İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AISI 430 KALİTE PASLANMAZ ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN PERÇİNLEME PROSESİNDE ÇATLAK OLUŞUMUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Asude BALAKAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

NİSAN 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AISI 430 KALİTE PASLANMAZ ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN PERÇİNLEME PROSESİNDE ÇATLAK OLUŞUMUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Asude BALAKAN
(506151430)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN

NİSAN 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506151430 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Asude BALAKAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "AISI 430 KALİTE PASLANMAZ ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN PERÇİNLEME PROSESİNDE ÇATLAK OLUŞUMUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Selim YILDIRIM İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa	.....

Teslim Tarihi : 11 Mart 2020
Savunma Tarihi : 21 Nisan 2020

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda bana her zaman yön gösteren, akademik görüş ve düşünceleriyle çalışmama ışık tutan değerli hocam Sn. Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bana bu projeyi gerçekleştirme şansı tanıyan ve projenin başlangıç aşamasından son aşamasına kadar benden desteğini esirgemeyen BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş. Kalite Müdürü Sn. Akın OKATAN'a, Tedarikçi Kalite Yönetimi Departmanı Alan Yöneticisi Sn. Tuna ÇATALTAŞ'a ve bütün ekip arkadaşlarıma teşekkür ederim. Ayrıca yapılan testlerde desteğini benden esirgemeyen arkadaşım Kıvanç ÇETİNKAYA'ya ve Arş. Gör. Halil İbrahim FİLİZ, Arş. Gör. Mertcan KABA ve Arş. Gör. Doğukan ÇETİNER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu güne kadar her konuda benden desteğini esirgemeyen ve hep yanımda hissettiğim canım aileme, Irmak Naz POLAT'a ve sevgili arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mart 2020

Asude BALAKAN
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. PASLANMAZ ÇELİKLER **3**
2.1 Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi 3
2.2 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması 3
2.2.1 Ferritik paslanmaz çelikler 5
2.2.2 Östenitik paslanmaz çelikler 7
2.2.3 Martensitik paslanmaz çelikler 7
2.2.4 Dupleks paslanmaz çelikler 8
2.2.5 Çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler 8
2.3 Alaşım Elementlerinin Paslanmaz Çeliklere Etkisi 9
2.3.1 Krom 10
2.3.2 Nikel 10
2.3.3 Molibden 11
2.3.4 Manganez 11
2.3.5 Alüminyum 11
2.4 Paslanmaz Çelik Saclarda Anizotropik Plastik Deformasyonun Şekillendirmeye Etkisi 11
3. PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ VE PERÇİN PROSESİ **15**
3.1 Paslanmaz Çelik Sacların Üretim ve Şekillendirme Aşamaları 15
3.2 Temper Haddesinin Şekillendirmeye Etkisi 16
3.3 Çamaşır Makinesi Tambur Üretiminde Perçin Prosesi 20
3.4 Perçinleme Prosesinde Çatlak Oluşumu 23
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **25**
4.1 Deneylerin Yapılması ve Kullanılan Cihazlar 25
5. DENEY SONUÇLARI **33**
5.1 Mekanik Test Sonuçları 33
5.2 Mikroyapı Analizleri 41
5.3 Kesme Yüzey Testi Sonuçları 47
5.4 Erichsen Derinliği ve Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları 52
6. GENEL SONUÇLAR **55**
KAYNAKLAR **57**
ÖZGEÇMİŞ **61**

KISALTMALAR

AISI : Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Hmk : Hacim Merkezli Kübik Yapı
Ymk : Yüzey Merkezli Kübik Yapı
ISO : Uluslararası Standardizasyon Örgütü
DIN : Alman Standardizasyon Enstitüsü
HRAP : Sıcak Haddelenmiş ve Dekapaj işlemi uygulanmış
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS : Enerji Dağılım Spektrometresi

SEMBOLLER

α	**:** Alfa
AlN	**:** Alüminyum nitrür
C	**:** Karbon
Cr	**:** Krom
Cr_2N	**:** Krom nitrür
Cr_2O_3	**:** Krom oksit
Ni	**:** Nikel
Mn	**:** Manganez
Nb	**:** Niyobyum
Ti	**:** Titanyum
Fe	**:** Demir
γ	**:** Gama
δ	**:** Delta
^oC	**:** Santigrat derece
^oF	**:** Fahrenhayt derece
%	**:** Yüzde
µm	**:** Mikrometre
$M_{23}C_6$	**:** Metal karbür
HNO_3	**:** Nitrik asit
HCI	**:** Hidroklorik asit
ε_w	**:** Enine gerçek birim şekil değişimi
ε_t	**:** Kalınlık yönünde gerçek birim şekil değişimi
$Rp_{(0,2)}$	**:** Akma dayanımı
Rm	**:** Çekme dayanımı
n	**:** Deformasyon sertleşmesi üssü
min	**:** Minimum
mm	**:** Milimetre
MPa	**:** Megapaskal
m	**:** Metre
Ti	**:** Titanyum
P	**:** Fosfor
Si	**:** Silisyum
S	**:** Kükürt
A80	**:** Kopma uzaması (başlangıç ölçü uzunluğu 80 mm)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : AISI 430 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi (% ağ.). **25**
Çizelge 4.2 : AISI 430 paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri. **25**
Çizelge 5.1 : Çatlamayan sac numunelerinin hadde yönüne dik çekme test sonuçları. **34**
Çizelge 5.2 : Çatlayan sac numunelerinin hadde yönüne dik çekme test sonuçları. . **34**
Çizelge 5.3 : Çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen numunelerin anizotropi katsayısı ve deformasyon sertleşmesi üssü değerleri. **40**
Çizelge 5.4 : Çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen numunelerin dikey ve düzlemsel anizotropi katsayıları..... **41**
Çizelge 5.5 : Mikroyapı analizi için kullanılan numunelerin sınıflandırılması. **41**
Çizelge 5.6 : Çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen paslanmaz sacların tane boyutu..... **47**
Çizelge 5.7 : Kesme testi sonucu numunelerin farklı hadde yönü açılarında kırılma ve kayma yüzey oranları. **51**
Çizelge 5.8 : Çatlayan ve çatlamayan sacların Erichsen derinliği sonuçları. **53**
Çizelge 5.9 : Çatlayan ve çatlamayan sacların sertlik ölçümleri. **53**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel miktarları **4**
Şekil 2.2 : Fe-Cr faz diyagramı **6**
Şekil 2.3 : Ferritik paslanmaz çelikler **6**
Şekil 2.4 : Fe-Cr-Ni faz diyagramı **8**
Şekil 2.5 : Schaffler Diyagramı **9**
Şekil 2.6 : Fe-Cr alaşımlarında ferrit ve östenit oluşum sıcaklığına bileşimin etkisi **10**
Şekil 2.7 : % 0-15 Al içeren AISI 430 paslanmaz çeliklerin rulo sarma sıcaklığı ve sıcak bant tavlamasının mikroyapı üzerindeki etkisi (a) 36L düşük rulo sarma sıcaklığı, (b) 36L düşük rulo sarma sıcaklığı ve sıcak bant tavlaması, (c) 36H yüksek rulo sarma sıcaklığı, (d) Yüksek rulo sarma sıcaklığı ve sıcak bant tavlaması, (e) 36HH düşük rulo sarma sıcaklığı, (f) düşük rulo sarma sıcaklığı ve sıcak bant tavlaması **13**
Şekil 3.1 : Paslanmaz çelik üretimi birinci adım ergitme **17**
Şekil 3.2 : Sıcak hadde prosesi **17**
Şekil 3.3 : İlk tavlama ve dekapaj prosesi **18**
Şekil 3.4 : Soğuk hadde ve final tavlama prosesi **18**
Şekil 3.5 : AISI 430 temper haddesi uygulanmış çeliğin hadde yönündeki optik mikroskop görüntüsü **19**
Şekil 3.6 : AISI 430 kalite temper haddesi uygulanmış çeliğin tane sınırlarındaki submikroskobik çökeltiler **19**
Şekil 3.7 : (a) Tambur dikişinin enine kesiti ve alttaki alt görünümde, bağlı bağlantı dikişinin tamburun dışından bir görünümü ve bağlantı dikişinin birleştirilmesinden önce uç kenarların şematik bir resmi, (b) Tamburun enine kesiti ve altından bağlantı dikişinin tamburun içinden görünüşü, (c) Tamburun enine kesiti ve altından bağlantı dikişinin tamburun içinden görünüşü **20**
Şekil 3.8 : 90^{o} bükülmüş perçin bölgesi. **21**
Şekil 3.9 : Final perçin prosesi yapılmış bağlantı bölgesi. **22**
Şekil 3.10 : Perçin prosesi tamamlanmış tambur. **22**
Şekil 3.11 : Tambur sacı perçin bölgesi. **23**
Şekil 3.12 : Çatlama görülen perçin bölgeleri. **24**
Şekil 3.13 : Perçin çatlağının kamera görüntüsü, (a) çatlak perçin formu, (b) çatlak olmayan perçin formu. **24**
Şekil 4.1 : Diskotom-65 kaba kesme cihazı. **26**
Şekil 4.2 : Struers Clitopress 20 kalıplama cihazı. **26**
Şekil 4.3 : Struers Tegrapol 21 zımparalama ve partlatma cihazı. **27**
Şekil 4.4 : Mikroskobik inceleme için hazırlanan numuneler. **27**
Şekil 4.5 : Clemex Vision yazılımlı Nikon Epiphot 200 optik mikroskop. **28**
Şekil 4.6 : JEOL JSM 5600 taramalı elektron mikroskobu. **28**
Şekil 4.7 : Zwick/Roell kesme kalıbı. **29**
Şekil 4.8 : Zwick/Roell Z020 çekme test cihazı. **29**

Şekil 4.9 : Erichsen Model 102 çökertme test cihazı. **30**
Şekil 4.10 : Qness marka Q10 model mikrosertlik ölçüm cihazı. **30**
Şekil 4.11 : Erichsen derin çekme cihazı. **31**
Şekil 4.12 : Shimadzu çekme cihazı. **31**
Şekil 5.1 : Çekme Testi Numunesi. **33**
Şekil 5.2 : Çatlama davranışında akma ve çekme dayanımı ilişkisi. **35**
Şekil 5.3 : Çatlayan ve çatlamayan sacların ortalama akma dayanımı değerleri. **35**
Şekil 5.4 : Çatlayan ve çatlamayan sacların ortalama çekme dayanımı değerleri. **36**
Şekil 5.5 : Çatlayan ve çatlamayan sacların ortalama kopma uzaması (A80) değerleri. **36**
Şekil 5.6 : A tedarikçisinden alınan sacların çekme ve akma dayanımı ilişkisi kontur grafiği. **37**
Şekil 5.7 : B tedarikçisinden alınan sacların çekme ve akma dayanımı ilişkisi kontur grafiği. **38**
Şekil 5.8 : Çatlama problemine etki eden parametreler. **38**
Şekil 5.9 : 22 numaralı çatlayan numunenin mikroyapı görüntüleri. **42**
Şekil 5.10 : 23 numaralı çatlayan numunenin mikroyapı görüntüleri. **43**
Şekil 5.11 : 24 numaralı çatlamayan numunenin mikroyapı görüntüsü. **44**
Şekil 5.12 : 25 numaralı çatlamayan numunenin mikroyapı görüntüsü. **45**
Şekil 5.13 : Çatlama davranışı gösteren paslanmaz sac numunelerde tespit edilen çökelti fazlarının taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri ve EDS analizleri. **46**
Şekil 5.14 : A ve B tedarikçisinden alınan çatlama davranışı gösteren sacların kırılma ve kayma yüzey görüntüleri ((a) hadde yönü açısı 0^o, (b) hadde yönü açısı 45^o, (c) hadde yönü açısı 90^o). **48**
Şekil 5.15 : A ve B tedarikçisinden alınan çatlama davranışı göstermeyen sacların kırılma ve kayma yüzey görüntüleri. **48**
Şekil 5.16 : Kırılma ve kayma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü. **49**
Şekil 5.17 : Kesilen numunenin kayma yüzeyinden kırılma yüzeyine geçiş bölgesi taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ((a) x500 büyütmedeki geçiş bölgesi, (b) x2000 büyütmedeki geçiş bölgesi). **50**
Şekil 5.18 : Erichsen çökertme testi numunesi. **52**

AISI 430 KALİTE PASLANMAZ ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN PERÇİNLEME PROSESİNDE ÇATLAK OLUŞUMUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle paslanmaz çelik kullanımı oldukça geniş bir alan kaplamaktadır. Paslanmaz çelikler; kimyasal özellikleri, fiziksel dayanımları ve yüzey kaliteleri dikkate alınarak farklı sanayi ve endüstri kollarında kendilerine kullanım alanları bulmaktadır. Paslanmaz saclar genellikle şekil alabilme özellikleri ile bilinirler ve bu özellikleriyle birçok sektörde kullanım alanları mevcuttur. Isıya ve korozyona karşı oldukça dayanıklıdırlar ve bu sebeple su ile temas edecek noktalarda kullanılırlar. Şekil alabilme özelliği sayesinde mutfak ürünlerinde ve dekorasyon ürünlerinde tercih edilirler. Paslanmaz saclar değişken özelliklerine ve kullanım alanlarına bağlı olarak çeşitlilik gösterirler ve sınıflara ayrılırlar. Paslanmaz sac derin çekme özelliğinin iyi olması ve korozyon dayanımı sayesinde çamaşır makinesi tamburu üretiminde tercih edilen bir malzemedir.

Çamaşır makinesinin en önemli parçalarının başında tambur gelmektedir. Yıkama işleminin gerçekleştirildiği bölüm olan tamburun, makinenin çalıştığı zaman boyunca mekanik anlamda problem oluşturmaması gerekmektedir.

Bu tez kapsamında çamaşır makinesi tambur üretiminde paslanmaz sacın perçinleme işlemi sırasında meydana gelen çatlak hasarının mikroyapı ve mekanik özellikler ile ilişkisi incelenmiştir. Literatür araştırmalarının ilk bölümünde paslanmaz sacların geçmişten bu güne olan tarihsel gelişiminden bahsedilmiştir. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması ve içerdikleri alaşım elementlerinin malzemenin özelliklerine etkisi de literatür çalışmalarında yer almaktadır. Tambur üretiminde ferritik paslanmaz çelik grubuna ait, soğuk haddelenmiş, 2B yüzey özelliklerine sahip AISI 430 kalite paslanmaz çelik ile çalışılmıştır. Farklı tedarikçilere ait saclar çatlama davranışı gösteren ve çatlama davranışı göstermeyen saclar olarak iki grupta incelenmiştir. İlk olarak çatlayan malzeme grubuna ait on farklı rulodan ve çatlama davranışı göstermeyen gruba ait on bir farklı rulodan alınan numunelerle çekme testleri yapılıp malzemelerin akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri elde edilmiştir.

Elde edilen değerler Minitab programı kullanılarak regresyon metodu ile istatistik bir model üzerine oturtularak mekanik değerlerin çatlama davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analiz sonucunda ilk olarak çatlayan tambur sacı üretme olasılığı akma dayanımı, çekme dayanımı ve kalıp farklılığı ile ilişkilendirilmiştir. Farklı tedarikçiler için çatlayan ve çatlamayan sacların akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin dağılımı hesaplanmış ve ortalama değerleri elde edilmiştir. Bu etkileşimler Minitab programında girdi olarak kullanılarak kontur grafikleri elde edilmiştir. Her tedarikçi için oluşturulan kontur grafikleri ile çatlama hasarı gözlemlenen ve gözlemlenmeyen sacların akma ve çekme dayanımları arasında ilişki kurularak limit değerleri belirlenmiştir. Elde edilen limit değerlerinin her tedarikçi için

farklı olduğu ve B tedarikçisinde bu aralığın daha geniş olduğu gözlemlenmiştir. Proses denemeleri ile üretilen çevre saclarının perçin bölgelerinde çatlak sayıları hesaplanıp Minitab analizinde girdi olarak kullanılarak ortalama çatlak perçin bölgesi sayısı akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma uzaması, sertlik ve kalıp farklılığı parametreleri ile ilişkilendirilmiştir ve çatlak oluşmayan değer aralıkları elde edilmiştir.

Mekanik özelliklerin yanı sıra üretim prosesinden de gelen kalıp farklılığı da analiz edilmiş ve çatlama davranışı üzerindeki etkisi görülmüştür. Mekanik analizlerin devamında deformasyon özelliklerinin belirlenmesi için 0^o, 45^o ve 90^o hadde yönü açılarına sahip numunelere kademeli çekme testi yapılarak dikey anizotropi katsayısı, düzlemsel anizotropi katsayısı ve deformasyon sertleşmesi üssü değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler iki grup arasında karşılaştırılarak farklılıkları tespit edilmiştir.

Çalışmanın devamında çatlayan ve çatlamayan sacların mikroyapıları optik mikroskop ile farklı büyütmelerde incelenmiştir. Çatlayan ve çatlamayan sacların tane yapıları kıyaslanarak çatlama davranışı göstermeyen saclara ait tanelerin eş eksenli olduğu ve mikroyapıda daha homojen bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Çatlama davranışı gösteren sacların mikroyapılarında deformasyon izleri ve çökelti fazları tespit edilmiştir. Tespit edilen bu çökelti fazları EDS analizi ile incelenerek bileşenleri belirlenmiş. Literatür çalışmaları ile kıyaslanarak çökelti fazlarının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği ve çatlama davranışına sebep olabileceği öngörülmüştür.

Tane boyutunun çatlama hasarına etkisinin incelenmesi amacı ile tane boyutu analizi yapılmıştır ve iki grup karşılaştırılarak tane boyutunun da çatlama davranışı üzerinde etkili bir değişken olduğu tespit edilmiştir. Tane boyutu küçüldükçe malzemenin şekillendirilebilirliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen sacların kırılma ve kayma yüzeyleri kesme yüzey analizi yapılarak incelenmiştir. Bu analizde malzemelerin 0^o, 45^o ve 90^o hadde yönlerinde kesilip yüzeyleri mikroskop altında incelenmiştir. Farklı hadde yönü açılarına sahip çatlayan ve çatlamayan numunelerin ortalama kırılma yüzey oranları hesaplanmıştır. Numunelerin kendi içinde hadde yönleri arasında kırılma yüzey oranlarında belirgin bir farklılık gözlenmezken, iki grup kıyaslandığında ortalama kırılma yüzey oranının çatlayan saclarda daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kırılma ve kayma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile farklı büyütmelerde incelenmiştir.

Çatlama özelliği gösteren ve göstermeyen sacların şekillendirilebilirliklerini kıyaslamak amacı ile Erichsen çökertme deneyi yapılmış ve Erichsen derinlikleri ölçülmüştür. Çatlama davranışı gösteren sacların Erichsen derinliklerinin çatlama davranışı göstermeyen göstermeyen saclara kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir.

Malzemenin sertliğinin şekillendirilebilirliğine etkisini incelemek için sertlik analizi yapılmıştır. İki grup kıyaslandığında çatlama davranışı gösteren sacların sertliğinin çatlama davranışı göstermeyenlere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AISI 430 STAINLESS STEEL ON THE CRACK FORMATION DURING THE RIVETING PROCESS

SUMMARY

Today, the stainless steel applications have covered a vast variety of the industries with the development of the technology. Stainless steels have been videly used in many industries and industry branches due to their chemical properties, physical strength and surface quality. Stainless steel sheets are generally known by their good formability properties. They have high resistance to heat and corrosion and therefore they are used in points that will come into contact with water. Satinless steel is preferred in kitchen products and decoration products due to its shape feature. There are many types of stainless steel sheets which could also be divided into many classes. Stainless steel sheets are also a preferred material in washing machine drum production due to their good deep drawing and corrosion resistance.

The drum is the most important part of the washing machine. The drum which is the part where the washing process takes place should not cause mechanical problems during the operation of the machine.

In this study, the effect of microstructure and mechanical properties on the crack formation that occurs during the riveting process of the stainless steel drum shell sheet was investigated in detail. In the first part of the literature studies, the historical development of stainless sheets from past to present is mentioned. The classification of stainless steels and the effects of the alloy elements they contain on the properties of the material are also included in the literature studies. Cold rolled, 2B surface properties of AISI 430 grade belonging to ferritic stainless steel group have been worked in drum production. Sheets which were produced by different suppliers examined in two groups: Sheets with cracking behavior and sheets without cracking behavior.

At first, tensile tests were performed with the samples taken from ten different coils of cracking behavior material group and eleven different coils of not showing cracking behavior group. Yield strength, tensile strength and elongation at fracture values of the materials were obtained. The obtained values were used as inputs of statistical model with the regression method using the Minitab program and the effect of mechanical values on the cracking behavior was examined. As a result of the analysis, the possibility of producing cracked drum sheet was first associated with yield strength, tensile strength and mold difference. For different suppliers, the yield strength, tensile strength and elongation at fracture values of the cracked and non-cracked sheets were calculated and their average values were obtained. Contour plot graphics are obtained by using these interactions as input in Minitab program. It has been observed that the limit values obtained are different for each supplier and this range is wider at supplier B. The number of cracks in the rivet regions of the drum sheel produced by the process trial was calculated and used as input in the Minitab analysis. The average number of

the cracked rivet area is associated with the yield strength, tensile strength, elongation at fracture parameters, and non-cracked value ranges are obtained. In addition to mechanical properties, mold difference was also analyzed and mold effect on cracking behavior was observed. Many studies have been conducted to improve the formability of ferritic stainless steel through the application of several different methods. Accordingly, controlling possible crystallographic orientations enhances the formability. In order to determine the deformation properties in the continuation of the mechanical analysis, normal anisotropy coefficient, planar anisotropy coefficient and deformation hardening exponent values were calculated by performing tensile testing on samples with 0^o, 45^o and 90^o to the rolling direction angles. These values were compared between two groups and their differences were determined. Lower values were obtained in the sheets that did not show cracking behavior in the normal anisotropy coefficient values. Higher value was obtained for the sheets showing cracking behavior. No significant difference was found in the cracking and non-cracking sheets in the planar anisotropy coefficient value. A linear relationship could not be established between cracking behavior and deformation hardening exponent values.

The microstructures of the cracked and non-cracked sheets were examined with optical microscopes at different magnifications. By comparing the grain structures of the cracked and non-cracked sheets, the grains of the sheets that do not show cracking behavior were found to be isotropic and have a more homogeneous distribution in the microstructure. The recrystallized grain size and uniformity of the microstructure can be linked to the stored energy after cold rolling. The grain size depends on the nucleation and growth rate. The literature demonstrates that high stored energy increases the nucleation rate more than the growth rate. Deformation marks and precipitate phases were detected in the microstructures of the sheets showing cracking behavior. These precipitates were analyzed by EDS analysis and their components were determined. In the light of the literature studies, it is predicted that the precipitate phases negatively affect the mechanical properties and may cause the cracking behavior. Deformation marks and precipitates were detected in the microstructures of the sheets showing cracking behavior. These precipitates were analyzed by EDS and their composition was determined. By taking into account of the previous literature studies, it is predicted that, precipitates negatively affect the mechanical properties and may cause cracking behavior.

Mechanical and chemical features of sheet metal materials such as yield strength, tensile strength, or microstructure are not alone sufficient to account for their formability. In order to analyze the effect of the grain size on the cracking damage, grain size analysis was performed. By comparing the two groups, it was determined that the grain size was also an effective variable on cracking behavior. It was determined that the formability of the material increases with the decrease of the grain size.

The fracture surface and shear surface of the sheets with and without cracking behavior were analyzed by cutting surface analysis. In this analysis, the materials are cut in 0^o, 45^o and 90^o to the rolling directions and their surfaces are examined under a stereo microscope. Average fracture surface ratios of cracked and non-cracked samples with different rolling direction were calculated. No significant difference was observed in the fracture surface ratios while appliying different rolling directions. When the two groups were compared, it was determined that the average fracture surface ratio was

higher in cracked sheets. Fracture and shear surfaces were examined at different magnifications with scanning electron microscope.

In order to compare the formability of sheets with and without cracking feature, Erichsen cupping test was performed and Erichsen depths were measured. It was determined that Erichsen depths of the sheets showing cracking behavior were less than those that did not show cracking behavior.

Hardness analysis was conducted to examine the effect of the hardness of the material on the formability. When the two groups were compared, it was seen that the hardness of the sheets which showed cracking behavior was lower than those that did not show cracking behavior.

1. GİRİŞ

Bugün paslanmaz çelik saclar, tüketilen toplam çeliğin yarısından fazlasını oluşturuyor. Ev aletleri, elektrikli eşyaların panelleri, mutfak eşyaları, kapılar, topuzlar ve duvar panelleri gibi yapı malzemeleri, asansör kutusunun iç panelleri, yol aynaları, otomobil ve tren dış panelleri dahil olmak üzere ulaşım ve otomobil malzemeleri ve otomotiv pencere süsleri ve kalıpları gibi bir çok alanda kullanılır, çünkü paslanmaz çelikler iyi yüzey görünümünün yanı sıra yüksek korozyon direncine sahiptir.

Paslanmaz çelik, en az yaklaşık % 10,5 oranında krom içeren bir çelik grubudur. Karbon çeliğinden farklı olarak, yüksek korozyon direncine ve ısıl dirence sahiptir. Paslanmaz çelik kolayca korozyona uğramaz, çünkü yüzeyde yaklaşık 300-500 nm kalınlığında pasif krom oksit (Cr_2O_3) tabakası oluşmaktadır. Mikroyapı bileşenlerine bağlı olarak çeşitli paslanmaz çelik türleri vardır [1].

Ferritik paslanmaz çelikler, yüksek mekanik dayanım ve korozyon direnci gerektiren çamaşır makinesi tamburlarında başarıyla kullanılmaktadır. Çamaşır makinesi tamburları, deterjanlara ve neredeyse her zaman nemli olan ortama dayanıklı olmalıdırlar. Buna karşın, lokal korozyona hiçbir şekilde müsaade edilemez. Çamaşır makinesi tamburları gibi önemli uygulamalarda başarılı şekilde kullanılan ferritik paslanmaz çelikler aslında birçok alanda çok daha geniş uygulama potansiyeline sahiptirler. Ferritik paslanmaz çelikler, genel olarak, östenitik paslanmaz çeliklerden daha kötü şekillendirilebilmelerine rağmen, 430 tip paslanmaz çelik, eğme, bükme, sac kesme, derin çekme işlemlerinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılır. Çatlak hasarı, genellikle soğuk haddelenmiş çelik sacların, diğer birçok biçimlendirme işleminde deformasyonun bir parçası olan eğme gibi plastik deformasyon işlemine uğradığında meydana gelir. Eğme yarıçapındaki artışla birlikte, çatlak oluşum ihtimali genellikle artar. Çatlama olayları, doku, bantlı yapı, metalik olmayan inklüzyonlar ve karbür parçacıkları gibi mikroyapısal faktörler tarafından tetiklenebilir. Soğuk haddelenmiş paslanmaz çeliğin biçimlendirilebilirliğini geliştirmek için çatlama olayının sistematik bir analizi gerekmektedir [2].

Bu çalışmada çamaşır makinesinin tambur çevre sacı üretiminde perçinleme prosesinde gözlemlenen sacın çatlama problemi üzerinde durulmuştur. Çevre sacında meydana gelen çatlama problemine etki eden mekanik faktörler incelenmiş ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ve incelemeler sonucunda kök nedene bağlı olarak iyileştirme önerileri sunulmuştur.

2. PASLANMAZ ÇELİKLER

2.1 Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi

Metalurjik keşifler açısından, 20. yüzyılın ilk yıllarının çok aktif olduğu bilinmektedir. Bu dönemde demir-karbon etkileşimi sistematik olarak incelenmiş ve sonuçlar sektörde belirlenen prensiplere göre uygulanmaya başlanmıştır. 1911 yılında General Electric Company filament üretimi için kimyasal bileşiminde % 14 - 16 krom alaşımı kullanırken aynı yıllarda Harry Brearley, Fe - Cr alaşımlarından % 12,8 krom içeren yüksek korozyon direncine sahip ürünler üretti. Harry Brearley bir deneyinden sonra, krom miktarı % 12'nin üzerinde olduğunda, korozyona dirençli malzemenin ortaya çıktığı sonucuna varmıştır. Literatürde Harry Brearley, paslanmaz çeliği geliştiren kişi olarak da bilinir ve bazı paslanmaz çeliklerin gelişimine katkıda bulunduğu bilinmektedir.

Östenitik alaşımların asitlere karşı direnci 1912'de Eduard Maurer ve Benno Strauss tarafından keşfedilmiştir. Bu keşif, Maurer'in çalışmasıyla krom-karbür şeklinde gerçekleşip, çözelti oluşturmak için sünek bir yapıdan daha etkili olduğu tespit edilmiştir. 1920'den bu yana, östenitik paslanmaz çelikler, üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve paslanmaz çeliğe olan talebin artması nedeniyle kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

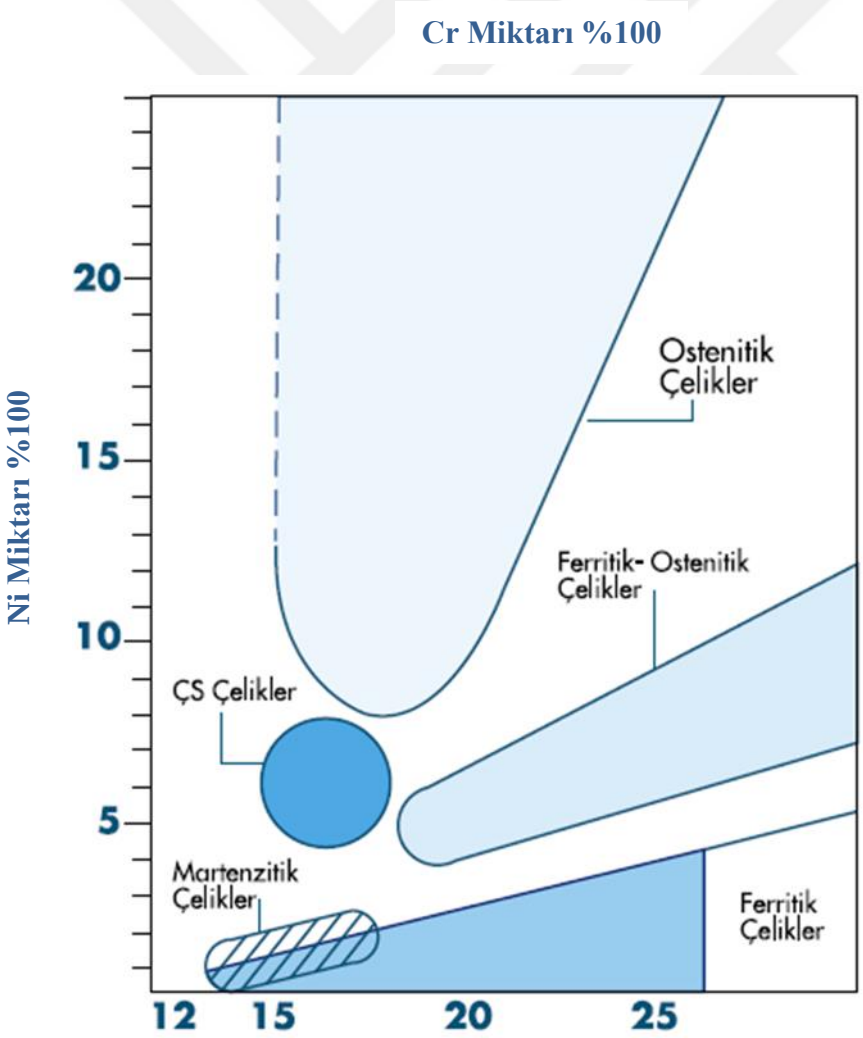
1950'lerde II. Dünya Savaşı'nın etkisiyle, alaşım elementi olarak Ni tedarik etmekte zorluk çekilmiştir ve bu alaşım elementi yerine Mn ve N kullanılarak AISI 200 serisi paslanmaz çelik grubu geliştirilmiştir. Benzer şekilde, farklı gereksinimler nedeniyle, düşük C ve N içerikli dubleks ferritik ve süper östenitik paslanmaz çelikler üretilmiştir [3].

2.2 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

Paslanmaz çelik ailesi, farklı şekillerde sınıflandırılabilen birkaç kategoriden oluşur. Oda sıcaklığında mikroyapılardaki metalurjik fazlar sayesinde, paslanmaz çelikler ferritik, östenitik, martensitik, dupleks ve çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler

olarak sınıflandırılabilir. Bu kategoriler arasındaki ilişki, ana elementlerden krom ve nikel oranına bağlı olarak Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Ferritik paslanmaz çelikler çok yüksek krom içeriğinden ve nispeten düşük nikel içeriğinden oluşur [4].

Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimi değiştirilerek, farklı özelliklere sahip alaşımlar elde edilir. Krom miktarı arttırılarak veya nikel ve molibden gibi alaşım elementleri eklenerek korozyon direnci arttırılabilir. Ayrıca, bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot, kükürt ve selenyum gibi çeşitli elementlerin eklenmesi de olumlu etkiler sağlayabilir. Yapının ferritik veya östenitik olup olmadığı öncelikle krom ve nikel alaşımları ile belirlenir. Malzemelerin iç yapısına göre yapılan bu sınıflandırmada kullanımı en yaygın olan paslanmaz çelikler östenitik ve ferritik çeliklerdir. Kullanım miktarlarını tüm paslanmaz çeliklere oranladığımızda % 95'e yakın bir değere ulaşır [5].



Şekil 2.1 : Paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel miktarları [35].

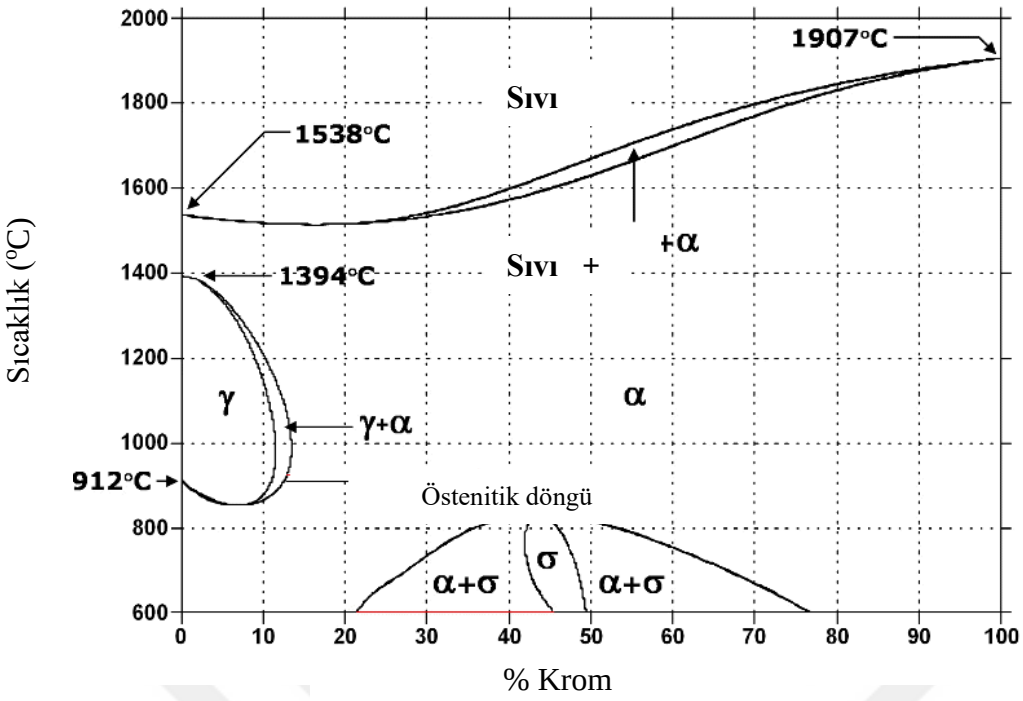
2.2.1 Ferritik paslanmaz çelikler

Ferritik çelikler yaklaşık % 17 Cr içerirler. Pahalı östenitik paslanmaz çelik kalitelerine çekici bir alternatif sunduğundan daha ilgi çekicidir ve en çok kullanılan mühendislik paslanmaz malzemelerinden biridir [12].

Ferritik paslanmaz çelikler, iyi mekanik davranışları ve korozyon direnci sayesinde önemli bir alaşım grubu oluşturur. Ferritik paslanmaz çelikler hmk kristal yapıya sahiptir ve oda sıcaklığında kristal yapısı saf demir ile aynıdır. Tek fazlı yapıya sahiptirler ve tüm sıcaklıklarda stabil özellik gösterirler. Krom, mükemmel korozyon direncini koruyan temel elementtir. Karmaşık mikroyapıları nedeniyle ferritik paslanmaz çeliklerin biçimlendirme özelliklerinin optimizasyonu ve öngörülmesi yoğun bir araştırma alanıdır. Derin çekme optimizasyonu gibi çok çeşitli endüstriyel problemler, kantitatif doku analizi ile çözülebilir. Bu nedenle, sıcak ve soğuk haddelenmiş bandın homojenliği, tavlama işleminden sonra alaşımların ince dağılmış Nb ve Ti karbonitrürlerle yeniden kristalleştirilmesi sırasında seçici parçacık sürüklenmesi ile ilgili temel hususlar tartışılmıştır [13].

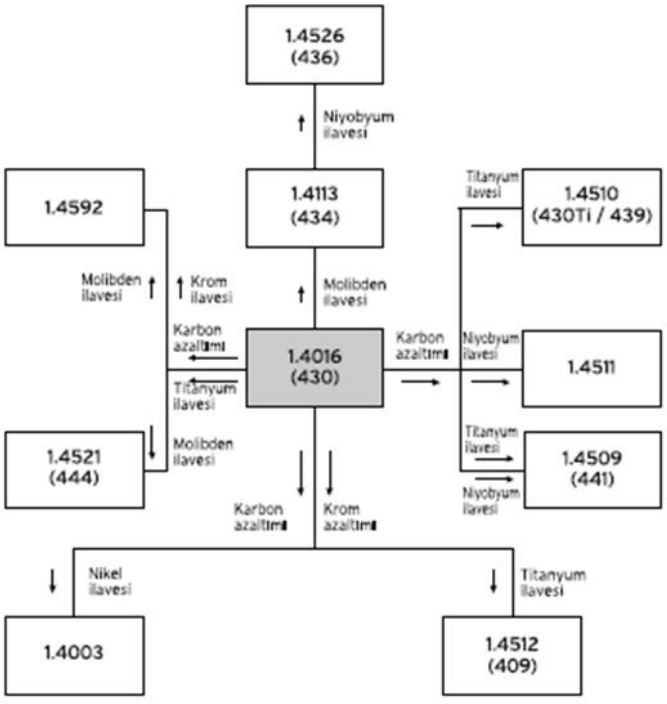
Spesifik mikroyapı bileşenleri, krom içeriğine bağlı olarak Şekil 2.2'de gösterilen sıcaklık değerlerinden etkilenir. Krom içeriği % 12,7'den fazla olduğunda alaşımın ergime noktasına kadar olan sıcaklıklarda tamamen ferritik olduğu görülebilir. Bununla birlikte, genel ticari ferritik paslanmaz çelikler, karbon ve azot gibi bir miktar östenit oluşturucu elementler içerir. Bir miktar östenit oluştuğunda, mevcut krom içeriği yüksek sıcaklıkta % 11 ile % 19 değerine ulaşır. Oluşan östenit, yüksek sıcaklıklarda ferritik tanelerin hızlı büyüme oranını düşürür. Alaşım tavlanmış halde tamamen ferritik hale gelebilir ve krom içeriği % 20'nin üzerinde olduğunda süper ferritik kaliteler olabilir. Süper ferritik kaliteler çok yüksek oranda ferrit içerir ve mükemmel korozyon direncine sahiptir.

Ferritik çeliklerde metallerarası fazlar da oluşabilir. En yaygın olanı, krom içeriği yaklaşık % 22-76 olduğunda, 500-800°C sıcaklıkta oluşan σ'dır [14-15]. σ, eşit oranlarda demir ve krom içeren, kırılgan tetragonal bir fazdır ve oluşumu bitişik ferritlerin Cr tükenmesine neden olur. σ fazı çoğunlukla tane sınırları ve arayüz alanı boyunca oluşur, çünkü oluşumu krom difüzyonuna dayanır [16].



Şekil 2.2 : Fe-Cr faz diyagramı [14].

Spesifik bileşim, bileşenleri ve çeliğin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Şekil 2.3'de gösterildiği gibi kompozisyona dayanan farklı ferritik paslanmaz çelik sınıfları, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO), Deutsches Institut für Normung (DIN, İngilizce, Alman Standardizasyon Enstitüsü), EN, vb. standardizasyon kuruluşları tarafından sınıflandırılmış ve düzenlenmiştir.



Şekil 2.3 : Ferritik paslanmaz çelikler [35].

2.2.2 Östenitik paslanmaz çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler genellikle gıda işleme endüstrisinde kullanılır. Bu malzemelerin korozyon direnci mükemmel olmakla birlikte, sertlikleri ve aşınma direnci nispeten düşüktür. Bu nedenle, korozyon direncini bozmadan aşınma direncini artırmak için birçok girişimde bulunulmuştur [17].

Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek oranda nikel içerir. Birçok özel uygulamada kullanımı açısından olağandışı bir fiziksel, mekanik ve kimyasal özellik kombinasyonuna sahiptir. Östenitik paslanmaz çeliklerde arayer karbon miktarı genellikle % 0,4'ün altında tutulur ve alaşımın C içeriği, Mo, V ve Nb gibi güçlü karbür oluşturan elementlerle alaşımlama ile daha da azaltılabilir. . Bu sayede kimyasal bileşimdeki Cr miktarını azaltan kromca zengin karbürlerin oluşması engellenerek, çeliğin tanelerarası korozyon, oyuklanma korozyonu ve gerilmeli korozyon çatlaması direnci arttırılır. Çeliğin korozyon formlarına karşı direnci ile benzer sorunlara neden olabilen safsızlıklar (S veya P gibi) da mümkün olan en düşük seviyede tutulur. Bu nedenle kimyasal bileşimin uygun şekilde ayarlanması, ısıl işlem ve mekanik işlemler yapılmasıyla östenitik paslanmaz çeliklerin özellikleri değiştirilebilir [18].

2.2.3 Martensitik paslanmaz çelikler

Martensitik paslanmaz çelikler, paslanmaz çeliklerin gösterdiği korozyon direncine ek olarak iyi aşınma direncine sahip olmasında dolayı tercih edilen uygulama malzemeleridir. Bu tür uygulamalar, türbin bıçaklarını, aletlerini, rulmanlarını ve muayene için ortopedik cerrahi için kemik testerelerini içerir [19].

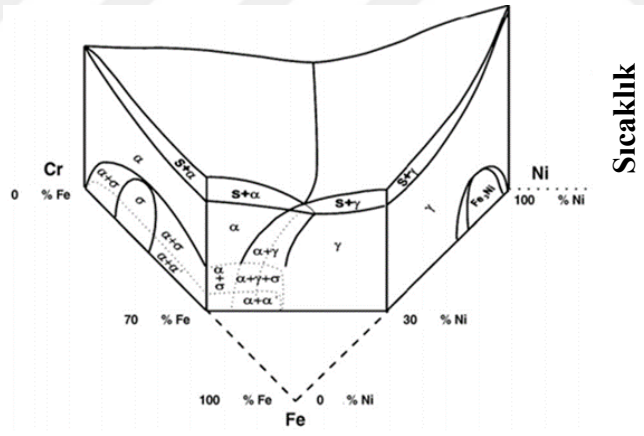
Martensitik paslanmaz çeliklerin dayanım ve sertliği karbon yüzdesine göre değişkenlik gösterirken, ısıl işlemi karbon çeliği veya düşük alaşımlı çeliklere benzerlik gösterir. Paslanmaz çelikler çok yüksek sertleşebilirliğe sahip olması nedeniyle diğer çeliklerden ayrılırlar. Isıl işlem değişkenliklerine çok duyarlı olan martensitik paslanmaz çeliklerin ısıl işlem kaynaklı hurda yüzdeleri de oldukça yüksektir. Maliyeti yüksek olan bu çelikler, üstün korozyon direnci kesinlikle gerekli olmadıkça kullanılmazlar [20].

Kaynak sırasında tane sınırlarında kırılgan krom karbür çökeltmesi, yüksek karbonlu martensitik paslanmaz çeliklerin kullanımını sınırlamıştır. Son zamanlarda, bu sorunu çözmek için süper martensitik paslanmaz çelikler geliştirilmiştir. Bu çeliklerde, karbon içeriği % 0,07'nin altına düşürülüp nikel (% 3,5 ila % 5,5) ve molibden (% 1,5 ila %

5,5) içeriği arttırılır. Bu nedenle, çelik yüksek dayanım, iyi plastisite ve kaynaklanabilirliğin yanında, iyi bir korozyon direncine ve işlenebilirliğe sahip olur. Bu yüzden özellikle petrol endüstrisinde tercih edilir [21].

2.2.4 Dupleks paslanmaz çelikler

Ferritik östenitik dupleks çelikler korozyona dayanıklı çeliklerdir. Tamamen ferritik çeliklerin aksine, daha iyi korozyon direnci ve aynı zamanda saf östenitik kalitelere kıyasla daha yüksek dayanıma sahiplerdir. Bu nedenle, dupleks çelikler, yüksek korozyon direnci ve iyi dayanım kombinasyonunun gerekli olduğu kimya endüstrisinde veya açık deniz teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dubleks çelikler üçlü Fe-Cr-Ni faz diyagramına dayanır (Şekil 2.4). Yüksek miktarda alaşım elementi nedeniyle, dubleks paslanmaz çelikler oldukça karmaşık bir çökelme davranışı gösterir. Bazı çökeltilerin dayanım ve aşınma direncine önemli etkisi vardır. Bu, ferritik ve östenit yapıcı alaşım elementlerinin bir arada kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Ferritik fazın yüksek difüzyon hızı nedeniyle, ilgili bütün çökeltiler burada bulunabilir. Muhtemel bir gevrekleşmeyle ilgili en tehlikeli olan, hegzagonal nitrürülerin (Cr_2N) oluştuğu 700-900 °C sıcaklık aralığıdır [22].



Şekil 2.4 : Fe-Cr-Ni faz diyagramı [22].

2.2.5 Çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler

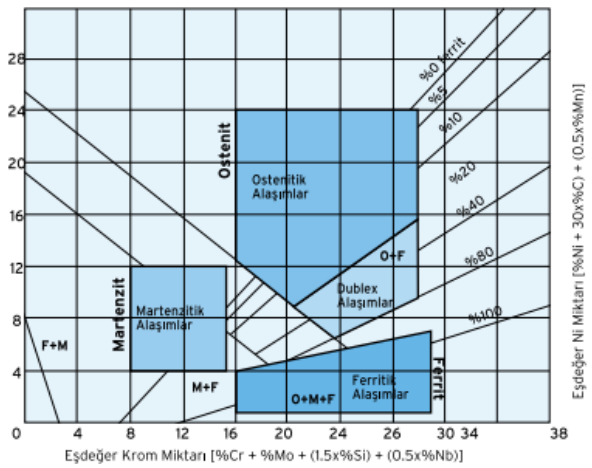
Çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler, aşınma direnci, yüksek dayanım ve korozyon direncinin bir kombinasyonunun gerekli olduğu uygulamalarda tercih edilen malzemelerdir. Bu alaşımlar şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, dayanım, tokluk ve korozyon direncinin çok iyi bir kombinasyonuna sahiptir. Bu tür uygulamalar arasında türbin kanatları, aletler, rulmanlar, tıp ve dişçilik ekipmanı bulunmaktadır. Ana alaşım elementi krom olmakla birlikte, çökelme ile sertleşen paslanmaz çeliklerde

dayanım artışına katkıda bulunan molibden, alüminyum ve titanyum gibi alaşım elementleri bulunur. Çökelme ile sertleşme işlemi, normal olarak şekillendirme ve işleme sonrası yapılan 400 °C ile 700 °C arasındaki sıcaklıklarda yaşlandırma prosesiyle elde edilir. Bu yaşlandırma işlemi, sert metalik bileşiklerin östenitik / martensitik matris içinde çökelmesini sağlar veya bunun dönüşümünü kolaylaştırır. Her ne kadar çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler östenitik paslanmaz çeliğe kıyasla yüksek sertlik ile karakterize edilse de, aşınma ve korozyon direnci bakımından yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gereklidir. Paslanmaz çelikte çökelme sertleşmesi için uygulama aralığının genişletilmesi sert ve aşınmaya dirençli bir yüzey tabakası ile birleştirilmiş nispeten yüksek kütle sertliğinin bir araya gelmesiyle mümkündür. Konvansiyonel olarak, termokimyasal işlemler, örneğin nitrasyon ve karbürizasyon, çeliklerin yüzey sertleştirilmesinde tercih edilen işlemlerdir [19-23].

2.3 Alaşım Elementlerinin Paslanmaz Çeliklere Etkisi

Demir ve karbona ek olarak, belirli özellikler elde etmek için çeliklere alaşım elementi ilavesi yapılır. Özellikle paslanmaz çelikler, % 12'den fazla krom içeren alaşımlı çeliklerdir ve bu alaşımlar malzemeyi çeşitli ortamlarda korozyona karşı dirençli kılar. Bugün paslanmaz çelikler, hem yüksek dayanım hem de tokluğa sahip iyi bir korozyon direnci kombinasyonunun gerekli olduğu endüstriyel ve gündelik uygulamalarda kullanımı yaygın olan malzemelerdir [6].

Başlangıçta kaynaklı yapıların belirlenmesi için kullanılan Schaffer diyagramı, Şekil 2.5'de gösterildiği gibi paslanmaz çeliklerin fazlarını ve yapılarını incelemek için de yararlı bir araçtır.

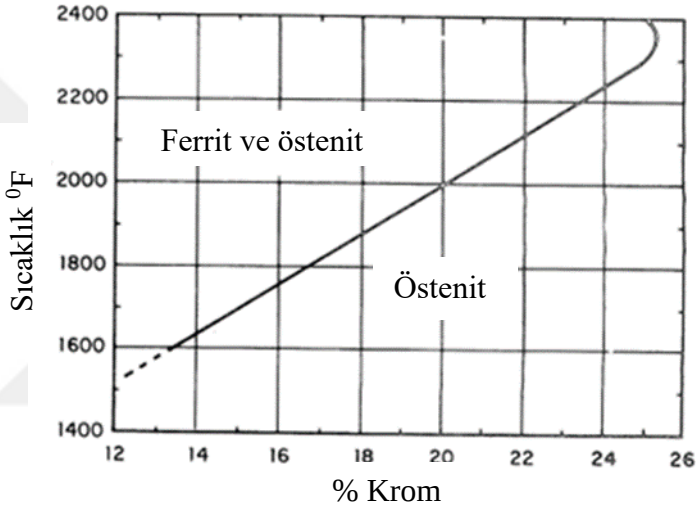


Şekil 2.5 : Schaffler Diyagramı [35].

Mikroyapıyı belirleyen alaşım elementlerini önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve manganez şeklinde sıralanabilir [5].

2.3.1 Krom

% 14 ile % 27 aralığında Cr alaşımları yapmak için demir-karbon sistemine krom eklendiğinde, krom karbür oluşur. Krom, ferrit yapıcı bir alaşım elementidir. Isıl işlemler vasıtasıyla, ferrit ve östenitte çözünmüş karbon, azot ve kromu içeren çok çeşitli mikroskopik ve alt mikroskobik yapılar, krom bakımından zengin krom karbür ve nitrür çökeltileri üretilebilir. Krom içeriğinin arttırılması, östenitin oluştuğu sıcaklığı arttırır [7].



Şekil 2.6 : Fe-Cr alaşımlarında ferrit ve östenit oluşum sıcaklığına bileşimin etkisi [7].

2.3.2 Nikel

Periyodik tablodaki en zehirli metallerden biri olan nikelin yıllık üretiminin yarısı paslanmaz çelik üretiminde kullanılmaktadır.

Paslanmaz çelik % 0 ila % 31 arasında nikel içerir. Ticari olarak kullanılan paslanmaz çeliklerin çoğu % 8'den büyük miktarlarda nikel içerir. Nikel östenit yapıcı etki gösterir. Nikel oranını değiştirerek, tam stabil östenitten yüksek yüzdelerde delta ferrit veya martensit içeren yapılar üretmek mümkündür. Nikel'in varlığı çeliğin manyetik ve kristal yapısını değiştirir. Fe – Cr – Ni östenit dengesi, östenitik paslanmaz çeliklerin birçok özel uygulama için uygun olmasını sağlayan olağandışı fiziksel, mekanik ve kimyasal özellik kombinasyonlarına sahiptir. Östenitik paslanmaz çelikler önemli miktarda nikel içermektedir [8].

2.3.3 Molibden

Paslanmaz çeliğe molibden ilavesi, pasif tabakanın klor iyonları varlığında korozyon direncini arttırır, bu nedenle bu elementin eklenmesiyle çelikler, oyuklanma korozyonuna ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı konvansiyonel krom-nikel çeliklerinden daha dayanıklı hale gelir [9].

Genel olarak, molibden ilavesi, östenitik paslanmaz çeliklerin korozyon direncini arttırır. Kritik pasivasyon akımını ve pasif alandaki akımı düşürür, oyuklanma potansiyelini pozitif değerlere kaydırır, kritik oyuklanma sıcaklığını yükseltir ve oyuk sayısını ve boyutunu azaltır [10].

2.3.4 Manganez

Manganez ve azot, birçok bakımdan östenitik paslanmaz çelikler için önemli alaşım elementleridir. Manganezin bütün rolü ve yararlı etki mekanizması, katılaşma ve ferritten östenite dönüşme olayındaki belirsizliğe yön vermesidir [11].

2.3.5 Alüminyum

Alüminyum ferrit fazını stabilize etme özelliğine sahiptir ve yeniden kristalleşme sıcaklığını önemli ölçüde azaltabilir [24]. Artan alüminyum içeriği, daha yüksek sıcaklıklarda AlN ve Al_20_3'ün çökelmesine de yol açabilir. Artan miktarda AlN, yüksek sıcaklıkta östenit oluşturmak için azaltılmış azot elementine kısmen katkıda bulunabilir, bu nedenle a + γ → α'nın yüksek sıcaklık faz dönüşümü gerçekleşir. İnce ve çok sayıda Al_20_3 partikül boyutunu inceltir ve daha sonra yeniden kristalleşmeyi teşvik eder. Alüminyum içeriğinin artmasıyla, çekme dayanımı doğrusal olarak artar, ancak kopma uzaması ve akma dayanımı önce artar, sonra azalır. Alaşım elementleri arasında alüminyum, Al_2O_3'ün yüksek oluşum sıcaklığı nedeniyle eş eksenli döküm yapısının elde edilmesi için uygun bir elementtir [25].

2.4 Paslanmaz Çelik Saclarda Anizotropik Plastik Deformasyonun Şekillendirmeye Etkisi

Soğuk haddelenmiş ve tavlanmış ferritik paslanmaz çelik saclarda çekme gerilmesi sırasındaki anizotropik plastik akış, soğuk haddelenmiş ve tavlanmış ferritik-paslanmaz çelik sacların yüzeyinde tane boyutuna bağlı bantlaşma, karbürler ve inklüzyon olmamasına rağmen bombelenme olarak tabir edilen yapının

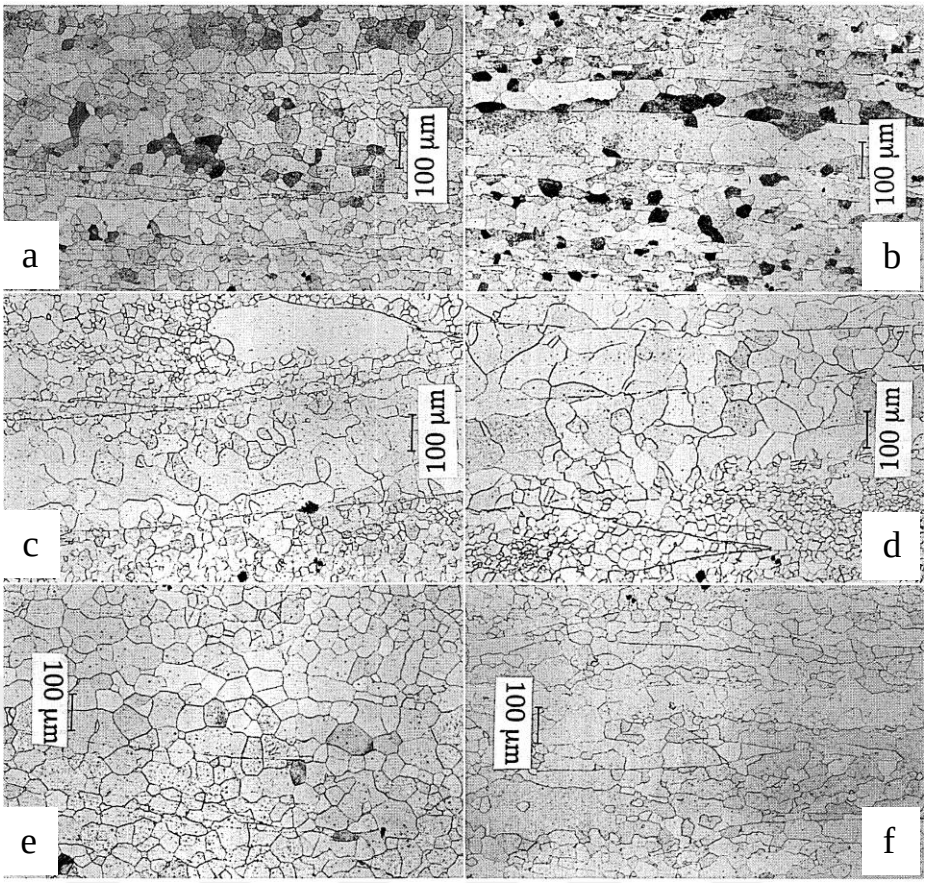
gözlemlenmesine neden olur. Ortak bir kristallografik yönelime sahip olan tane gruplarının, şerit benzeri formda görülebildiği ve anizotropik bantlaşmaya neden olabileceği gözlenmiştir [25].

İnce tabakanın yüzeye çıkmasına neden olan anizotropik plastik akış, çatlakların başlamasına ve tabaka yüzeyine paralel olarak yayılmasına neden olarak hasara neden olabilir. Bu mekanizmanın, bazen alaşımlı çelik plakalarda gözlenen sac kırılmalarına da katkıda bulunduğuna inanılmaktadır. Katılaşma ve devamında gelen termomekanik proseslere bağlı alaşım elementlerinin mikroyapıda homojen olmayan dağılım göstermesi segregasyon bantlarının oluşmasına neden olur. Alaşımca zengin ve alaşımca fakir bant yapılarının oluşumu farklı dayanım ve sertlik katmanları oluşturacağından yüzeyde çatlama oluşturabilir.

Tane sınırındaki çökeltiler ve inklüzyonlar tane sınırlarını zayıflatacaktır. (110) (111), (100) dokusunun sadece yüksek gerilimli kayma bantlarında bulunan çökeltiler, daha sonra, klivaj kırılmanın oluşmasına hizmet etmektedir.

Hung-Chi Chao'nun yaptığı çalışmada ticari olarak üretilen yüksek oranda anizotropik kristal yapılara (çelik, demir dışı metaller veya plastikler) sahip olan tüm malzemeler, bantlaşma yapısını oluşturma eğilimlidir ve tümü belirli gerilme koşulları altında potansiyel olarak anizotropik lamelli kırılmaya maruz kalır. Haddelenerek inceltilmiş malzemelerde yönelimli bant anizotropisi yüksek birim şekil değişimi ve kuvvetlerini ürettiğinden dolayı bantlı bölgeler arasındaki zayıf ara yüzlerin lamel kırığına neden olduğunu göstermiştir [26].

Bunun yanında anizotropi katsayısında sarım sıcaklığı ve sıcak bant tavlama işlemi de etkilidir. Geleneksel yığın tavlama (batch tavlama) işleminde alüminyum ve azot daha öncesinde yavaş ısıtma sırasında çökeltiler oluşturur, bu yüzden derin çekme çeliklerinin düşük sarım sıcaklığına ihtiyaçları vardır. Yassı taneler bu işlemin sonucunda oluşur. Hızlı ısıtma hızı ve kısa ısıtma süreleriyle karakterize edilen sürekli tavlama, tipik olarak 40 saat yerine 4-8 dakika sürer. Bu işlemde, AIN'yi çökeltmek için yüksek sargı sıcaklıkları gereklidir. Katı çözeltiden azotun uzaklaştırılmasıyla r değeri artar, ancak AIN sürekli tavlanmış çeliklerin doku iyileştirilmesinde rol oynamaz.



Şekil 2.7 : % 0-15 Al içeren AISI 430 paslanmaz çeliklerin rulo sarma sıcaklığı ve sıcak bant tavlamasının mikroyapı üzerindeki etkisi (a) 36L düşük rulo sarma sıcaklığı, (b) 36L düşük rulo sarma sıcaklığı ve sıcak bant tavlaması, (c) 36H yüksek rulo sarma sıcaklığı, (d) Yüksek rulo sarma sıcaklığı ve sıcak bant tavlaması, (e) 36HH düşük rulo sarma sıcaklığı, (f) düşük rulo sarma sıcaklığı ve sıcak bant tavlaması [29].

Soğuk hadde işleminden sonra sıcak hadde uygulanması sonucu anizotropi katsayısının arttığını görülür, ayrıca daha yüksek ΔR değerleri de elde edilir. Şekil 2.7'de % 0-15 seviyelerinde Al içeren mikroyapılarda sarım sıcaklığı ve sıcak bant tavlama işleminin mikroyapıya etkisi gözlemlenmektedir. Düşük sarım sıcaklıklarında daha eş eksenli bir tane yapısı gözlemlenirken, yüksek sarım sıcaklığı (36H) ve sıcak bant tavlama (alaşım 36HH) ile tane boyutlarında karışık (bimodal dağılım) gözlemlenmektedir. Karbür fazı, sıcak haddelenmiş aşamadan geri kazanılan orijinal tane ana hatlarını dekore etmektedir. Buna karşılık 35L alaşımı, ince karbür dağılımıyla daha yüksek oranda eş eksenli tane yapısına ve en yüksek r değerine sahiptir. İnce ve eş eksenli mikroyapılar, ferritik paslanmaz çeliklerde ve diğer alaşım gruplarında gözlenen kırılma olaylarını azaltmaya katkıda bulunur. ASTM tane büyüklüğü 6-8 (40-20 µm) genellikle optimum şekillendirilebilirlik ile sonuçlanır. R. Paton ve arkadaşlarının yaptığı çalışma sonucu düşük sarım sıcaklıkları kullanılarak

işlenen ve sıcak bant tavlaması olmayan alaşımlar en iyi şekillendirilebilirliği (çekilebilirlik) göstermiştir. Son tavlamadan sonra üretilen ince taneli mikroyapı sebebiyle en iyi şekillendirilme özelliği gözlemlenmiştir. Şekillendirme işlemleri ve optimum bir mikroyapı üretmek için alüminyum nitrür ve karbürün ince dispersiyonları gereklidir [29].

3. PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ VE PERÇİN PROSESİ

3.1 Paslanmaz Çelik Sacların Üretim ve Şekillendirme Aşamaları

Paslanmaz çelik saclar beş aşamada üretilirler. İlk adımı Şekil 3.1'de gösterildiği gibi ergitme prosesidir. Paslanmaz çeliklerin kalitesi kimyasal kompozisyonu ile belirlenerek ergitme işlemi uygulanır. Geri dönüştürülebilir paslanmaz çelik ve ferro alaşımlar 160 tona kadar kapasiteli elektrikli ark fırınında ergitilir. Ergitilen alaşım, kimyasal bileşimi elde etmek için daha sonraki adımda dönüştürücüye aktarılır. Burada çeliğin kalitesini belirleyen alaşım elementleri eklenir. Sonraki aşamada sürekli döküm prosesi boyunca sıvı çelik dökülür, soğutulur ve katılaştırılır. Bu aşamada levhaların maksimum genişliği belirlenir. Belirlenen genişliğe göre slab şeklinde oksijen ile kesim işlemi yapılır.

İkinci aşama sıcak hadde işlemidir. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi bu aşamada slablar fırınlarda ortalama 1200 ^{o}C'ye yeniden ısıtılır. Kalınlığın ilk 200 mm'den 40 mm'ye gelmesi bir slabın bir çok kez haddeden geçmesiyle gerçekleşir. Termal tünel kalınlığı azaltılmış slabın sıcaklığını korur. Daha sonra levha yedi haddeli bir istasyondan geçerek ortama 3 mm'nin altında bir kalınlığa ulaşır. Paslanmaz sac soğutulur ve rulo haline getirilir. Bu rulolar yüzeylerinin oksitlenmesinden dolayı siyah sac olarak da adlandırılırlar.

Üçüncü aşama ise ilk tavlama ve dekapaj işlemidir. Siyah rulolar tavlama fırınında ısıtılır. Bu adım paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerinin iyileştiği aşamadır. Şekil 3.3'de gösterildiği gibi bilyeli temizleme yöntemi ile yüzeydeki oksit tabakası kırılır. Dekapaj işlemi asit banyolarında başlayıp su ile temizleme işlemi ile devam eder ve son adım olarak da siyah rulo kurutulup yüzeyindeki oksit tabakasından arınarak beyaz rulo haline gelir. Buna HRAP (sıcak haddeli ve dekapaj işlemi uygulanmış) bitişli yüzey denir.

Dördüncü adım Şekil 3.4'de gösterildiği gibi soğuk hadde ve son tavlama işlemlerinden oluşur. Bu aşamada kalınlığı ortama 3 mm olan beyaz ruloların kalınlığı

tekrarlı haddeleme işlemiyle 0.3 mm'ye kadar düşürülebilir. Soğuk hadde işleminden sonra gerçekleştirilen tavlama işlemi malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirir ve son olarak yapılan dekapaj işlemi ile tavlama sırasında oluşan oksit tabakasını ortadan kaldırarak malzemeye mat bir yüzey görüşünü verir (2D). Diğer bir seçenek ise koruyucu atmosfer altında tavlama işlemi gerçekleştirilerek parlak yüzeyli (BA) malzemeler elde edilir. Tavlama işlemi malzemenin şekillendirilebilirlik ve süneklik özelliğini iyileştirir. Bu yöntemle yüzeyde oksit tabakası oluşmayacağı için dekapaj işlemine ihtiyaç duyulmaz. Son işlem olarak ince paso (temper haddesi) işlemi yüzey düzlemselliğini ve yüzey kalitesini garantiler. Proses bir, iki veya üç paso şeklinde gerçekleştirilebilir. Kullanım alanlarına bağlı olarak farklı temper haddesi işlemleri seçilebilir. Ev aletlerinde ve beyaz eşyalarda 2B veya BA yüzey özelliklerinde malzemeler tercih edilir.

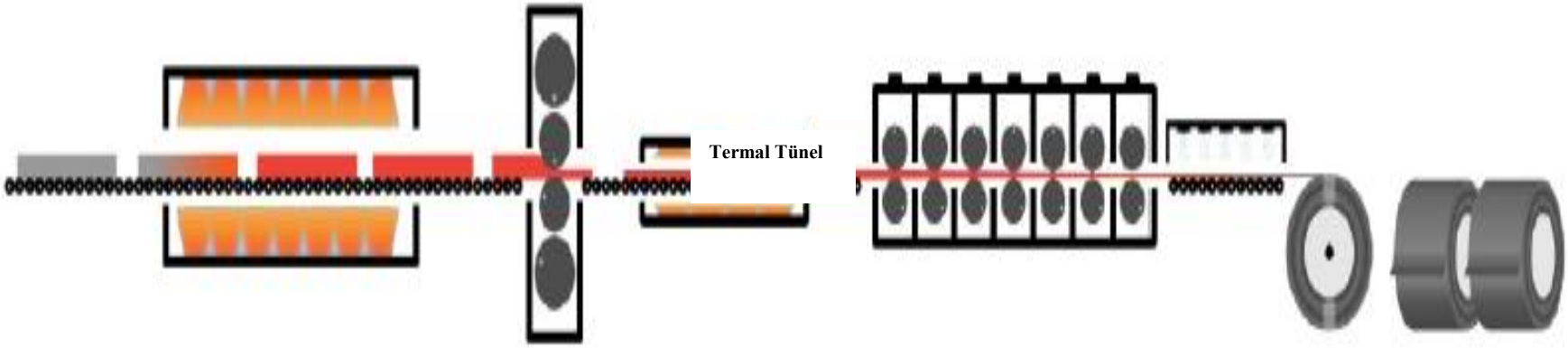
Son aşama olarak da rulolar enine ve boyuna istenilen boyutlarda kesilir. Bu aşamada bazı parlatma, fırçalama ve bazı özel yüzey kaplama işlemleri de gerçekleştirilebilir. Eğer paslanmaz saclar plaka halinde kullanılacaksa boyutlandırma işlemleri gerçekleştirilerek nihai ürün haline getirilir.

3.2 Temper Haddesinin Şekillendirmeye Etkisi

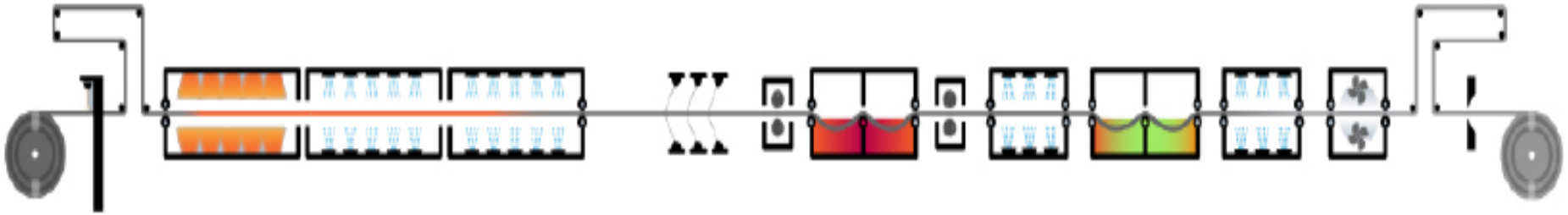
Temper haddesi işlemi diğer şekillendirme işlemlerinden önce genellikle soğuk haddelenmiş ve tavlanmış çelik saclar ve bazı sıcak haddelenmiş çelikler üzerinde gerçekleştirilen son işlemleri temsil eder. Haddeleme parametre ayarı, küçük uzamalar (yaklaşık e = % 0,5-4 aralığında) ve küçük sac kalınlığı için büyük yuvarlanma yarıçapı olduğundan geleneksel haddeleme işleminden oldukça farklıdır. Bu prosesin amacı, uygun bir sertlik değerine ulaşmak, Luders bantlarının oluşumunu önlemek, ürüne istenen yüzey kalitesini ve düzlük derecesini vermektir [28].



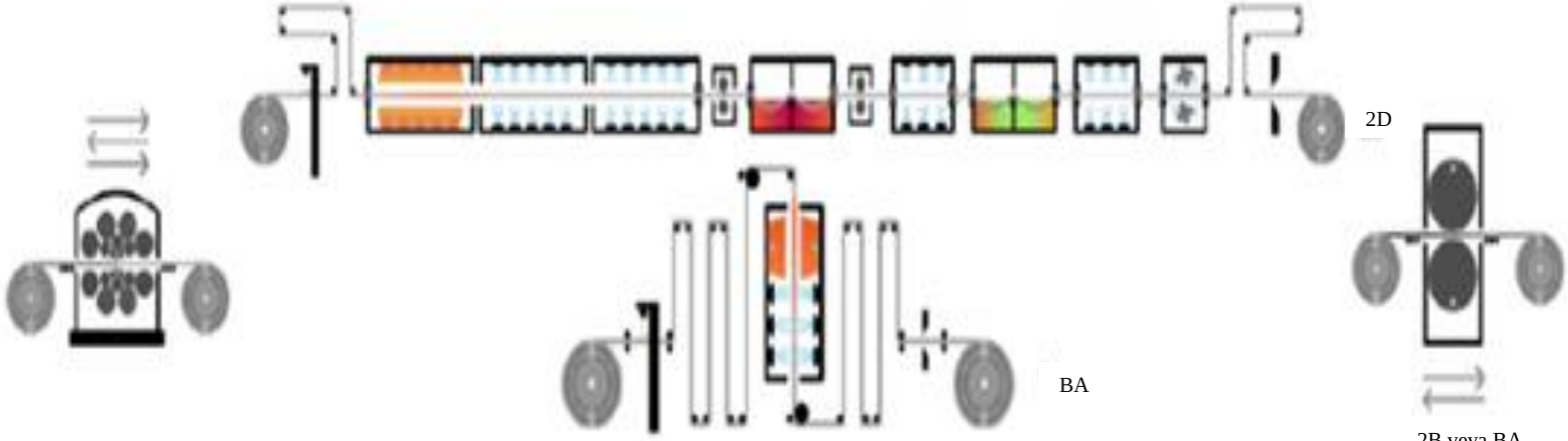
Şekil 3.1 : Paslanmaz çelik üretimi birinci adım ergitme [27].



Şekil 3.2 : Sıcak hadde prosesi [27].



Şekil 3.3 : İlk tavlama ve dekapaj prosesi [27].

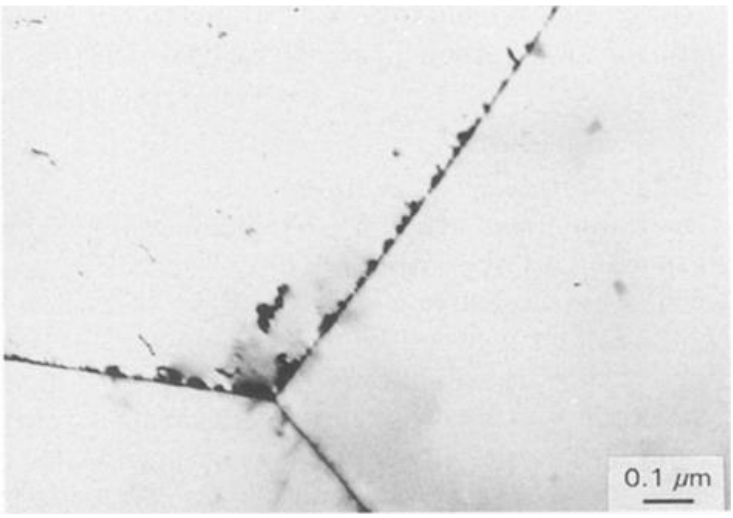


Şekil 3.4 : Soğuk hadde ve final tavlama prosesi [27].



Şekil 3.5 : AISI 430 temper haddesi uygulanmış çeliğin hadde yönündeki optik mikroskop görüntüsü [29].

Yapı Şekil 3.5'te belirtildiği gibi ferrit matrisinin içinde dağılmış karbür parçacıklarından oluşur. Bu parçacıklar $M_{23}C_6$ tipindeki karışık karbürlerdir. Termomekanik geçmişin bir sonucu olarak, numunelerin enine kesitindeki gözlemler karbürlerin hadde yönünde bir miktar hizalandığını göstermektedir. Karbürlerin dağılımı homojen değildir. Öte yandan, temper haddesinin neden olduğu deformasyon derecesi o kadar küçüktür ki (% 1), optik mikroskopi ile başka bir yapısal özellik saptanamaz. Ferritin katı çökeltisi yüksek oranda krom içerir.



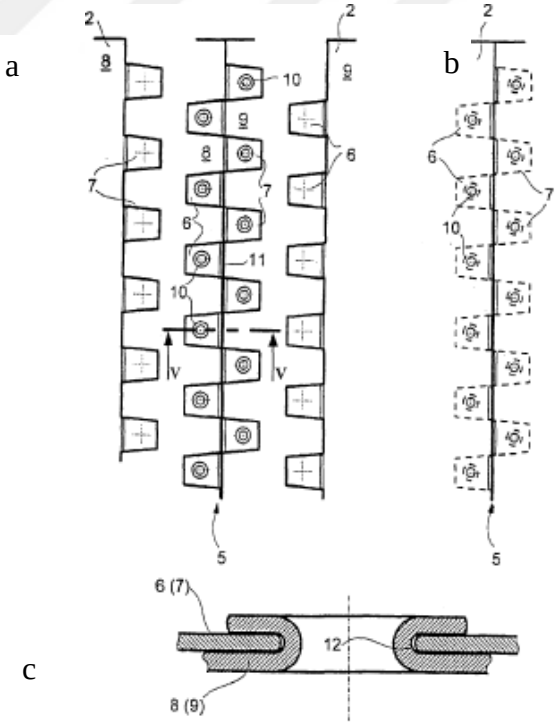
Şekil 3.6 : AISI 430 kalite temper haddesi uygulanmış çeliğin tane sınırlarındaki submikroskobik çökeltiler [29].

Temper haddesi ile ortaya çıkan plastik deformasyon (kalınlıkta yaklaşık % 1 azalma), tanelerin, özellikle tane sınırları üzerinde gerilmeye bağlı mikroskopla görülemeyecek boyutlarda çökelmesine yol açar. Submikroskopik partiküllerin, özellikle tane sınırları

üzerinde gerilmeye bağlı çökelmesine neden olur. Şekil 3.6'da da görüldüğü gibi bu partiküllerin boyutları 0,5 µm'den küçüktür. Çökeltiler düşük karbonlu karbonitrürlerdir. Bu karbonitrürler azot ve karbon atomlarını güçlü bir şekilde bağlarken dislokasyonlar yüksek oranda hareket etme kabiliyeti kazanır [29].

3.3 Çamaşır Makinesi Tambur Üretiminde Perçin Prosesi

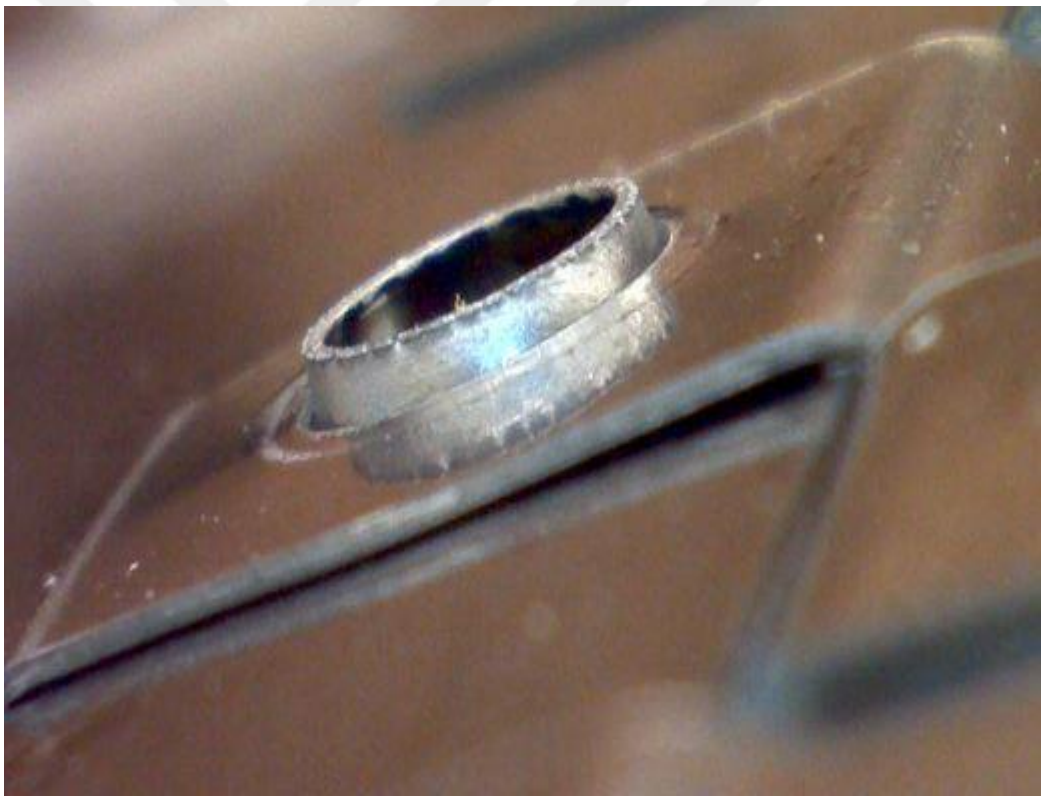
Nemli çamaşırların yüksek hızda döndürülmesi için tambur parçası yapılandırılmıştır. Tambur, bir silindir oluşturmak için ince duvarlı bir malzeme şeridinde kavisli dönen bir tambur çevre sacına sahiptir. Paslanmaz sac plaka şeklindeki malzemenin paralel uç kenarları eklem çizgisi oluşturulmaktadır. Tamburun 1500 devir/dakika'dan yüksek tambur hızlarına dayanabilmesi için uç kenarlarında yarık şeklinde bir diş çıkarma vardır. Dişler ve diş çıkarma, karşı uç kenarın ilgili diş boşluklarına geçer, böylece diş boşluklarının taban çizgileri, yaklaşık olarak düz bir çizgi oluşturmak üzere birleşir. Dişler, malzeme şeridinin üzerindeki tamburun dışındaki uç kenarın dişsiz bölgesine yerleştirilir; her diş, ilgili dişsiz bölgeye sıkıca tutturulur. Bu prosese perçinlenme adı verilir.



Şekil 3.7 : (a) Tambur dikişinin enine kesiti ve alttaki alt görünümde, bağlı bağlantı dikişinin tamburun dışından bir görünümü ve bağlantı dikişinin birleştirilmesinden önce uç kenarların şematik bir resmi, (b) Tamburun enine kesiti ve altından bağlantı dikişinin tamburun içinden görünüşü, (c) Tamburun enine kesiti ve altından bağlantı dikişinin tamburun içinden görünüşü [31].

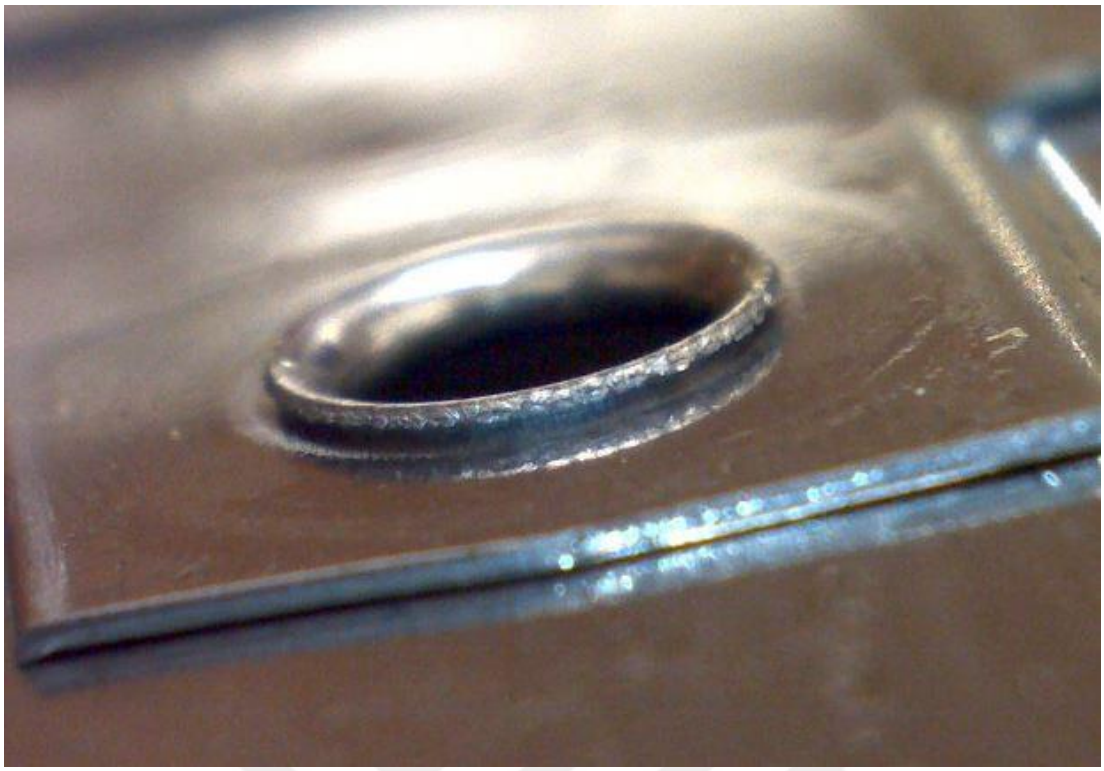
Şekil 3.7’de belirtildiği gibi çamaşır makinesi tambur çevre sacının uç kenarlarının büküldüğü ve birbirine kenetlendiği ve ek bir açılı bölümü sayesinde, birbirine kenetlenmiş uç kenarlarının birbirinden ayrılamayacağı şekilde oluşturulan bir bağlantı dikişi vardır. Dikişin, bağlantı dikişine çapraz olarak yerleştirilmiş boncuk benzeri kabartmalı kısımlarla birleştirilmesi sayesinde dikiş, yaklaşık 1500 devir/dakika'ya kadar olan dönme hızlarında çalışacak şekilde üretilen çamaşır makinesi tamburları için yeterince sağlamdır [31].

İlk aşama Ø62 ve Ø28 boyutlarında perçin delikleri delinir. Sonraki aşamada perçin flaplerinin son şekli verilir. Devamında tambur çevre sacı yuvarlanarak delikler arasında merkezleme elde edilir. Perçin’in ilk adımı olan 90^o bükme işlemi yapılır. Şekil 3.8’de perçin prosesinin ilk aşaması olan bükme işlemi bitmiş bölge gösterilmektedir.



Şekil 3.8 : 90^o bükülmüş perçin bölgesi.

2. aşama ve final perçin adımının tamamlanması ile ortalanmış ve hizalanmış perçin bağlantıları elde edilir. Şekil 3.9’da final perçin adımı tamamlanmış bağlantı bölgesi gösterilmiştir.

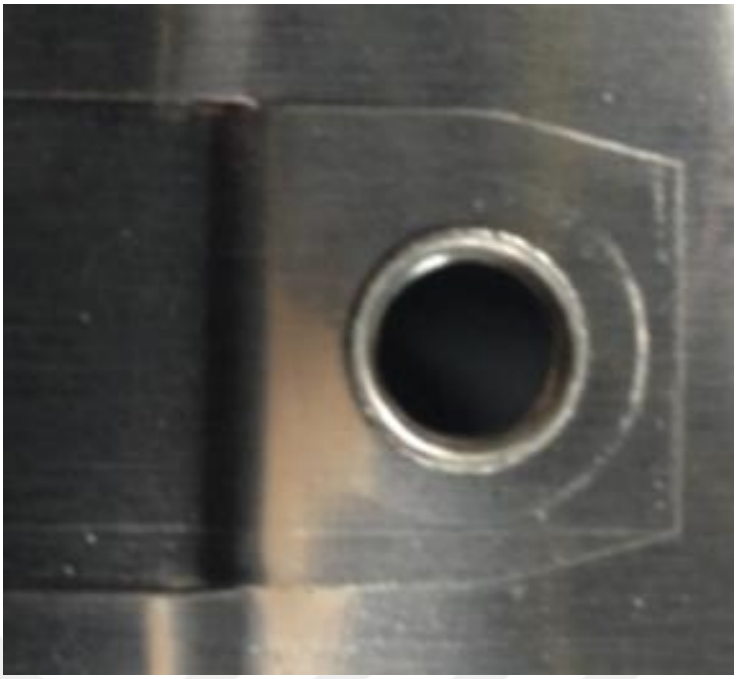


Şekil 3.9 : Final perçin prosesi yapılmış bağlantı bölgesi.

Bir adet tamburda Şekil 3.10'da belirtildiği gibi toplamda 18 adet perçin bölgesi bulunmaktadır. Bir adet tambur için kamera limit değerlerinde izin verilen çatlak sayısı 18 adettir ve Şekil 3.11'de gösterilen bir tane perçinde 2'den fazla çatlak bulunamaz.



Şekil 3.10 : Perçin prosesi tamamlanmış tambur.

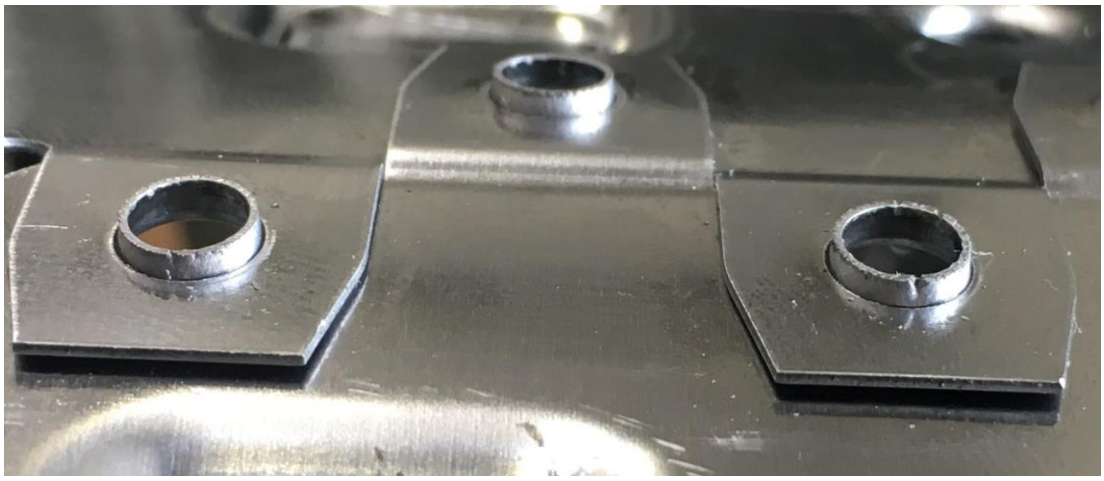


Şekil 3.11 : Tambur sacı perçin bölgesi.

3.4 Perçinleme Prosesinde Çatlak Oluşumu

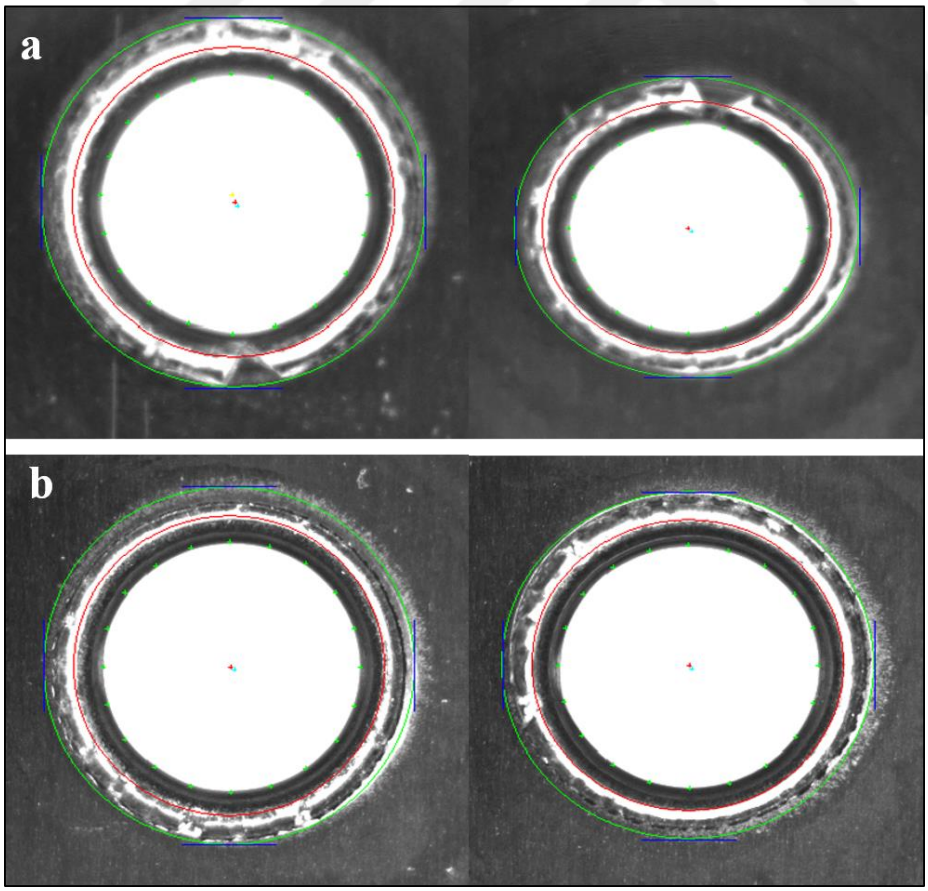
Mekanik sabitleme, gövde yapısal bileşenlerini birleştirmek için en önemli yöntemlerden biridir ve kullanımı bir dizi dezavantaja rağmen öngörülebilir gelecekte devam edecektir. Proseste perçin şaftının genişletilmesi, perçin deliği çevresinde kalıntı bir gerilme alanı ile sonuçlanan bir girişim oluşturur. Bu kalıntı gerilme alanının doğası ve perçin yükü üzerindeki etkisi, perçin deliği çevresindeki çatlakların çekirdeklenmesinde ve büyümesinde önemli bir rol oynar. Yüzeylerdeki aşınmaya ve kayma hasarına bağlı meydana gelen çatlak oluşumunda yüksek oranda malzeme, kenetleme kuvveti ve prosesteki kısıtlar etkilidir. Proses sırasında meydana gelen ikincil bükme ve sürtünme sırasında birleşme yüzeyi boyunca oluşan kalıntı gerilmeler, bu bölgeleri çatlak başlangıcı için olası bir yer haline getirir. Perçinleme sırasında kalıntı gerilmelerin oluşumu, büyük radyal gerilmelerin bir bağlantı deliğini çevreleyen malzemeyi plastik olarak deforme ettiği soğuk genleşme işlemlerinde gözlemlenir. Malzeme elastik geri esnemesinin ardından plastik olarak deforme olmuş malzemeyi sıkıştırarak kalıntı gerilme durumunu üretir [32].

Üretilen tambur çevre saclarında çatak oluşumu yüksek oranda 90^{o} bükme işlemi sonrasında yapılan final perçinleme işlemi sırasında meydana gelirken, bazı durumlarda Şekil 3.12'de gösterildiği gibi final perçinlemeden önce de çatlaklar tespit edilmiştir.



Şekil 3.12 : Çatlama görülen perçin bölgeleri.

Bu çatlaklar üretim prosesinde yer alan kamera kontrolleri ile tespit edilmektedir. Her tamburda 18 adet perçin vardır. Kameraya çatlak boyutunun limit değerleri tanımlanmıştır ve bu limit değerleri aşıldığında hattan otomatik olarak ayrılır. Şekil 3.13'de belirtildiği gibi perçin bölgesinde kırmızı alan limit değeri olarak belirtilen bölgedir ve çatlak bu sınırı aştığı için üretilen tambur çevre sacı hurda edilir.



Şekil 3.13 : Perçin çatlağının kamera görüntüsü, (a) çatlak perçin formu, (b) çatlak olmayan perçin formu.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Deneylerin Yapılması ve Kullanılan Cihazlar

Tambur çamaşır makinesinde osilasyon grubunun en önemli parçasıdır. Çamaşırların yıkama ve sıkma işlemi tambur bölgesinde gerçekleştirilir, dolayısıyla bu bölge suyla sürekli temas halindedir. Korozyon dayanımı ve proses uygunluğu sebebiyle tambur üretiminde AISI 430 kalite paslanmaz sac kullanılır. Tambur üretiminde sacın yuvarlak forma geldikten sonra birleşimi perçin prosesi ile sağlanmaktadır. Tambur çevre sacı üretimi için öncelikli olarak farklı tedarikçilerden rulo şeklinde alınan AISI 430 kalite paslanmaz saclar kesilir. Ardından suyun içerisinden geçebileceği delikler açılır ve perçin prosesi için uç kısımlarına kulak formu verilir. Plaka halindeki bu saclar yuvarlanır ve daire oluşturacak şekilde kulak bölgelerinden perçinlenir. Bu çalışmada perçin prosesinde meydana gelen çatlama problemi incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında iki farklı firmadan alınan aynı kalitedeki saclar çatlama performanslarına göre sınıflandırılmıştır. Sınıflandırılan sacların mikroyapı ve şekillendirilebilirlik özellikleri üzerine deneyler tasarlanmıştır. Kullanılan sacın kimyasal özellikleri Çizelge 4.1'de ve mekanik özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : AISI 430 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi (% ağ.).

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
0,08	1	0,04	0,015	1	16-18	0,75 maks

Çizelge 4.2 : AISI 430 paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.

Kalınlık (mm)	Akma dayanımı $Rp_{(0,2)}$ (MPa)	Çekma dayanımı Rm (MPa)	Kopma uzaması A80 (%)
0,5	260-280	430-600	25

Çalışma kapsamında çatlama performansını etkileyen deformasyon sertleşmesi üssü, anizotropi katsayısı, tane yapısındaki çökelti fazları ve kayma davranışları üzerinde durulmuştur. Mekanik değerler ile regresyon analizi yapılıp etkili olan parametreler belirlenmiştir.

Metalografik incelemeler için şekillendirme prosesine hiç girmemiş rulolardan alınan numune saclar yüzeyden ve kesitten olmak üzere kalıplama cihazına sığabilecek boyutta Şekil 4.1'de gösterilen Struers marka Diskotom-65 model kesme cihazı ile kesilmiştir.



Şekil 4.1 : Diskotom-65 kaba kesme cihazı.

Sonraki aşamada numuneler Şekil 4.2'de görülen Struers marka Citopress-20 model cihaz ile bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler bir sonraki aşamada Şekil 4.3'de gösterilen Struers marka Tegrapol-21 model zımparalama ve patlatma cihazı ile kaba işlemden ince işleme doğru 120-240-500-800 ve 1200 grip zımparalar ile zımparalanmıştır. Ardından kaba işlemden ince işleme sıralı olmak üzere 6 μm, 3 μm ve 1 μm boyutunda elmas solüsyonla ve en son işlem olarak da Struers UP-S Nondry ile patlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2 : Struers Clitopress 20 kalıplama cihazı.



Şekil 4.3 : Struers Tegrapol 21 zımparalama ve parlatma cihazı.

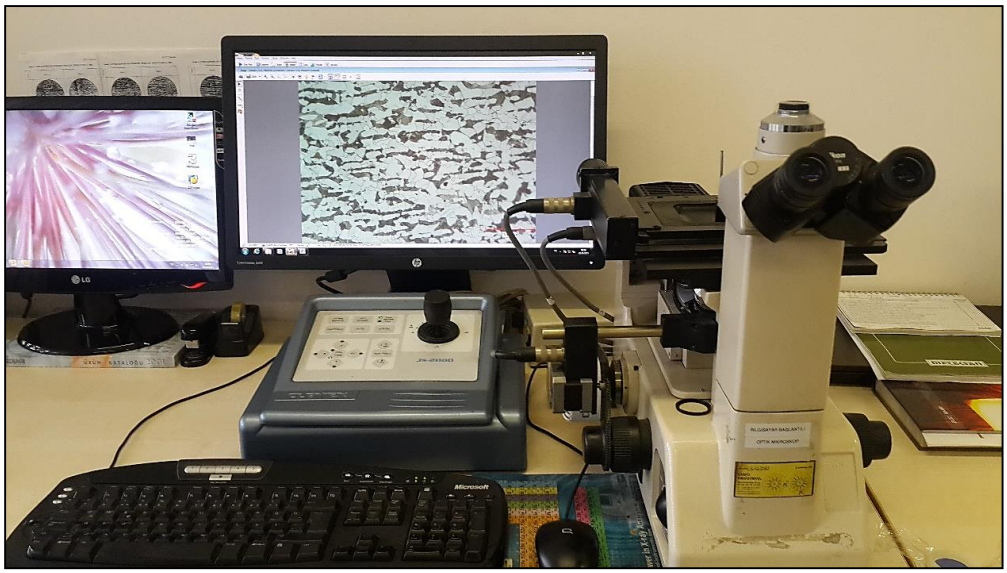
Kesme ve zımparalama işleminden sonra numuneler numunelerin yüzeyi 10 ml HNO_3, 20 ml HCl ve 30 ml saf su karışımı ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bakalitler numune hazırlama işlemleriyle Şekil 4.4'te görüldüğü gibi mikroskopla incelenebilir hale getirilmiştir.



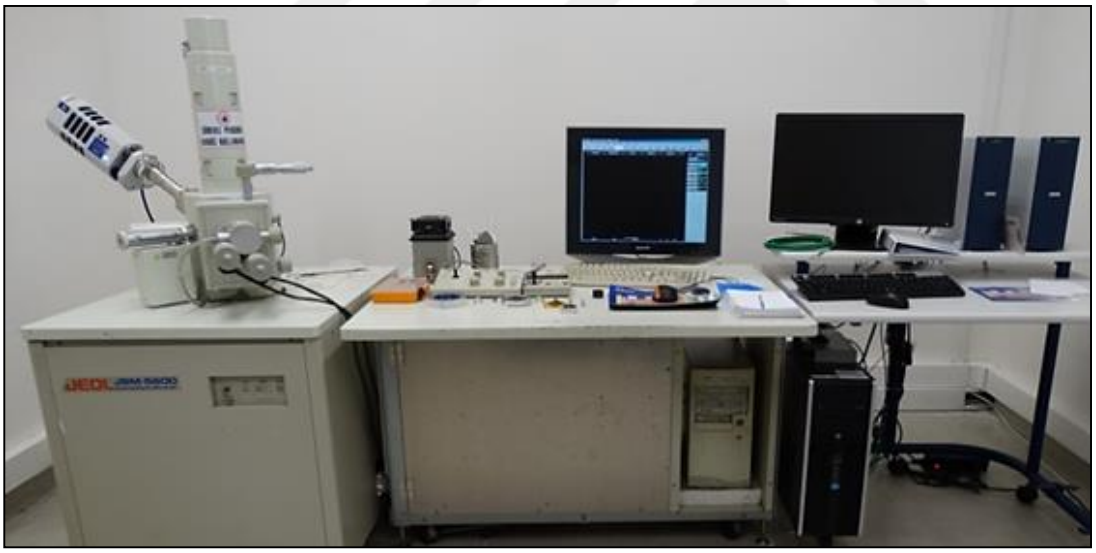
Şekil 4.4 : Mikroskobik inceleme için hazırlanan numuneler.

Optik mikroskop incelemeleri, Şekil 4.5'te gösterilen Clemex Vision yazılımlı Nikon marka Epiphot 200 model cihaz ile ASTM E45 standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu, ASTM E112 standardına uygun olarak mikrometre cinsinden ölçülmüştür.



Şekil 4.5 : Clemex Vision yazılımlı Nikon Epiphot 200 optik mikroskop.

Numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntülerinin çekilmesi için incelemeleri Şekil 4.6'te gösterilen JEOL marka JSM 5600 model tungsten flamanlı cihaz kullanılmıştır.



Şekil 4.6 : JEOL JSM 5600 taramalı elektron mikroskobu.

Numuneler LePera çözeltisi ile dağlanmış ve iletken bakalit ile elektrik iletkenliği sağlanmıştır. Taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde, 15 kV hızlandırma voltajı ile 1500 ve 3500 büyütmelerde ikincil elektron görüntüleri alınmıştır.

Çekme test numuneleri Şekil 4.6'da Zwick/Roell marka kesme kalıbında ebatları DIN EN ISO 6892-1 standardı referans alınarak hazırlanmıştır. Çekme testi numuneleri hadde yönüne 90^{o}'lik açıyla kesilmiştir.



Şekil 4.7 : Zwick/Roell kesme kalıbı.

Kopma uzaması ölçümlerini etkileyen çentik etkisini gidermek amacıyla numunenin eğrilik yarıçapına sahip bölgeleri ve kenar bölgeleri çekme testi öncesinde zımparalanmıştır. Çekme testi aşağıda Şekil 4.8'de belirtilen Zwick/Roell Z020 marka cihazla DIN EN ISO 6892-1 standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 : Zwick/Roell Z020 çekme test cihazı.

Malzemelerin Erichsen çökertme testleri Şekil 4.9'da belirtilen Erichsen model 102 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümlerinde Şekil 4.10'da gösterilen Qness marka Q10 modeli mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. 500 gram yük uygulanarak sertlik ölçümleri Vickers cinsinden yapılmıştır.



Şekil 4.9 : Erichsen Model 102 çökertme test cihazı.



Şekil 4.10 : Qness marka Q10 model mikrosertlik ölçüm cihazı.

Numunelerin kayma yüzeylerinin gözlenebilmesi için malzemeler Şekil 4.11'de Erichsen derin çekme cihazı ile kesilerek kesme yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 4.11 : Erichsen derin çekme cihazı.

Numunelerin deformasyon sertleşmesi üssü ve anizotropi katsayılarını belirlemek amacı ile Şekil 4.12'de belirtilen Shimadzu marka çekme cihazı ile çekme testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.12 : Shimadzu çekme cihazı.

Son olarak da numunelerin çekme testi, derin çekme testi ve sertlik test sonuçları Minitab programı ile istatistiksel bir model üzerine oturtularak çatlamaya etken parametreler regresyon analizi yapılarak belirlenmiştir. Kontur grafikleri çıkartılarak çatlak gözlemlenen ve çatlak gözlemlenmeyen mekanik değer aralıkları belirlenmiştir.

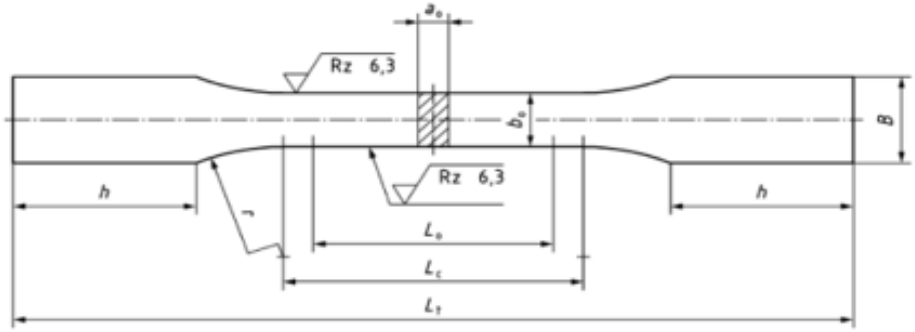
5. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda belirtilen mikroyapı incelemeleri, mekanik test sonuçları ve istatistiksel çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir.

5.1 Mekanik Test Sonuçları

Bu çalışmanın ilk safhasında malzemenin hangi özelliğinin perçinlenme prosesine etki ettiğini tespit etmek amacı ile Minitab analizine girdi verisi olarak iki farklı tedarikçiden tedarik edilen AISI 430 kalite paslanmaz sac rulolar perçinleme prosesinde çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen olarak iki gruba ayrılmıştır. Çatlamayan on bir adet ve çatlayan on adet paslanmaz sac rulodan tambur üretimi yapılıp, mekanik değerleri karşılaştırılmıştır. Çamaşır makinesi tamburunda on sekiz adet perçin bölgesi bulunmaktadır. Her bir perçin bölgesi kamera ile kontrol edilerek çatlama davranışı gösterip göstermediği belirlenmiştir.

Çekme deney numunesi Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Her bir çekme testi için üçer adet numune test edilip ortalama değerleri girdi olarak kullanılmıştır.



b_0	L_0 (mm)	B (mm)	r (mm)	h (mm)	L_C (mm)	L_t (mm)	Yüzey pürüzlülüğü
20±1	80	30±1	20	≥50	120±1	≥250	R_z 6,3

Şekil 5.1 : Çekme Testi Numunesi.

Çekme deney numunesi Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Her bir çekme testi için üçer adet numune test edilip ortalama değerleri girdi olarak kullanılmıştır.

Çatlamayan numunelerin çekme test sonuçları Çizelge 5.1'de, çatlayan numunelerin çekme test sonuçları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

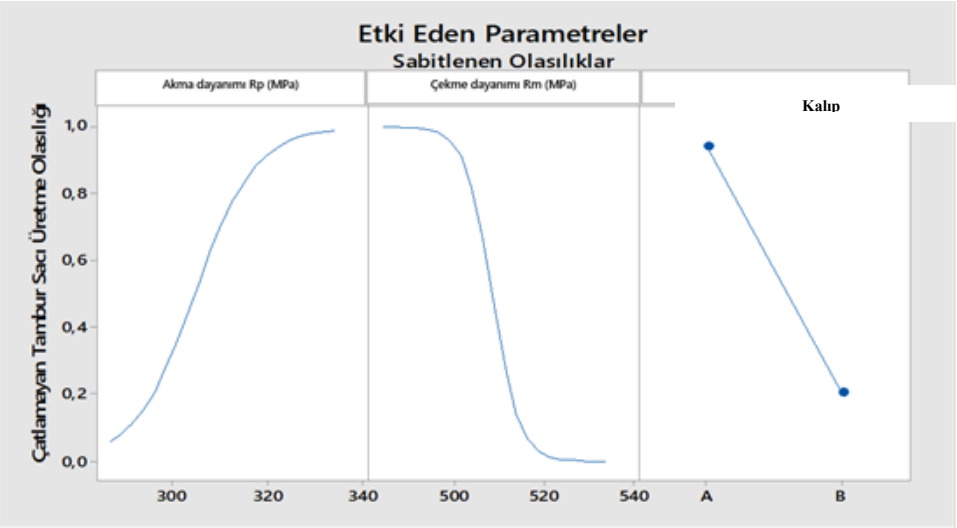
Çizelge 5.1 : Çatlamayan sac numunelerinin hadde yönüne dik çekme test sonuçları.

Numune	Tedarikçi	Akma Dayanımı $Rp_{(0,2)}$ MPa	Çekme Dayanımı, Rm MPa	Kopma Uzaması %
1	A	306	504	28,2
2	A	292	490	29,4
3	A	296	491	29,9
4	A	292	485	30,9
5	A	287	484	28,3
6	A	305	494	30,7
7	A	304	492	30,6
8	A	306	493	29,7
9	A	313	494	28,1
10	A	316	505	28,5
11	A	317	511	26,3

Çizelge 5.2 : Çatlayan sac numunelerinin hadde yönüne dik çekme test sonuçları.

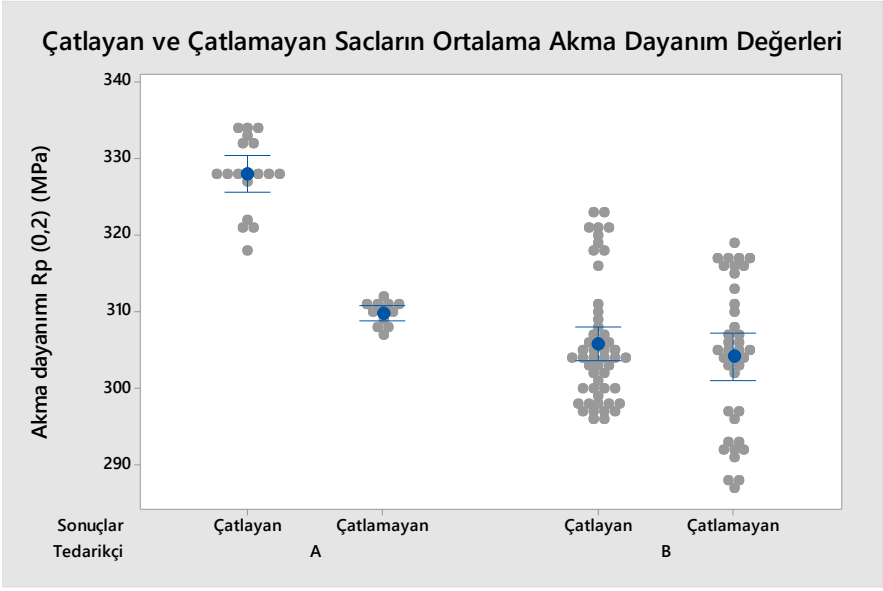
Numune	Tedarikçi	Akma Dayanımı $Rp_{(0,2)}$ MPa	Çekme Dayanımı, Rm MPa	Kopma Uzaması %
12	A	323	516	24,6
13	A	320	519	26,8
14	A	296	497	27,6
15	A	316	505	29,3
16	A	305	506	28,2
17	A	304	501	28,4
18	A	321	518	26,1
19	A	298	502	27,7
20	A	303	509	26,7
21	B	333	531	29,3

Çatlayan ve çatlamayan sac numunelerinin hadde yönüne dik yapılan çekme test sonuçları istatistik amaçlı Minitab programı kullanılarak regresyon metodu ile analizi yapılmıştır ve etkili parametreler değerlendirilmiştir.



Şekil 5.2 : Çatlama davranışında akma ve çekme dayanımı ilişkisi.

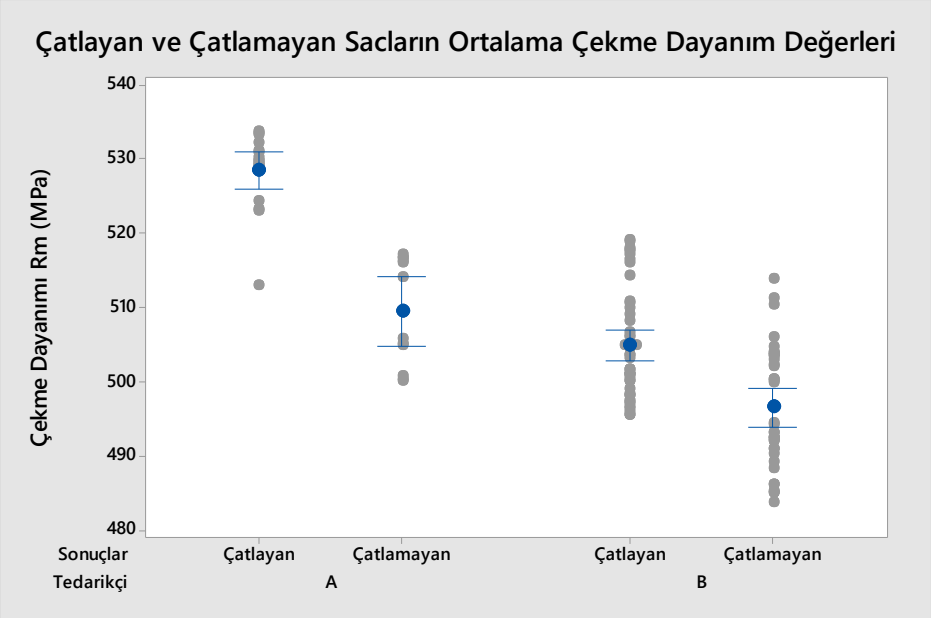
Çatlama davranışında akma ve çekme dayanımı ilişkisi Şekil 5.2'de verilmiştir. Akma dayanımı ve çekme dayanımı girdilerin ikinci dereceden bir fonksiyonu olarak gözlemlenmiştir. Akma dayanımının ($Rp_{0,2}$) 300 MPa ve üzeri değerlere ulaştığı, çekme dayanımının da 500 MPa ve altı değerlerde olduğu durumlarda çatlamayan perçin bölgeleri üretme olasılığı en yüksek değerlere ulaşmaktadır. İki farklı tedarikçi ruloları da incelendiğinde A tedarikçisindeki çatlak sac oranının B tedarikçisine göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. A tedarikçisinin oranının fazla çıkması kullanılan ruloların çoğunun A tedarikçisine ait olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.3 : Çatlayan ve çatlamayan sacların ortalama akma dayanımı değerleri.

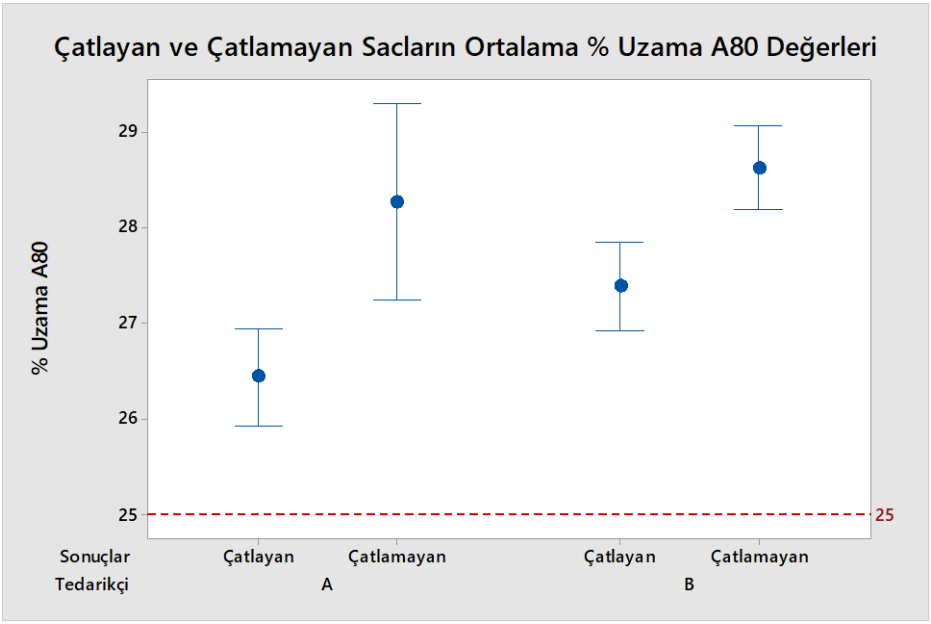
İki grubun ortalama akma dayanım değerleri Şekil 5.3'de verilmiştir. Farklı tedarikçilerden alınan numunelerde A tedarikçisinden alınan çatlayan ve çatlamayan

saclarda akma dayanımları arasında belirgin bir fark gözlemlenirken B tedarikçisinde bu farkın çok daha az olduğu gözlemlenmektedir.



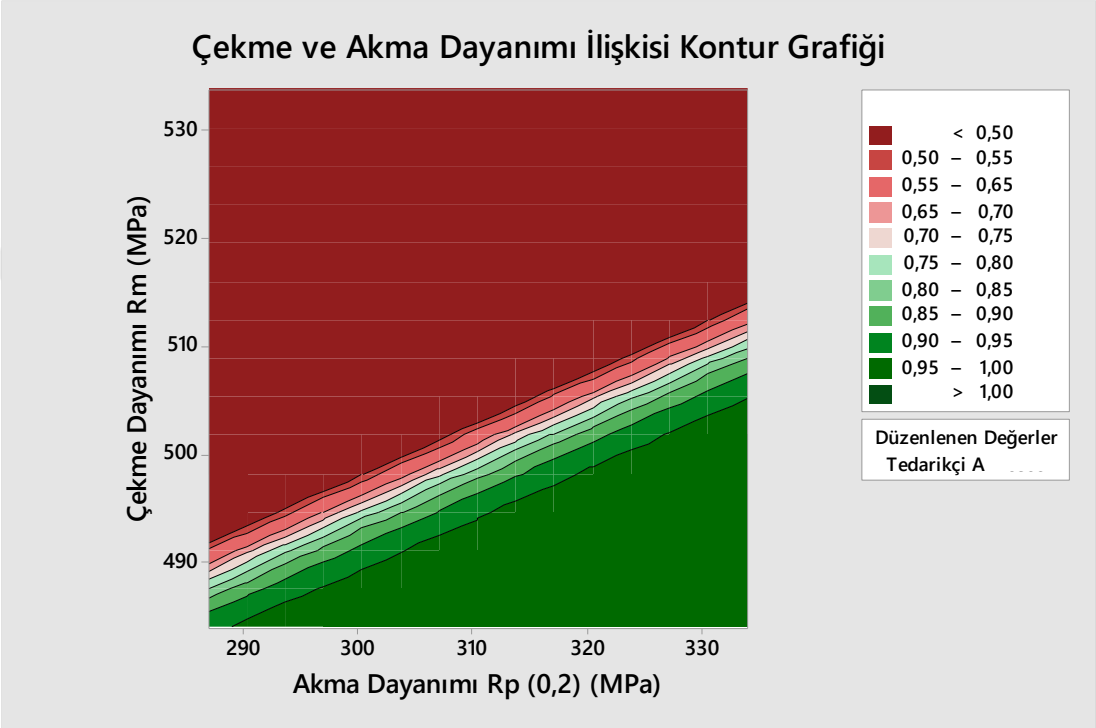
Şekil 5.4 : Çatlayan ve çatlamayan sacların ortalama çekme dayanımı değerleri.

Çatlayan ve çatlamayan sacların ortalama çekme dayanım değerleri Şekil 5.4'de verilmiştir. Analiz sonucunda her iki tedarikçi için de artan çekme dayanımı değerlerinde çatlama davranışı ortaya çıkmıştır. A tedarikçisinde çatlama davranışları ortalama 520 MPa üzerindeki değerlerde ortaya çıkarken, B tedarikçisinde bu değer ortalama 505 MPa ve üzeri değerlerde gözlemlenmiştir.



Şekil 5.5 : Çatlayan ve çatlamayan sacların ortalama kopma uzaması (A80) değerleri.

Problem yaşanılmadan önce sadece limit değer olarak ilgili referanslarda % 25 kopma uzaması değeri dikkate alınırken analiz sonucunda paslanmaz sacın akma dayanımının ve çekme dayanımının çatlama problemine doğrudan etki eden parametreler olduğu tespit edilmiştir. Her iki tedarikçi için de çatlayan ve çatlamayan numuneler karşılaştırıldığında çatlamayan numunelerin uzama değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir fakat sabit bir limit değeri bulunamamıştır.

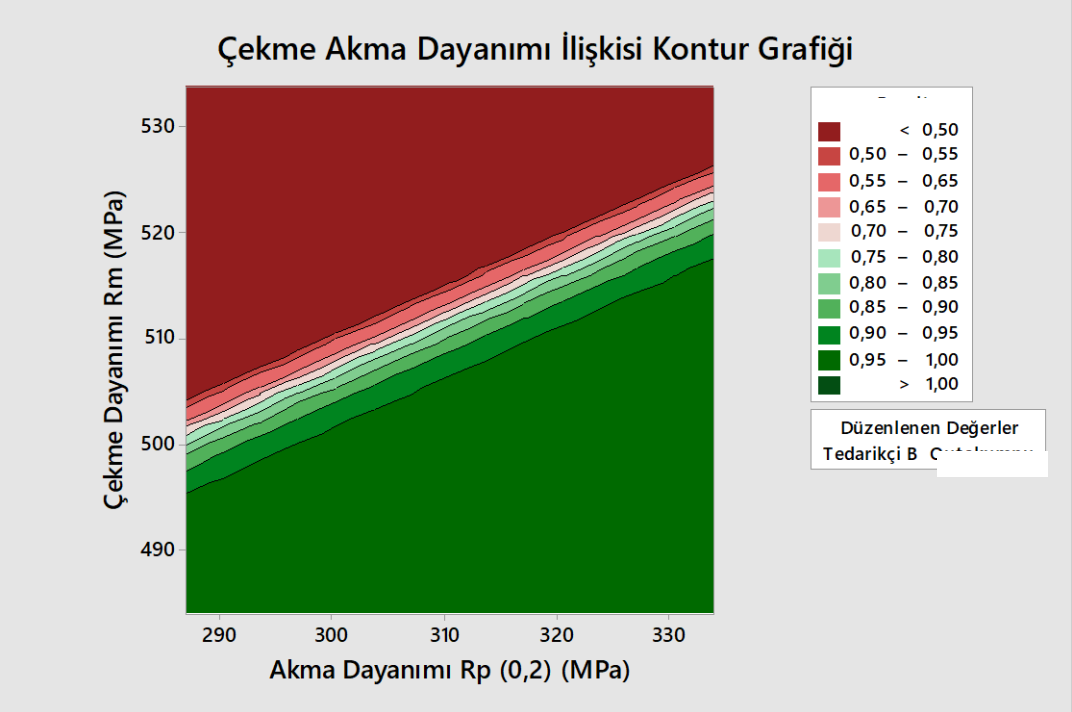


Şekil 5.6 : A tedarikçisinden alınan sacların çekme ve akma dayanımı ilişkisi kontur grafiği.

Yapılan analiz sonucunda her iki tedarikçi için çekme ve akma dayanımı arasında bir ilişki kurulup çatlama problemi gözlemlenmeyecek güvenli çalışma alanı belirlenmiştir. Şekil 5.6'da çatlama davranışı göstermeyen bir başka deyişle güvenli bölge olarak tabir edilen aralık yeşil bölge ile gösterilirken kırmızı bölgeler çatlama davranışı gösteren alanı simgelemektedir. Çatlama probleminin gözlemlenmemesi için akma dayanımı 300 MPa ve altı değerlerinde iken çekme dayanımının 490 MPa ve altı değerlerde olması gerekmektedir. Akma dayanımı değeri yükseldikçe, daha yüksek çekme dayanımı değerlerinde de güvenli bölgede kalarak çatlama problemi gözlemlenmeden tambur çevre saçı üretilebilir.

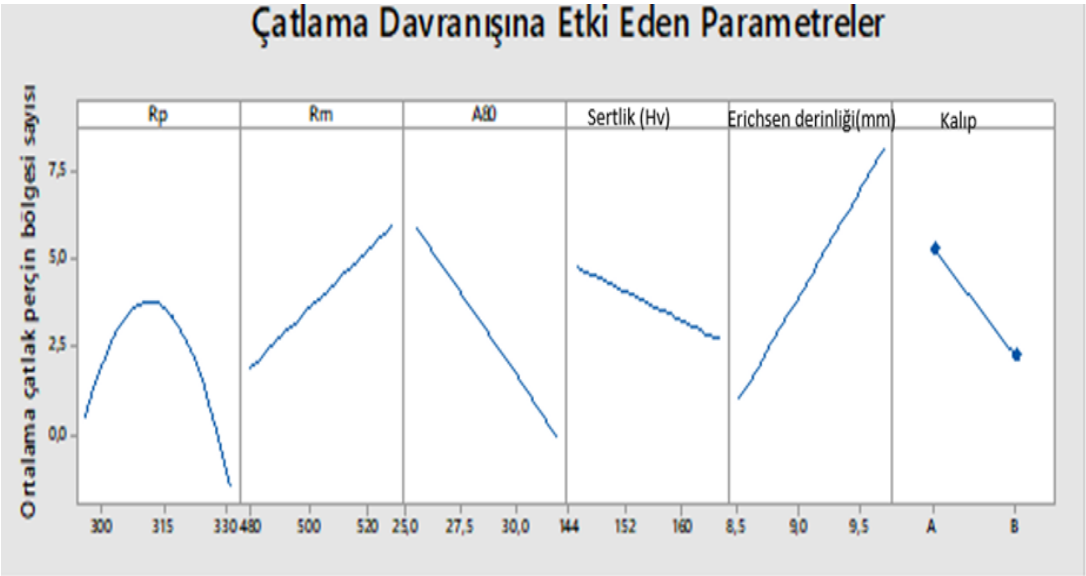
B tedarikçisinin çekme ve akma ilişkisi kontur grafiği Şekil 5.7'da verilmiştir. A tedarikçi ile kıyaslandığında, çatlama davranışı göstermeyen güvenli çalışma alanı B

tedarikçisinde daha fazladır. 300 MPa ve altı akma değerlerinde dahi 500 MPa ve üzeri çekme dayanımı değerlerinde çatlama davranışı gözlemlenmez.



Şekil 5.7 : B tedarikçisinden alınan sacların çekme ve akma dayanımı ilişkisi kontur grafiği.

Yapılan regresyon analizi sonucunda malzemenin yanında kalıptan da gelen etkili parametreler araştırılıp, sertlik ve derin çekme test sonuçları da ilave edilerek 'Fit Regresyon Model Backward Elimination' yöntemi ile kullanılmış ve % 95 güven aralığında Şekil 5.8'de verilen parametre ilişkileri tespit edilmiştir.



Şekil 5.8 : Çatlama problemine etki eden parametreler.

Her bir girdi kendileri ve ilişkili diğer verilerle çaprazlanmış ve çıktıya etkisi olan değerler belirlenmiştir. Y ekseni 18 perçin bölgesi için ortalama çatlak sayısını, x ekseni ise etkili parametre değerlerini ifade etmektedir. Akma dayanımının çatlama problemine parabolik ilişkisi gözlemlenirken; çekme dayanımı, sertlik, derin çekme sonucu ve kalıp farklılığının çatlama problemine lineer ilişkisi tespit edilmiştir. Akma dayanımının 296-310 MPa aralığındaki değerlerde artan çatlama davranışı gözlemlenirken, 310 MPa'dan 330 MPa'ya kadar azalan bir eğilim tespit edilmiştir. Çekme dayanımının 479-528 MPa aralığında olduğu durumlarda çatlama davranışı artmaktadır. Erichsen çökertme testi sonucu Erichsen derinliği arttıkça çatlama davranışına karşı olan direncinin arttığı tespit edilmiştir. Seri üretimde kullanılan kalıpların da performansının çatlama problemine etki ettiği tespit edilmiş, kalıp iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Haddeleme prosesi ile üretilmiş sacların plastik deformasyon özellikleri çoğunlukla hadde yönüne bağlı olarak farklılık gösterir. Plastik deformasyon oranı veya çekilebilirlik oranı literatürde (R) olarak tanımlanmaktadır. Anizotropi katsayısı malzemenin derin çekilebilirliği hakkında bilgi verir. Bu değerin yüksek olması malzemenin perçinlenme prosesinde incelmeye karşı direncini belirler ve denklem 5.1'de belirtildiği gibi enine gerçek birim şekil değiştirme (ε_w) değerinin kalınlık yönündeki gerçek şekil değiştirme (ε_t) değerine oranı ile elde edilir. Denklem 5.2 hadde yönüne göre değişik doğrultularda elde edilen plastik deformasyon oranlarının ortalaması sacın dikey plastik anizotropisini (R_{ort}) verir.

$$R=\varepsilon_w/\varepsilon_t \tag{5.1}$$

$$R_{ort} =R_0+2R_{45}+R_{90}/4 \tag{5.2}$$

Perçinlenme prosesinde çatlak oluşmaması için Denklem 5.3'de belirtilen düzlemsel anizotropi katsayısı ise sacın kulaklanmaya karşı direncinin bir ölçüsü olup, pozitif ya da negatif değerinin sıfıra en yakın olması istenir.

$$\Delta R =R_0-2R_{45}+R_{90}/2 \tag{5.3}$$

Deformasyon sertleşmesi üssü ve anizotropi katsayısının etkisini incelemek amaçlı kademeli çekme testi uygulanmıştır. Test numuneleri, Çizelge 5.3'de gösterildiği gibi iki rulo çatlama davranışı gösteren ve iki rulo çatlama davranışı göstermeyen

paslanmaz saclardan toplamda otuz adet, hadde yönüne 0º, 45º, 90º açı değerlerinde kesilerek hazırlanmıştır. Numunelerin anizotropi katsayısı ve deformasyon sertleşmesi üssü değerleri Çizelge 4.5'da verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen numunelerin anizotropi katsayısı ve deformasyon sertleşmesi üssü değerleri.

Numune	Tedarikçi	Parça	Hadde yönü açısı	Deformasyon sertleşmesi üssü (n)	Anizotropi katsayısı (R)
22	B	1	0º	0,184	1,31
22	B	1	45º	0,180	1,06
22	B	1	90º	0,182	0,86
22	B	2	0º	0,187	1,19
22	B	2	45º	0,181	0,90
22	B	2	90º	0,180	0,75
22	B	3	0º	0,184	0,96
22	B	3	45º	0,182	1,04
22	B	3	90º	0,189	0,75
23	A	1	0º	0,193	0,64
23	A	1	45º	0,183	0,86
23	A	1	90º	0,189	0,68
23	A	2	0º	0,179	0,85
23	A	2	45º	0,186	0,95
23	A	2	90º	0,186	0,69
24	B	1	0º	0,185	0,62
24	B	1	45º	0,183	1,03
24	B	1	90º	0,174	0,34
24	B	2	0º	0,184	0,68
24	B	2	45º	0,175	0,86
24	B	2	90º	0,179	0,38
24	B	3	0º	0,183	0,62
24	B	3	45º	0,179	1,00
24	B	3	90º	0,174	0,43
25	A	1	0º	0,193	0,82
25	A	1	45º	0,183	0,97
25	A	1	90º	0,184	0,91
25	A	2	0º	0,177	0,71
25	A	2	45º	0,193	0,82
25	A	2	90º	0,196	0,79

Dikey anizotropi katsayısı ve düzlemsel anizotropi katsayıları da Çizelge 5.4'de verilmiştir. R_{ort} değerlerinde çatlama davranışı göstermeyen saclarda daha düşük

değerler elde edilirken çatlama davranışı gösteren saclarda daha yüksek değer elde edilmiştir. ΔR değerinde çatlayan ve çatlamayan saclarda önemli bir fark tespit edilmemiştir.

Çizelge 5.4 : Çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen numunelerin dikey ve düzlemsel anizotropi katsayıları

Numune	Parça	Dikey anizotropi katsayısı (R_{ort})	Düzlemsel anizotropi katsayısı (ΔR)
22	1	1,074	0,030
22	2	0,936	0,070
22	3	0,949	-0,188
23	1	0,761	-0,208
23	2	0,857	-0,180
24	1	0,754	-0,543
24	2	0,697	-0,333
24	3	0,764	-0,475
25	1	0,919	-0,105
25	2	0,782	-0,067

5.2 Mikroyapı Analizleri

Numuneler perçinlenme işlemindeki çatlama özelliklerine göre gruplandırılmış ve mikroyapıları incelenmiştir. Gruplanan AISI 430 kalite paslanmaz sacların bilgisi Çizelge 5.5'de verilmiştir.

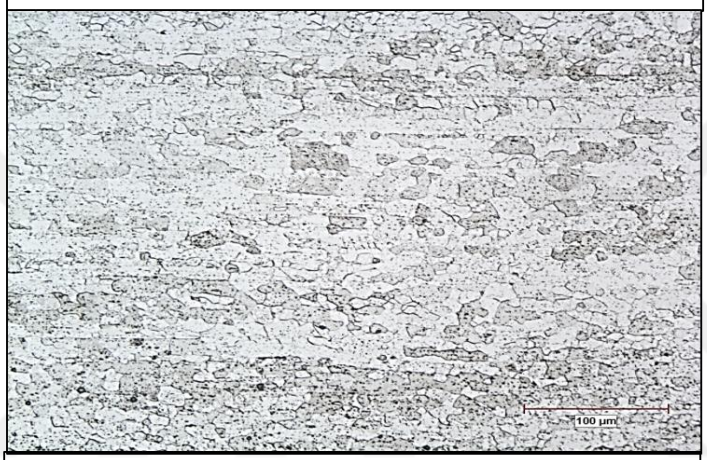
Çizelge 5.5 : Mikroyapı analizi için kullanılan numunelerin sınıflandırılması.

Numune	Tedarikçi	Çatlama davranışı
22	B	Çatlayan
23	A	Çatlayan
24	B	Çatlamayan
25	A	Çatlamayan

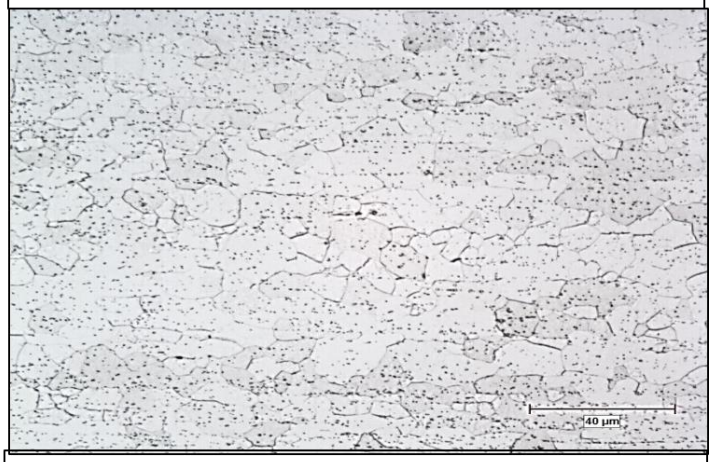
Mikroyapıda çatlak problemi yaratabilecek çökelti fazları incelenmiştir. Çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen numuneler arasında 100, 200 ve 500 büyütmede mikroskop ölçümleri ve tane boyutu ölçümü yapılıp, tane yapısı dağılımı karşılaştırılmıştır.



X100



X200

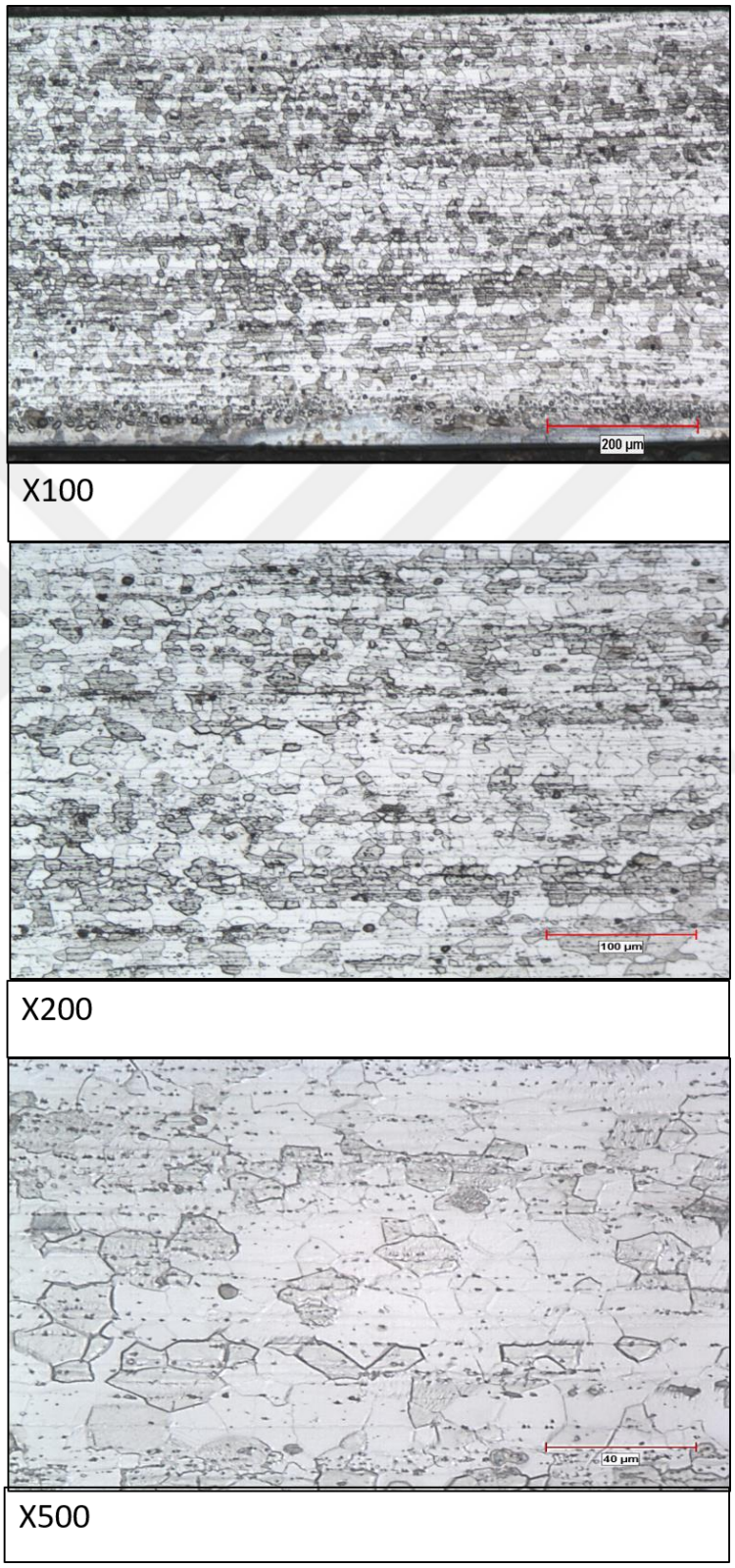


X500

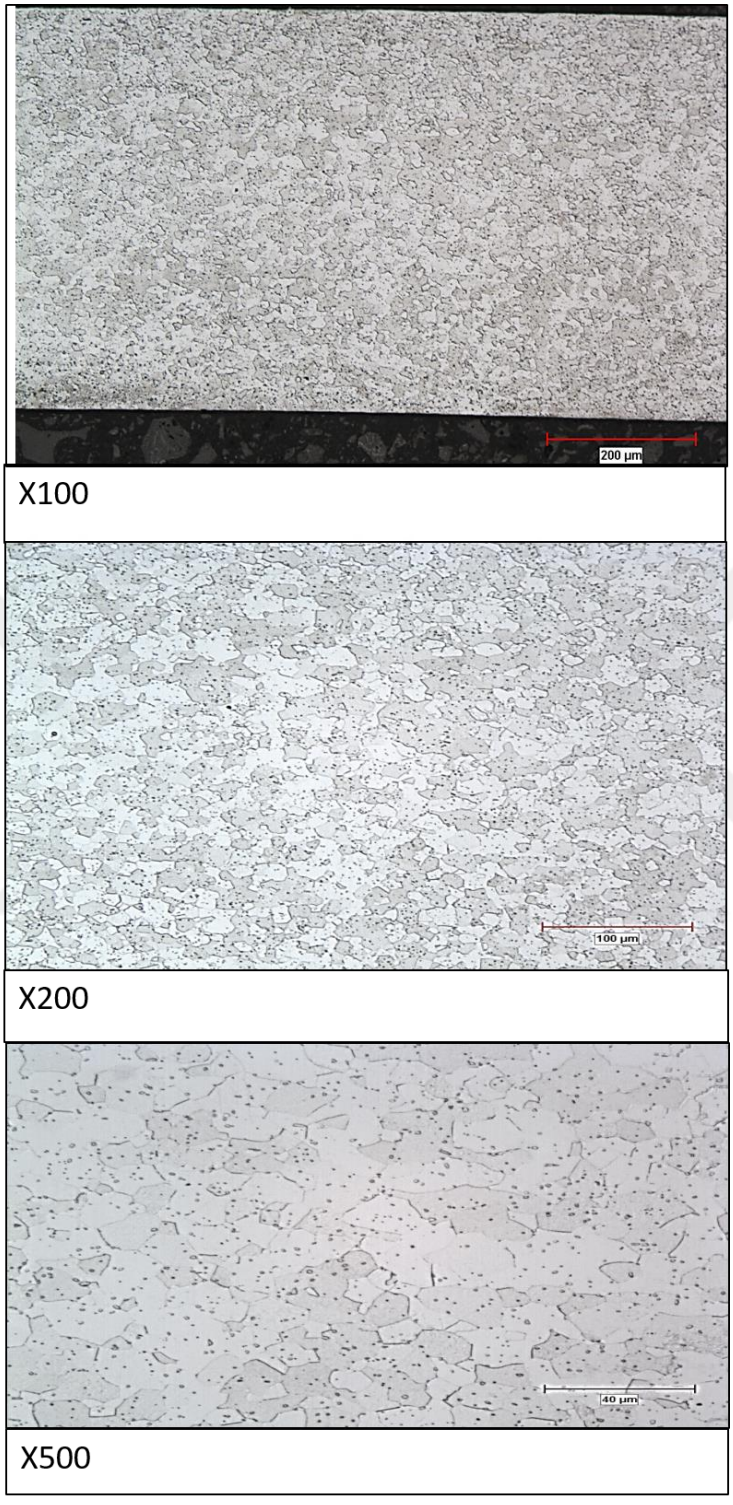
Şekil 5.9 : 22 numaralı çatlayan numunenin mikroyapı görüntüleri.

Çatlama davranışı gözlemlenen 22 ve 23 numaralı paslanmaz sac numunelerin mikroyapıları Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Tane boyutu dağılımına bakıldığında eş eksenli tane yapısı gözlemlenmeyip mikroyapının orta bölgelerinde tane büyümesi meydana gelirken kenar bölgelerde daha ince taneli bir yapı tespit

edilmiş ve homojen olmayan tane yapısı gözlemlenmiştir. Hadde yönündeki deformasyon izleri çatlama davranışı gösteren saclarda belirgin olarak gözlemlenmektedir.



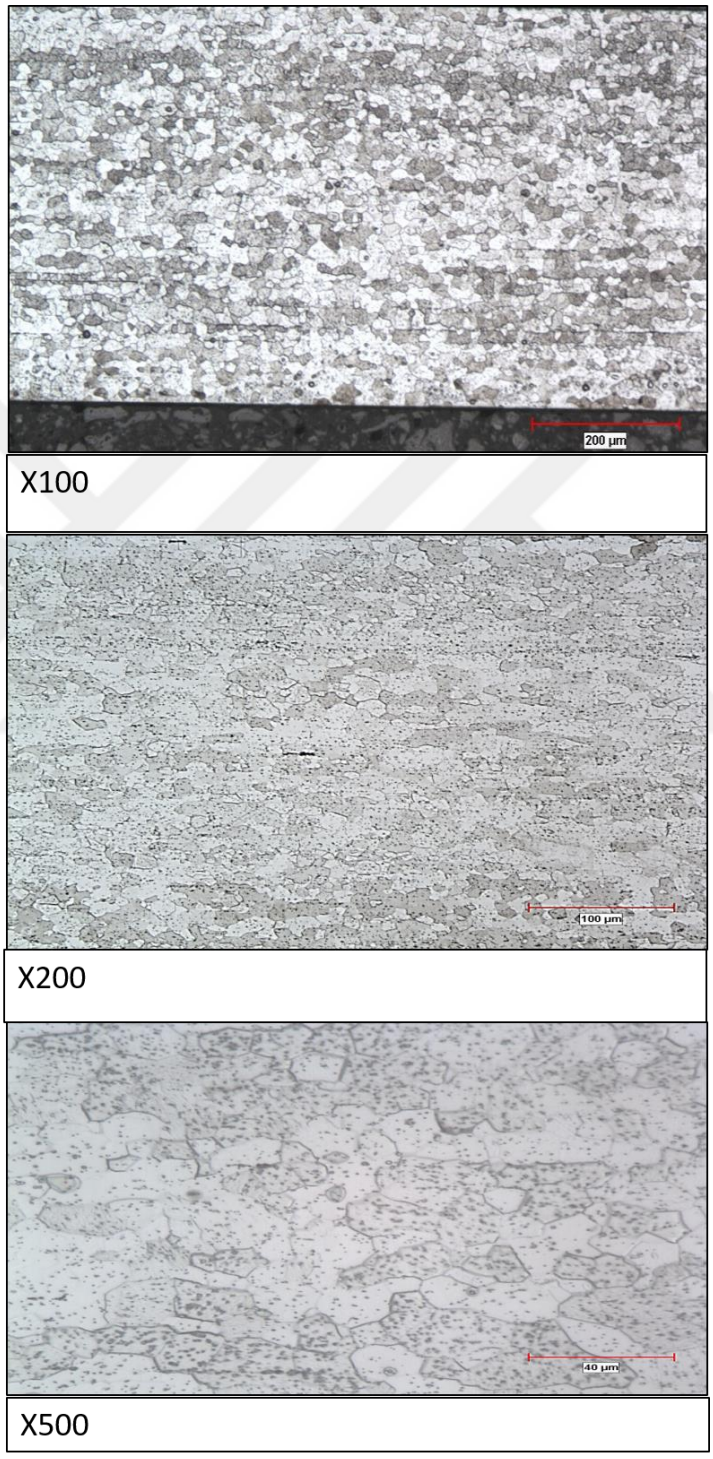
Şekil 5.10 : 23 numaralı çatlayan numunenin mikroyapı görüntüleri.



Şekil 5.11 : 24 numaralı çatlamayan numunenin mikroyapı görüntüsü.

Çatlama davranışı gözlemlenmeyen paslanmaz sac numunelerinin mikroyapıları Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Yapılar 100, 200 ve 500 büyütmelerde incelendiğinde herhangi bir çökelti fazı tespit edilmemiştir. Farklı büyütmelerde yapılan incelemelerde eş eksenli tane yapısı gözlemlenmiştir. Mikroyapılarda hadde

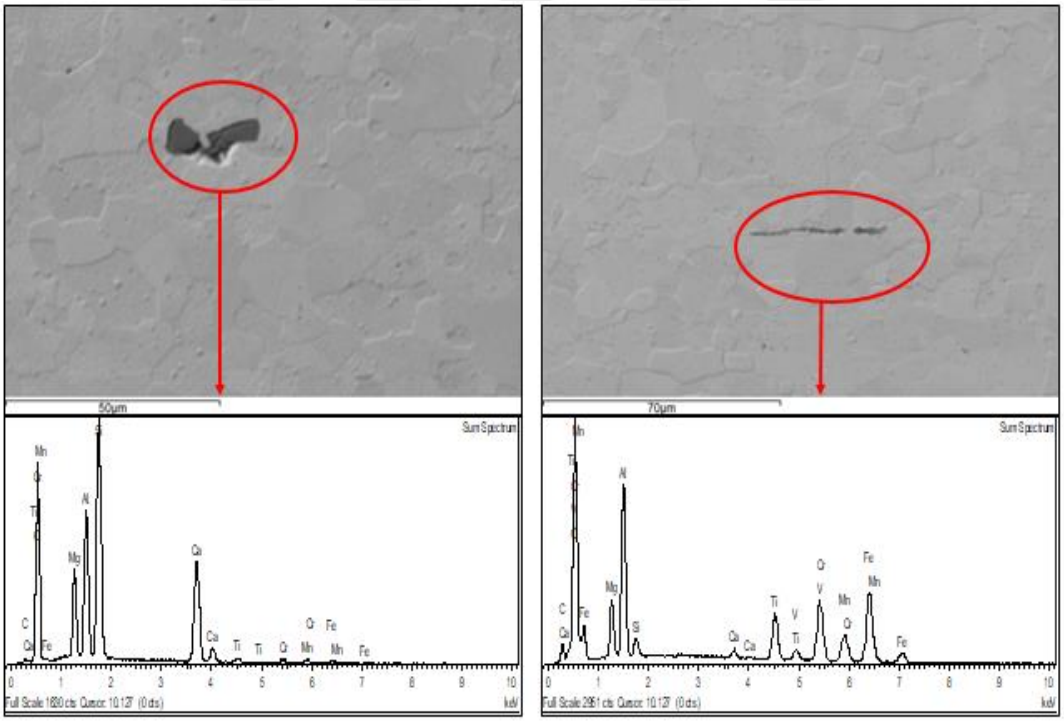
yönüne bağlı deformasyon izleri ve hadde yönünde tane uzama davranışı görülmemektedir. Soğuk hadde işlemi sonrasında yeniden kristalleşme, mikroyapının her bölümünde eş seviyede gerçekleşmiş ve buna bağlı olarak izotropik taneler meydana gelmiştir.



Şekil 5.12 : 25 numaralı çatlamayan numunenin mikroyapı görüntüsü.

Bunların yanı sıra çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen paslanmaz saclar karşılaştırıldığında çatlayan saclarda taneler arasında çökelti fazları tespit edilmiştir. Çökelti fazlarının analizi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ve enerji saçınım spektrometresi (EDS) analizi gerçekleştirilip, çökelti fazlarının kimyasal analizi yapılmıştır.

Tanelerarası çökelti fazları EDS analizi ile incelendiğinde içerisinde yüksek oranda Mg, Al, Si ve Ca elementleri tespit edilmiştir. Hem sıcak hem de soğuk haddelenmiş paslanmaz ferritik paslanmaz çeliklerin yüzey kalitesi yüksek ergime noktasına sahip olan $MgO.Al_2O_3$ spinel gibi metalik olmayan cüruf tipi inklüzyonlara karşı çok hassastır. Bu inklüzyonlar hem soğuk haddelenmiş hem de sıcak haddelenmiş paslanmaz sacların yüzeylerinde inklüzyon hattı kusurlarına neden olurlar. Yapılan çalışma literatürdeki analizlerle karşılaştırıldığında benzer EDS grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 5.13 : Çatlama davranışı gösteren paslanmaz sac numunelerde tespit edilen çökelti fazlarının taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri ve EDS analizleri.

Literatürde temiz ferritik paslanmaz çeliklerin üretimi için $MgO.Al_2O_3$ spinel inklüzyonları yapıdan gidermek için birçok çalışma yapılmıştır. Genellikle bu inklüzyonlar alüminyum ile deokside edilmiş çeliklerde ve silisyum ile deokside edilmiş çeliklerde gözlemlenir. $MgO.Al_2O_3$ yüksek bir ergime noktasına sahip

olduğundan ve çelikten farklı bir deformasyon davranışı sergilediğinden malzemenin mekanik değerlerinde olumsuz etki yaratır ve şekillendirilebilirliğini etkiler [33]. Bununla beraber literatürde AISI 430 kalite soğuk haddelenmiş paslanmaz sacların mikroyapılarında uzamış inklüzyonlar tespit edilmiş ve EDS analizleri sonucu C2/c grubuna ait $CaMnSi_2O_6$ olduğu belirlenmiştir. Çatlayan sac numunelerinin EDS analizleri (Şekil 5.13) literatür ile karşılaştırıldığında benzer pikler tespit edilmiştir. Yapılan literatür araştırmasında AISI 430 kalite soğuk haddelenmiş saclarda bulunan bu uzamış $CaMnSi_2O_6$ inklüzyonlarının eğme işlemi sırasında çatlama yapısı oluşturduğu ispatlanmıştır. Şekillendirilebilirliği artırmak için inklüzyonların hacmini düşürmek ya da uzamış inklüzyon tane yapısını eş eksenli tane yapısına modifiye yöntemleri önerilmiştir [34].

Çizelge 5.6 : Çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen paslanmaz sacların tane boyutu.

Numune	Çatlama davranışı	Numunelerin ortalama tane boyutu (μm)
22	Çatlayan	13
23	Çatlayan	15
24	Çatlamayan	9
25	Çatlamayan	10

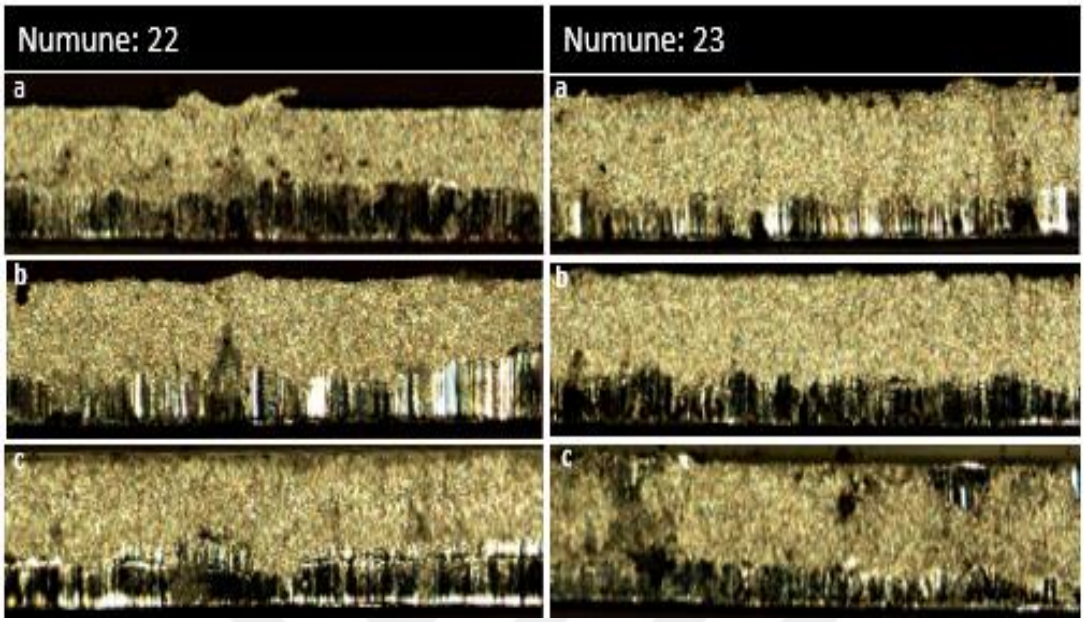
Çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen sacların tane boyutu dağılımı hesaplanmış ve Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

İki grup karşılaştırıldığında çatlama davranışı gösteren sacların tane boyutunun çatlama davranışı gözlenmeyen sacların tane boyutundan daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Tane boyu büyüdükçe malzemelerin şekillendirilebilirlik özelliği olumsuz yönde etkilenir. Tane yapısının eş eksenli olmaması ve tane boyutunun büyümesi perçinleme prosesinde çatlama davranışını tetikleyen bir faktördür.

5.3 Kesme Yüzey Testi Sonuçları

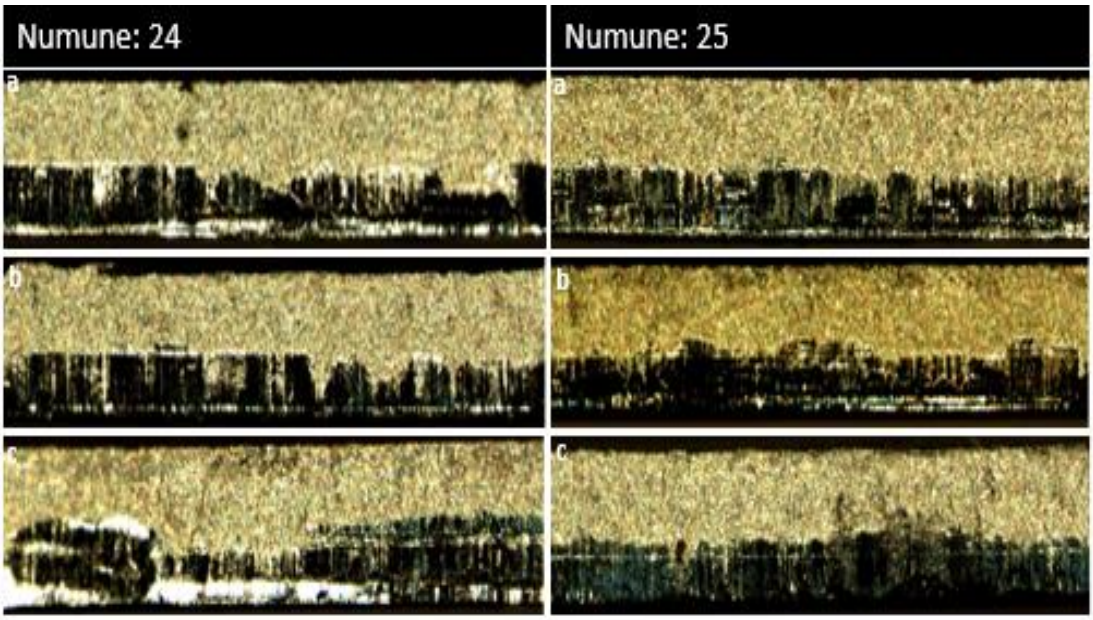
Kesme gerilimi malzemenin iki zıt yüzeyinin birbirine paralel ve ters yönde kaymalarını sağlayacak şekilde etki eder. İnce paslanmaz sac malzemeler deforme olduğunda başlangıçta düzgün bir kesme yüzey davranışı gösterirken sonrasında aniden deformasyon karakteri değişkenlik gösterebilir. Çatlama davranışı gösteren ve

göstermeyen sacların arasındaki kırılma ve kayma yüzeyi farklılıkları incelenmiştir. Numunelerin kırılma ve kayma yüzeyleri Şekil 5.14'de ve 5.15'de gösterilmektedir.



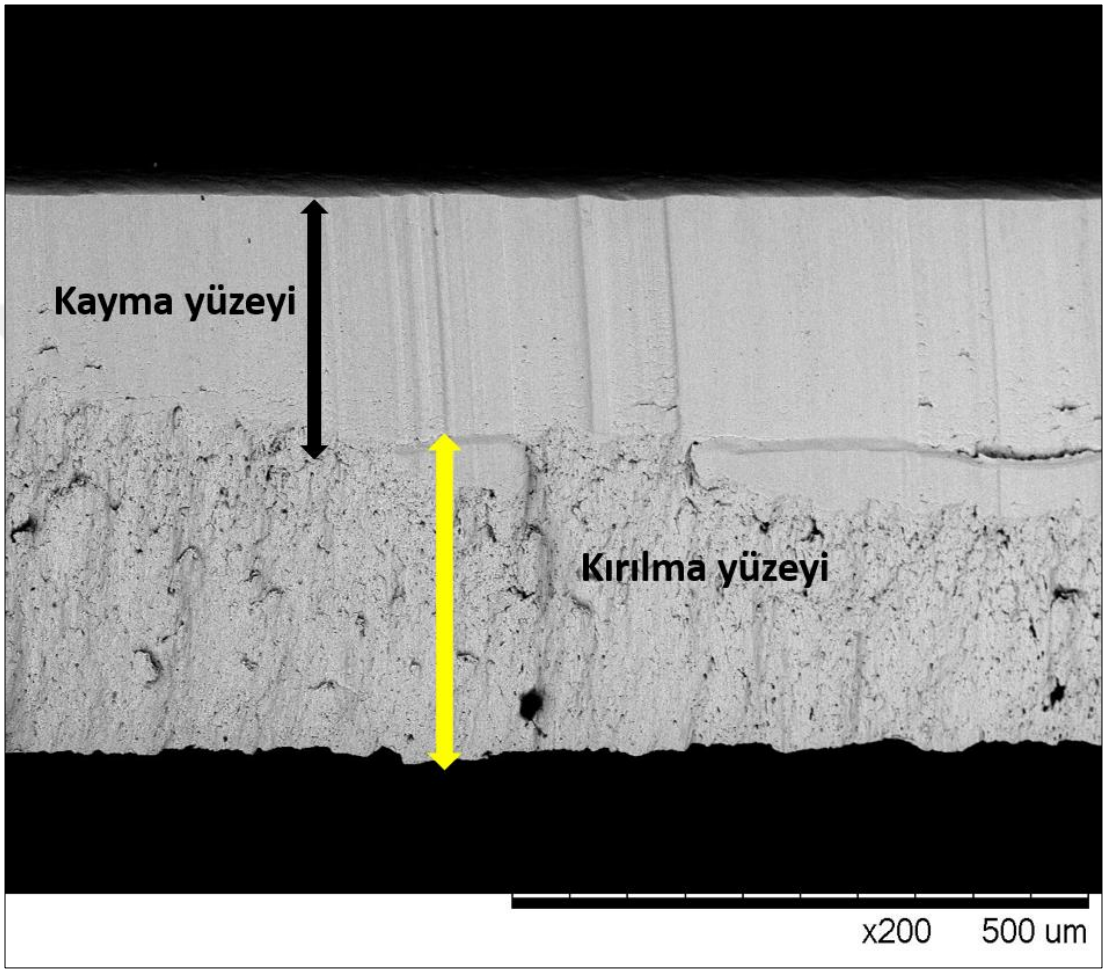
Şekil 5.14 : A ve B tedarikçisinden alınan çatlama davranışı gösteren sacların kırılma ve kayma yüzey görüntüleri ((a) hadde yönü açısı 0^o, (b) hadde yönü açısı 45^o, (c) hadde yönü açısı 90^o).

Siyah bölgeler kayma yüzeyini temsil ederken, sarı bölgeler kırılma yüzeyini temsil etmektedir. Malzemede kayma yüzey oranı ne kadar yüksek ise çatlama davranışı gösterme olasılığı azalır.



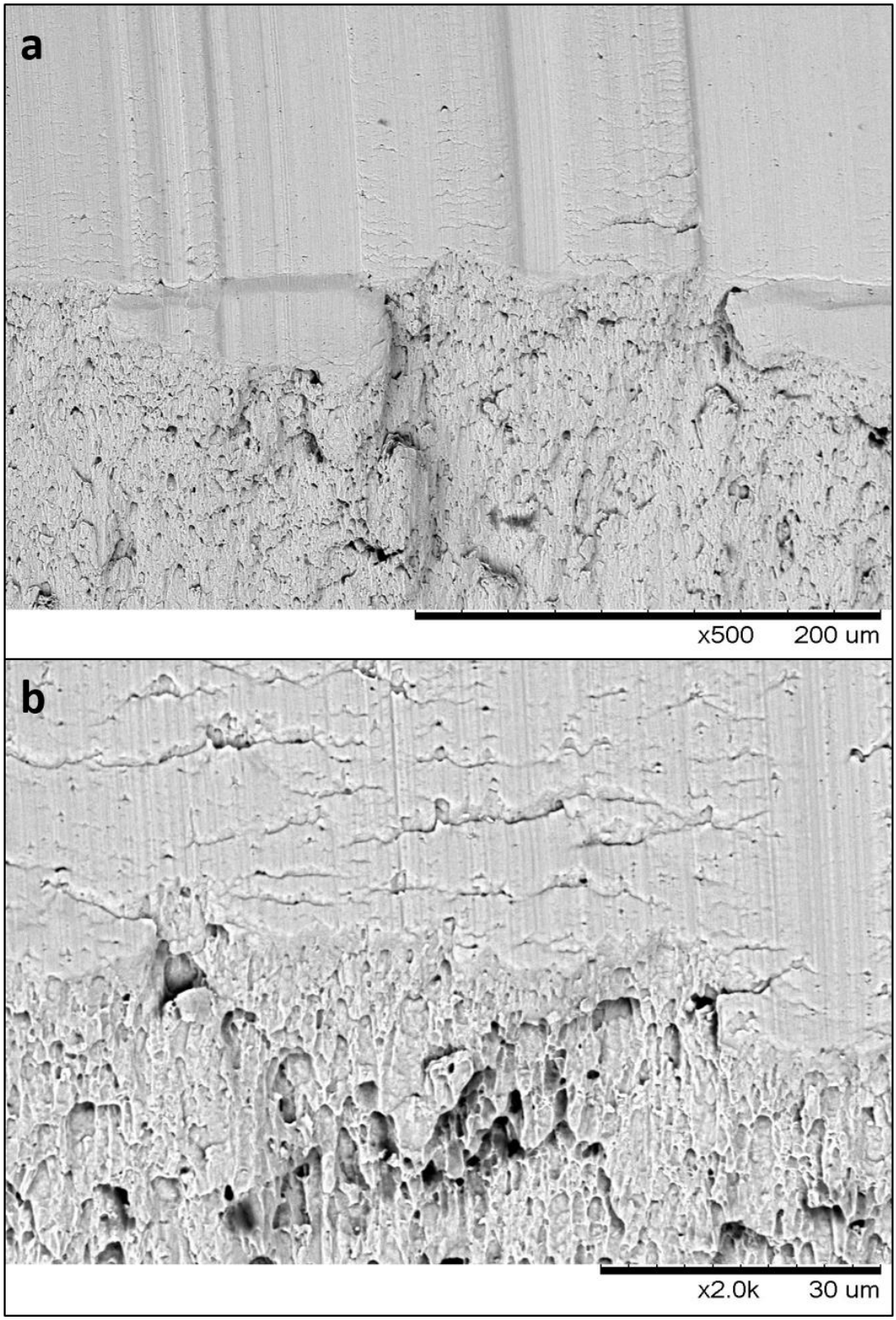
Şekil 5.15 : A ve B tedarikçisinden alınan çatlama davranışı göstermeyen sacların kırılma ve kayma yüzey görüntüleri.

Kırılma ve kayma yüzeyinin 200 büyütmede taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü Şekil 5.16'da verilmiştir. Sarı ok ile belirtilen pürüzlü bölge kırılma yüzeyini temsil ederken siyah ok ile belirtilen aralık kayma yüzeyini temsil eder. Kayma yüzeyinin kırılma yüzeyine oranı ne kadar yüksek olursa malzemenin çatlama ihtimali o kadar azalır.



Şekil 5.16 : Kırılma ve kayma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü.

Çatlamayan numunelerde kırılma yüzeyinden kayma yüzey bölgesine geçiş bölgesi belirginken, çatlayan numunelerde bu geçiş bölgesi belirgin değildir ve kesme yüzeyi boyunca pürüzlü bir yapı görülür. Şekil 5.17'de kayma yüzeyinden kırılma yüzeyine geçiş bölgesinin 500 ve 2000 büyütmede taramalı elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir. Kesme işlemi sırasında bu geçiş bölgesinde malzeme koparak kesilmeye başlar. Bu sebeple yüzeyinde süngerimsi bir yapı görüntüsü oluşur.



Şekil 5.17 : Kesilen numunenin kayma yüzeyinden kırılma yüzeyine geçiş bölgesi taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ((a) x500 büyütmedeki geçiş bölgesi, (b) x2000 büyütmedeki geçiş bölgesi).

Sacın kalınlığı boyunca kırılma ve kayma yüzeylerinin kalınlığı ölçülmüştür. Ölçümler Çizelge 5.7'de verilmiştir.

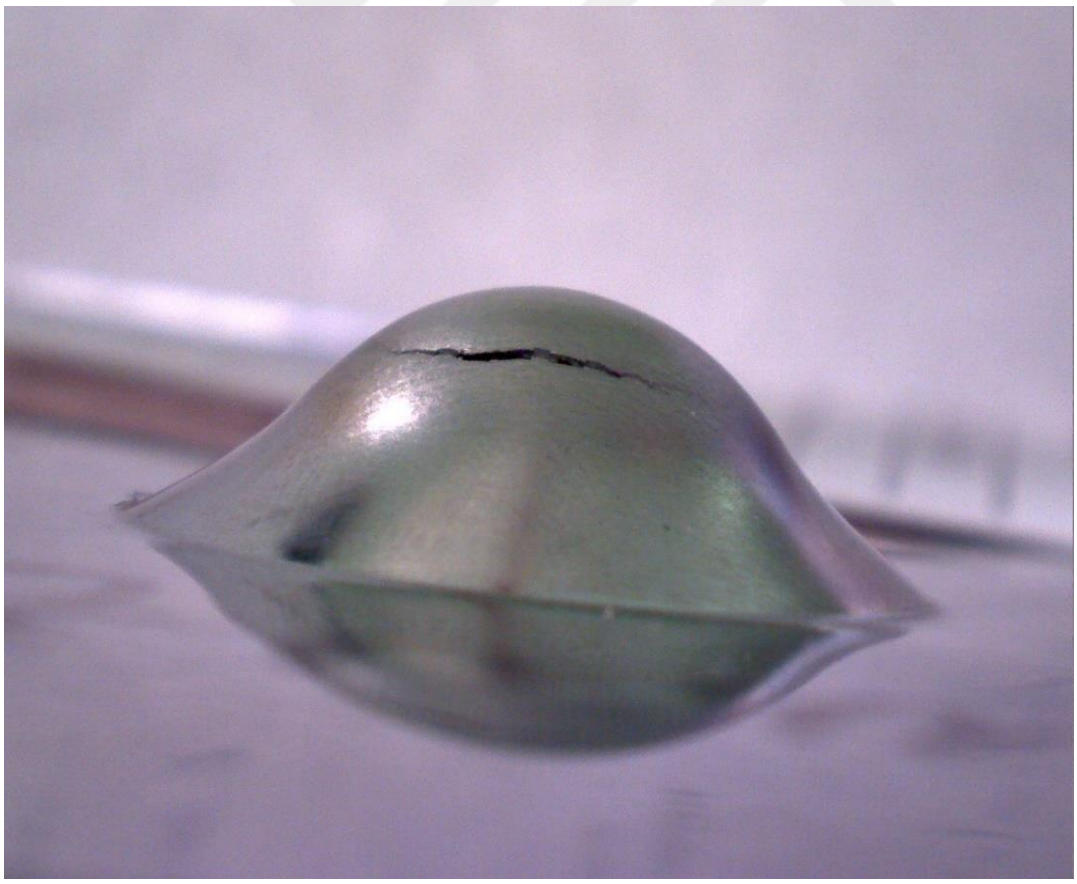
Çizelge 5.7 : Kesme testi sonucu numunelerin farklı hadde yönü açılarında kırılma ve kayma yüzey oranları.

Numune	Çatlama davranışı	Parça	Hadde yönü açısı	Kırılma yüzey oranı (%)	Kayma yüzey oranı (%)
22	Çatlayan	1	0º	66	34
22	Çatlayan	1	45º	64	36
22	Çatlayan	1	90º	62	38
22	Çatlayan	2	0º	54	46
22	Çatlayan	2	45º	58	42
22	Çatlayan	2	90º	62	38
22	Çatlayan	3	0º	64	36
22	Çatlayan	3	45º	62	38
22	Çatlayan	3	90º	62	38
23	Çatlayan	1	0º	70	30
23	Çatlayan	1	45º	54	26
23	Çatlayan	1	90º	84	16
23	Çatlayan	2	0º	80	20
23	Çatlayan	2	45º	56	24
23	Çatlayan	2	90º	56	24
24	Çatlamayan	1	0º	66	34
24	Çatlamayan	1	45º	66	34
24	Çatlamayan	1	90º	50	50
24	Çatlamayan	2	0º	60	40
24	Çatlamayan	2	45º	60	40
24	Çatlamayan	2	90º	70	30
24	Çatlamayan	3	0º	64	36
24	Çatlamayan	3	45º	62	38
24	Çatlamayan	3	90º	62	38
25	Çatlamayan	1	0º	52	48
25	Çatlamayan	1	45º	56	44
25	Çatlamayan	1	90º	52	48
25	Çatlamayan	2	0º	60	40
25	Çatlamayan	2	45º	60	40
25	Çatlamayan	2	90º	54	46

Çatlama davranışlarına göre gruplanan numunelerin kayma ve kırılma yüzey oranları kıyaslandığında çatlayan numunelerin ortalama kırılma yüzey oranları kayma yüzey oranlarından daha büyüktür. En yüksek kayma yüzey oranı 24 numaralı çatlamayan numunede görülürken, en yüksek kırılma yüzey oranı 23 numaralı çatlayan numunede gözlemlenmiştir. Kayma yüzey oranı % 42 ve üzeri olan numunelerde çatlama davranışı gözlemlenmemiştir.

5.4 Erichsen Derinliği ve Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Erichsen çökertme deneyi, metalik sacların şekillendirilme kabiliyetini belirlemeye yönelik bir yöntemdir. Sac malzemeler hassas malzemeler olup şekillendirilebilirlik kabiliyetleri bu test ile gözlemlenebilir. Kademeli olarak malzemede bir kubbe oluşturulur ve Şekil 5.18'de görüldüğü gibi deformasyon oluştuğu noktadaki kubbe yüksekliği (Erichsen derinliği) ölçülerek şekillendirilebilirlik kabiliyeti kıyaslanır. Çökertme testleri Erichsen Model 102 cihazıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.18 : Erichsen çökertme testi numunesi.

22, 23, 24 ve 25 numaralı numunelerden elde edilen çekme test sonuçları Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Çatlayan ve çatlamayan sacların Erichsen derinliği sonuçları.

Numune	Tedarikçi	Çatlama davranışı	Erichsen derinliği (mm)
22	B	Çatlayan	8,9
23	A	Çatlayan	8,7
24	B	Çatlamayan	9,7
25	A	Çatlamayan	9,5

Çatlayan ve çatlamayan saclar kıyaslandığında çatlamayan sacların yüzeyden deformasyon bölgesine kadar olan derinlik değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Erichsen derinliği 9,5 mm'den daha yüksek olan malzemelerde çatlama davranışı gözlemlenmemiştir. Çatlayan ve çatlamayan sacların sertlik ölçümleri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Çatlayan ve çatlamayan sacların sertlik ölçümleri.

Numune	Tedarikçi	Çatlama davranışı	Sertlik (HV)
22	B	Çatlayan	147
23	A	Çatlayan	145
24	B	Çatlamayan	159
25	A	Çatlamayan	157

İki grup arasında kıyaslama yapıldığında çatlamayan sacların sertliğinin çatlayan saclara oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir fakat çatlama davranışı ile sertlik arasında lineer bir ilişki kurulamamıştır.

6. GENEL SONUÇLAR

Ferritik paslanmaz çelikler başta beyaz eşya sektörü olmak üzere endüstride birçok alanda hem oksidasyon ve korozyon dirençlerinin yüksek olmasından dolayı hem de paslanmaz çelikler arasında uygun maliyetli olduğu için tercih edilmektedir. Ferritik paslanmaz çelik grubunun bir üyesi olan AISI 430 kalite paslanmaz çelikler genellikle derin çekme ve eğme uygulamalarında kullanılır. Çamaşır makinesi tambur parçası üretiminde de bu sebeple tercih edilir. Rulo sac, tambur üretim prosesi aşamalarında eğme ve delik delme gibi birçok mekanik işleme maruz kalır. Bu çalışmada tambur çevre sacının yuvarlanıp perçin prosesi ile birleştirilmesi esnasında kenet bölgelerindeki çatlak oluşumu incelenmiştir. Tambur üretiminde kullanılan AISI 430 kalite paslanmaz çeliğin şekillendirilebilirlik özelliğine etki edebilecek parametreler sistematik olarak incelenip yapılan deneysel çalışmalarla probleme neden olabilecek etmenler belirlenmiştir. Çalışmada üretim esnasında çatlayan ve çatlamayan rulolar gruplandırılıp incelenmiştir.

Oluşturulan deney tasarımında öncelikli olarak mekanik değerler incelenmiştir. İki farklı tedarikçiden tedarik edilen on bir adet çatlamayan ve on adet çatlayan rulodan her rulo için üçer adet numune hazırlanıp çekme test sonuçların ortalama değerleri Minitab istatistiksel analiz programında girdi verisi olarak kullanılmıştır. Amaç bu problemde malzeme karakteristiğinde hangi mekanik parametrelerin etkili olduğunun tespit edilmesidir. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda malzemenin akma ve çekme dayanımı arasındaki ilişkinin çatlama problemine direkt etkisi olduğu tespit edilmiştir. Her tedarikçi için muhtemel çatlama problemi görülmeyecek akma ve çekme dayanımı aralıkları kontur grafikleri ile belirlenmiştir. B tedarikçisinden temin edilen paslanmaz sac rulonun güvenli çalışma alanı A tedarikçisinden daha geniştir. Kopma uzaması değerleri iki grup arasında kıyaslandığında çatlayan saclarda bu değerin çatlamayanlara nazaran daha az olduğu fakat çatlama problemine direkt etki eden bir parametre olmadığı tespit edilmiştir. İstatistiksel çalışmanın son kısmı olarak da regresyon analizi gerçekleştirilerek, malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı, şekillendirilebilirliği ve sertliğinin yanında üretim prosesindeki kalıpların etkisi de

incelenmiş ve kalıp kaynaklı etmenlerin de olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonuçları dikkate alınarak kalıplarda iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. İstatistiksel analiz kısmı, hangi parametrelerin etki edebileceğini göstererek araştırmanın sonraki safhalarına ışık tutmuştur. Devamında malzemelere kademeli çekme testi uygulanarak deformasyon sertleşmesi üssü ve anizotropi katsayıları hesaplanmış ve çatlama problemi ile aralarında ilişki olup olmadığı araştırılmıştır. Dikey anizotropi katsayısı çatlama davranışı göstermeyen saclarda daha düşükken çatlama davranışı gösteren saclarda daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Düzlemsel anizotropi değerleri karşılaştırıldığında çatlayan ve çatlamayan saclar arasında önemli bir fark tespit edilmemiştir.

Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında çatlama davranışı gösteren ve göstermeyen paslanmaz sacların mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı iki tedarikçiden iki adet çatlayan ve iki adet çatlamayan olmak üzere toplamda dört adet paslanmaz sac mikroyapısı incelenmiştir. Çatlayan numunelerde yapının orta bölümünde daha büyük taneler mevcutken kenar bölgelerde daha ince taneli bir yapı tespit edilmiştir. Çatlayan numunelerde eş eksenli bir tane yapısı yoktur. Bunun yanı sıra çatlayan numunelerde hadde yönüne bağlı deformasyon izleri tespit edilmiştir. Çatlayan numunelerde mikroyapı içinde çökelti fazları tespit edilmiştir. Yapılan tane boyutu ölçümlerinde de çatlayan sacların tane boyutlarının çatlamayan saclara kıyasla daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmanın sonraki aşamasında kesme yüzeylerinin yapısı incelenmiş ve kayma yüzeyi ile kırılma yüzeyi oranı analiz edilmiştir. Bütün saclarda kırılma yüzey oranı kayma yüzey oranından daha yüksek bulunmuştur fakat çatlayan saclarda bu oranın çatlamayan saclara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Son olarak numunelere Erichsen çökertme testi ve sertlik deneyleri yapılmıştır. Erichsen derinliği değerleri çatlayan saclarda daha düşük iken çatlamayan saclarda daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (% 9). Sertlik ölçümlerinde çatlayan numunelerin sertliği çatlamayan numunelere kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür (% 8).

KAYNAKLAR

[1] Tanure, L.P. de A. R., Alcântara, C.M. de, Oliveira, T.R. de, Santos, D.B., & Gonzalez, B.M. (2017). Microstructure, Texture and Microhardness Evolution during Annealing Heat Treatment and Mechanical Behavior of the Niobium-Stabilized Ferritic Stainless Steel ASTM 430 and Niobium-Titanium-Stabilized Ferritic Stainless Steel ASTM 439: a Comparative Study. *Materials Research, 20*(6), 1650–1657. doi:10.1590/1980-5373-mr-2017-0568

[2] Ahn, B.R., & Kim, N.J. (1998). Analysis and prevention of cracking phenomena during bending of cold-rolled 430 stainless steel. *Journal of Materials Science Letters, 17*(7), 573-576. doi: 10.1023/ a:1006577721705

[3] Kanbollu, S., (1996). *Östenitik Krom* Nikelli Paslanmaz *Çeliklerin Kaynak Özellikleri* (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] Fu, Z., (2017). *A study of static strain aging of selected ferritic steels* (Master's thesis). Tampere University of Technology, Faculty of Engineering Sciences, Tampereen yliopisto.

[5] Odabaş, C. (2004). *Paslanmaz çelikler, temel özellikleri, kullanım alanları, kaynak yöntemleri*. Askaynak, İstanbul.

[6] Vitos,L., Korzhavyi, P. & Johansson, B. (2003). *Stainless steel optimization from quantum mechanical calculations.* Nature Mater 2, 25–28 (2003) doi:10.1038/nmat790

[7] Streicher, M.A (2013).*The Role of Carbon, Nitrogen, and Heat Treatment in the Dissolution of Iron-Chromium Alloys in Acids, CORROSION*. 1973;29(9):337

[8] Truman, Je (1976). *Stainless steels. In: Schreir LL (ed) Corrosion, 2nd ed., vol. 1: Metal/environment reactions*, Newnes-Butterworths, London and Boston.

[9] Lo, K.H., Shek, C.H., Lai, J.K.L. (2009). *Recent developments in stainless steels*, Materials Science and Engineering, 65, 39-104.

[12] Tikhovskiy, I., Raabe, D., & Roters, F. (2008). Simulation of earing of a %17 Cr stainless steel. *Materials Science and Engineering A 488* (2008) 482–490. doi:10.1016/j.msea.2007.11.063

[13] Raabe, D., & Lüucke, K. (1993). Textures of ferritic stainless steels. *Materials Science and Technology 9*(4), 30-312. doi:10.1179/mst.1993.9.4.302

[14] Dubiel, S.M., & Cieślak, J. (2011). Sigma-Phase in Fe-Cr and Fe-V Alloy Systems and its Physical Properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 36*(4), 191–208. doi:10.1080/ 10408436.2011. 589232

[15] Seiotovirta, M. (2013). Handbook of Stainless Steel, Espoo, Finland: Outokumpu Oyj.

[16] McGuire, M.F. (2008).Ferritic Stainless Steels , *Stainless Steel for Design Engineers (pp.109-122)*, Materials Park, Ohio: ASM Internationa.

[17] Menthe, E.& Rie, T. (1999). Further investigation of the structure and properties of austenitic stainless steel after plasma nitriding, *Surface and Coating Technology, 116–119* (1999) 199–204.

[18] Ryan, M.P., Williams,D.E., Chater,R.J.,Hutton, B.M. & McPhail, D. (2002). Why Stainless Steel Corrodes, *Nature, 14-415*(6873) 770-4 doi: 10.1038/415770a

[19] Sun, Y., Bell, T., Wood, G. (1994). Wear behavior of plasma-nitrided martensitic stainless steel, *Surface and Coating Technology, 163 –164* (2003) 380–3854

[20] Gürkan, M. (2007). *Ostenitik ve martensitik paslanmaz çeliklerin yüksek sıcakılık aşınma davranışları* (yüksek lisans tezi), Afyon Kocatepe Üniversitesi.

[21] Liu, Y., Ye, D., Yong, Q., Su, J., Zhao, K., & Jiang, W. (2011). Effect of Heat Treatment on Microstructure and Property of Cr13 Super Martensitic Stainless *Steel. Journal of Iron and Steel Research International*, *18*(11), 60–66. doi:10.1016/s1006-706x (11)60118-0

[22] Pohl, M., Storz, O., & Glogowski, T. (2007). Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. *Materials Characterization,58*(1), 65–71. doi:10.1016/ j. matchar.2006.03.015

[23] Facchini, L., Vicente, N., Lonardelli, I., Magalini, E., Robotti, P., & Molinari, A. (2010). Metastable Austenite in 17-4 Precipitation-Hardening Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting. *Advance Engineering Materials, 12*(3), 184-188. doi:10.1002/adem.200900259

[24] Gordon, W., & van Bennekom, A. (1996). Review of stabilisation of ferritic stainless steels. *Materials Science and Technology, 12*(2), 126–131. doi:10.1179/mst.1996.12.2.126

[25] Zhang, X., Fan, L., Xu, Y., Li, J., Xiao, X., & Jiang, L. (2015). Effect of aluminum on microstructure, mechanical properties and pitting corrosion resistance of ultra-pure 429 ferritic stainless steels. *Materials & Design (1980-2015), 65*, 682-689. doi:10.1016/j.matdes.2014.09.074

[26] Chao, H.-C. (1978). Mechanism of anisotropic lamellar fractures. *Metallurgical Transactions A, 9(4), 509–514. doi:10.1007/bf02646407*

[27] <URL-1> https://www.aperam.com/sites/default/files/documents / 2018-07/ Manufacturing%20Process%20Gobal_en.pdf, erişim tarihi: 11.03.2020.

[28] Grassino, J., Vedani, M., Vimercati, G., & Zanella, G. (2012). Effect of skin pass rolling parameters on mechanical properties of steels. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 429 ferritic stainless steels.*13*(11), 2017-2026, . doi: 10.1007/s12541-012-0266-1

[29] Alvarez De Sotomayor, A., & Herrera, E.J. (1994). Permanent elimination of the yield-point phenomenon in AISI 430 stainless steel by skin-pass rolling fect of skin pass rolling parameters on mechanical properties of steels. *International Journal of Materials Science, 29*(22), 5833–5838. doi:10.1007/bf00366864

[30] Paton, R. (1994). Influence of aluminium and thermomechanical treatment on formability and mechanical properties of type 430 *Materials Science and Technology, 10*(7), 604–613. doi:10.1179/mst.1994.10.7.604

[31] Nitche, A. (2005). *U.S. Patent No. 6,935,143 B2.* Berlin, Germany: U.S. Patent and Trademark Office.

[32] Rans, C., Straznicky, P. V., & Alderliesten, R. (2007). Riveting Process Induced Residual Stresses Around Solid Rivets in Mechanical Joints. *Journal of Aircraft, 44*(1), 323–329. doi:10.2514/1.23684

[33] Jiang, Z., Li, S., & Li, Y. (2011). Thermodynamic Calculation of Inclusion Formation in Mg-Al-Si-O System of 430 Stainless Steel Melts. *Journal of Iron and Steel Research, International, 18*(2), 14–17. doi:10.1016/s1006-706x (11)60017-4

[34] Ahn, B.R. (1998). Anlysis and Prevention of Cracking Phenomena Durin Bending of Colled-rolled 430 Stainless Steel, *Journal of Materials Science Letters, 17,* 572-576

[35] Aran, A. ve Temel M.A. (2003). Paslanmaz Çelik Yası Mamuller, Sarıtaş Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, 165 s.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Asude BALAKAN

Doğum Tarihi ve Yeri **:** İstanbul-12.09.1991

E-posta **:** balakanasude@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yükseklisans** **:** 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Eylül 2018-Halen: BSH Ev Aletleri San. Tic. A.Ş. Çamaşır Makinesi Fabrikası, Tedarikçi Kalite Mühendisi.
- Eylül 2017- Eylül 2018: BSH Ev Aletleri San. Tic. A.Ş. , Soğutucu Fabrikası, Tedarikçi Kalite Yüksek Lisans Proje Öğrencisi.