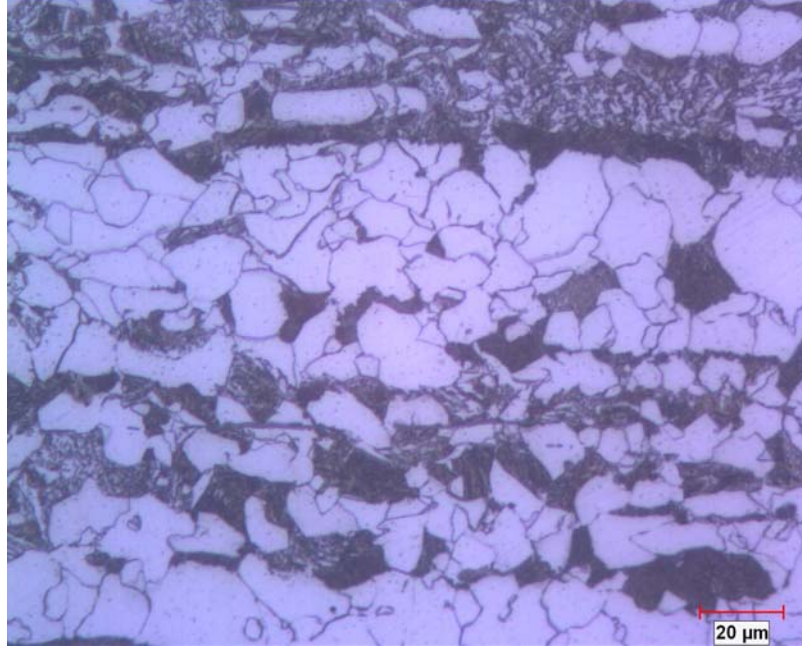


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 9,44 μm

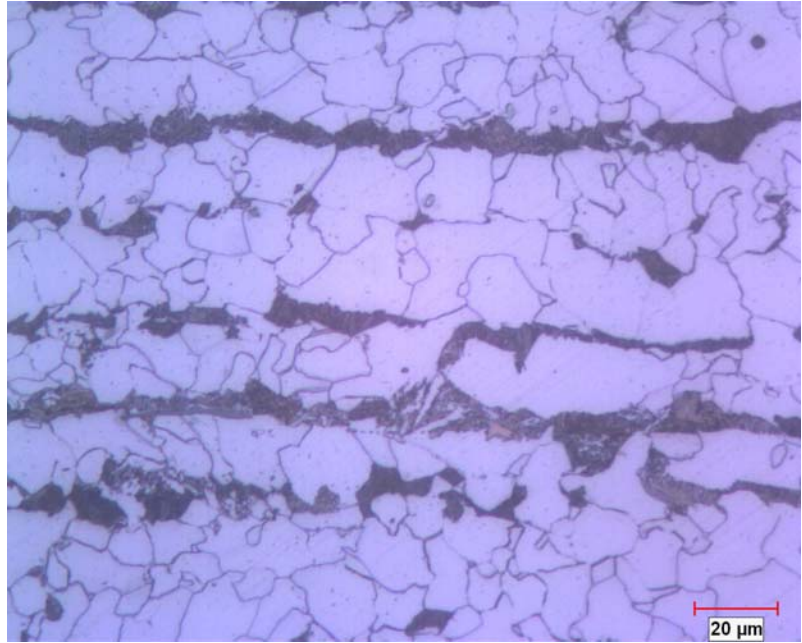


Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 9,44 μm

Şekil Ek-3.10. S355 J0 J2 K2, 5. Deneme (5-1 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.



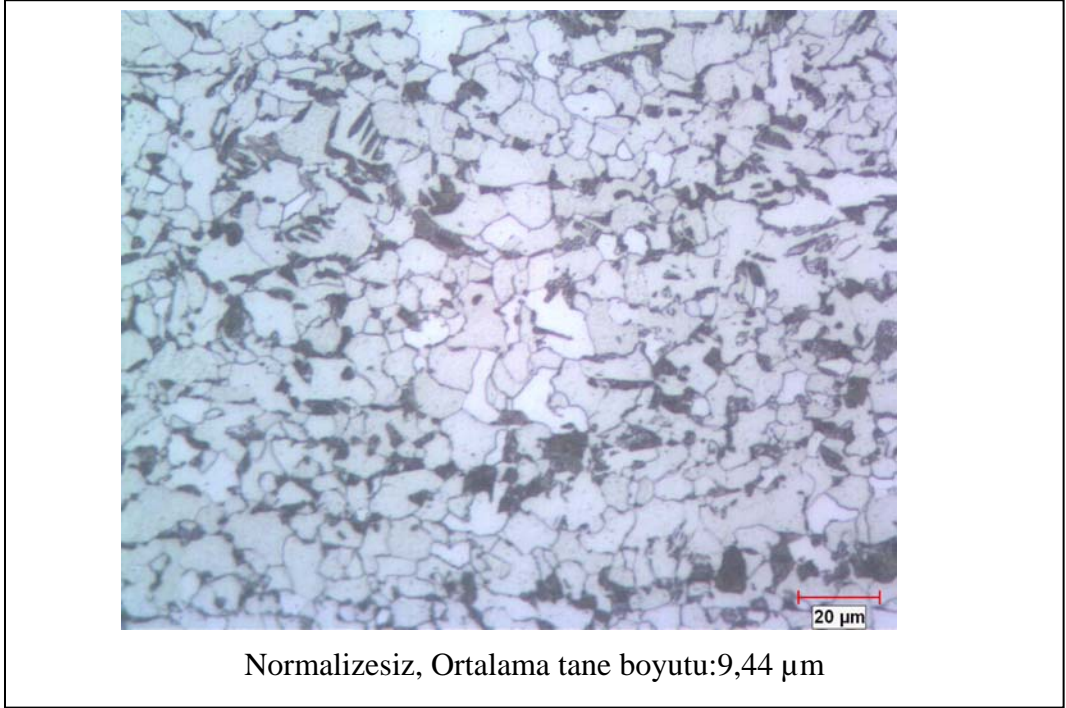
Normalizesiz, Ortalama tane boyutu:11,2 μm



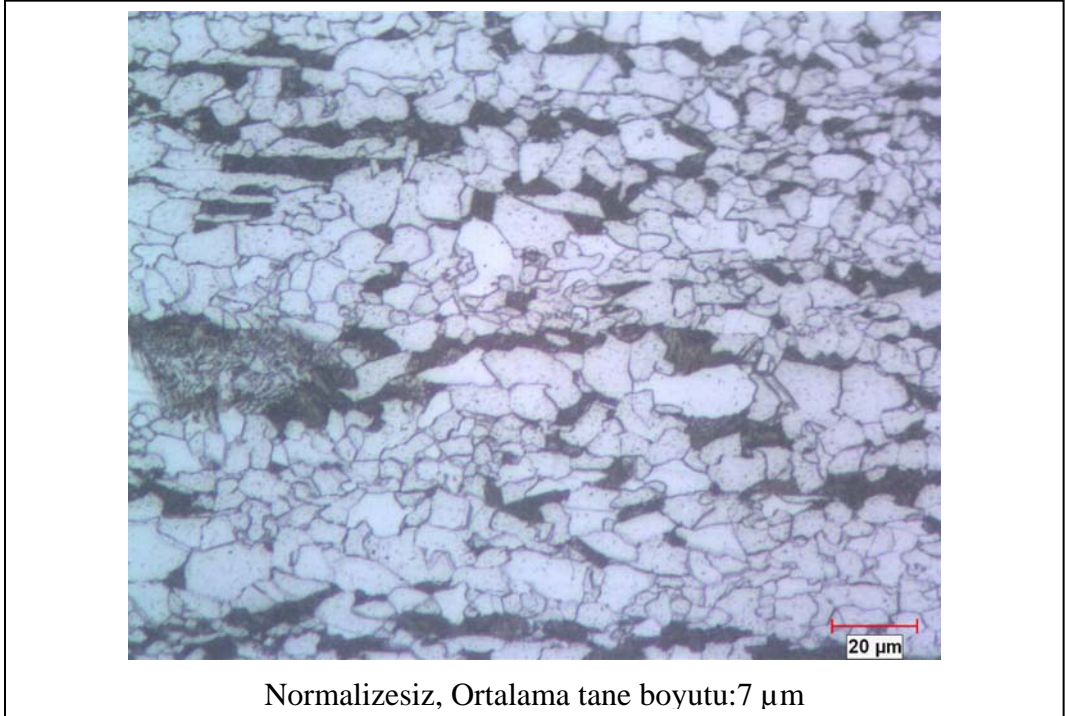
Normalizeli, Ortalama tane boyutu:11,2 μm

Şekil Ek-3.11. S355 J0 J2 K2, 5. Deneme (9-1 no'lu levha) 75 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levhaların mikro yapıları.

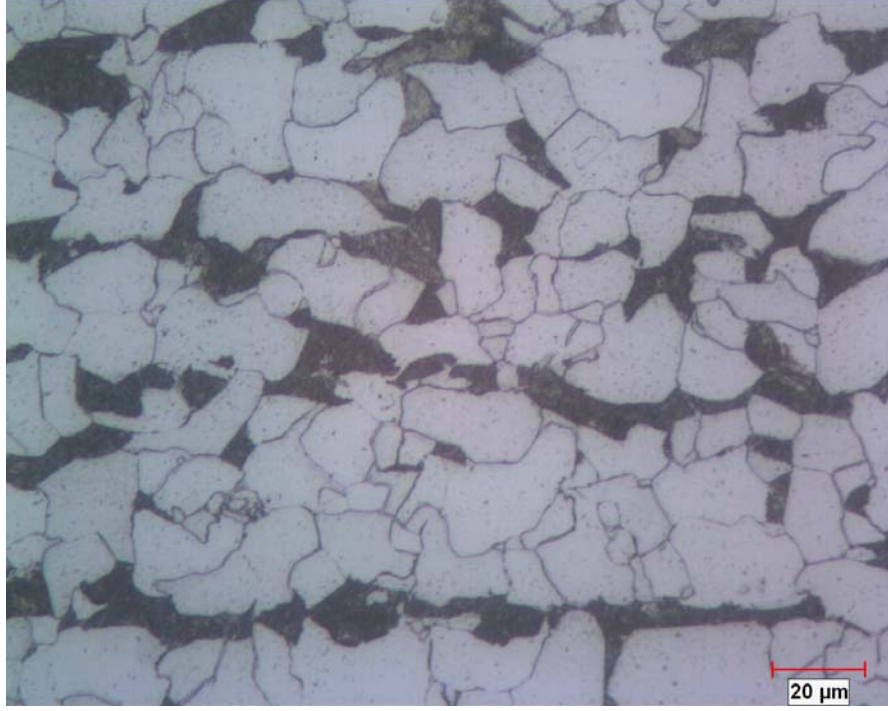
B- S355 J2W Kalite Levha Mikro Yapıları



Şekil Ek-3.12. S355 J2W, 1. Deneme (2-1 no'lu) levha 50 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapı

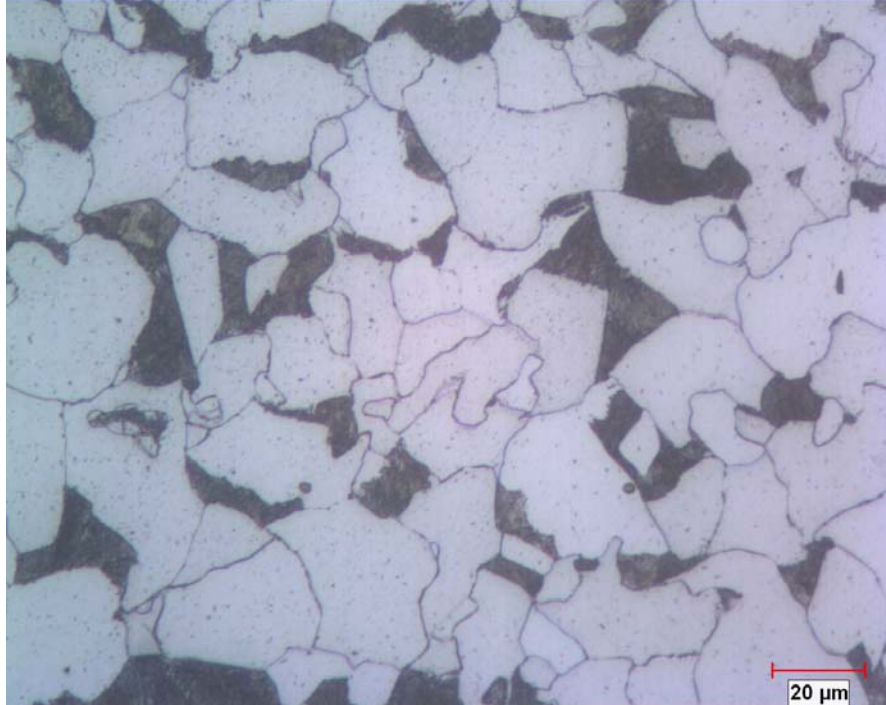


Şekil Ek-3.13. S355 J2W, 2. Deneme (3-2 no'lu levha) 16 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.



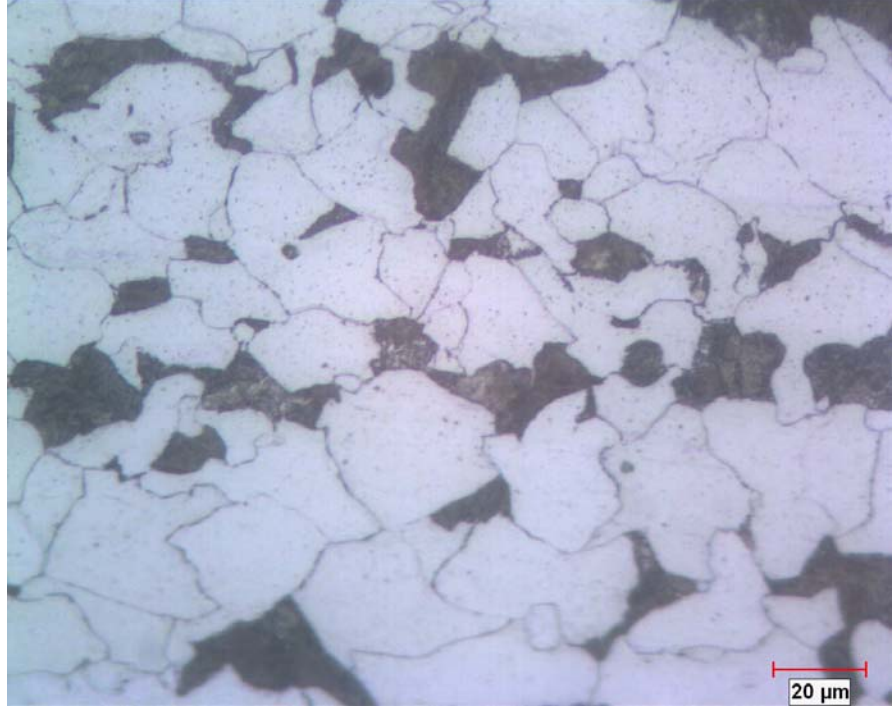
Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 13,4 μm

Şekil Ek-3.14. S355 J2W, 2. Deneme (4-1 no'lu levha) 20 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.



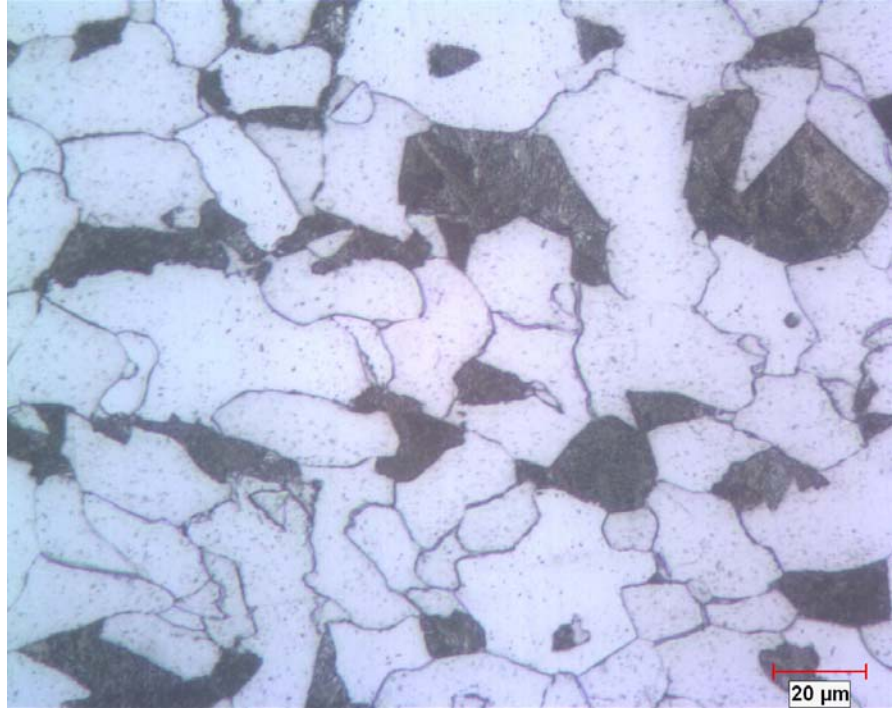
Normalizesiz, Ortalama tane boyutu:7 μm

Şekil Ek-3.15. S355 J2W, 2. Deneme (1-1 no'lu levha) 30 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.



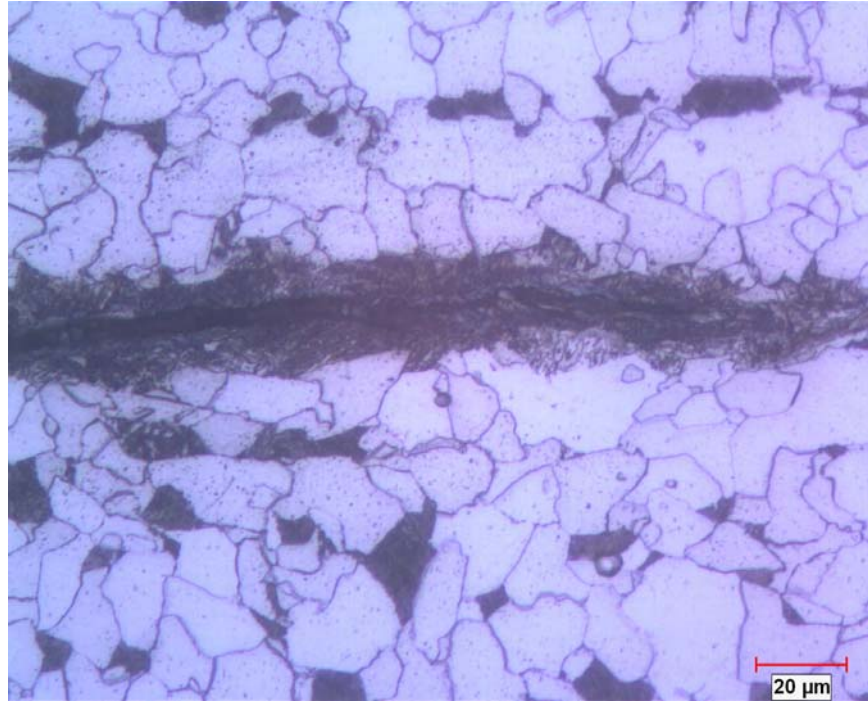
Normalizesiz. Ortalama tane boyutu: 13,4 μm

Şekil Ek-3.16. S355 J2W, 2. Deneme (5-1 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.

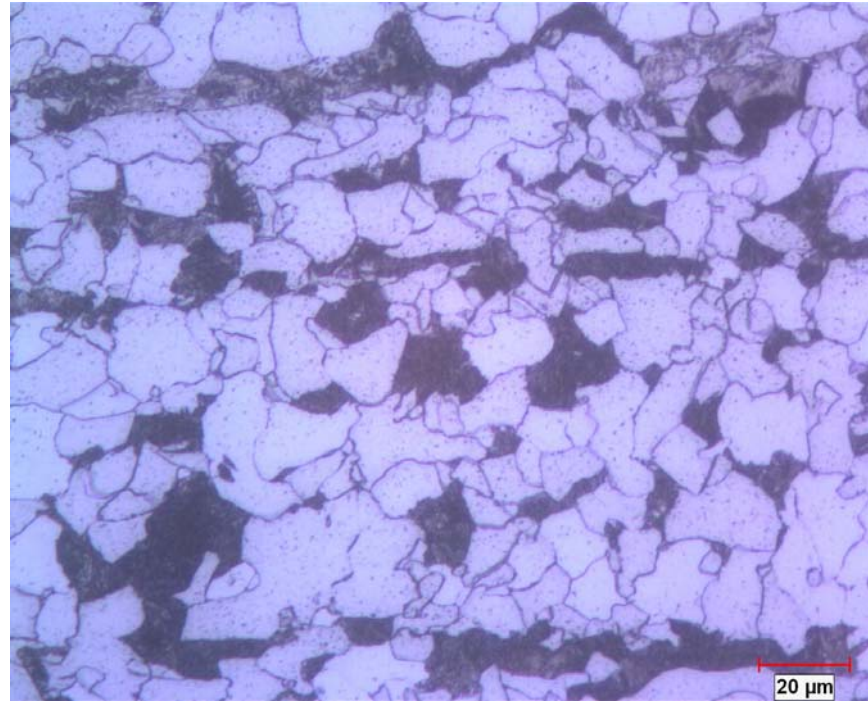


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 13,4 μm

Şekil Ek-3.17. S355 J2W, 2. Deneme (2-1 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz levha mikro yapısı.

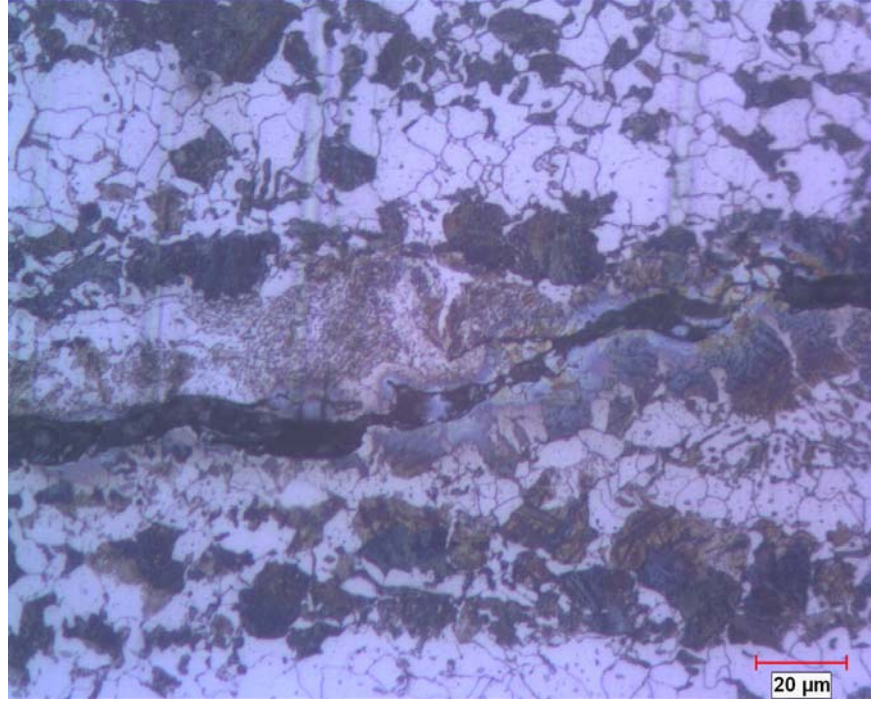


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 9 μm

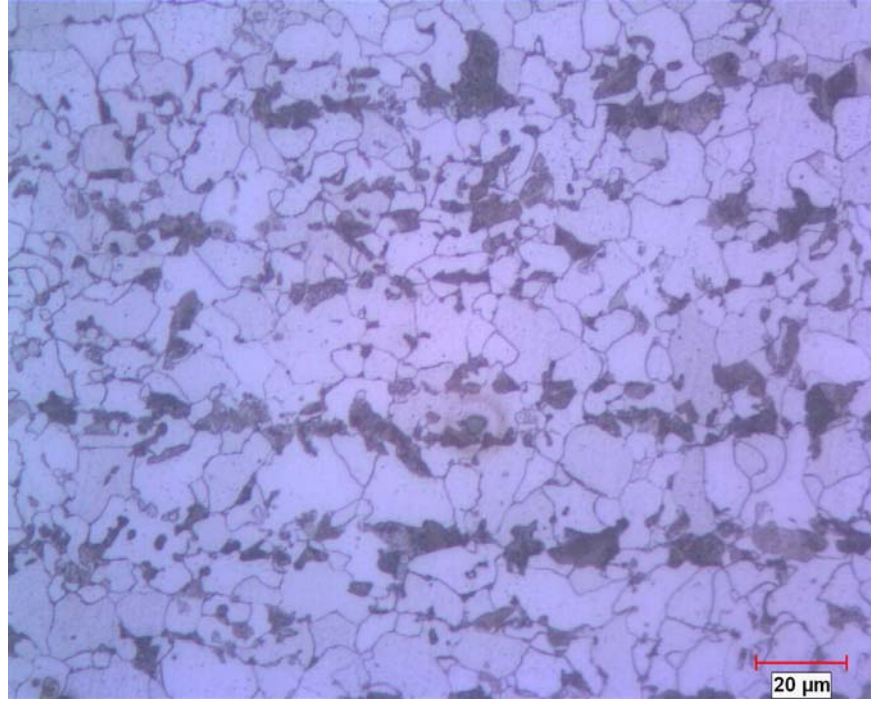


Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 7,94 μm

Şekil Ek-3.18. S355 J2W, 3. Deneme (3-2 no'lu levha) 16 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.

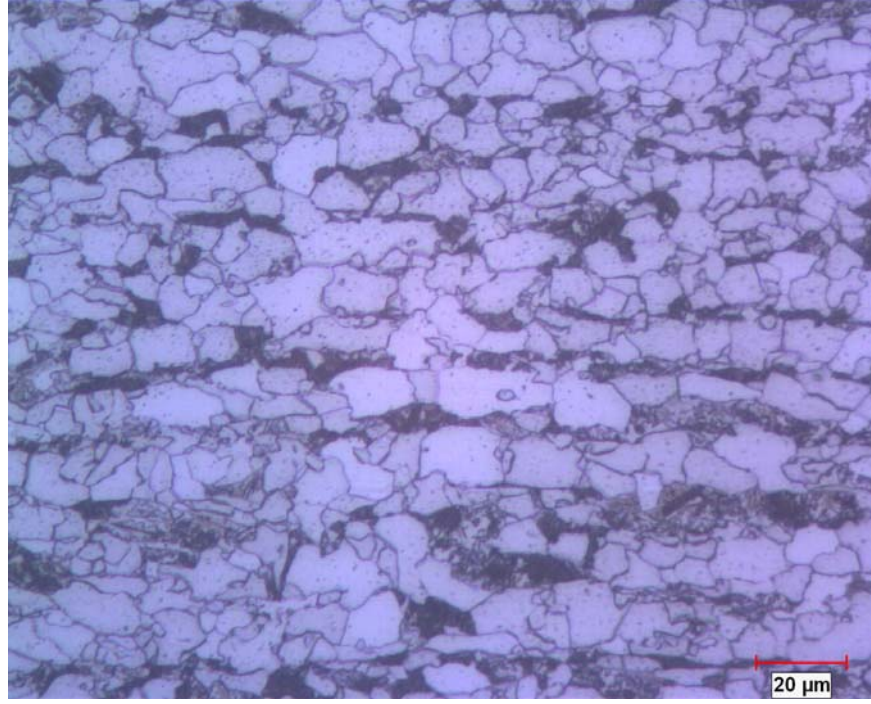


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 9,44 μm

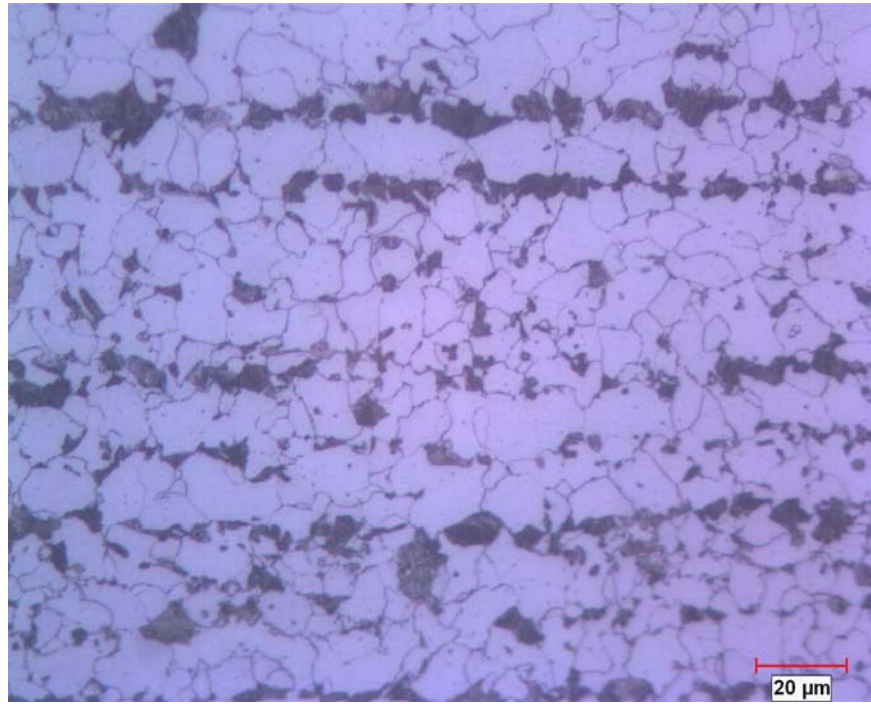


Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 7,94 μm

Şekil Ek-3.19. S355 J2W, 3. Deneme (4-1 no'lu levha) 20 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.

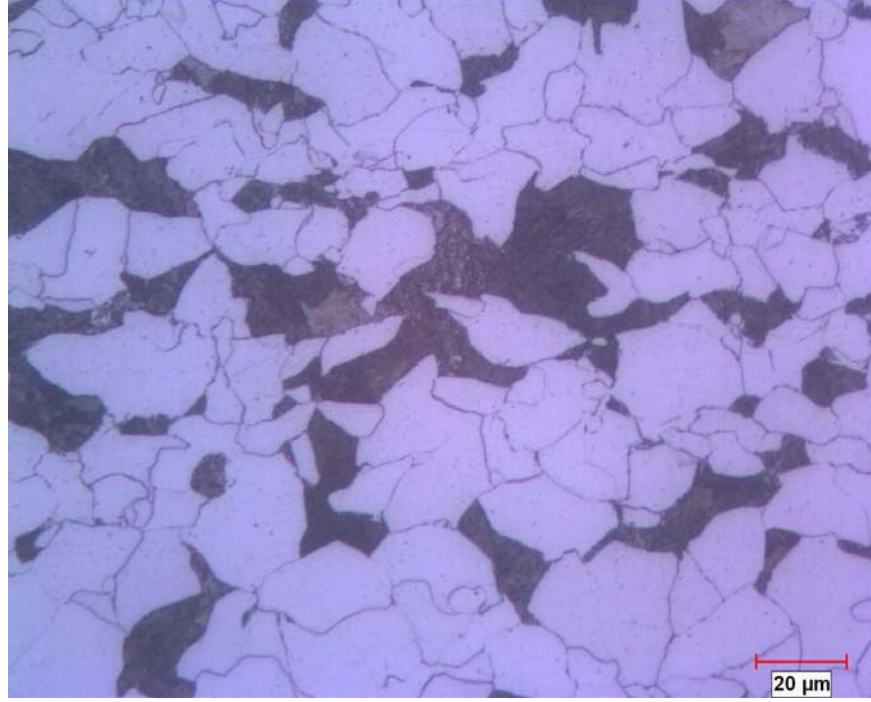


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 11 µm

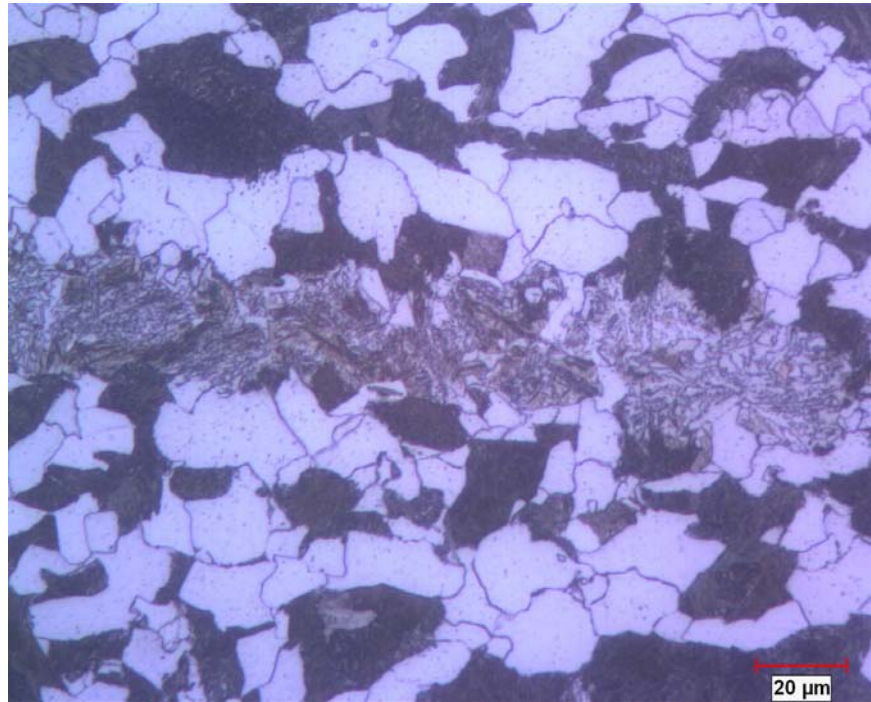


Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 7,94 µm

Şekil Ek-3.20. S355 J2W, 3. Deneme (1-1 no'lu levha) 30 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.

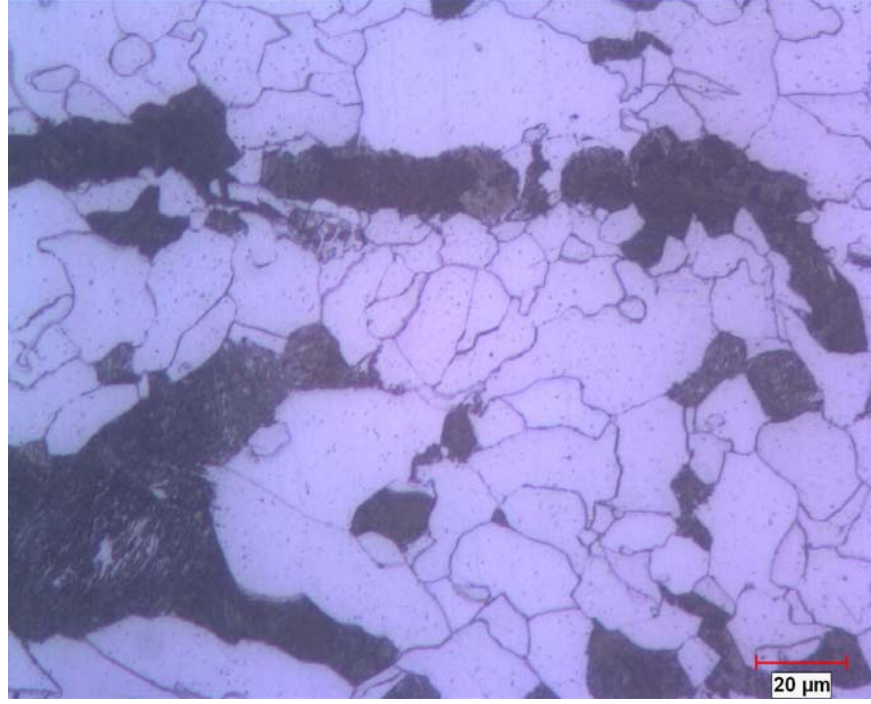


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 11,2 μm

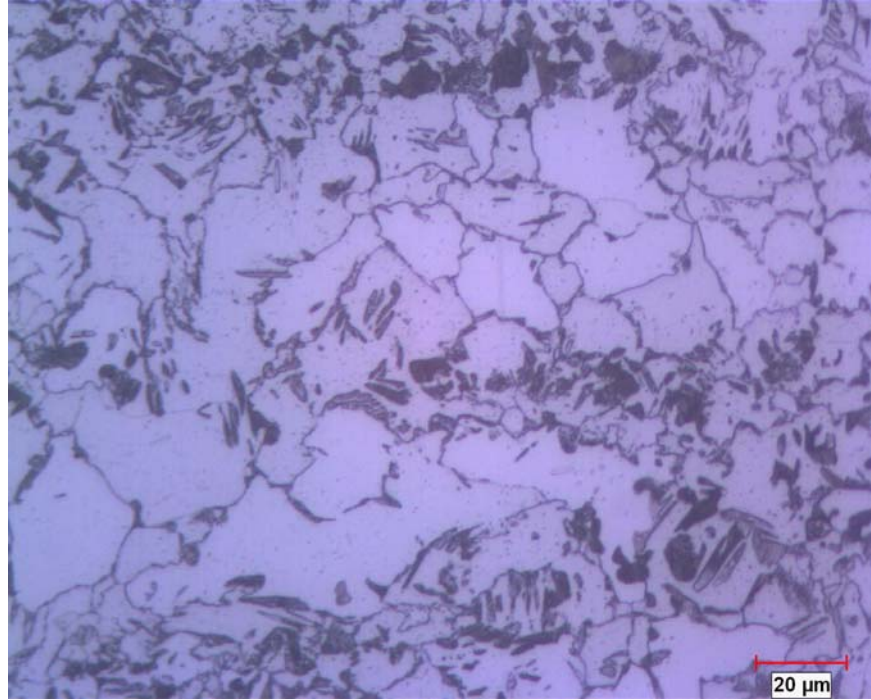


Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 7,94 μm

Şekil Ek-3.21. S355 J2W, 3. Deneme (5-1 no'lu levha) 40 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.

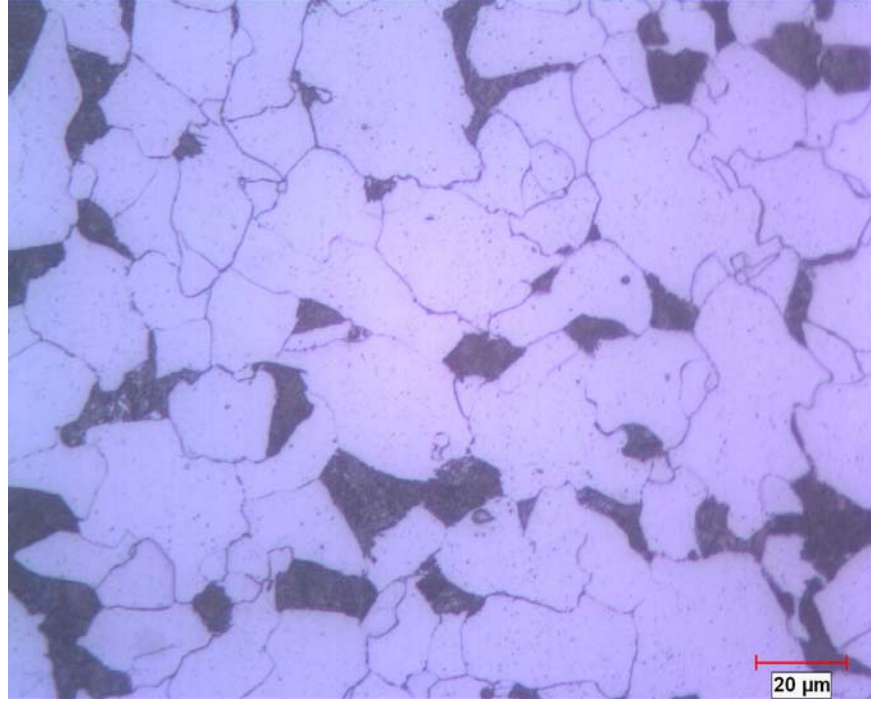


Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 11,2 μm

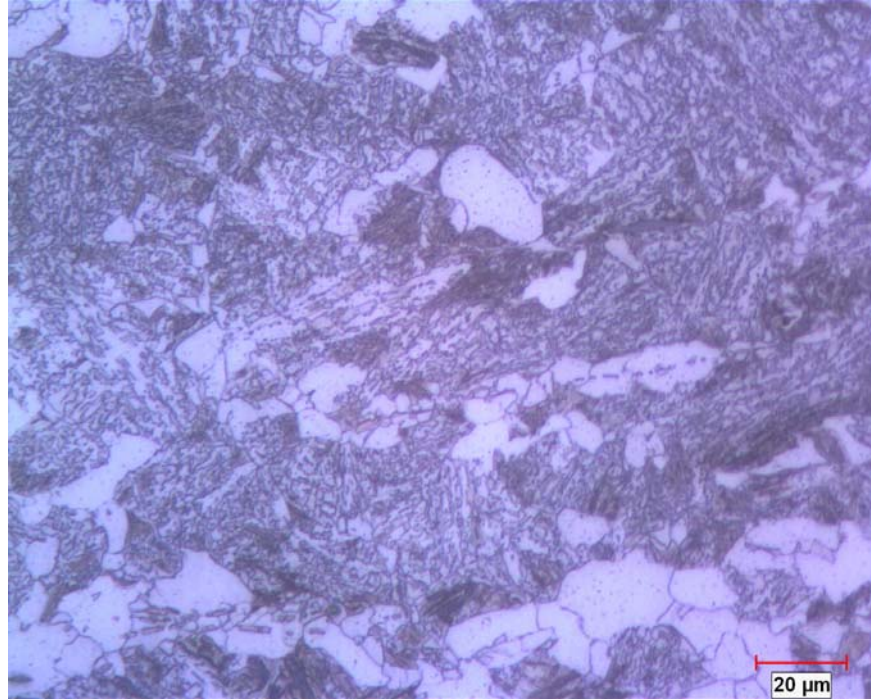


Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 9,44 μm

Şekil Ek-3.22. S355 J2W, 3. Deneme (2-2 no'lu levha) 50 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.



Normalizesiz, Ortalama tane boyutu: 13,4 μm



Normalizeli, Ortalama tane boyutu: 9,44 μm

Şekil Ek-3.23. S355 J2W, 3. Deneme (6-2 no'lu levha) 60 mm kalınlık için normalizesiz ve normalizeli levha mikro yapıları.