

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YENİ NESİL MİKRO ALAŞIMLI ÇELİK KOMPOZİSYONU  
GELİŞTİRİLMESİ VE PROTOTİP ÜRETİM PROSESİ TASARIMI**

**Fulya EYÇİN**

**Danışman  
Doç. Dr. Osman ÇULHA**



**MANİSA-2019**

## TEZ ONAYI

Fulya EYÇİN tarafından hazırlanan " **Yeni nesil mikro alaşımlı çelik kompozisyonu geliştirilmesi ve prototip üretim prosesi tasarımı** "adlı tez çalışması 23/08/2019 aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**

**Doc. Dr. Osman ÇULHA**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Doc. Dr. Hülya DURMUŞ**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Dr.Öğr. Üyesi Metin YURDDAŞKAL**  
Dokuz Eylül Üniversitesi



## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Fulya EYÇİN**



**İÇİNDEKİLER**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ .....	IX
ÖZET.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
2. GENEL BİLGİLER .....	3
2.1. Kardan mili çalışma sistemi.....	3
2.2. Kardan Mili.....	3
2.3. Malzeme ve Gelişim süreçleri .....	4
2.4. Termomekanik işlemler .....	18
2.5. Demir Karbon Denge Diyagramı Sıcaklık Aralıkları .....	23
2.6. Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Çelikler.....	25
2.7. Mikro Alaşımli Çeliklerde Sertleştirme Mekanizmaları .....	26
2.8. Alaşım Elementlerinin Etkisi.....	27
2.9. Dönüşüm Davranışına Etki Edilmesi .....	33
2.10. Çökelti Oluşumu.....	33
2.11. Kritik Soğuma Hızı.....	34
2.11.1. Ferrit ( $\alpha$ -demir): .....	35
2.11.2. Sementit ( $Fe_3C$ ).....	35
2.11.3. Perlit.....	36
2.11.4. Östenit ( $\gamma$ -demir).....	36
2.11.5. Martenzit.....	37
2.11.6. Beynit:.....	38
2.11.7. Ledeburit.....	38
2.2.3. Metal Şekillendirme simülasyonu .....	39
3.SİMÜLASYON DESTEKLİ ANALİZ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	42
3.1.Mevcut Durum Çalışmaları .....	42
3.2. Numune Hazırlama.....	42
3.3. Spektrometre ile Kimyasal Kompozisyonun Belirlenmesi.....	42
3.4. Mevcut Durum Mikro Yapı İncelemeleri .....	43
3.4.1. Mikroyapı ve Sertlik (1141M – 1.1141 – Çelik Bar) .....	43



3.4.2. Mikroyapı ve Sertlik (C45E – 1.1191 – Çelik Bar).....	44
3.4.3. Mikroyapı ve Sertlik (C45E – 1.1191 – Dövülmüş Çatalı Flanşh) .....	44
3.4.4. Mikroyapı ve Sertlik (41Cr4 – 1.7035 – Dövme Parça).....	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	46
4.1. Mevcut Durum Simülasyon Destekli Mekanik Özellik Kontrolleri.....	46
4.1.1. 1141M Dövme Simülasyonları.....	46
4.2. Malzeme Kimyasal Kompozisyonunun Belirlenmesi .....	61
4.3 1. Alaşım Dövme Simülasyonları.....	63
4.3 2. Alaşım Dövme Simülasyonları.....	67
4.3 3. Alaşım Dövme Simülasyonları;.....	72
4.3 4. Alaşım Dövme Simülasyonları;.....	78
4.3 5. Alaşım Dövme Simülasyonları;.....	83
5.SONUÇ VE ÖNERİLER .....	88
KAYNAKLAR .....	90
ÖZGEÇMİŞ .....	92

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\gamma$	Demirin gama fazı
$\gamma_K$	Dönüşmüş yüksek
$\gamma_Y$	Deoksiribonükleik asit
$\alpha$	Demirin alfa fazı
$M_d$	Martenzit başlangıç sıcaklığı
$M_s$	Martenzit bitiş sıcaklığı
$M$	Şekil değiştirmeyele östenitten dönüşen martenzit fazı
$HV$	Vickers sertliği
<b>C</b>	Karbon
<b>Mn</b>	Mangan
<b>Si</b>	Silisyum
<b>P</b>	Fosfor
<b>S</b>	Kükürt
<b>Cr</b>	Krom
<b>Ni</b>	Nikel
<b>Mo</b>	Molibden
<b>Co</b>	Kobalt
<b>W</b>	Wolfram
<b>Ti</b>	Titanyum
<b>Sn</b>	Kalay
<b>Cu</b>	Bakır
<b>Pb</b>	Kurşun
<b>N</b>	Azot

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2. 1. Tork Akış Şeması .....	3
Şekil 2. 2. Araçların farklı bölümlerinde kullanılan çeliklere ait sınıflandırma .....	5
Şekil 2. 3. a) Hafif ticari araçlarda kullanılan çelik parçalar ve kaliteleri, b) Ağır ticari araçlardaki kritik çelik parça ve ekipmanlar .....	6
Şekil 2. 4 Kardan Mili.....	6
Şekil 2. 5. Ülkelere göre değişim gösteren Karbon emisyon değerlerinin yıl bazında değişimleri ve hedefleri ) .....	7
Şekil 2. 6. Çift fazlı çeliklerin genel mikroyapısı (koyu renkli bölgeler martenzit, açık renkli bölgeler ferrit fazını temsil etmektedir.) .....	9
Şekil 2. 7. Düşük alaşımlı yüksek mukavemetli HSLA 350/450 çeliği ile benzer akma mukavemetine sahip DP 350/600 çeliği akma eğrisi karşılaştırması ve b) DP çeliklerinin kendi içinde akma eğrisi karşılaştırması .....	9
Şekil 2. 8. a) TRIP çeliğinin mikroyapısı ve b) DP, HSLA ve TRIP karşılaştırması	12
Şekil 2. 9. TRIP çeliklerinin termomekanik ısıl işlemi esnasındaki faz durumları ...	13
Şekil 2. 10. TRIP çeliklerinin üretim şemaları a) Levha üretim şeması, b) Sıcak şerit-bant üretim şeması.....	13
Şekil 2. 11. a) TWIP çeliğinin tavlanmış mikroyapısı ve b) akma eğrileri .....	15
Şekil 2. 12. a) Kütük sürekli dökümü ve b) haddeleme işle üretimde meydana gelen yapısal değişimler, c) Şekillendirme sırasında deformasyon ve sıcaklık uygulamaları sonucunda farklı ortamlarda soğumaya maruz bırakılan çeliklerin yapısal dönüşümleri.....	17
Şekil 2. 13. Sıcaklık, deformasyonu ve soğuma süreçleri ile mikroyapı ilişkisi .....	22
Şekil 2. 14. Fe-C Denge diyagramı.....	24
Şekil 2. 15. Döküm yapısının haddeleme sıcaklığına bağlı metalurjik değişimleri... 24	24
Şekil 2. 16. Sıcak Haddelemede Sıcaklık Ve Mikro Yapı Değişimi .....	24
Şekil 2. 17. Mikro alaşımlı çelikler.....	25
Şekil 2. 18. Yeniden kristallenme .....	26
Şekil 2. 19. Mikro alaşım elementlerinin tane boyutuna etkisi.....	33
Şekil 2. 20. Çökelti Oluşumu .....	34
Şekil 2. 21. Kritik Soğuma Hızı.....	35
Şekil 2. 22. Ferrit yapısı.....	35
Şekil 2. 23. Sementit yapısı.....	36
Şekil 2. 24. Perlit Yapısı .....	36
Şekil 2. 25. Östenit Yapısı .....	37
Şekil 2. 26. Martenzit Yapı .....	37
Şekil 2. 27. Fe – Fe <sub>3</sub> C Denge Diyagramında Ledeburit.....	38
Şekil 2. 28.F e-Fe <sub>3</sub> C Denge Diyagramının Çeliğe Ait Kısmı ve Soğuma Sırasında Oluşan İç Yapılar .....	39
Şekil 3. 1. Numune Hazırlama .....	42
Şekil 3. 2. 1141M 10x , 20x ve 50x yaklaşım ile mikroyapı incelemeleri .....	43

Şekil 3. 3. Tane Boyutu .....	43
Şekil 3. 4. 1141M 10x ve 20x yaklaşım ile mikroyapı incelemeleri .....	44
Şekil 3. 5. 1141M Tane Boyutu .....	44
Şekil 3. 6. C45E 10x , 20x ve 50x yaklaşım ile mikroyapı incelemeleri.....	44
Şekil 3. 7. C45E Tane Boyutu .....	44
Şekil 3. 8. Sıcak dövülmüş C45E 10x , 20x ve 50x yaklaşım ile mikroyapı incelemeleri .....	45
Şekil 3. 9. 41Cr4 10x ve 50x yaklaşım ile mikroyapı incelemesi.....	45
Şekil 4. 1. 1141M Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress ....	46
Şekil 4. 2. 1141M Ön Şekillendirme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi.....	47
Şekil 4. 3. 1141M Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress ....	47
Şekil 4. 4. 1141M Dövme 1 Effective Plastic Strain .....	47
Şekil 4. 5. 1141M Dövme 1 Effective Stress.....	48
Şekil 4. 6. 1141M Dövme 1 Yield Stress .....	48
Şekil 4. 7. 1141M Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	48
Şekil 4. 8. 1141M Dövme 2 Effective Plastic Strain .....	48
Şekil 4. 9. 1141M Dövme 2 Effective Stress.....	49
Şekil 4. 10. 1141M Dövme 2 Yield Stress.....	49
Şekil 4. 11. 1141M Dövme 2 Kuvvet- Deplasman Eğrisi .....	49
Şekil 4. 12. 1141M Son Şekillendirme Effective Plastic Strain .....	49
Şekil 4. 13. 1141M Son Şekillendirme Effective Stress.....	50
Şekil 4. 14. 1141M Son Şekillendirme Yield Stress.....	50
Şekil 4. 15. 1141M Son Şekillendirme Kuvvet- Deplasman Eğrisi .....	50
Şekil 4. 16. 1141M Soğuma Simülasyonu.....	51
Şekil 4. 17. C45E Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress.....	51
Şekil 4. 18. C45E Ön Şekillendirme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi .....	52
Şekil 4. 19. 1141M Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress ..	52
Şekil 4. 20. C45E Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	52
Şekil 4. 21. C45E Dövme 1 Effective Plastic Strain.....	52
Şekil 4. 22. C45E Dövme 1 Effective Stress .....	53
Şekil 4. 23. C45E Dövme 1 Yield Stress .....	53
Şekil 4. 24. C45E Dövme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi.....	53
Şekil 4. 25. C45E Dövme 2 Effective Plastic Strain.....	53
Şekil 4. 26. C45E Dövme 2 Effective Stress .....	54
Şekil 4. 27. C45E Dövme 2 Yield Stress .....	54
Şekil 4. 28. C45E Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi.....	54
Şekil 4. 29. C45E Son Şekillendirme Effective Plastic Strain.....	54
Şekil 4. 30. C45E Son Şekillendirme Effective Stress .....	55
Şekil 4. 31. C45E Son Şekillendirme Yield Stres.....	55
Şekil 4. 32. C45E Son Şekillendirme Kuvvet- Deplasman Eğrisi.....	55
Şekil 4. 33. C45E Soğuma Simülasyonu .....	56

Şekil 4. 34. 41Cr4 Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress....	56
Şekil 4. 35. 41Cr4 Ön Şekillendirme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi .....	57
Şekil 4. 36. 41Cr4 Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress....	57
Şekil 4. 37. 41Cr4 Ön Şekillendirme 2 Kuvvet- Deplasman Eğrisi .....	57
Şekil 4. 38. 41Cr4 Dövme 1 Effective Plastic Strain.....	57
Şekil 4. 39. 41Cr4 Dövme 1 Effective Stress .....	58
Şekil 4. 40. 41Cr4 Dövme 1 Yield Stress .....	58
Şekil 4. 41. 41Cr4 Dövme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi.....	58
Şekil 4. 42. 41Cr4 Dövme 2 Effective Plastic Strain.....	58
Şekil 4. 43. 41Cr4 Dövme 2 Effective Stress .....	58
Şekil 4. 44. 41Cr4 Dövme 2 Yield Stress .....	59
Şekil 4. 45. 41Cr4 Dövme 2 Kuvvet- Deplasman Eğrisi.....	59
Şekil 4. 46. 41Cr4 Son Şekillendirme Effective Plastic Strain.....	59
Şekil 4. 47. 41Cr4 Son Şekillendirme Effective Stress .....	59
Şekil 4. 48. 41Cr4 Son Şekillendirme Yield Stress .....	60
Şekil 4. 49. 41Cr4 Soğuma Simülasyonu .....	60
Şekil 4. 50. 1. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain.....	63
Şekil 4. 51. 1. Alaşım Ezme1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi.....	63
Şekil 4. 52. 1. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain.....	63
Şekil 4. 53. 1. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi.....	64
Şekil 4. 54. 1. Alaşım Dövme 1 Effective Plastic Strain .....	64
Şekil 4. 55. 1. Alaşım Dövme 1 Effective Stress.....	64
Şekil 4. 56. 1. Alaşım Dövme 1 Yield Stress.....	64
Şekil 4. 57. 1. Alaşım Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	65
Şekil 4. 58. 1. Alaşım Dövme 2 Effective Plastic Strain .....	65
Şekil 4. 59. 1. Alaşım Dövme 2 Effective Stress.....	65
Şekil 4. 60. 1. Alaşım Dövme 2 Yield Stress.....	65
Şekil 4. 61. 1. Alaşım Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	66
Şekil 4. 62. Son Şekillendirme Effective Plastic Strain / Effective Stress .....	66
Şekil 4. 63. 1. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet- Deplasman Eğrisi .....	66
Şekil 4. 64. 1. Alaşım Soğuma Simülasyonu.....	67
Şekil 4. 65. 2. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain.....	67
Şekil 4. 66. 2. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi.....	68
Şekil 4. 67. 2. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain.....	68
Şekil 4. 68. 2. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi.....	68
Şekil 4. 69. 2. Alaşım Dövme 1 Effective Plastic Strain .....	69
Şekil 4. 70. 2. Alaşım Dövme 1 Effective Stress.....	69
Şekil 4. 71. 2. Alaşım Dövme 1 Yield Stress.....	69
Şekil 4. 72. 2. Alaşım Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	69
Şekil 4. 73. 2. Alaşım Dövme 2 Effective Plastic Strain .....	70
Şekil 4. 74. 2. Alaşım Dövme 2 Effective Stress.....	70

Şekil 4. 75. 2. Alaşım Dövme 2 Yield Stress.....	70
Şekil 4. 76. 2. Alaşım Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	70
Şekil 4. 77. 2. Alaşım Son Şekillendirme Effective Plastic Strain .....	70
Şekil 4. 78. 2. Alaşım Son Şekillendirme Effective Stress.....	71
Şekil 4. 79. 2. Alaşım Son Şekillendirme Yield Stress.....	71
Şekil 4. 80. 2. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	71
Şekil 4. 81. 2. Alaşım Soğuma Simülasyonu.....	72
Şekil 4. 82. 3. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain.....	72
Şekil 4. 83. 3. Alaşım Ezme1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	73
Şekil 4. 84. 3. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain.....	73
Şekil 4. 85. 3. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi.....	73
Şekil 4. 86. 3. Alaşım Dövme 1 Effective Plastic Strain .....	74
Şekil 4. 87. 3. Alaşım Dövme 1 Effective Stress.....	74
Şekil 4. 88. 3. Alaşım Dövme 1 Yield Stress.....	74
Şekil 4. 89. 3. Alaşım Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	74
Şekil 4. 90. 3. Alaşım Dövme 2 Effective Plastic Strain .....	75
Şekil 4. 91. 3. Alaşım Dövme 2 Effective Stress.....	75
Şekil 4. 92. 3. Alaşım Dövme 2 Yield Stress.....	75
Şekil 4. 93. 3. Alaşım Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	75
Şekil 4. 94. 3. Alaşım Son Şekillendirme Effective Plastic Strain .....	76
Şekil 4. 95. 3. Alaşım Son Şekillendirme Effective Stress .....	76
Şekil 4. 96. 3. Alaşım Son Şekillendirme Yield Stress.....	76
Şekil 4. 97. 3. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	77
Şekil 4. 98. 3. Alaşım Soğuma Simülasyonu.....	77
Şekil 4. 99. 4. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain.....	78
Şekil 4. 100. 4. Alaşım Ezme1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	78
Şekil 4. 101. 4. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain .....	78
Şekil 4. 102. 4. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi.....	79
Şekil 4. 103. 4. Alaşım Dövme 1 Effective Plastic Strain .....	79
Şekil 4. 104. 4. Alaşım Dövme 1 Effective Stress.....	79
Şekil 4. 105. 4. Alaşım Dövme 1 Yield Stress.....	79
Şekil 4. 106. 4. Alaşım Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	80
Şekil 4. 107. 4. Alaşım Dövme 2 Effective Plastic Strain .....	80
Şekil 4. 108. 4. Alaşım Dövme 2 Effective Stress.....	80
Şekil 4. 109. 4. Alaşım Dövme 2 Yield Stress.....	80
Şekil 4. 110. 4. Alaşım Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	81
Şekil 4. 111. 4. Alaşım Son Şekillendirme Effective Plastic Strain .....	81
Şekil 4. 112. 4. Alaşım Son Şekillendirme Effective Stress.....	81
Şekil 4. 113. 4. Alaşım Son Şekillendirme Yield Stress.....	81
Şekil 4. 114. 4. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	82
Şekil 4. 115. 4. Alaşım Soğuma Simülasyonu.....	82

Şekil 4. 116. 5. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain .....	83
Şekil 4. 117. 5. Alaşım Ezme1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	83
Şekil 4. 118. 5. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain.....	83
Şekil 4. 119. 5. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi.....	84
Şekil 4. 120. 5. Alaşım Dövme 1 Effective Plastic Strain .....	84
Şekil 4. 121. 5. Alaşım Dövme 1 Effective Stress.....	84
Şekil 4. 122. 5. Alaşım Dövme 1 Yield Stress.....	84
Şekil 4. 123. 5. Alaşım Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	85
Şekil 4. 124. 5. Alaşım Dövme 2 Effective Plastic Strain .....	85
Şekil 4. 125. 5. Alaşım Dövme 2 Effective Stress.....	85
Şekil 4. 126. 5. Alaşım Dövme 2 Yield Stress.....	85
Şekil 4. 127. 5. Alaşım Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi .....	86
Şekil 4. 128. 5. Alaşım Son Şekillendirme Effective Plastic Strain .....	86
Şekil 4. 129. 5. Alaşım Son Şekillendirme Effective Stress.....	86
Şekil 4. 130. 5. Alaşım Son Şekillendirme Yield Stress.....	86
Şekil 4. 131 5. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet- Deplasman Eğrisi .....	87
Şekil 4. 132.5. Alaşım Soğuma Simülasyonu.....	87

## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 2.1.</b> Otomotiv çelikleri genel karşılaştırma tablosu .....	16
<b>Tablo 2.2.</b> Alaşım elementleri ve malzeme isimlendirmesi .....	16
<b>Tablo 2.3.</b> Alaşım Elementlerinin Etkisi .....	32
<b>Tablo 3.1.</b> Spektrometre ile kimyasal kompozisyonun incelenmesi .....	43
<b>Tablo 4.1.</b> Geliştirilen alaşım elementleri .....	62





## TEŐEKKÜR

Tez alıŐmalarımındaki katkıları, öneri ve görüşleri, değerli bilgileri ve manevi desteğiyle her zaman yanımda olan kıymetli hocam Doç. Dr. Osman ÇULHA baŐta olmak üzere çalıŐmalarım boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Tirsan Kardan San. Tic. A.Ő ailesine, Simülasyon alıŐmalarımında katkıları, bilgi ve destekleri için Serhat Badakı'ya teŐekkürü borç bilirim.

alıŐmalarımındaki maddi manevi desteğiyle her zaman yanımda olan eŐim Serkan Eyin'e ve motivasyonumu arttıran oğlum Uzay Eyin'e, 218-138 nolu BAP projesi ile yüksek lisans çalıŐmasına maddi katkıda bulunan Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinatörlüęüne teŐekkür ederim.

Fulya EYİN  
Manisa, 2019

## ÖZET

### Yüksek Lisans

### Yeni Nesil Mikro Alaşımli Çelik Kompozisyonu Geliştirilmesi Ve Prototip Üretim Prosesi Tasarımı

Fulya EYÇİN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Osman ÇULHA

Bu tez de yüksek mukavemetli kardan mili üretimi için çelik alaşımı seçimi, geliştirilmesi ve bu hammadde ile yenilikçi dövme projesi tasarlanması hedeflenmektedir. Hammadde seçimi ve geliştirilmesi kapsamında karbür-nitrür yapıcı çelik alaşım elementlerinin dövme prosesi ile birlikte mamul mekanik özelliklerini geliştirme kabiliyetleri, simülasyon destekli olarak araştırılmıştır. Metal şekillendirme prosesleri ile üretilen ürün özellikleri; hammadde özellikleri, deformasyon öncesi tavlama, dövme operasyonları sayısı, deformasyon oranı ve sıcaklığı, sürtünme ve soğutma şartlarından etkilenmektedir. Farklı değişkenlerin etkisini birlikte analiz edilen bu projede; i) geliştirilen çelik alaşım kompozisyonlarına ait termal, mekanik ve metalurjik özelliklerin sayısal hale getirilmesi ve indekslenmesi, ii) sonlu eleman-hacim yöntemi ile dövme ve soğutma prosesi tasarımı, iii) sayısal verilerin işlenmesi sonucunda üstün mekanik özellikler elde edilen kombinasyonlar elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında; Alaşım elementi seçimi ve alaşım dizaynı gerçekleştirilmiş C, N, Si, Mn, Al, V, Ti, Nb ve Cr elementlerinden mikro alaşım katkısı olan Al, Ti, V ve Nb elementlerinin (toplamda maksimum % 0,22, örnek kaliteler ise S480W, S600, S600MC, S700 MC levha) arayer atomları olan C ve N ile oluşturdukları karbür ve nitrürlerin, östenit fazı içindeki çözünürlükleri, dizayn edilen kompozisyon bazında dinamik yeniden kristalleşme sıcaklığı, deformasyon oranı ve sıcaklık ile çökeltilerin oluşturduğu süreçlerin fiziksel metalurji ile açıklanması, tane inceltme mekanizması, kontrollü soğutma tasarımı ve oluşturulan kompozisyona ait TTT ve CCT diyagramları belirlenmiştir. % deformasyon oranları %5-70 arasında değişen, sıcaklıkların ise alaşım kompozisyonuna göre son

deformasyonun östenitin yeniden kristalleşme olmadığı sıcaklık aralığında (bu sıcaklık C, Ti, Al, Si, Nb ve V elementlerinden etkilenmektedir.) gerçekleştiği termomekanik işlemdir. Soğuma sonrası deformasyon östenit yapısının ince taneli ferrit perlit yapısında olmasına neden olur. Son dövme işlemi östenitin ferrite dönüşüme başladığı sıcaklığın az üstünde verilmektedir. Bu noktada üretilen sanal malzeme özellikleri deposu esasında termomekanik ve kontrollü şekillendirme süreçleri farklı deformasyon oranları ve sıcaklıklarında (faz bölgesinde) yapılmıştır. Simüle edilen dövme proseslerinden sonra, alaşım TTT-CCT esasında hava, hızlandırılmış hava (Accelerated air cooling), su+hava, su sprej ortamındaki farklı ısı transfer katsayılarının ürün mikro yapısında ortaya çıkardığı etkiler analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sıcak Dövme, Simülasyon Destekli Dövme Tasarımı, Simülasyon Destekli Malzeme Datası Tasarımı, Mikro Alaşımli Çelik, Dövme Tasarımı, Sonlu Eleman-Hacimler Metodu

**2019, 108 sayfa**

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **Development of New Generation Micro Alloy Steel Composition and Production Process Design of Prototype**

**Fulya EYÇİN**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Metallurgy and Materials Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman ÇULHA**

With this project, it is aimed to select and develop steel alloy, and design innovative forging process with this raw material for high strength cardan shaft production. Within the scope of raw material selection and development, the ability of the carbide-nitride-forming steel alloying elements to improve the mechanical properties of the product together with the forging process were investigated with the support of simulation. Product characteristics produced by metal forming processes are affected by raw material properties, pre-deformation annealing, number of forging operations, deformation rate and temperature, friction and cooling conditions.

In this project, the effects of different variables were analyzed together; i) Digitalization and indexing of thermal, mechanical and metallurgical properties of the steel alloy compositions developed, ii) forging with finite element-volume method, and cooling process design, iii) As a result of the processing of numerical data, combinations with superior mechanical properties were obtained.

As a result of the project, the selection of alloy elements and alloy design have been carried out C, N, Si, Mn, Al, V, Ti, Nb and Cr elements of the micro-alloy elements of the Al, Ti, V and Nb elements (in total a maximum of 0.22%, sample qualities S480W, S600, S600MC, S700 MC plates) C and N and the carbides and nitrides, which are formed by atoms, the austenite phase, the solubility of the designed composition based on the dynamic recrystallisation temperature, deformation rate and temperature and the process of precipitation with the process of physical metallurgy, grain refinement mechanism, controlled cooling design and TTT and CCT diagrams of the composition were determined.

This process is a thermomechanical process where the deformation rates vary between 5-70% and the temperatures are realized in the temperature range ( this temperature affects by C, Ti, Al, Si, Nb and V elements) where austenite is not recrystallized according to the alloy composition. Deformation after cooling process causes the austenite structure to be of fine-grained ferrite and perlite structure. The final cutting depth process is given a little more than the temperature at which the austenite is beginning to transform to the ferrite. At this point, the thermomechanical and controlled forming processes based on the virtual material properties store were made at different deformation rates and temperatures (in the phase region). After simulated forging processes, the effects of different heat transfer coefficients in air, accelerated air cooling, water + air, water-spray environment on the basis of alloy TTT-CCT were analyzed.

**Keywords:** Hot forging, simulation aided forging desing , simulation aided materials data design, micro-alloyed steel, forging design, finite element-volumes method

**2019, 108 pages**

## 1. GİRİŞ

Otomotiv sektöründe 2023 yılında ihracatın 20 milyar dolardan 75 milyar dolara çıkarması hedefleniyor. Bu hedefe ulaşmak için, otomotiv sektörünün her yıl ihracatta yüzde 10'luk istikrarlı bir artış elde etmesi gerekiyor. Türkiye ve dünyadaki otomobil üretimi, nüfus ve refahla paralel olarak artmaktadır. 2011 yılında otomobil üretimi dünyasında 81 milyon seviyesinde gerçekleşirken Türkiyede 1.2 milyon adet üretim gerçekleşmiş olup dünyada 17. sırada yer almaktadır. Otomotiv endüstrisinin günümüzde karşılaştığı en önemli sınırlamalardan biri de emisyon değerleridir. Emisyon değerlerindeki bu sınırlamalar araçların toplam ağırlıklarındaki azaltma yönündeki Ar-Ge faaliyetlerini hızlandırmıştır.

Artık ülkemizde gelecek 10 yıl içinde otomotiv sektörü için üretilen çelik ürünlerin (mukavemet 600 MPa ya kadar) kullanımını azalacak hatta yok olacaktır. 2014 yılı Avrupa komisyonunun 2020 ve 2050 Avrupa’ında Metalurji başlıklı raporunda; çevre ve enerji verimliliğine dayalı çelik üretim yöntemleri ile üretilmiş, yüksek mukavemetli, hafif, korozyon direnci arttırılmış, kaynaklanabilirliği geliştirilmiş, kontrollü, termomekanik işlemler ile üretilen çeliklere ihtiyacın artacağı konusunda strateji ortaya konulmuştur.

Otomotiv endüstrisi, üretiminde kullanılacak girdi seçiminde güvenlik, fiyat , performans, üretimde kullanılabilirlik ölçütlerini göz önünde bulundurur. Bu nedenle çelik endüstrisi, güvenlik ve mukavemetden ödün vermeden daha hafif ve daha ince otomotiv çeliği üretimini hedeflemiştir. World Auto Steel tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, yedinci nesil Volkswagen Glofta kullanılan yüksek mukavemetli çelik gövde ile aracın ağırlığı öncesine göre 100 kg'a düşürülmüştür. Araçta kullanılan yüksek dayanımlı çelikler daha fazla güvenlik ve performans vaat ediyor. Dünya çelik endüstrisi, çelik ürünlerinin otomobil üretiminde konumunu korumak amacıyla, endüstrinin değişen ihtiyaçlarını karşılamak için çelik üretmek için yoğun bir şekilde çalışıyor.

Türkiye sanayi vizyonunu belirlemek amacıyla Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı öncülüğünde yürütülen çalışmalar ile Türkiye için uygulanacak stratejinin vizyonu “Orta ve yüksek teknolojili ürünlerde Avrasya’nın üretim üssü olmak” olarak belirlenmiştir. Bu uzun dönemli vizyon kapsamında 2011-2014 yıllarını kapsayan

Türkiye Sanayi Stratejisi'nin genel amacı, "Türk Sanayisinin rekabet edebilirliğinin ve verimliliğinin yükseltilerek, dünya ihracatından daha fazla pay alan, ağırlıklı olarak yüksek katma değerli ve ileri teknoloji ürünlerin üretildiği, nitelikli işgücüne sahip ve aynı zamanda çevreye ve topluma duyarlı bir sanayi yapısına dönüşümü hızlandırmak" olarak belirlenmiştir.

Bu amaç çerçevesinde, firmaların rekabet gücünü artıracak, kurumlar arasında koordinasyonu sağlayacak, işgücünün niteliğini yükseltecek, işletmelerin finansmana erişimini kolaylaştıracak, yenilikçilik kapasitelerini geliştirecek, girdi maliyetlerini düşürecek, çevreye duyarlılığını artıracak yatay politikalar uygulanmasına yönelik sektörel stratejilerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Yüksek Planlama Kurulu kararı ile kabul edilen **Demir-Çelik ve Demir Dışı Metaller Sektörü Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2012- 2016)**'nına uygun olarak yukarıdaki strateji, vizyon ve eylem planlarına uyumlu olarak proje kapsamında yeni nesil yüksek mukavemetli ve düşük maliyetli çelik geliştirilmesi hedeflenmektedir.

### **1.1. Tezin Amacı**

Tez çalışmasında, sayısal simülasyon ve hesaplamalı malzeme bilimi destekli yeni nesil çelik alaşımı ve dövme prosesi geliştirilmesi sonucunda hafif ve yüksek mukavemetli kardan mili tasarımı ve üretimini gerçekleştirmek hedeflenmektedir. Proje hedeflerinde belirtilen ürün mekanik özelliklerindeki artış; çelik alaşımının termal/mechanik özellikleri, deformasyon öncesi tavlama, dövme operasyonları sayısı, deformasyon oranı, sıcaklığı ve soğutma rejiminin birlikte tasarlanması ile mümkün olabilmektedir.

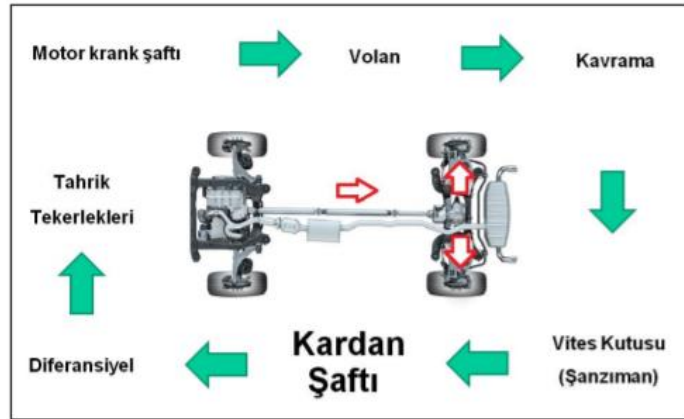
Hesaplamalı malzeme mühendisliğinin temel prensipleri baz alınarak karbür-nitrür ve/veya karbonitrür oluşumu gösteren alaşım elementlerinin çeşidi ve miktarının belirlenmesi, sayısal simülasyon yöntemi ile geliştirilen malzeme datası kullanılarak sıcak dövme ve soğutma rejimine bağlı son ürün mekanik özelliklerinin değişimi ortaya çıkarılmıştır. Bu süreçte eşlenik simülasyon uygulanarak çelik alaşımından son ürüne kadar üretim zinciri bilgisayar ortamında tasarlanmış elde edilen sonuçlar çelikten üretilen mevcut/yeni kardan mili tasarımlarının hafifleştirilmesinde kullanılması hedeflenmiştir.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Kardan mili çalışma sistemi (aktarma organları, malzeme ve proses geliştirme)

Aktarma organları sisteminin fonksiyonu, motorda üretilen ve vites kutusu aracılığıyla aktarılan torkun tahrik tekerleklerine iletilmesi işlemidir. Motor torkunun tahrik tekerleklerine iletilmesinde; vites kutusu, kardan mili ve diferansiyel gibi komponentler; aktarma organları sisteminin ana bileşenlerini oluşturur.

Arka aksdan tahrikli bir araç için; içten yanmalı motorda kimyasal enerjinin mekanik enerjiye çevrilmesi ile ortaya çıkan tork sırasıyla; krank mili, volan ve moment dönüştürücü olarak görev yapan vites kutusuna aktarılır. Vites kutusundaki her bir vites kademesine ait belirli bir çevrim oranı vardır. Araç hangi vites kademesindeyse, o vites çevrim oranı kadar artırılan motor torku, kardan şaftı aracılığıyla tahrik aksı üzerindeki diferansiyele iletilir. Diferansiyel tarafından son çevrim oranı kadar (FDR) daha artırılan tork, aks aracılığıyla tahrik tekerleklerine iletilmiş olur.



Şekil 2. 1. Tork Akış Şeması

### 2.2. Kardan Mili

Kardan mili temel görevi, motor tarafından üretilen devir ve torkun, vites kutusundan alınıp tahrik aksı üzerinde bulunan diferansiyele iletilmesidir. Kardan milleri araç üzerinde, vites kutusuyla diferansiyel arasına yerleştirilerek; araç konfigürasyonuna göre birden fazla akstan tahrikli ağır vasıtalarda (6x4, 8x4 gibi), arkadaki tahrik aksları üzerinde bulunan diferansiyeller arasına yerleştirilerek de tahrik iletimini sağlarlar. Aracın bozuk yüzey üzerinde seyrettiği durumlarda, aracın tahrik



aksları üzerindeki süspansiyon, yoldan gelen etkilere göre araç ekseni ve araç eksinine dik yönde aks hareketini sağlar. Bu hareketler doğrultusunda aks, bağlı olduğu diğer araç bileşenlerine baskı ya da darbe uygulamaz. Özellikle tahrik aksının, kardan mili aracılığıyla vites kutusuna eğilme momenti uygulamasını veya darbe kuvveti yoluyla aktarma organları sistemi üzerinde herhangi bir hasara sebebiyet vermesini engellemek gerekmektedir. Bu bakımdan kardan milleri açısız ve aksel hareket edebilme özellikleriyle, tahrik aksı hareketlerinin aktarma organları sistemi üzerinde oluşturabileceği olumsuz etkileri ortadan kaldırırlar.

Kardan milinin alt bileşenleri,

- Bağlantı flanşı,
- Kardan mili açısız hareket edebilmesini sağlayan U-tip kardan mafsalı
- Kardan mili aksel hareket kabiliyeti kazandıran kayıcı kısmı,
- Belirli bir et kalınlığına sahip boru,
- Gürültü ve titreşim sönümlenme maksatlı ses damperi.

Kardan mili tek parçalı olabileceği gibi araç şasi uzunluğuna ve aracın çekiş konfigürasyonuna göre çok parçalı olarak da tasarlanabilirler. Çok parçalı kardan milleri, literatürde ‘center bearing’ olarak anılan bir askı mekanizmasıyla taşıt şasi koluna bağlanır. Bu tip askı mekanizmalarının, kardan mili titreşimlerini şasiye iletmek amacıyla, izolasyon ve sönümlenme özellikleri vardır. Bu özelliklerini yapılarındaki vulkanize edilmiş kauçuk malzeme vasıtasıyla kazanırlar.

### **2.3. Malzeme ve Gelişim süreçleri**

Günümüzde otomotiv sektörünün yüz yüze kaldığı sorunlarda en önemlisi kullanılan taşıtlardan kaynaklanan çevre problemleridir. Fosil yakıt kullanımının azaltılması, taşıtlarda yolcu ve sürüş güvenliğinin artırılması ihtiyaç olmasından ziyade artık zorunluluk haline gelmiştir. Otomotiv endüstrisinin de amacı, yakıt tüketimini ve egzoz gazı salınımını azaltacak, bunu yaparken de şekillendirilebilirlik ve mukavemet özelliklerini koruyacak çelik malzemelerin üretimini sağlamaktır. Bu parametrelerin her biri üzerinde itina ile çalışılması gereken birer mühendislik problemidir. Bu problemleri çözüme kavuşturmak amacı ile geliştirilen yeni nesil

yüksek mukavemetli çelikler çift fazlı (DP), üç fazlı (TRIP) ve karmaşık fazlı (CP) çeliklerdir. Geliştirilmeye devam eden bu tür çelikler kullanıldığı araçlarda aynı zamanda güvenlik parametrelerinden de ödün vermemektedirler. Herhangi bir kaza sebebiyle oluşabilecek hasarları en iyi şekilde karşılayabilme özelliklerine sahiptirler (Logneborg vd., 1991).

Özellikle güvenlik parametresi ön planda olduğunda otomotiv sektöründe çelik malzeme kullanımı kaçınılmaz olmaktadır. Otomotiv malzemesi seçimi yapılırken, statik ve dinamik durumda yük taşıyabilme özelliği, boyanabilirlik, yüksek çökme direnci ve iyi geometrik tasarım gibi parametrelere dikkat edilmelidir. Farklı otomobil segmentlerine ait otomotiv malzemesi seçimi yapılırken, statik ve dinamik durumda yük taşıyabilme özelliği, boyanabilirlik, yüksek çökme direnci ve iyi geometrik tasarım gibi parametrelere dikkat edilmelidir. Aşağıdaki şekil 1’de farklı sınıflardaki araçlarda kullanılan çelikler ve kaliteleri gösterilmiştir.

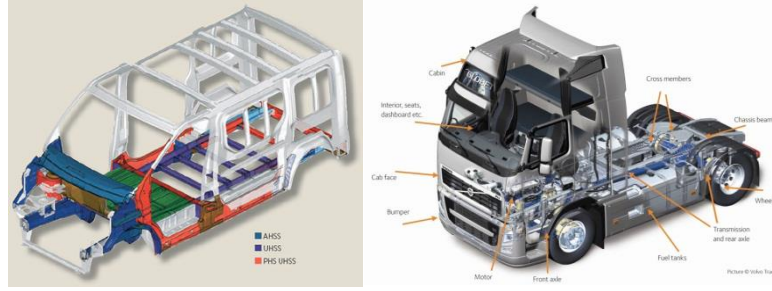


**Şekil 2.** Araçların farklı bölümlerinde kullanılan çeliklere ait sınıflandırma

Ticari araçlarda benzer şekilde hafif ve mukavemetli çelik konstrüksiyon parçalarından imal edilmeye başlamıştır. Emisyon ve yakıt parametreleri önemli birer sınırlayıcı faktördür. Bir örnek vermek gerekirse; bazı hafif ticari araç segmenti yer alan araçların çelik esaslı jantları Manisa da bir firmada üretilmektedir. Otomotiv firmaları, jantın lastik ve çamurlukları dahil olmak üzere bir ağırlık değeri belirleyerek sınırlama getirmektedir. Üretim sonucu elde edilen jant aynı veya daha üstün güvenlik ve ömür kriterlerine sağlayacak şekilde hafif olarak üretilme şartı bulunmaktadır.

Kamyon, tır ve ağır iş makinelerinde benzer durumlar söz konusu olmaktadır. Şekil 2’de örnek bir ticari araçta ve tırdaki çelik parçalar gösterilmiştir. Bu farklı türdeki araçlarda toplam ağırlığın %60-70’ni ise çelik malzeme oluşturmaktadır. Bu oran oldukça fazla ve önemli derece de geliştirilmeye açık parçanın bulunduğu

göstermektedir. Yapılan bazı ticari çalışmalarda %20 ye kadar araçlarda hafiflik sağlamak mümkün olmuştur.

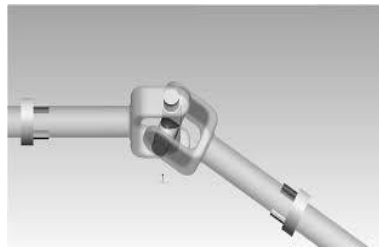


a)

b)

**Şekil 2. 3.** a) Hafif ticari araçlarda kullanılan çelik parçalar ve kaliteleri, b) Ağır ticari araçlardaki kritik çelik parça ve ekipmanlar

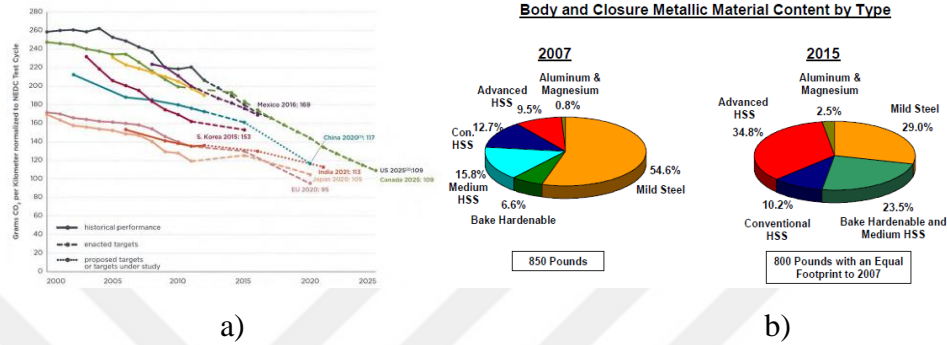
Sadece otomotiv sacları değil, aktarma organları, motor parçalarına benzer hafif ve mukavemetli sınırlaması getirilmektedir. Bir örnek de kardan mili verilebilir. Kardan millerin, yaprak yayların, rot ve direksiyon parçalarının da hafifleşmesi söz konusudur. Bu durumda ülkemizdeki otomotiv yan sanayi kuruluşlarının çelik üreticileri ile hammadde geliştirmeye yönelik faaliyetlerde bulunması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Uzun ürün grubunda yer alan ürünlerden olan kare, yuvarlak, lama ve özel lamaların otomotiv yan sanayi tarafından hammadde olarak kullanılması ile de aşağıdaki Şekil 3'teki otomotiv parçaları elde edilmektedir. Genellikle sıcak ve soğuk dövme prosesi ile üretim gerçekleştirilen bu parçaların mukavemet değerleri de yassı ürünlere paralel olarak artırılması istenmektedir.



**Şekil 2. 4** Kardan Mili

Türkiye'de araçlardaki vergilendirme emisyonu göre değil motor hacmine göre yapıldığından tüketicilerin alımında ilk sırayı çevreyi ne kadar kirlettiği değil aracın fiyatı gelmektedir. 2017 itibarıyla Türkiye'de satılan araçların sadece yüzde 12,66'sının emisyon oranları yani ortalama CO<sub>2</sub>'si (karbondioksit) 100 g/km ve altındadır. Bu araçlar büyük bölümü de ucuz fiyata sahip küçük motorlu araçlardan

oluşmaktadır. 100 ila 120 g/km arasında CO<sub>2</sub> emisyon oranına sahip satılan araçların oranı ise %41,64. 120 g/km ve üzeri orana sahip yani çevreyi en çok kirleten araçların satıştaki payı ise %47,69'ı bulmaktadır. AB'nin hedefinin tüm yeni araçlar için CO<sub>2</sub> seviyesini 95 g/km seviyesinde tutmak olduğu düşünülürse; şekil 4, Türkiye'nin bu konuda elini daha hızlı tutması gerekmektedir. Ticari araçlardaki bu oran ise 140 g/km olarak belirlenmiştir.



**Şekil 2. 5.** Ükelere göre değişim gösteren Karbon emisyon değerlerinin yıl bazında değişimleri ve hedefleri ve b) 2007-2015 yılı çelik kalitelerindeki değişimin karşılaştırması

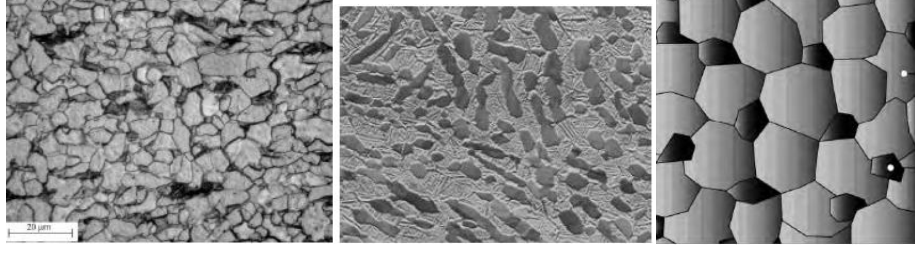
Ülkemizde yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler üzerine yapılan çalışmalar çok değerlidir. Çünkü dünya standartlarına baktığımızda; gelişmiş ülkeler çelik üretim teknolojilerini entegre tesislere dayandırmış ve katma değeri diğer çelik mamullere yüksek olan yüksek mukavemetli çelikler, AHSS, UHSS, LBS paslanmaz çelikler üretmektedir. Ülkemizde ise otomotiv sektöründe araçların ağırlıklarını azaltmak amacıyla gün geçtikçe kullanımı artacak olan DP çeliklerin üretimi çok düşük miktarlarda yapılırken, TRIP çeliklerinin üretimi yoktur.

Katma değeri yüksek mamul üretmenin yanı sıra üretimin ekonomikliği, çevreye duyarlılığı, yaratıcı ve yenilikçi olması da önemlidir. Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler sınıfındaki çift fazlı çelikler sergilemiş oldukları yüksek spesifik mukavemet (mukavemet/özgül ağırlık), çarpışma dayanımı, iyi kaynak kabiliyeti gibi üstün özellikleri sebebiyle otomotiv endüstrisinde en çok tercih edilen yeni nesil yüksek mukavemetli çelik grubudur (Ulu, 2009). DP çeliklerinin mikroyapısını yumuşak ferrit ve sert martenzit fazı oluşturur. Bu çelikler yüksek mukavemet özelliğini martenzitten, süneklik özelliğini de ferrit fazından almaktadır. Yüksek mukavemetler elde etmek için martenzit hacim oranını artırıcı yönde prosesler dizayn edilmektedir. Şekil 5'de tipik bir çift fazlı çeliğin mikroyapısı görülmektedir. Bu

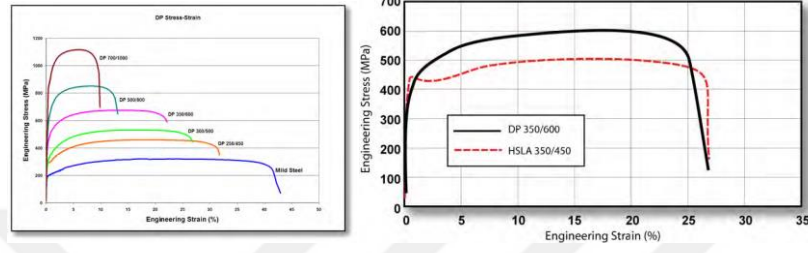
çelikler östenit faz bölgesinden kontrollü soğutma (sıcak haddelenmiş ürünler) veya çift fazlı ferrit + östenit bölgesinde dönüşüm devam ederken hızlı soğutma sonucunda kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi (soğuk haddelenmiş sürekli tavlanmış ve sıcak daldırma ile kaplanmış ürünler için) ile üretilebilmektedir. Proses şartlarına bağlı olarak yapıda beynit veya kalıntı östenit fazıda bulunabilmektedir. Üretimde kenar çatlaklarının önüne geçebilmek için kimyasal kompozisyon ve üretim süreçlerindeki tasarımlar ile yapıda bir miktar beynit fazı da oluşturulmaktadır.

Şekil 5'te görünen DP çelik yapısında, ferrit fazı ve martenzit adacıkları yer almaktadır. Ferrit fazının sürekli yapıda oluşu matrise çok iyi şekil alabilirlik özelliği sağlamaktadır. Bu çelik deformasyona uğratıldığında, oluşan strain-gerinim yapı içindeki minimum mukavemet değerine sahip olan martenzit adacıkları etrafındaki ferrit fazlarında yoğunlaşmaktadır. Bu durumda yüksek seviyelerde başlangıç sertleşme üsteli değerleri (initial work hardening rate,  $n$ ) elde edilmektedir. Bu durum DP çeliklerine, yüksek uzama ve sertleşme üsteli  $n$  değeri, benzer akma mukavemetine sahip geleneksel çeliklere göre daha yüksek çekme mukavemetine sahip olmasını sağlamaktadır (Şekil 6). DP çelikleri belirgin akma noktası göstermezler. Çünkü, östenitin martenzite dönüşmesi esnasında, hacimce büyüme olmaktadır.

Bu nedenle de yapı içerisindeki ferritler deformasyona uğrar ve oluşan martenzit adacıklarının etrafında hareketli dislokasyon yoğunluğu artar ve kalıntı iç gerilmeler meydana gelir. Ek olarak, sürekli akma gösterdiklerinden dolayı çift fazlı çeliklerin parça yüzeyleri çok düzgün olmaktadır. Kompozisyonda bulunan Karbon, prostedeki soğuma hızına bağlı olarak martenzit oluşumunu destekler ve Mn, Cr, Mo, V ve Ni ise kendi başına veya kombinasyonları şeklinde çelik sertliğinin artmasına katkı sunmaktadırlar. Bu alaşım elementi kombinasyonları çok iyi ayarlanmalı ve kaynaklanabilirlik özellikleri de kontrol altında tutulmalıdır (Kuziak vd., 2008). Genel olarak kimyasal kompozisyonu içinde; C: % 0,06-0,15, Si: 0,10-0,50, Mn: % 1,5-2,5, V: % 0,06, Nb: % 0,04 oranında bulunmaktadır.



**Şekil 2. 6.** Çift fazlı çeliklerin genel mikroyapısı (koyu renkli bölgeler martenzit, açık renkli bölgeler ferrit fazını temsil etmektedir.)



a)

b)

**Şekil 2. 7.** Düşük alaşımlı yüksek mukavemetli HSLA 350/450 çeliği ile benzer akma mukavemetine sahip DP 350/600 çeliği akma eğrisi karşılaştırması ve b) DP çeliklerinin kendi içinde akma eğrisi karşılaştırması

DP ve diğer AHSS çeliklerinin bir diğer önemi özelliği de fırında sertleşme (bake hardening effect) etkisi göstermeleridir. Bu etki sayesinde ön şekillendirme sonrası boyama işlemi sırasında yaşlanmadan kaynaklı olarak akma mukavemetinde ekstra artışlar elde edilebilmektedir. Çift fazlı çelikler gerek sergilemiş oldukları güvenlik özellikleri gerekse şekillendirilebilme kabiliyetleri iyi olduğundan otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Özellikle yüksek mukavemet ve sünekliğin bir arada olması gereken jant, koltuk çerçevesi, kapı panelleri ve tampon gibi otomotiv parçalarında çift fazlı çelikler yoğun olarak tercih edilmektedir.

DP ve diğer AHSS çeliklerinin bir diğer önemi özelliği de fırında sertleşme (bake hardening effect) etkisi göstermeleridir. Bu etki sayesinde ön şekillendirme sonrası boyama işlemi sırasında yaşlanmadan kaynaklı olarak akma mukavemetinde ekstra artışlar elde edilebilmektedir. Çift fazlı çelikler gerek sergilemiş oldukları güvenlik özellikleri gerekse şekillendirilebilme kabiliyetleri iyi olduğundan otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Özellikle yüksek mukavemet ve sünekliğin bir arada olması gereken jant, koltuk çerçevesi, kapı panelleri ve tampon gibi otomotiv parçalarında çift fazlı çelikler yoğun olarak tercih edilmektedir.

DP çeliklerinin 1980li yıllarda ticari olarak büyük tonajlı üretimlerinin yapılmasından sonra bu konuda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Li ve arkadaşları 2013 yılında ısıtma hızının soğuk haddelenmiş 0.1C-0.4Si-1.6Mn kompozisyonuna sahip DP çeliğinde ferrit yeniden kristalleşmesi ve östenit dönüşümü üzerine etkisini incelemek amacıyla 5, 50 ve 500 °C/s olmak üzere farklı ısıtma hızları kullanarak çalışma yapmışlardır. Bu çalışma neticesinde, artan ısıtma hızının östenit dağılım ve morfolojisini doğrudan etkilediği görülmüştür. Ferrit yeniden kristalleşme ve östenit dönüşüm prosesleri yüksek ısıtma hızlarında çakışmıştır (Li vd., 2013).

Xiong ve arkadaşları 2015 yılında şerit döküm prosesi ile üretilen 0.08C-0.81Si-1.47Mn-0.03Al kompozisyonuna sahip çift fazlı çeliğin deformasyonunun mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Şerit döküm prosesinin simüle edildiği bu çalışmada numuneler önce 40 K/s ve 20 K/s ısıtma hızlarıyla önce 1000°C, sonra 1300°C'ye ısıtılmışlar ve bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletildikten sonra 30 K/s hızla 1050°C'ye soğutulurken bir miktar deformasyon uygulanmıştır. Daha sonra kademeli soğutma ile numuneler 10 K/s soğutma hızı kullanılarak 650, 670, 690, 720 ve 830°C sıcaklıklara kadar soğutulup daha sonra suda soğutma işlemine tabi tutulmuşlardır.

Yapılan bu çalışma neticesinde, azalan kesintili soğutma sıcaklığı ve artan deformasyon miktarına bağlı olarak ferrit fraksiyonunun arttığı tespit edilmiştir. Mikroyapıda azalan ferrit fraksiyonu ile maksimum çekme dayanımının arttığı, buna karşın toplam uzama miktarının ise azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, artan deformasyon oranı ile birlikte yapıdaki dislokasyon yoğunluğunun arttığı görülmüştür (Xiong vd., 2015). 2013 yılında yapılan bir başka araştırmada Türkmen ve Gündüz, çift fazlı çeliklerde martenzit yapının statik deformasyon yaşlanma davranışı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmadan, DP çeliğine kritik sıcaklık bölgesinde 775 °C' de kritik çift faz, su verme ve kademeli su verme olmak üzere üç farklı ısıl işlem uygulanmıştır. Daha sonra %4 ön deformasyona maruz bırakılan numunelere 180°C' de 10 ila 160 dakika arası yaşlandırma yapılmıştır. Uygulanan işlemler sonucunda ağ, fiber ve kütleli olmak üzere farklı martenzit morfolojileri tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda, ağ veya kütleli martenzit yapısına sahip numunelere kıyasla belirli bir yaşlanma süresi sonucunda, fiber martenzitli numuneler daha yüksek akma dayanımını ve sertlik göstermişlerdir (Türkmen ve Gündüz, 2013). Bunların

yanında çentik düktilitesi, kaynaklanabilirliği, hasar analizleri, dinamik çekme testi karşılaştırmaları (farklı deformasyon hızlarında), martenzit bantlaşma etkisi, deformasyon özellikleri, strain rate ve sıcaklık etkisi, kademeli deformasyon, martenzit dağılımı ve morfolojisi, termomekanik kontrollü proseslerin karşılaştırması esasında çalışmalara rastlanmaktadır. Metalurjik süreçler incelendiğinde ise alaşım elementi seçimi ve deformasyon sıcaklığı-oranı ile kontrollü soğutma ortamı etkisi, ferrit-martenzit ve bir miktar da oluşması muhtemel beynit fazının farklı kalınlıktaki DP çeliklerinin faz çeşidi, dağılımı ve oranları üzerine metalografik etkileri ile bu etkilerin mekanik özelliklerde yarattığı değişimleri incelenmiştir(Hayat, 2011; Faccoli vd., 2014; Bettaieb vd., 2010; Huh vd., 2007; Ramazani vd., 2014; Al-Abbasi, 2016; Paul, 2013; Curtze vd., 2009; Jha vd., 2013; Verma vd., 2014; Cheng vd., 2016; Adamczyk ve Grajcar, 2005).

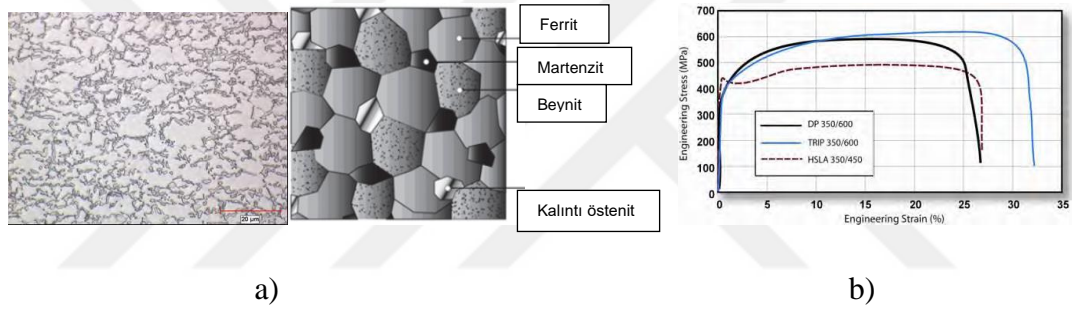
DP çelikleri ile birlikte otomotiv endüstrisinde TRIP çeliklerinin de kullanım alanı oldukça geniştir. TRIP çeliklerinde yumuşak ferrit matrisi içerisinde sert çoklu faz yapısı bulunmaktadır. Matris içeriği yüksek miktarda kalıntı östenit, belli bir miktarda beynit ve bazen kalıntı östenit ile beraber martenzit görülebilmektedir (WorldAutoSteel, 2011). Martenzitik yapı kalıntı östenitin plastik deformasyon yöntemi ile dönüştürülmesi sonucu elde edilmektedir.

Mikroyapısal olarak incelediğimizde, ferrit matrisi içine gömülmüş östenit tanelerinden meydan gelmektedir. Artık östenitin minimum % 5 oranında olması durumunda ise sert fazlardan olan beynit ve martenzit fazlarında bulunmaktadır. Bu kompozisyona sahip çelikler, beynit oluşum sıcaklığında izotermal dönüşüm için ısıl işlem uğratılmaktadırlar. Bu çeliklerdeki yüksek karbon ve silisyum içeriği artık östenitin belirgin hacim fraksiyonlarına sahip olmasını sağlarlar. DP çeliklerindeki gibi deformasyon sırasında sert ikincil fazların ferrit matris içinde dağılımı yüksek sertleşme üsteli “n” ortaya çıkarır. Ayrıca TRIP çeliklerindeki artık östenit, deformasyon sırasında sürekli olarak martenzit fazına dönüşür. Deformasyon hızı ve oranı, sertleşme üsteli-work hardening rate “n” değerini değiştirdiğinden önemli bir etken parametredir. Martenzitik dönüşüm ile ince dağılmış sert karbürler ile yüksek dislokasyon yoğunluğu sağlanması hedeflenmiştir. Alaşım karbürlerinin hızlı bir şekilde oluşması ile östenitte karbon azalması meydana gelmiştir. Bu da Ms (martenzit başlangıç) ve Mf (martenzit bitiş) sıcaklıklarının bölgesel yükselmesine neden olmuştur. Temel kural, yarı kararlı östenitin deformasyon işlemi öncesi oda sıcaklığı



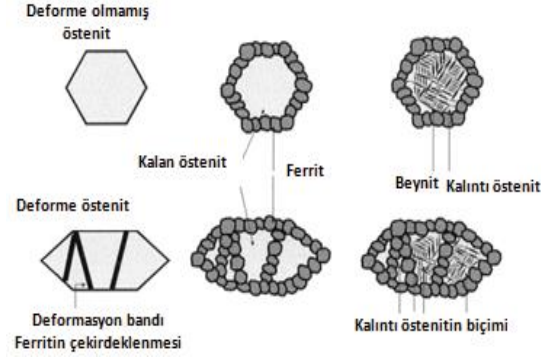
altında olan  $M_s$  ve  $M_f$  sıcaklıklarını oda sıcaklığının üzerine çıkartmaktadır. Böyle bir çelik, ideal termo-mekaniksel işlemlerden sonra tamamıyla östenitik yapıda olabilir ve plastik şekillendirme işlemi ile istenilen yüksek dislokasyon yoğunluğu, alaşım karbürlerin ince dağılımı gibi yapısal özelliklerin bazısına sahiptir.

Oluşturulan martenzit yapı ile dayanım ve süneklik artırılır. Yüksek mukavemet ve süneklik, deformasyon ile gerçekleşen yapısal dönüşüm ile elde edilir. Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemet-uzama kombinasyonu sağlayan (800-1000 MPa yüksek mukavemet) TRIP çelikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Standart bir TRIP çeliğinin oda sıcaklığında mikroyapısı %55-60 ferrit, %25-40 beynit ve %5-15 yarı kararlı kalıntı östenitten oluşur. TRIP çeliklerinin mekanik özellikleri mikroyapıda bulunan düşük miktardaki kalıntı östenit tarafından kontrol edilmektedir (Özer, 2009).



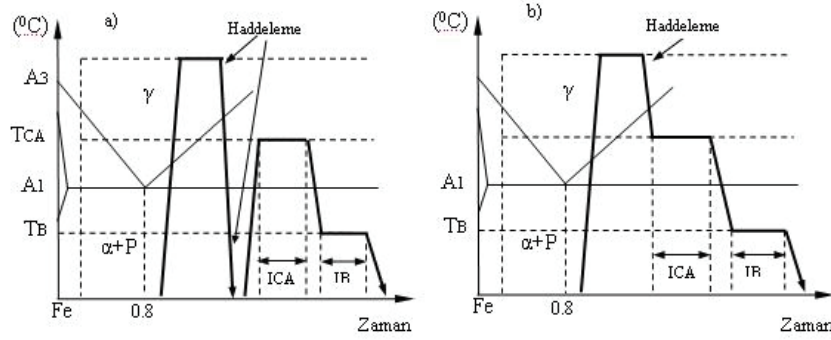
**Şekil 2. 8.** a) TRIP çeliğinin mikroyapısı ve b) DP, HSLA ve TRIP karşılaştırması

TRIP çeliklerde fazların boyutları düşürülebilir; beynit ve östenit 1 ila 3  $\mu\text{m}$  arasında iken ana yapı ferrit 5 ila 10  $\mu\text{m}$  arasında olabilir. (Özer, 2009; Furne'mont vd., 2002, Jacques, 1998). Şekil 8'de TRIP çeliğinin ısı işleme sırasında oluşan faz dönüşümleri gösterilmiştir.



**Şekil 2. 9.** TRIP çeliklerinin termomekanik ısı işleme esnasındaki faz durumları

TRIP Çeliklerinin uygulama alanları otomotiv sektöründe bağlantı elemanları, gövde yapılarında kullanılmaktadır. Ayrıca enerji absorblayıcı olarak da kullanılmaktadır. TRIP çeliklerinin termo-mekanik işlem süreci Şekil 9' da gösterildiği gibidir.



**Şekil 2. 10.** TRIP çeliklerinin üretim şemaları a) Levha üretim şeması, b) Sıcak şerit-bant üretim şeması

TRIP çeliklerinin iki şekilde üretilebilirliği vardır:

- Birincisi; sıcak hadde bantlarında veya soğuk hadde batlarında üretim,
- İkincisi ise tavlama ile üretimdir.

Şekil 10'da sıcak hadde bantlarında TRIP çeliğinin üretim şeması bulunmaktadır. Buradaki önemli nokta, grafikten de görülebileceği gibi sıcaklıkların çelik kompozisyonuna göre hesaplanmasıdır. Bu hesaplamalar aşağıdaki formüller ile gerçekleştirilmektedir.

$$A1(^{\circ}C) = (723) - (10,7Mn) - (16,9Ni) + (29,1Si) + (16,9Cr) + (290As) + (6,38W)$$

$$A3(^{\circ}C) = (910) - (203C) \quad (15,2Ni) + (44,7Si) + (104V) + (31,5Mo) + (13,1W) \quad \text{göre}$$

hesaplanmaktadır.

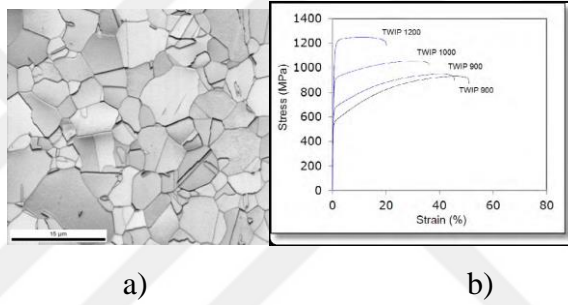
Ms “martenzit” dönüşüm başlangıç sıcaklığıdır. Düşük ve orta alaşımlı çeliklerin Ms sıcaklığı şu denklem ile hesaplanabilir.  $Ms (0C) = 550 - (350C) - (40Mn) - (20Cr) - (10Mo) - (17Ni) - (8W) - (10Cu) + (15Co) + (30Al)$  TRIP çeliğinin üretiminde kritik öneme sahip östenit, A1 sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda kararlı, oda sıcaklığında ise kararsız bir fazdır. TRIP çeliklerinde karbonca zenginleştirilmiş östenit, kararlı faz durumdadır (Hayat, 2010). TRIP çelikleri ara sıcaklıkta izotermal tutulma ile bir miktar beynit oluşturularak üretilirler (Hayat, 2010).

TRIP çeliklerinde yüksek silisyum ve karbon miktarları mikroyapıda yüksek hacim oranlarında artık östenit oluşturur. Bütün AHSS’ler östenit veya östenit+ferrit fazından başlayarak kontrollü soğutmayla sıcak haddelenmiş ürünler için dövme sırasında, kaplama veya tavlama yapılmış ürünler için tav fırınlarında üretilirler.

Arif Basuki ve diğerleri, % 0,39 C, 1,37 Si ve 1,45 Mn kimyasal bileşimine sahip çelikte 420°C’ de süreyi 240 s olarak belirtmiştir.

Bir diğer çalışmada ise A. Wasilkowska ve arkadaşları beynitik dönüşümü tespit etmek amacıyla kritik tav sıcaklık aralığında (“ $\alpha + \gamma$ ” yaklaşık 800°C) tavlama yaparak östenitik dönüşümü sağlamışlardır. Sonra numuneleri hızlı bir şekilde 700-650°C sıcaklığına kadar soğutmuşlardır. Düşük Si içeriğine sahip çelik için 400 °C/400 s ve yüksek Si içeriğine sahip çelik için T=300, 350 ve 400 °C sıcaklıklarda t=60, 120, 240 ve 480s sürelerinde çalışma yapılmıştır. Sonucunda değişik parametrelerde TRIP çeliği elde edilen yüksek Si içeriğine sahip çelikte tavlama sıcaklığının ve süresinin düşüşünün, % östenitik dönüşüm ve % uzama miktarlarını arttırdığını tespit etmişlerdir. Xicheng Wei ve arkadaşları 2007, çalışmasında kimyasal bileşimini verdiği çelik için 400 °C’de 5dk.’nın dönüşüm için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Bir başka çalışmada ise Sung-Joon Kim vd., 2007, (Kim vd. 2003) kimyasal kompozisyonunu vermiş olduğu çelikte beynitik dönüşümü için numuneyi 430°C’de 1 dk’dan 20 dk’ya kadar artan sürelerde 1’er dk arayla ısıl işleme uygulamıştır. Dönüşümün mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Sonucunda süre artışıyla kalıntı östenitin miktarının arttığı 5 dk’dan sonra ise kalıntı östenitin miktarının azaldığı belirlenmiştir. Aynı şekilde akma, çekme ve % uzama değerlerinin de 5 dk’ya kadar arttığı bildirilmiştir.

TRIP çeliklerin kimyasal kompozisyonları incelendiğinde, Sung-Joon Kim dayanım süneklik ilişkisi çerçevesinde TRIP çeliklerin kimyasal bileşimini 0,2–0,4% C, 1,0–2,5% Mn ve 1,2–2,0% Si olabileceğini bildirmektedir. Sourabh Chatterjee ise TRIP çeliklerinin kimyasal bileşiminin % 0,2 C, %1,5 Mn ve %1 ile 2 oranında Si içerebileceğini tespit etmiştir. TWIP olarak tanımlanan Twinning-Induced Plasticity çelikleri oda sıcaklığında östenitik yapıda kalmalarını kompozisyonda yer alan yüksek Mangan (17-27) oranları ile sağlamaktadır. Yüksek oranlarda deformasyon ikizlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Deformasyon sırasında oluşan ikizlenme olayı, sertleşme oranının “n” değerinin yükselmesine neden olmaktadır. Oluşan ikiz sınırları birer tane sınır gibi görev yapıp tanenin incelmeye ve mukavemet artışına neden olmaktadır. Şekil 11 de tavllanmış bir TWIP çeliğine ait mikroyapı ve akma eğrileri bulunmaktadır.



**Şekil 2. 11.** a) TWIP çeliğinin tavllanmış mikroyapısı ve b) akma eğrileri

Bu çeliklerde n değeri, % 30 a kadar gelen mühendislik strainlerinde 0,4'e kadar artabilmekte sonrasında toplam deformasyon değeri % 50 ye kadar uniform olarak uzama göstermektedir. Çekme mukavemeti değerleri ise 1000 MPa'ın üzerindedir.

Bu tip çeliklerde Mangan elementi büyük önem taşır. Oda sıcaklığında ferrit oluşumun engeller ve östeniti oda sıcaklığında stabilize etmektedir. Fe-C-Mn faz diyagramına göre Mangan karbürlerin oluşumu tahmin edilebilmektedir. Mangan'ın bir diğer önemli etkisi ise deformasyon sırasında östenit fazının yığılma hatası (stacking-fault) enerjisini düşürmesidir.

Kompozisyondaki yüksek karbon oranı akma ve çekme mukavemetini arttırmak için gereklidir. Bu çeliklerin bazılarında Mn oranı düşürülerek yerine Al eklenmektedir. % 3 ün altındaki Al ilavesi yoğunlukta hafif bir azalma sağlamakta ve araçların hafifleştirilmesinde etkin kullanım sağlamaktadır. Al da benzer şekilde östenit fazını stabilize eder ve tane içinde ikizlerin oluşumunu teşvik ederek şekil alabilirliği yükselmektedir. Tablo 1'de otomotiv kullanılan çeliklere ait genel bir

karşılaştırma gösterilmiştir. Literatürde bu tür çeliklerin mekanik özellikleri, şekil alabilirlikleri, mikroyapıları, tekstür özellikleri, üretim süreçleri, birleştirilme prosesleri ve ısıtma sonrası dinamik mekanik özellikleri hakkında pek çok çalışma yer almaktadır (Ding vd., 2006; Dai vd., 2010; Ding vd., 2011; Zhang vd., 2011; Su vd., 2013; Ma vd., 2014; Faccoli vd., 2014; Daamen vd., 2014; Caballero vd., 2013; Saleh vd., 2011; Xiong vd., 2011).

**Tablo 2.1.** Otomotiv çelikleri genel karşılaştırma tablosu

Çelik	Mikroyapı	Karakteristikler
<b>LC</b> Low Carbon Düşük Karbon	$\alpha$	- <b>Yumuşak:</b> Alaşimsız Al-söndürülmüş düşük karbon çeliği; DQ, ekstra derin çekmeye uygun - <b>IF:</b> arayer atomu içermeyen çelik; mikroalaşımli ekstra derin çekmeye uygun
<b>HSS</b> High Strength Steel  Yüksek Mukavemetli Çelik	$\alpha$	- <b>BH:</b> bake hardening çeliği, bu çeliğin boyanması sırasında fırınlama yapıldığında C ile yaşlanma sayesinde ek bir mukavemet katılabilir - <b>IF-HS:</b> yüksek muk. IF çeliği, Mn ve P ile sertleştirilmiş - <b>P:</b> P alaşımli yüksek mukavemetli çelik - <b>IS:</b> Izotropik akma davranışı gösteren çelikler, Ti ve Nb mikroalaşımli - <b>CMn:</b> Katı ergiyik serleşmesi için C, Mn ve Si içeren çelikler - <b>HSLA:</b> Yüksek mukavemetli düşük alaşımli çelik, Nb veya Ti mikroalaşımlama ile sertleştirilmiş
<b>AHSS</b> Advanced High Strength Steel Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik	$\alpha+\alpha'$ $\alpha+\alpha_B+\gamma_R$ $\alpha'+\alpha$ $\alpha+\alpha_B+\alpha'$	- <b>DP:</b> Dual fazlı çelikler, % 5-30 Martenzit ve ferrit içeren mikroyapı - <b>TRIP:</b> Dönüşüm katkılı plastisite gösteren çelik, ferrit, beynit ve kalıntı östenit içeren mikroyapı - <b>PM:</b> Kısmi yada tamamen martenzitik çelikler - <b>CP:</b> Kompleks fazlı çelik, ferrit, beynit ve martenzit karışımı mikroyapı
<b>HMS</b> High Mn Steel Yüksek Mn Çeliği	$\gamma$ yada yüksek miktarında $\gamma$	- <b>HMS-TRIP:</b> Gerinme katkılı $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ dönüşümü gösteren bir alaşım tasarımına sahip çelik - <b>HMS-TWIP:</b> Deformasyon etkisiyle mekanik ikizlenmeler gösteren bir alaşım tasarımına sahip çelik

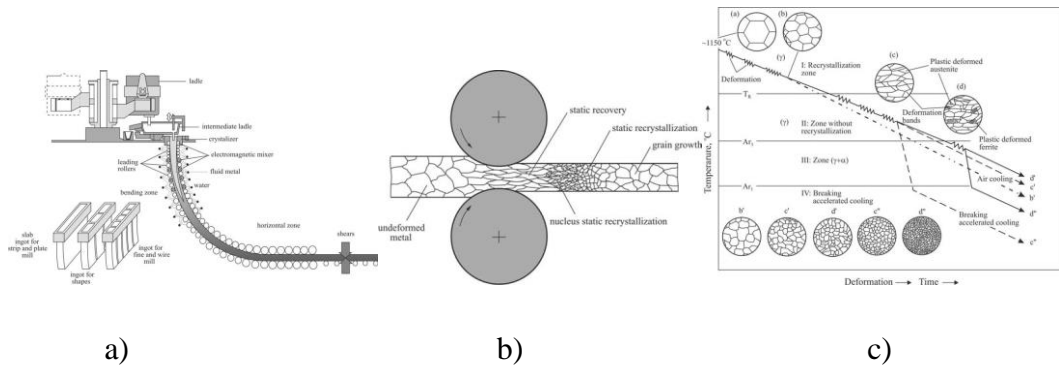
**Tablo 2.2.** Alaşım elementleri ve malzeme isimlendirmesi

Steel type	Designation	C	Mn	Si	Al	P	Cr	Nb	Ti	V
<b>BH</b>	H180BD	0.04	0.70	0.50	0.04	0.01	-	-	-	-
	"	0.01 <sup>1)</sup>	0.70	0.50	0.04	0.01	-	-	-	-
<b>IF-HS</b>	H260YD	0.003	0.40	0.10	0.03	0.05	-	0.04	0.02	-
<b>P</b>	H220PD	0.06	0.70	0.50	0.04	0.07	-	-	-	-
<b>HSLA</b>	H320LA	0.07	0.35	0.01	0.04	0.01	-	0.04	-	-
<b>DP</b>	H300X	0.10	1.00	0.50	0.04	0.01	-	-	-	-
	"	0.10	1.00	0.10	0.04	0.05	-	-	-	-
	"	0.08	1.50	0.10	0.04	0.07	0.40	-	0.03	-
	H340X	0.10	1.20	0.10	0.04	0.01	0.80	0.04	-	-
	"	0.07	1.40	0.10	0.04	0.04	-	0.04	-	-
<b>PM</b>	MS1000-W	0.17	2.20	2.00	0.04	0.01	1.00	-	-	-
<b>TRIP</b>	RA700K	0.20	1.50	1.50	0.04	0.01	-	-	-	-
	"	0.20	1.50	0.10	1.80	0.01	-	-	-	-
	"	0.15	2.00	0.10	0.04	0.04	-	-	-	-
	"	0.20	1.50	1.10	0.04	0.01	-	0.04	-	-
	RA800K	0.20	1.50	1.50	0.04	0.01	-	-	-	0.10
<b>HMS</b>	TRIP	0.02	15	3	3	-	-	-	-	-
	TWIP	0.03	25	3	3	-	-	-	-	-
	TWIP	0.60	22	-	-	-	-	-	-	-

Uzun ürün grubunda ise, termomekanik veya kontrollü dövme ile şekillendirilmiş HSLA mikroalaşımli çelik kompozisyonları kullanılmaktadır.

Özellikle yarı mamul olarak üretimi gerçekleştirilen yuvarlak, lama ve kare kesitli ürünler bir sonraki aşamada soğuk ve sıcak dövme yolu ile yeniden şekillendirilmektedirler.

Yarı mamul ürün, çelik kütük dökümü, haddelenmesi ve kontrollü soğutma işlemleri sonucunda; homojen mikroyapı, minimum dekarbürüzyon derinliği (maksimum 150 mikron), tane boyutu ve minimum inklüzyon oranı (ASTM E 45 ve 112, K3 veya K4), kabuk soyma ve % 100 çatlak kontrolünden geçirilmektedir. Prototip üretim öncesinde simülasyon desteği ile sırasında mikro alaşımlı hammadde seçimi sayesinde ürün ikinci bir işleme gerek duyulmadan istenen metalurjik ve mekanik özelliklere sahip olmaktadır (Biglou ve Lenard; Luo, 2001; Stahlberg ve Luo, 2001; Adamczyk, 2006; Xiao vd., 2012; Bakkaloğlu, 2002; Humphreys vd., 2001, ). Bu noktada üretilen hammadde kütükteki mikro alaşım elementleri seçimi (Al, Ti, V, Nb, C, N) ve miktarının belirlenmesi prototip üretim sırasında deformasyon oranlarını yakından etkileyecektir. Mikroalaşımlı çelik hammadde kullanılarak prototip üretim hedeflenen kare, yuvarlak veya lama kesite sahip uzun ürünlerin soğuma analizleri önem kazanmaktadır. Çünkü mukavemet kazandırmak için sadece mikro alaşım elementi yeterli olmayıp ürünün kritik sıcak bölgelerinde oluşturduğu faz dönüşümlerinin soğuma analizi ile desteklenerek araştırılması gerekmektedir. Mikro-alaşım elementleri sıcak haddeleme ile üretim işleminde hadde sıcaklığına göre yeniden kristalleşme süreçleri oluşturmakta (şekil 11) ve östenit tane boyutunun büyümesine engel olarak soğuma yöntemi ile birlikte daha ince tane yapılı bir mikroyapı elde edilmesini sağlamaktadır (Adamczyk, 2006; Xiao vd., 2012; Bakkaloğlu, 2002; Humphreys vd., 2001; Lee vd., 2010; Adamczyk ve Grajcar, 2007; Emi vd., 2005).



**Şekil 2. 12.** a) Kütük sürekli dökümü ve b) haddeleme işleminde meydana gelen yapısal değişimler, c) Şekillendirme sırasında deformasyon ve sıcaklık uygulamaları sonucunda farklı ortamlarda soğumaya maruz bırakılan çeliklerin yapısal dönüşümleri

## 2.4. Termomekanik işlemler

Termomekanik işlemler veya prosesler (TMT-TMP), dövme, ekstrüzyon gibi imalat yöntemlerinde ısı işlem, plastik deformasyon ve faz dönüşümlerini esas alarak görünen fazların, yapı, morfoloji ve tane boyutu kombinasyonu, alt tane veya sonradan oluşan tanelerin (ferrit), dislokasyonlar ile ince çökeltilerin (karbür ve karbonitrür) etkileşimini içermektedir. Bu mekanizmalardaki temel amaç ise çok yüksek mukavemet, geliştirilmiş şekil alabilme kabiliyeti ve arttırılmış tokluk özelliklerine ulaşmaktır. Termomekanik işlemler, deformasyon prosesinin faz dönüşümünden önce, sırasında ve sonrasında gerçekleşmesi bakımından 3 e ayrılmaktadır (şekil 4):

**Sınıf 1:** Östenit dönüşümünden önce deformasyon tamamlanmaktadır. Bu yöntemde yüksek sıcaklık termomekanik işlemlerde (HTMT) denilmektedir. Kontrollü dövme veya düşük sıcaklık termomekanik işlemler (LTMT) ise ausforming olarak tanımlanır. HTMT ve LTMT sertliği arttırılabilen düşük ve yüksek alaşımlı çeliklere uygulanabilmektedir. Ayrıca kontrollü ve termomekanik şekillendirme mikro alaşımlı ferritik-perlitik, düşük karbonlu beynitik, haddelenmiş perlitik ve su verilmiş-temperlenmiş çeliklere uygulanmaktadır.

**Sınıf 2:** Östenit dönüşümü sırasında deformasyon meydana gelmektedir. Buna en iyi örnek ise isoforming prosesleridir. Deformasyon sırasında yarı kararlı östenit fazından küreselleşmiş karbürlere sahip ferrit fazı oluşur. Örnek olarak TRIP çelikleri Md sıcaklığı üzerinde yarı kararlı östenit fazı deforme edilir, sonra strain induced martenzit fazı elde etmek amacı ile soğuk şekillendirilir. Isoforming tekniği düşük alaşımlı veya perlit oluşturan çeliklerde, paslanmaz çeliklerde kullanılmaktadır.

**Sınıf 3:** Östenit dönüşümü bittiğinde deformasyon gerçekleşir. Strain tempering, ılık şekillendirme, marforming olarak isimlendirilir. Bu proseste temperlemeden önce martenzit cold-work işlemine tabi tutulur.

Dövme ile üretim sonucunda elde edilen ince taneli mikro yapı, mukavemeti ve tokluğu birlikte arttırması yanı sıra gevrek – sünek geçiş sıcaklığını düşürmektedir. Bu açıdan asimetrik kesite sahip bu ürünün, üretim süreçleri tasarımı bu açıdan önem arz etmektedir. Plastik deformasyon ve malzemenin yüksek sıcaklıkta şekil alabilme özelliklerinden yola çıkarak, kaliteli çelik kullanarak tasarlanan haddeme işlemine ait, deformasyon oranı, birim şekil değişimi-enerji, hammadde-ürün hacim oranı, termal gerilme-termal deformasyon ve nihai ürün şekli-doğrultmayı etkileyen sıcaklık,

zaman, hız ve enerji gibi sıcak dövme proses parametrelerinin elde edilmesi ve özellikle ezme oranı (deformasyon), merdane torkları, enerji ve zaman açısından diğer çelikler bazında karşılaştırılması yapılmıştır (Ghosh vd., 2006; Korczak, 2004; Ghosh vd., 2003).

Bilindiği üzere, sıcaklığa bağlı olarak değişen gerilme-şekil değişim eğrisi incelendiğinde kaliteli çeliklerde daha yüksek mukavemet değerleri ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıkta olmasına rağmen mukavemeti diğer çeliklere göre daha yüksek olan proje konusu çelikler kullanılarak (Al, V, vs. mikro alaşım elementleri, karbür yapıcı bulunan kütük hammaddesi) için farklı bir kalibre tasarımı yapılması aşıkardır. Bu nedenle mevcut üretim hattı motor güçleri, merdane çapları ve hat uzunluğu dikkate alındığında sürekli bir üretim hattı için gerekli sıcak dövme üretim parametreleri ezme oranına bağlı olarak elde edilmesi neticesinde kesite ait gerekli olan proses ihtiyaçları ortaya çıkarılmıştır (Ghosh vd., 2006; Korczak, 2004; Ghosh vd., 2003; Gornia ve Mei, 2008, Adamczyk ve Grajcar, 2007; Emi vd., 2005; Das vd., 2003; Ozgowicz vd., 2011; Yang vd., 2010; Chowdhury ve Rajinikanth; Zrnika vd., 2002; Basu vd., 2005 ). Şekil 12’de ise farklı sıcaklık zonlarında uygulanan deformasyonlar ve soğuma ortamının farklılaşması ile elde edilen mikroyapılar görülmektedir. Tek ve çift fazlı bölgede yapılan deformasyon ile hava, fanlı havaya cebri hava, su+hava karışımı sonucunda daha ince tane boyutu elde edilmektedir.

Plastik şekil değişimi belirli sıcaklık aralığında ve zaman sınırları içinde yapıldığında çeliklerde yüksek mukavemet özellikleri kazandırabilmektedir. Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramlarından faydalanılarak yapılan sıcak şekil verme işlemleri “termomekanik” olarak nitelendirilir. Bu işlem ile konvansiyonel ısı işlem ve mekanik işlemlerin uygulanmasıyla elde edilemeyen mikroyapı ve özellikler sağlar (Barsom, 1995; Taş, 2006). Mikroyapıda plastik şekil vermeyle meydana gelen kafes hatalarından yararlanılarak, termomekanik işlemlerle malzemenin mukavemetinin artması ile süneklik ve tokluğunun artması hedeflenir.

Termomekanik dövmenin esas yararı, mikro alaşım elementleri etkisi üzerine kurulmuştur. Anahtar elementlerden biri ise Nb (Niyobyum)’dur. Nb, yeniden kristalleşme sıcaklığını yükselterek dövme sırasında östenitin yapısında ezilmesine neden olur ve uygulanan soğutma işlemi ile ince taneli mikro yapının oluşumunu sağlamaktadır. Nb ayrıca çökelme sertleşmesi ile mukavemetin artmasını



sağlamaktadır (Kundakçı, 2010). Termomekanik işlem ile üretilen konstrüksiyon parçalarında ve takımlarda çok daha yüksek mukavemet ve tokluk elde edilmektedir. Mekanik özellikler için etkin olabilecek mekanizmalardan (dislokasyon sertleşmesi, katı çözümlü sertleşmesi, tane sınırı sertleşmesi, çökeltme sertleşmesi) yararlanılabilmesi ve malzemeden beklentilerin farklı oranlarda müştereken en iyi oranlarda karşılanabilmesi için malzeme kompozisyonunun ve termomekanik işlemin birbiriyle uyum içinde olması gerekir. Termomekanik şekillendirme-dövmede mikro alaşım elementi olarak kompozisyonda yer alabilecek olan elementler ise;

Titanyumun etkinliği niobyumdan düşüktür. Alaşımlama oranıyla mukavemet artırıcı etki orantılı olarak artar. Titanyumla yüksek mukavemet artışları hedeflenir. Sıcak deforme edilebilirlik, azota olan aşırı afiniteden dolayı ve bunun neticesi bağlama yüksek sıcaklıklarda sürekli iyileştirilir. Titanyumnitrür fiziksel ve termodinamiksel olarak niobyumkarbonitrüre benzer. Titanyumnitrür kaynak esnasında ısı tesiri altındaki bölgedeki tane kabalaşmasına engel olur. Titanyumun tane küçültmeye olan etkisi niobyum ile vanadyum arasındadır; çökelti sertleştirme karakteristiği ise vanadyuma çok benzer.

Vanadyum, çelikte en büyük çözünürlüğe sahip mikroalaşım elementidir. Vanadyumnitrür, vanadyumkarbürü göre az çözünür. Azot oranının artmasıyla vanadyumun çözünme ve çökeltmesi kontrol edilebilir. Vanadyum çökeltleri titanyuma göre daha az etkilidir. Yeniden kristalleşme geciktirmesi düşüktür. Buna karşın yüksek vanadyum çözünürlüğü ferritin normalleştirme tavından sonra iyi bir çökelti sertleşmesine sebep olur. Artan vanadyum miktarı sayesinde akma mukavemeti artar. Tane inceltme etkisinin zayıf olmasından dolayı tokluğa etkisi negatiftir. Alüminyum, deoksidasyon maddesi ve mikroalaşım elementi olarak çelik üretiminde çifte fonksiyona sahiptir. Tam durgun çeliklerde çözülmüş Al mikroalaşım elementi olarak etkilidir. Azota olan aşırı afinitesinden dolayı AlN oluşturur. Bu, östenit tane büyümesini engeller ve östenit dönüşümünü hızlandırır. Al esas etkisini ferritin kuvvetli tane inceltmesinde gösterir.

Plastik deformasyon ve termal analiz yöntemlerine bağlı olarak ürünün sıcak dövme üretim yöntemi ile üretilmesi için gerekli hesaplamaların yapılması ve hammadde yani yarı mamul yuvarlak kesitinin belirlenmesi ile başlayan tasarım süreçleri dövme dizaynı ile sonlandırılmaktadır. Dövme sistemlerinde her yönü ile

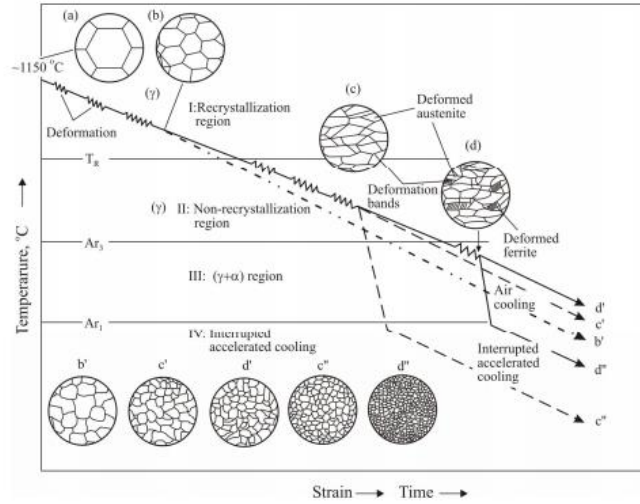
kaliteli sonuçların alınabilmesi için dövme parametrelerinin optimum şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Dövülecek malzeme ve istenilen geometriye bağlı olarak dövme hızı, dövme kuvveti, dövme sıcaklığı, sürtünme katsayısı gibi parametrelerin dövme prosesinde belirleyici faktörler olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada sistemi bütünüyle ele alıp tüm üretim parametrelerine ait model oluşturma, dövme dizaynları, basma kuvveti, hız, sürtünme, kalıp açıları, kalıp doldurması, çapak gibi etkenlere ait parametreler detaylı incelemesi yapılarak proses tasarımı sanal üretim şartları elde edilmektedir.

Sıcak dövme ile üretim yönteminin tüm teorik hesaplamalarına göre, dövme sırasında kesit bazında elasto-plastik analizler termal etkilerle birlikte düşünülüp modellenebilmektedir. Bu önemli bir avantajdır. Kesit değişimlerine ve ürün boyuna göre hesaplanan hammadde kesiti ve boy ölçülerine bağlı olarak üretim sonlu elemanlar model programları ile yapılması ise önemli teknik – mali avantajlar sunmaktadır. Her pasodaki deformasyon hızı, ezme kuvveti, paso sonrası kesit ve boy belirlenebilmektedir. Şekil 13'te görüldüğü üzere termomekanik işlemlerde deformasyon sıcaklığı ve o sıcaklıktaki malzemenin faz yapısı önem arz etmektedir.

Örnek bir uygulama için verilen şekil 13'teki bu deformasyon bölgelerine ek olarak mamul soğuma şartlarının yapı üzerindeki etkisi de ortaya çıkmıştır.

Son yıllarda çelikten mamul üretiminde, sıcak dövmeye göre, daha yüksek mekanik özelliklerin sağlanabildiği termomekanik-kontrollü dövme ile üretim tercih edilmektedir. Termomekanik dövme ile malzemelerde mikro alaşım elementi katkısı ile birlikte, deformasyon hızı, oranı ve sıcaklığı ile kontrollü soğutma prosesi uygulaması sonucunda daha ince taneli, tok ve yüksek mukavemetli ürünler elde edilebilmektedir. Termomekanik veya kontrollü dövme ile üretim sonucunda elde edilen ince taneli mikro yapı, mukavemeti ve tokluğu birlikte artırması yanı sıra gevrek - sünek geçiş sıcaklığını düşürmektedir. Bu açıdan ürünlerin üretim süreçleri tasarımı bu açıdan önem arz etmektedir. Plastik deformasyon ve malzemenin yüksek sıcaklıkta şekil alabilme özelliklerinden yola çıkarak, kaliteli-vasıflı çelik kullanarak tasarlanan dövme işlemine ait, deformasyon oranı, birim şekil değişimi-enerji, hammadde-ürün hacim oranı, termal gerilme-termal deformasyon ve nihai ürün şeklini etkileyen sıcaklık, zaman, hız ve enerji gibi sıcak dövme proses parametrelerinin elde

edilmesi ve özellikle ezme oranı (deformasyon), kalıp kuvvetleri ve gerilmeleri, temas basınçları, enerji ve zaman açısından değerlendirilmesi çok önemli hale gelmiştir.



**Şekil 2. 13.** Sıcaklık, deformasyonu ve soğuma süreçleri ile mikroyapı ilişkisi

**TMCP**, düşük karbon eşdeğerine (CE) sahip alaşımların mukavemeti arttırmak için kullanılır. Geleneksel üretimde C değerini azalttığımızda alaşımın mukavemeti düşmektedir. Fakat mikroalaşım elementleri (MAES) ve AC katkısı ile mukavemetteki azalma telafi edilmektedir. Bu prosesin artan ürün kalınlığı ile ortaya çıkan faydası azalmış olsada, düşük karbon eşdeğerine sahip çeliklerin yüksek mukavemette ve tokluk değerlerinde üretilmesi, kaynaklanabilme kabiliyetlerinin artırılması, kaynak sırasında ısıdan etkilenen bölge kırılma tokluğunun geliştirilmesi mümkün olabilmektedir. Çelik kompozisyonuna, Nb, Ti ve V miktarının % 0,1 den az olduğu mikroalaşım elementlerinin eklenmesinin amaçları;

1. Östenit tane boyutunun ve dönüşüm sonrasında ferrit tane boyutunun inceltilmesi (refinement)
2. Ferrit latisi içinde çökelti fazları oluşturması, faz dönüşüm sıcaklığını düşürmesi, artan dislokasyon yoğunluğu ile ferrit fazı tane boyutunun inceltilmesi
3. Östenit tane büyümesinin önlenmesi,
4. Östenit yeniden kristalleşmesinin, östenit-ferrit dönüşümünün geciktirilmesi
5. Katı çözeltili içindeki azotun-N bağlanarak nitrür oluşturup yapıdan uzaklaştırılmasıdır.

Kararlı ve çok küçük boyutlarda yapı içinde iyi dağılmış mikroalaşım karbürleri (NbC, VC, TiC), nitrürleri (NbN, VN, TiN) ve /veya karbonitrürleri (NbCN,

VCN, TiCN, (Nb,V)CN, (Nb, Ti)CN), C ve N olduğu çeliklerde çökelmektedir. Bu çökeltilerin östenit fazı içinde çözünürlük limitleri söz konusudur. Düşük sıcaklıklardaki östenit fazının içinde ve azalan sıcaklıkla oluşan ferrit fazı içinde çökme eğilimindedirler. Bu kararlı ikincil faz partiküller;

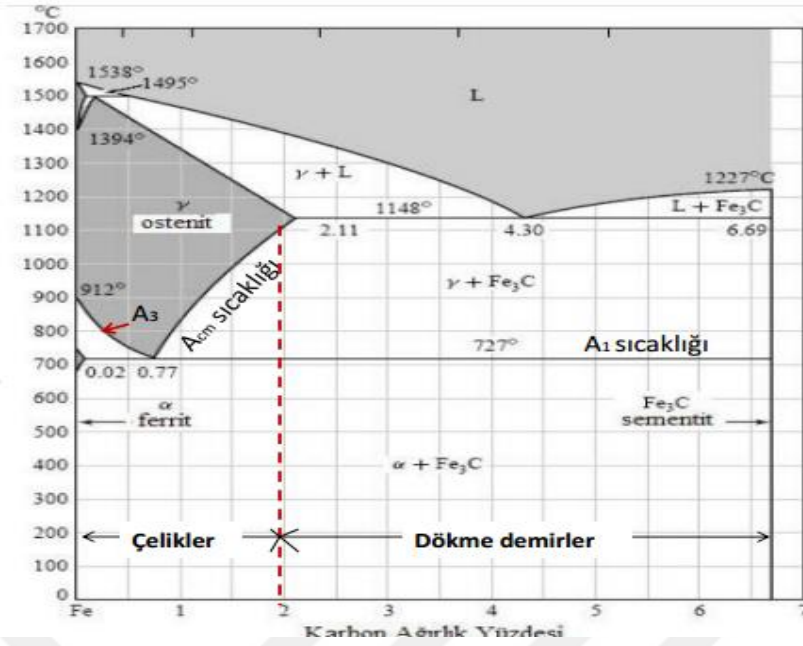
1. Östenit faz bölgesinde tavlama,
2. Sıcak dövme veya deformasyon sırasında,
3. Ferrit fazına dönüşüm sırasında ve sonrasında,
4. Hızlandırılmış soğuma sırasında (AC),
5. Tekstür formasyonu sırasında,
6. İkincil sertleştirme sağlamak için yapılan temperleme sırasında dönüşmüş martenzit içinde oluşabilmektedir.

Kontrollü şekillendirme prosedürleri;

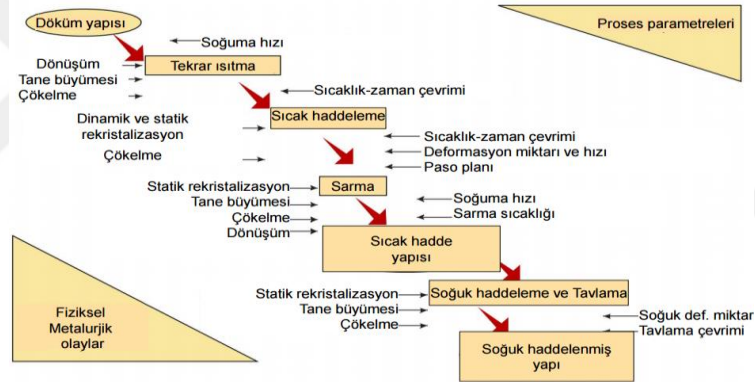
1. Küçük ve uniform östenit tanesi elde etmek için ısıtma ve bekleme tavlama-reheating,
2. Yüksek sıcaklık dövme serisi sonunda ince taneli östenit fazı elde edilmesi,
3. Östenit tanelerinin statik yeniden kristalleşmesi için madde geçişleri arasında yeniden kristalleşme sıcaklığının altında bir sıcaklıkta bekleme,
4. Östenit tanelerini kırmak, düzleştirmek veya pancake yapısı elde etmek amacı ile çift fazlı bölgede finish dövme,
5. Pancake şeklinde deforme olmuş östenit tanelerinden çok ince ferrit dönüşümlerinin oluştuğu havada soğutma işlemi olarak sıralanmaktadır.

## **2.5. Demir Karbon Denge Diyagramı Sıcaklık Aralıkları**

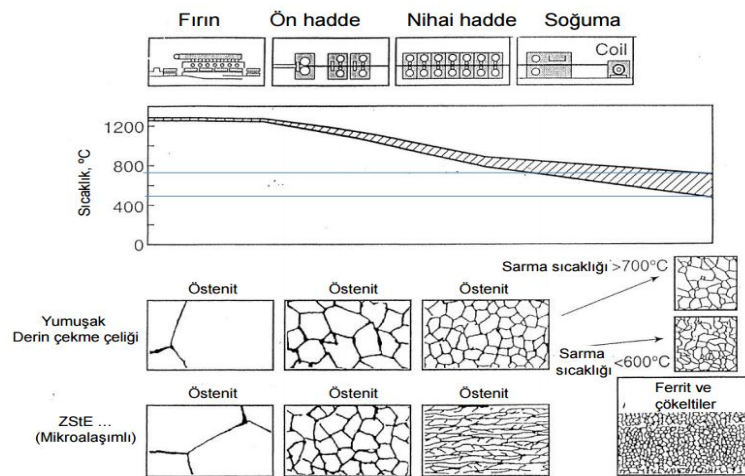
- A1 Ötektoid reaksiyon sıcaklığıdır.
- A2 küri sıcaklığı (769°C) dır. Bu sıcaklıkta manyetiklik kaybolur.
- A3 Ötektoid altı çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığıdır ( C oranına bağlı olarak değişir)
- Acm Ötektoid üstü çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığıdır (C oranına bağlı olarak değişir)



Şekil 2. 14. Fe-C Denge diyagramı



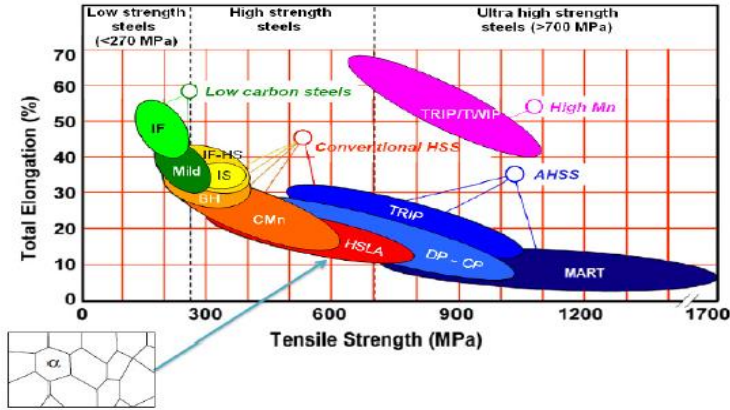
Şekil 2. 15. Döküm yapısının haddeleme sıcaklığına bağlı metalurjik değişimleri



Şekil 2. 16. Sıcak Haddedelemde Sıcaklık Ve Mikro Yapı Değişimi

## 2.6. Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Çelikler (Mikro Alaşımli Çelikler)

Mikro alaşımli çelikler, geliştirildikleri yapı çeliklerine oranla daha yüksek dayanım ve tokluk gösterirler. Mikro alaşımli çelikler, piyasada veya literatür de farklı isimlerle anlatılır. Alaşım oranı  $< \%1$  tane küçülterek ve ince sert karbürler oluşturarak mukavemeti arttırılmış olan ve akma mukavemeti/çekme mukavemeti oranı yüksek olan çeliklerdir. Isıl işlem yapılmadan kullanılırlar.



Şekil 2. 17. Mikro alaşımli çelikler

- Perlitçe fakir çelikler, İnce taneli çelikler
- Yüksek mukavemetli düşük alaşımli çelikler
- Z ste-çelikleri veya ZE çelikleri
- Mukavemetleri yüksek ‘‘345-620 MPa seviyelerine kadar ‘‘
- Toklukları yüksek, Şekil verilebilirlikleri iyi
- Kaynaklanabilirlik ve korozyon dayanıklılığı yüksektir.
- Yüksek mukavemet ağırlık oranına sahiptirler
- Maliyetin düşürülmesi

HSLA çeliklerinde ince tane boyutları, östenit tane boyutunun, sıcak haddeleme sırasında çeliğin sıcaklığı düştüğü zaman, karbürlerin, karbonitrürlerin, nitrürlerin oluşumu ile kontrolünü gerektirir. Bu ince çökeltiler, östenit tane sınırlarını sabitleyerek, tane büyümesine engel olurlar. Daha düşük haddeleme sıcaklıklarında dahi çökeltiler, çok fazla deforme olmuş östenit tanelerinin yeniden kristalleşmesini

yavaşlatırlar. Kontrollü haddelemede dinamik yeniden kristalleşme olarak bilinen temel tane rafinasyon mekanizması, sıcak deformasyon sırasında östenitin yeniden kristalleşmesidir. En iyi tane rafinasyon elementleri, kuvvetli karbür ve nitrür oluşturuçulardır, bunlar Nb, Ti ve V olabilir, Al da sadece nitrür oluşturur. Çeliğe az miktarda niobyum (Nb), titanyum (Ti) ve vanadyum (V) gibi karbür, nitrür veya karbonitrür oluşturan elementler ilave edilerek mikro alaşımlandırma gerçekleştirilir.

## 2.7. Mikro Alaşımli Çeliklerde Sertleştirme Mekanizmaları

HSLA çeliklerinde sertleşme mekanizmaları; katı eriyik sertleşmesi, dislokasyon sertleşmesi, çökeltme sertleşmesi ve tane küçültmedir. Katı eriyik sertleşmesi, dislokasyon sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi dayanımı arttırırken, tane küçültme hem dayanımı hem de tokluğu arttırmaktadır.

Küçük tane elde edebilmek için ;

- Östenitleştirme sıcaklığında tane büyümesini geciktirmek
- Yeniden kristalleşmenin geciktirilmesi
- Ferrit çekirdeklenme bölgesinde artma
- Ferrit tane büyümesinin geciktirilmesi

Küçük tane elde edebilmek için ;

1. Östenitleştirme sıcaklığında tane büyümesini geciktirmek
2. Yeniden kristalleşmenin geciktirilmesi
3. Ferrit çekirdeklenme bölgesinde artma
4. Ferrit tane büyümesinin geciktirilmesi



Şekil 2. 18. Yeniden kristallenme

## 2.8. Alaşım Elementlerinin Etkisi

### **Karbon:**

Karbon, çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. Mukavemet artışı ise karbon, demirle katı çözelti yaparak kuvvetli karbürler oluşturur. Bu karbürler ile aşınma direncinde de artış olur. İşlenebilirliğin ön planda olduğu çeliklerde karbon miktarı düşük tutulmalı, dayanım değerlerinin yüksek olması gerektiği durumlarda ise çeliğin karbon içeriği yüksek olmalıdır. Karbon değeri %0,8'den daha fazla artarsa kırılma artar, ısıtılma işlemi sonu sertlik kalıntı östenit nedeni ile artmaz. Yüksek karbonlu çeliklerin ısıtılma işleminde çatlama riski vardır.

### **Mangan:**

Zayıf bir karbür yapıcıdır. Sertliği ve sertleşme kabiliyetini artırır. Mangan, çeliğin sıcak şekillendirme prosesleri sırasında meydana gelen sıcak yırtılma eğilimini azaltır ve önler. MnS oluşturarak kükürdün neden olduğu gevrekliği azaltır. Yüksek miktarlarda ilave edildiğinde aşınma direnci yüksek östenitik çelik oluşur. Çeliğin talaşlı imalat kabiliyetini artırır. Ergimiş çeliği deoksidize eder. Kaynaklanabilirliği azaltır.

### **Silisyum:**

Başlıca alaşım elementidir. Katı eriyik mukavemetini artırır. Sertliği ve sertleşme kabiliyetini artırır. Ergimiş çelikte oksijeni giderir ve SiO<sub>2</sub> kalıntıları oluşturur. Karbür yapmaz. Oksidasyon direncini artırır. Elektrik ve manyetik özellikleri iyileştirir. Talaşlı imalatı olumsuz etkiler. Dökme demirlerde grafitleşmeyi artırır.

### **Fosfor:**

Empürite olarak kabul edilir. Düşük karbonlu çeliklere mukavemeti ve sertliği arttırmak için ilave edilebilir. Sünekliği ve tokluğu düşürür. Talaşlı imalat kabiliyetini artırır. Korozyon direncini artırır. Temper gevrekliğini tetikler. Yüksek miktarda ise, özellikle dökme demirlerde arzu edilmeyen Fe<sub>3</sub>P bileşimini oluşturur.

### **Kükürt:**

Empürite olarak kabul edilir. Gevrekliğe neden olur. Sünekliği ve darbe direncini düşürür. Mn ile bulunduğu işlenebilirliği artırır. Bazı işlenebilir çelikler



% 0.08 ile 0.15 kadar S içerir. Yüzey kalitesini olumsuz etkiler. Kaynaklanabilirliği azaltır.

**Nikel:**

Birçok çelikte başlıca alaşım elementidir. Katı eriyik mukavemeti ve sertliğini artırır. Sertleşebilirliği artırır. Düşük sıcaklıklarda tokluğu artırır. Karbür yapmaz. Yüksek kromlu paslanmaz çelikleri östenitik yapar. Korozyon direncini artırır.

**Krom:**

Bazı düşük alaşımlı çeliklerde ve tüm paslanmaz çeliklerde önemli alaşım elementidir. Katı eriyik mukavemetini ve sertliğini bir miktar artırır. Sertleşme kabiliyetini (Su alma derinliğini) artırır. Korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyon direncini artırır. Karbür yapıcıdır. Krom karbürler aşınma direncini artırır ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı kazandırır. Tokluğu artırır. Karbürizasyonu hızlandırır.

**Molibden:**

Bazı düşük alaşımlı çeliklerde ve takım çeliklerinde önemli alaşım elementidir. Katı eriyik mukavemeti ve sertliğini artırır. Sertleşebilirliği artırır. Kuvvetli karbür yapıcıdır. Yüksek sıcaklık özelliklerini ve sürünme direncini artırır. Temper gevrekliğini azaltır. Paslanmaz çeliklerde korozyon direncini artırır. Aşınma direncini artırır. Tokluğu artırır.

**Bakır:**

Birçok çelikte sıcak yırtılmaya yol açar. Empürite elementi olarak kabul edilir. Atmosferik korozyon direncini artırır. Özel çeliklerde ısıtılma sonrası yaşlanma ile yüksek mukavemet ve sertlik için kullanılır. Sünekliği düşürmeden mukavemeti artırır. Karbür yapmaz. Sıcak işlenebilirliği düşürür. Yüzey kalitesini azaltır. Akma ve çekme dayanımını artırır, yüzde uzamayı ve şekillenebilirliği azaltır. Soğuk çekilebilirliği olumsuz etkiler. Bu yüzden filmaşınlar de ki bakır oranının olabildiğince düşük olması istenir.

**Kobalt:**

Isıya dayanıklı çelikler ve bazı takım çeliklerinde önemli bir alaşım katkısıdır. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve sertliği artırır. Zayıf karbür yapıcıdır. Sertleşebilirliği düşürür.

**Tungsten:**

Bazı çeliklerde gerekli bir alaşım elementidir. Katı eriyik mukavemeti ve sertliği artırır. Sertleşebilirliği artırır. Kuvvetli karbür yapıcıdır. Karbürleri takım çeliklerinde aşınma direnci verir.

**Niobyum:**

Niobyum östenitte küçük çökelti oluşumlarıyla düşük sıcaklık tokluğunun eldesin de önemli bir rol oynar. Niobyum içeriği sınırlandırılmıştır; uygulamada niobyum karbonitrürleri östenitletirme de kısmen çözünmeden kalır. Nb mukavemet ve tokluğun artmasında etkilidir, yeniden kristalleşmeyi geciktirir ve tane boyutunu küçültür. En yüksek tane küçültme etkisi niobyumdadır. Etken miktar sınırı %0.04 Nb'dur. Bu miktar Nb-alaşımında tokluk maksimum seviyededir. Çökelme sertleşmesi etkisine sahiptir

**Titanyum:**

Alaşımına miktarı mukavemet artırıcı etki orantılı olarak arttığından, titanyumla yüksek mukavemet artışları hedeflenir. Titanyum mikro alaşımlı çelikler de yeniden kristalleşme ataletine sebep olmaktadır. Sıcak deforme edilebilirlik, azota olan aşırı afiniteden dolayı ve bunun neticesi bağlama yüksek sıcaklıklarda sürekli iyileştirilir. Titanyum nitrür kaynak esnasında ısı tesiri altındaki bölgedeki tane kabalaşmasını engeller. Titanyumun tane küçültme etkisi niobyum ile vanadyum arasındadır; çökelti sertleştirme karakteristiği ise vanadyuma benzemektedir

**Vanadyum:**

Çelikte çok çözünürlüğe sahip mikro alaşım elementidir. Vanadyum nitrür, vanadyum karbüre göre az çözünür. Azot oranının artmasıyla vanadyumun çözünme ve çökmesi iyi kontrol edilebilir. Vanadyum çökeltileri titanyuma göre daha az etkilidirler. Yeniden kristalleşme geciktirmesi düşüktür. Düşük sıcaklıklarda vanadyum KÇ halinde bulunur; böylece dönüşüm gecikir. Buna karşın yüksek vanadyum çözünürlüğü ferritin normalleştirme tavından sonra iyi bir çökelti sertleşmesine yol açmaktadır. Artan vanadyum miktarı ile akma mukavemeti artar. Tane inceltme etkisinin zayıf olmasından dolayı tokluğa etkisi negatiftir Temperleme direncini artırır/yüksek sıcaklıkta mukavemet kaybını azaltır.

**Kalsiyum:**

Çeliklere sülfür kalıntılarının şekil kontrolü için ilave edilir. (kükürt ile birleşerek yuvarlak deforme edilemez sülfürler oluşturur.) Kuvvetli bir deoksidandır. Kalsiyum oksit yapar ve kalsiyum alüminat kalıntıları oluşturur. Tokluğu geliştirir; şekil alabilirliği ve işlenebilirliği artırır.

**Zirkonyum:**

Çeliğe sülfür kalıntılarının şekil kontrolü için ilave edilir. (yuvarlak, deforme edilemez zirkonyum sülfürler oluşturur) Kuvvetli bir deoksidandır. Zirkonyum oksit oluşturur. Kuvvetli bir nitrit yapıcıdır.

**Bismut**

Çeliklerde işlenebilirliği artırır. Kurşuna benzer etkisi vardır.

**Alüminyum:**

Desoksidasyon maddesi ve mikro alaşım elementi olarak çelik üretiminde çifte fonksiyona sahiptir. Tam durgun çeliklerde çözülmüş Al mikro alaşım elementi olarak etki eder. Bu, östenit tane büyümesini engeller ve östenit dönüşümünü hızlandırır. Al esas etkisini ferritin kuvvetli tane inceltmesinde gösterir.

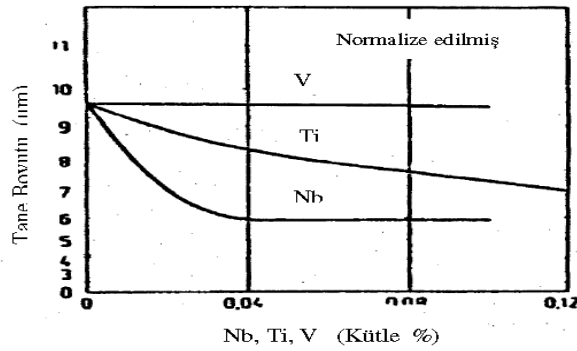
**Tablo 2.3.** Alaşım Elementlerinin Etkisi

Alaşım Elementi	Sertlik	Mukavemet	Akma Noktası	Uzama	Kesit Daralması	Darbe Dayanımı	Elastiklik	Yüksek Sıcaklığa Dayanım	Soğuma Hızı	Karbür Oluşumu	Alaşım Direnci	Dövülebilirlik	İşlenebilirlik	Oksitlenme Eğilimi	Korozyon Direnci
Si	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	—
Mn*	↑	↑	↑	~	~	~	↑	~	↓	~	↓↓	↑	↓	~	—
Mn**	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	~	—	—	—	↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	—
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	—	↓↓↓	↑↑↑
Ni*	↑	↑	↑	~	~	~	—	↑	↓↓	—	↓↓	↓	↓	↓	—
Ni**	↓↓	↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	—	↑↑↑	↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑
Al	—	—	—	—	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓	—	↓↓	—
W	↑	↑	↑	↓	↓	~	—	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	—
V	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓↓	↑↑↑↑	↑↑	↑	—	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	—	↑↑	↑↑	—	↑↑↑	↓	~	↓	—
MO	↑	↑	↑	↓	↓	↑	—	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	—
S	—	—	—	↓	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓↓	↑↑↑	—	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	—	—	—	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑

## 2.9. Dönüşüm Davranışına Etki Edilmesi

Yapı çeliklerinin C oranı mikro alaşım elementlerinin mukavemet ve tokluk artırıcı ile aşırı derecede düşürülebildiğinden, mikro alaşımli çelikler kısa dönüşüm zamanları göstermektedirler; böylece pratik bir sertleşme tehlikesi ortaya çıkmamaktadır. Mikro alaşım elementlerinin faz dönüşümüne etkisi alaşım oranı yanında, östenitleme sıcaklığına ve bununla birlikte çökelti durumuna bağlıdır. Düşük östenitleme sıcaklıkları, hızlandırılmış ferrit oluşumuna sebep olur, çünkü bir yanda matriksin C oranı çözünmemiş karbonitrürleri yoluyla düşürülürken, diğer yanda çökeltilerin kendileri  $\gamma/\alpha$  dönüşümü çekirdeklenme noktalarını temsil etmektedirler. Mikro alaşım elementlerinin artan oranı çözünürlük sıcaklığının yükselmesiyle aynı şekilde dönüşümün hızlandırılmasına etki eder. Yüksek östenitleme sıcaklıklarında matriksin C oranı ve mikro alaşım elementi oranı yükselirken, diğer yanda karbonitrürlerin çözünmesinden sonra çekirdek yoğunluğu düşer.

Ferrit oluşumu geciktirilerek beynit ya da martenzit kademesinde dönüşüm meydana gelebilmektedir



Şekil 2.19. Mikro alaşım elementlerinin tane boyutuna etkisi

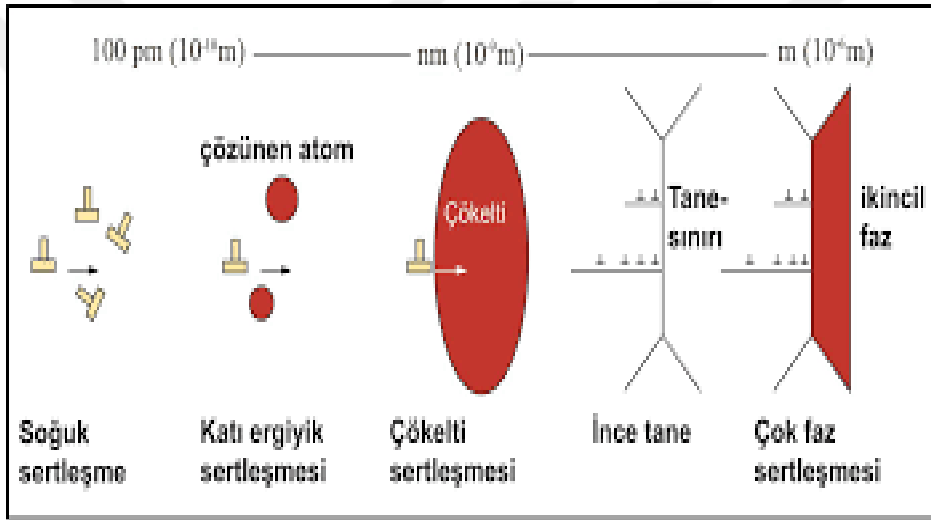
## 2.10. Çökelti Oluşumu

Düşük alaşımli yüksek mukavemetli çeliklerde özellikler çökelti tarafından belirlenir. Çökelti dislokasyon hareketini engeller, sertlik ve mukavemetin artmasına sebep olur. Ti, V, Nb gibi mikro alaşım elementleri, karbür, nitrür ve karbonitrür oluşumu üzerinden ilave bir çökelti sertleşmesi meydana getirirler. 1200 °C de bekleme sırasında partiküller çözünebilirken, son

hadde sıcaklıklarında ve daha da soğutma durumunda tekrar çökmeye yol açan kuvvetli bir aşırı doyum ortaya çıkmaktadır. Çökeltme hızı plastik deformasyonun artması ile artar.

Mikro alaşım elementlerine ve termomekanik işleme bağlı olarak östenitte çözülmüş mikro alaşım elementlerinin bir kısmı çöker. Çözeltide kalanlar, dönüşümden sonra veya dönüşüm sırasında çökeltirler.

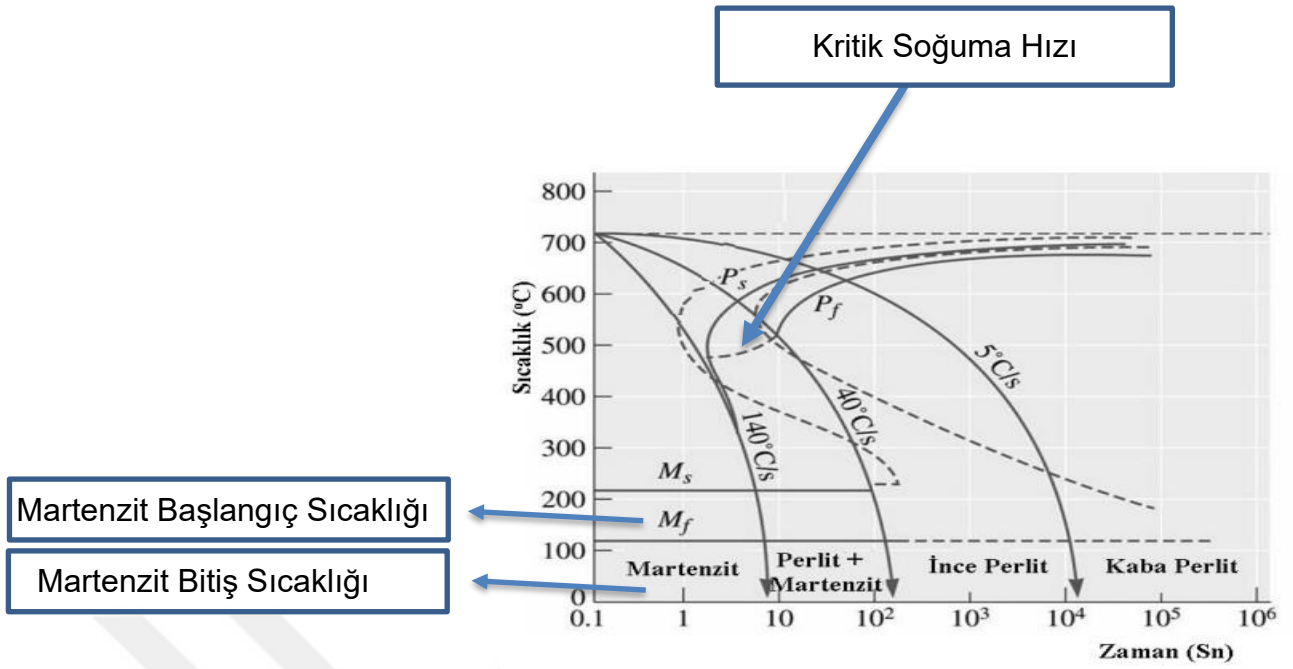
Çözeltideki mikro alaşımlar mikro yapının ve özelliklerin belirlenmesinde rol oynarlar. Ferrit kafesinin dayanımlarını artırmalarının yanında dönüşüm sıcaklığını düşürürler ferrit veya beyrit oluşumunu engellerler.



Şekil 2. 20. Çökelti Oluşumu

### 2.11. Kritik Soğuma Hızı

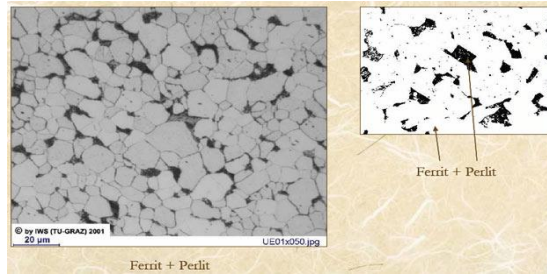
Yayınmalı veya yayınmasız dönüşümü belirleyen parametre soğuma hızıdır. Soğumanın kritik hızın üzerinde olması durumunda östenit martenzite dönüşür. Daha yavaş soğuma hızlarında yayınma gerçekleşir ve soğuma hızına bağlı olarak yayınma ile perlit veya beyrit oluşabilir.



Şekil 2. 21. Kritik Soğuma Hızı

### 2.11.1. Ferrit ( $\alpha$ -demir):

- Ferrit, demirde (HMK) az miktarda karbonun erimesiyle oluşan ara yer katı eriyiğidir.
- Demir-karbon denge diyagramında “ $\alpha$ ” bölgesinde oluşur.
- Ferritte en fazla %0.008 karbon çözülebilir.
- Çelikteki en yumuşak faz ferrittir.

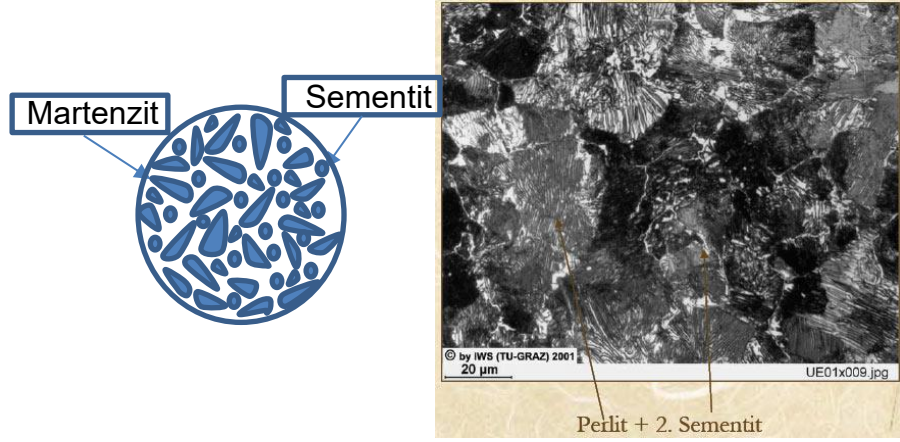


Şekil 2. 22. Ferrit yapısı

### 2.11.2. Sementit (Fe<sub>3</sub>C)

- %6,67 karbon içeren demir karbür bileşimidir.
- Çeliğin yapısındaki en sert fazdır.
- Yapıda iğneli veya ağ şeklinde bulur kırılımandır.

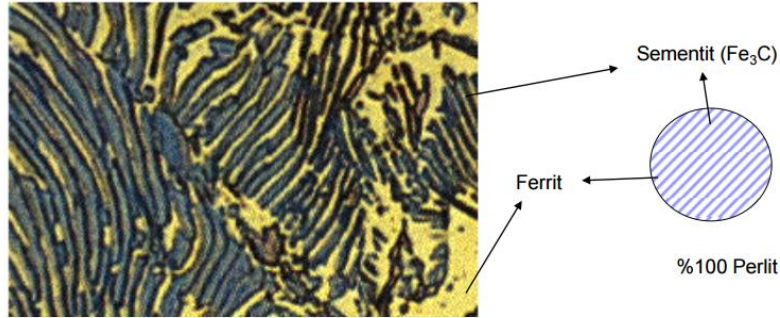
- Çekme dayanımı düşük, basma mukavemeti yüksektir.



Şekil 2. 23. Sementit yapısı

### 2.11.3. Perlit

- %0,83 karbon içeren ötektoid yapıdır. Ferrit ve sementitin karışımı olan perlit yavaş soğuma şartlarında 723 °C sıcaklıkta oluşur.
- Yuvarlak taneli veya lamelli olarak bulunabilir. Taneli türü, 723 °C sıcaklıkta tavlama ve çok yavaş soğutma ile oluşur. Lamelli türü ise havada soğutmayla oluşur.
- Perlitik yapı özellikle taşlanabilirlik için uygundur.



Şekil 2. 24. Perlit Yapısı

### 2.11.4. Östenit ( $\gamma$ -demir)

- YMK şeklinde demir yapıda katı karbon çözültisidir. Demir-karbon denge diyagramında " $\gamma$ " bölgesinde oluşan östenit yaklaşık %2'ye kadar karbon çözümlenebilir. Alaşımsız çelikte normal olarak oda sıcaklıklarında bulunmaz.



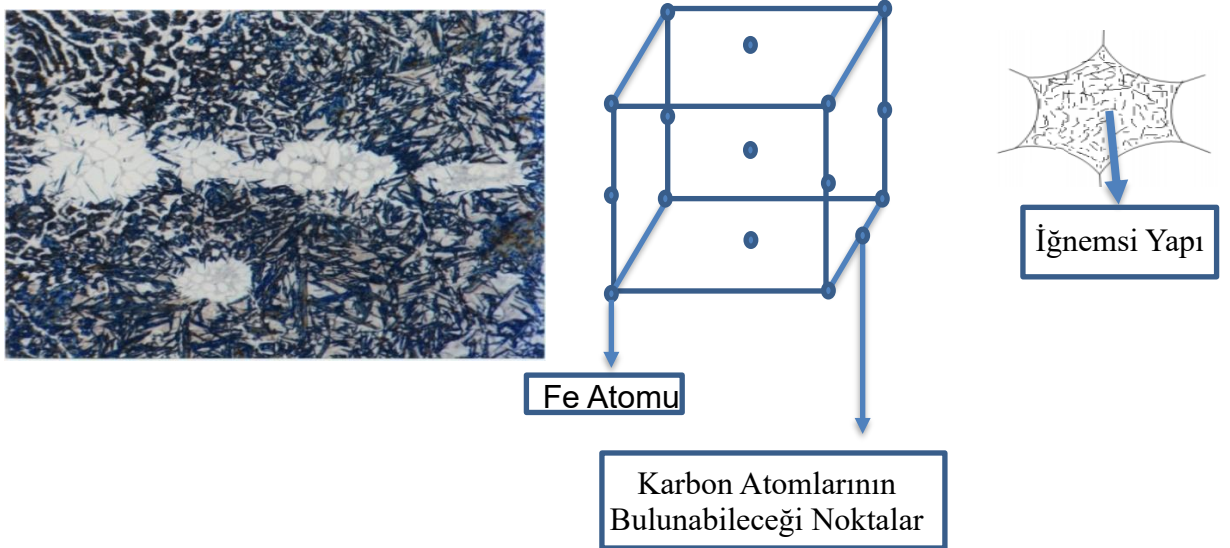
- Her cins çelikte 723 °C nin üzerinde bulunur. Ac3 ve Acm sıcaklıklarının üzerinde tam çözünme görülür yapı yumuşak ve antimanyetiktir.
- Ortalama özellikleri,
- Alaşimsız çelikte oda sıcaklıklarında bulunmaz.



Şekil 2. 25. Östenit Yapısı

#### 2.11.5. Martenzit

- Östenitin hızlı soğutulmasıyla elde edilen iğneli ve sert bir yapıdır. Yaklaşık 200- 250 °C civarında dönüşür.
- Östenitin, perlitik dönüşüme izin vermeyecek hızlarda, ancak martenzit elde etmeyecek kadar yavaş soğutulması sonucu farklı yapılar ortaya çıkar. Bu yapılar soğuma hızı arttıkça, sorbit, beynit, trostit isimlerini alır:



Şekil 2. 26. Martenzit Yapı

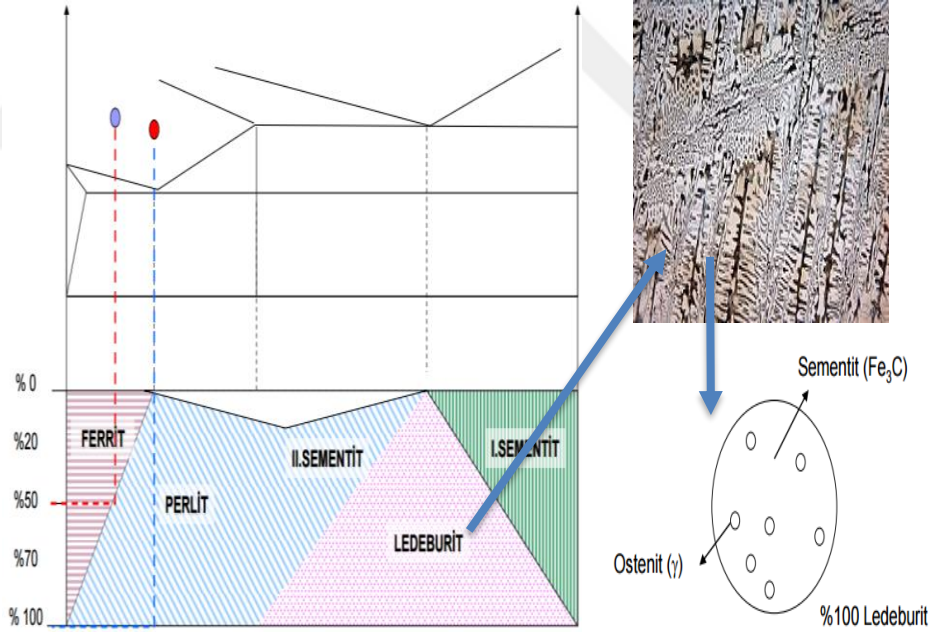
### 2.11.6. Beynit:

- Özmenevişleme işlemiyle elde edilen yapının sertliği perlit ve martenzit yapıların arasında olup, 40-60 HRC arasında değişir.

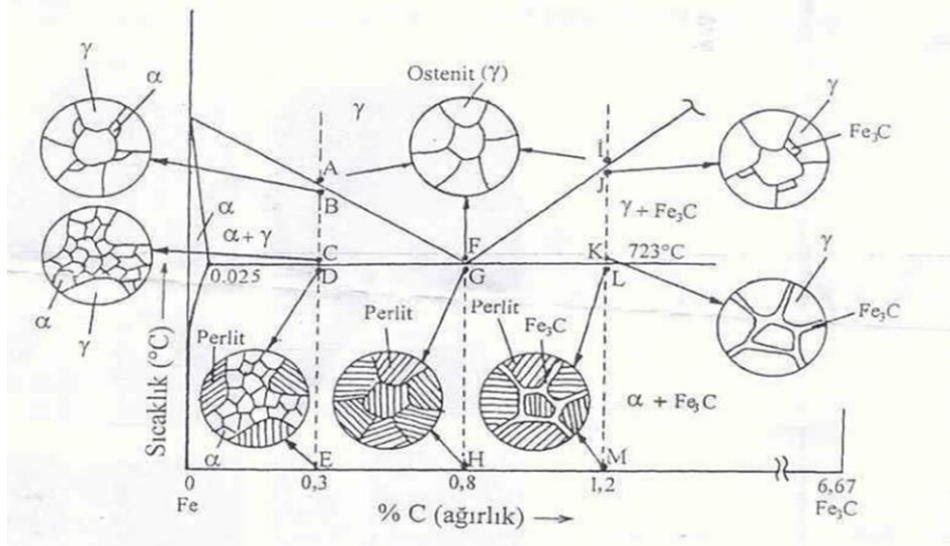
### 2.11.7. Ledeburit

Östenit ve sementit fazlarının mekanik karışımıdır. Demir-karbon denge diyagramının ötektik pozisyonudur.

- Yapısı Sementit + Östenittir (Bu yapıya ötektik yapıda denir),
- Ötektik sıcaklığında (1147°C'de) sıvıdan dönüşüm ile oluşur.
- %4,3 C içeren alaşım %100 ledeburitten ibarettir.
- Şekilde K noktası ötektik noktadır.
- Bu durumda C miktarı %4,3'tür



Şekil 2. 27. Fe – Fe<sub>3</sub>C Denge Diyagramında Ledeburit



**Şekil 2. 28.** Fe-Fe<sub>3</sub>C Denge Diyagramının Çeliğe Ait Kısmı ve Soğuma Sırasında Oluşan İç Yapılar

### 2.2.3. Metal Şekillendirme simülasyonu

Simufact; metal şekillendirme, mekanik birleştirme, kaynak ve hızlı prototipleme uygulamaları için benzetim programları geliştiren, Almanya merkezli bir yazılım şirkettir. Sayısal benzetim konusunda sektörün büyük grubu olan MSC 47 Software bünyesinde yer alan Simufact'in geliştirdiği simufact. forming programıyla soğuk, ılık ve sıcak dövme, sac şekillendirme, hadde, ısıl işlem, mekanik birleştirme ve kaynak prosesleri gerçeğe uygun şekilde analiz edilebilir[47]. Simufact.forming, imalat sektörü için özel geliştirilmiş bir sayısal benzetim yazılımı olup aşağıdaki prosesler simüle edilebilir;

- Sıcak profil haddeleme,
- Soğuk, ılık ve sıcak dövme,
- Rekvals ve çapraz kamalı haddeleme,
- Sac şekillendirme,
- Yüzük haddeleme,
- Elektro şişirme,

- Açık kalıpta dövme,
- Profil ekstrüzyonu,
- Mekanik birleştirme,
- Perçinleme
- Kenetleme
- Kaynaklı birleştirme,
- Direnç punta kaynağı
- Sürtünme karıştırma punta kaynağı
- Sürtünme kaynağı,
- Statik yükleme,

Isıl işlem. Simufact.forming ile aşağıdaki parametreleri incelemek mümkündür;  
Şekillendirme kuvveti ve torkları Parça üzerindeki:

- Malzeme akışı
- Katlanma
- Kalıp doldurma / doldurmama
- Çapak / fire
- Akız çizgileri (Lif yapısı)
- Sıcaklık dağılımı
- Geri yaylanma
- Kalınlık değişimi
- Artık gerilme
- Sünek kırılma / çatlama
- Faz dönüşümleri
- Sertlik

- Tane boyutu

Kalıp üzerindeki:

- Gerilme ve deformasyon dağılımı
- Sıcaklık dağılımı
- Aşınma dağılımı



### 3.SİMÜLASYON DESTEKLİ ANALİZ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1.Mevcut Durum Çalışmaları

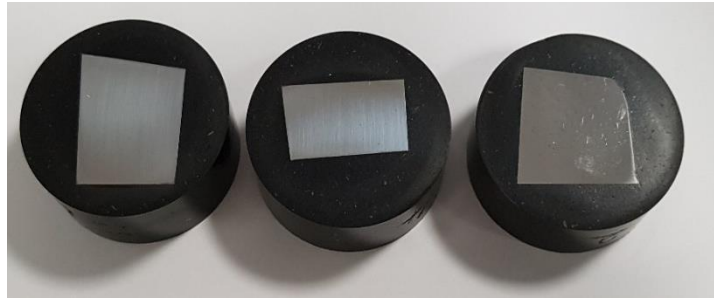
1141M, C45E ve 41Cr4 malzemelerinin ham parça ve dövülmüş paralarının mikro yapıları ve sertlik taramaları yapılarak yenii geliştirilerek çeliğin en az 41Cr4'ün özelliklerine yakın olması hedeflenmiştir.

#### 3.2. Numune Hazırlama

Çelik bar ve dövülmüş çatallı flanşdan kesme cihazı kullanılarak alınan numuneler,

1. Bakalit ile kaplanmıştır,
2. Numuneler sırasıyla 120, 400, 600, 800, 1000, 1200 SiC zımparalar ile zımparalanmıştır,
3. Her zımpara geçişinde numune su ile temizlenip akol ile kurutulmuştur,
4. Zımparalama her aşamada numuneler 90° çevrilerek uygulanmıştır,
5. 6 µm elmas pasta yardımıyla numuneler çuhada parlatılmıştır. İstenilen yüzey pürüzlülüğü elde edilene kadar işlem tekrarlanmıştır.
6. Parlatma sonrası numune su ile temizlenip alkol yardımıyla kurutulmuştur.

Mikro yapı incelemeleri için numuneler %3 lük Nital dağlayıcı ile dağlanmıştır.



Şekil 3. 1. Numune Hazırlama

#### 3.3. Spektrometre ile Kimyasal Kompozisyonun Belirlenmesi

Kardan mili parçası olan flanşa ait farklı çelik malzemelerin spektrometre yardımı ile kompozisyonu belirlenmiştir. Analiz sonuçlarında standart alaşım elementleri haricinde; Cr, Mo ve Ni elementleri belirlenmiştir.



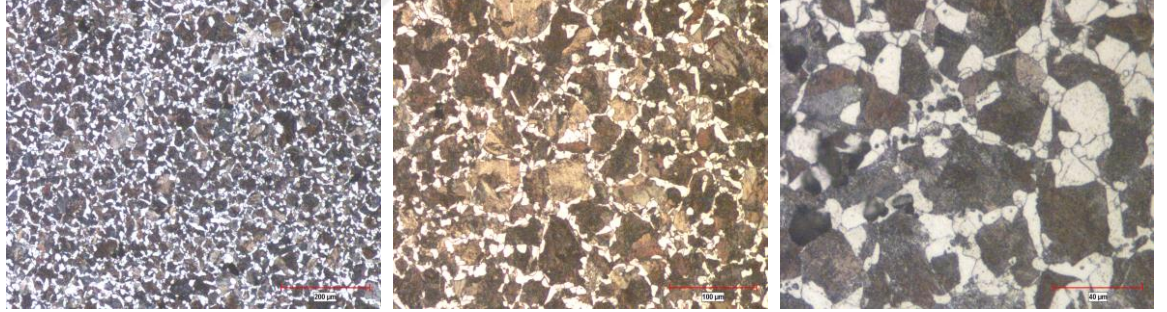
**Tablo 3. 1.** Spektrometre ile kimyasal kompozisyon incelenmesi

Kalite	C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Mo	Ni
1.1141	0,12-0,18	0,15-0,35	0,30-0,60	0,035	0,03	—	—	—
1.7035	0,38-0,45	0,15-0,40	0,60-0,90	0,035	0,035	0,90-1,20	—	—
1.1191	0,42-0,5	≤0,40	0,50-0,80	≤0,03	≤0,035	≤0,40	≤0,10	≤0,40

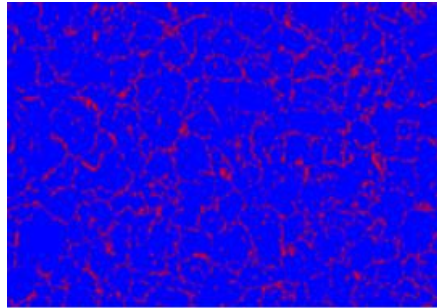
### 3.4. Mevcut Durum Mikro Yapı İncelemeleri

#### 3.4.1. 1141M – 1.1141 – Çelik Bar

1.1141 kodlu düşük karbonlu malzemeye ait metalografik sonuçlara göre; 34,99 mikrometre tane boyutu ve %63 perlit % 37 ferrit faz oranlarına sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada vickers sertlik testinde 1.1141 için ortalama sertlik değeri 232HV'dir.



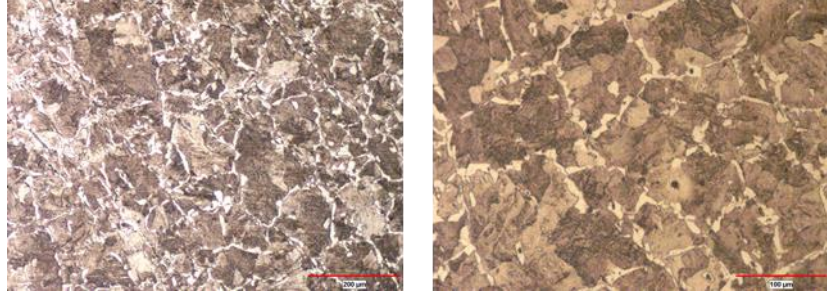
**Şekil 3. 2.** 1141M 10x , 20x ve 50x yaklaşım ile mikroyapı incelemeleri



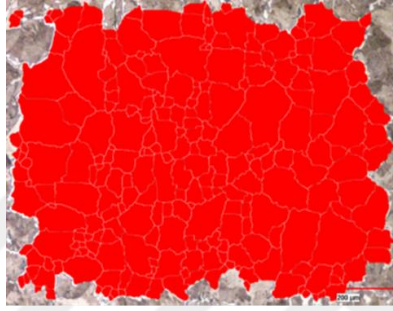
**Şekil 3. 3.** Tane Boyutu

1200°C de dövülmüş çatallı flanş'ın metalografik sonuçlara göre; 56,86 mikrometre tane boyutu ve % 70 perlit % 30 ferrit faz oranlarına sahip olduğu

belirlenmiştir. Yapılan çalışmada vickers sertlik testinde 1.1141 için ortalama sertlik değeri 241HV'dir.



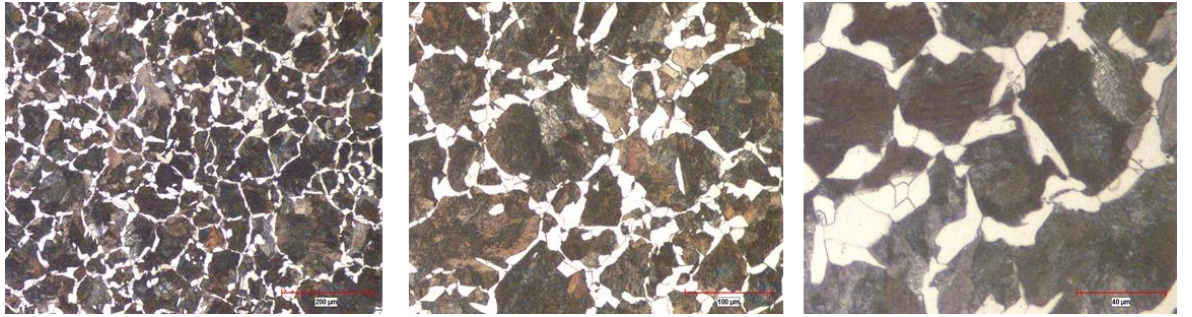
Şekil 3. 4. 1141M 10x ve 20x yaklaşım ile mikroyapı incelemeleri



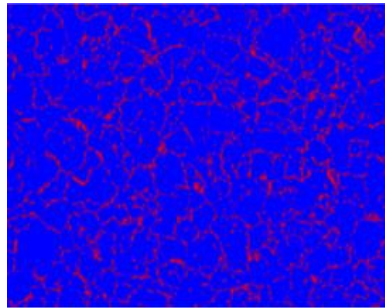
Şekil 3. 5. 1141M Tane Boyutu

#### 3.4.2 C45E – 1.1191 – Çelik Bar

1.1191 numunesinde ise; Yapı içerisinde %61 perlit % 39 ferrit yapısı gözlenmiştir ortalama tane boyutu 49,84 dur. Yapılan çalışmada vickers sertlik testinde 1.1191 için ortalama sertlik değeri 210 HV'dir.



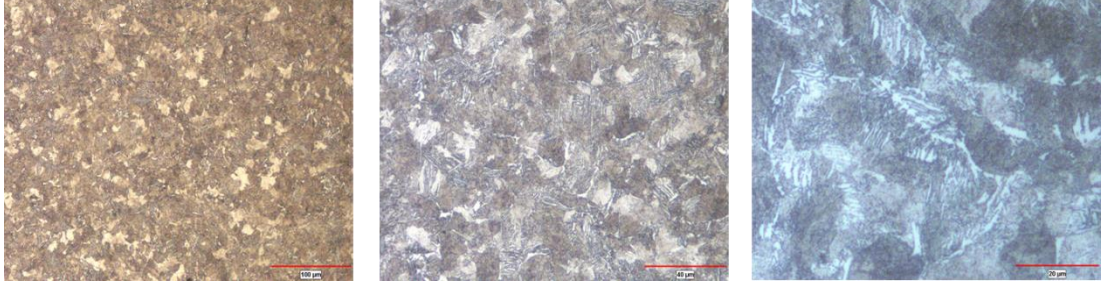
Şekil 3. 6. C45E 10x , 20x ve 50x yaklaşım ile mikroyapı incelemeleri



Şekil 3. 7. C45E Tane Boyutu



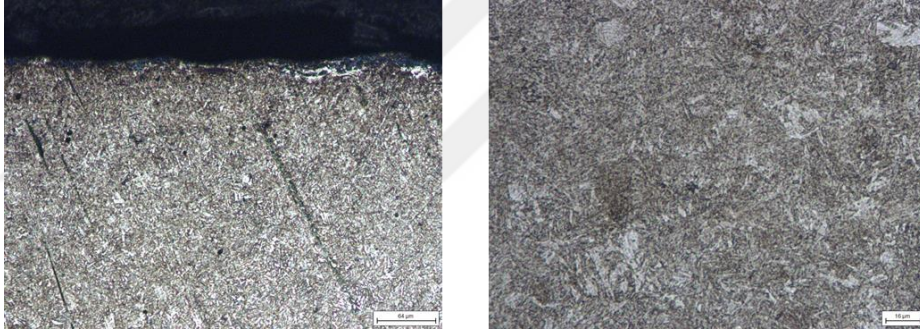
C45E malzeme ile 1200°Cde dövülen çatallı flanşın ortalama sertlik değeri 235HVdir. Dövme sonrası yapı içerisinde martenzit yapı oluşumu görülmüştür. Dövme prosesi sonrası sementasyon uygulanmaktadır.



**Şekil 3. 8.** Sıcak dövülmüş C45E 10x , 20x ve 50x yaklaşım ile mikroyapı incelemeleri

### 3.4.3 41Cr4 – 1.7035 – Dövme Parça

41Cr4 malzeme ile 1200°Cde dövülen çatallı flanşın ortalama sertlik değeri 271 HV dir.



**Şekil 3. 9.** 41Cr4 10x ve 50x yaklaşım ile mikroyapı incelemesi

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, sayısal simülasyon ve hesaplamalı malzeme bilimi destekli yeni nesil çelik alaşımı ve dövme prosesi geliştirilmesi sonucunda hafif ve yüksek mukavemetli kardan mili tasarımı ve üretimi için bilgi birikimi elde etmek hedeflenmektedir. Proje hedeflerinde belirtilen ürün mekanik özelliklerindeki artış; çelik alaşımının termal/mekanik özellikleri, deformasyon öncesi tavlama, dövme operasyonları sayısı, deformasyon oranı, sıcaklığı ve soğutma rejiminin birlikte tasarlanması ile mümkün olabilmektedir.

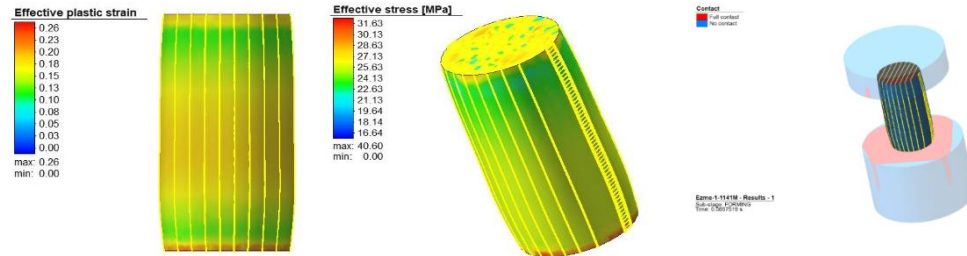
Hesaplamalı malzeme mühendisliğinin temel prensipleri baz alınarak karbür-nitrür ve/veya karbonitrür oluşumu gösteren alaşım elementlerinin çeşidi ve miktarının belirlenmesi, sayısal simülasyon yöntemi ile geliştirilen malzeme datası kullanılarak sıcak dövme ve soğutma rejimine bağlı son ürün mekanik özelliklerinin değişimi ortaya çıkarılmıştır. Bu süreçte eşlenik simülasyon uygulanarak çelik alaşımından son ürüne kadar üretim zinciri bilgisayar ortamında tasarlanacak ve elde edilen sonuçlar çelikten üretilen mevcut/yeni kardan mili tasarımlarının hafifleştirilmesinde kullanılacaktır. Sonlu elemanlar analizi doğrulama çalışmalarında çalışmalarını kapsamında mevcutta kullanılan çelik alaşımları ve bu alaşımlar ile üretimi gerçekleştirilmiş kardan mili ürünlerinin metalografik ve mekanik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

### 4.1. Mevcut Durum Simülasyon Destekli Mekanik Özellik Kontrolleri

#### 4.1.1. 1141M Dövme Simülasyonları

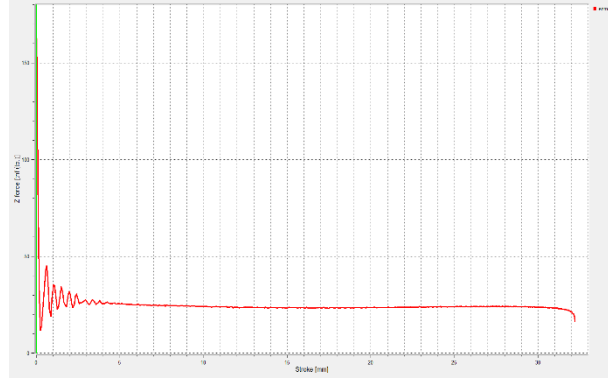
1141M malzeme ile 1200 °C de simülasyon ortamında 5 operasyonda dövülen çatalı flanşa ait bilgiler aşağıdadır.

#### Ön Şekillendirme 1;



**Şekil 4. 1.** 1141M Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress

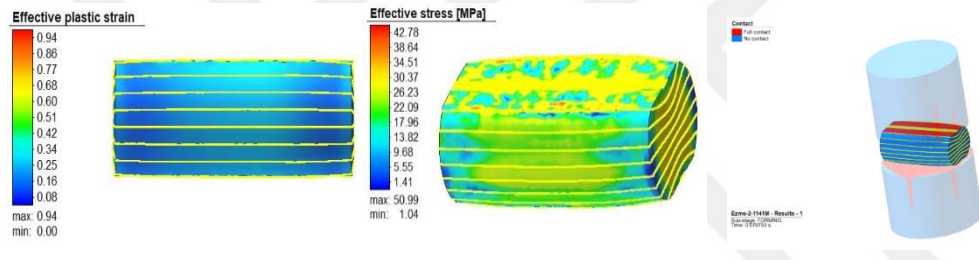
Ön Şekillendirme 1 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,26 – Effective stress 31,63 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



**Şekil 4. 2.** 1141M Ön Şekillendirme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi

### Ön Şekillendirme 2;

İkinci proses ise Ön Şekillendirme 2 olarak adlandırılan aşamadır. Bu aşamada ilk dövme yüzeyi yan yatırılarak ikinci bir dövme yapılır.

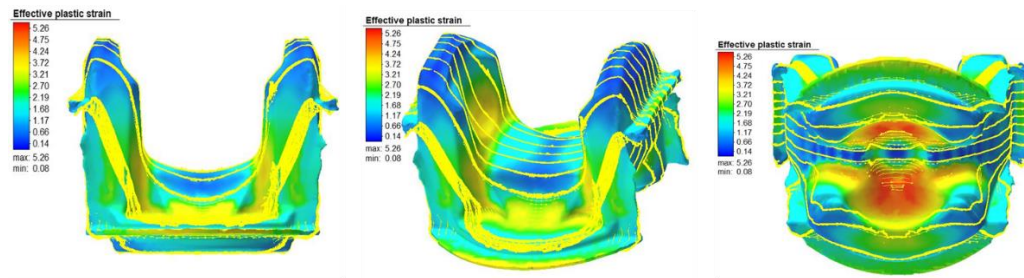


**Şekil 4. 3.** 1141M Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Yapılan 2. dövme operasyonu sonucunda Effective plastic strain 0,94 – Effective stress 42,78 olarak tespit edilmiştir.

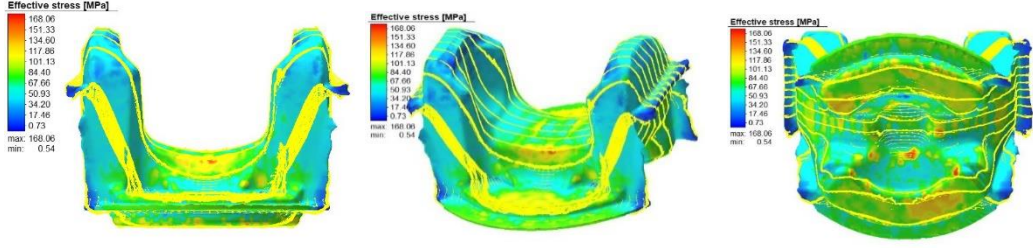
### Dövme 1;

3. operasyon dövme 2 operasyonudur. Bu proses sırasında çatallı flanş'ın ana şekli verilmektedir.



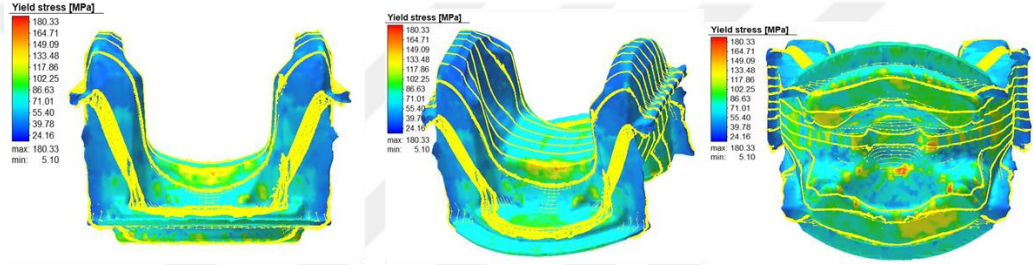
**Şekil 4. 4.** 1141M Dövme 1 Effective Plastic Strain

Yapılan dövme 1 operasyonu sonucunda Effective plastic strain 5,26 olarak tespit edilmiştir.



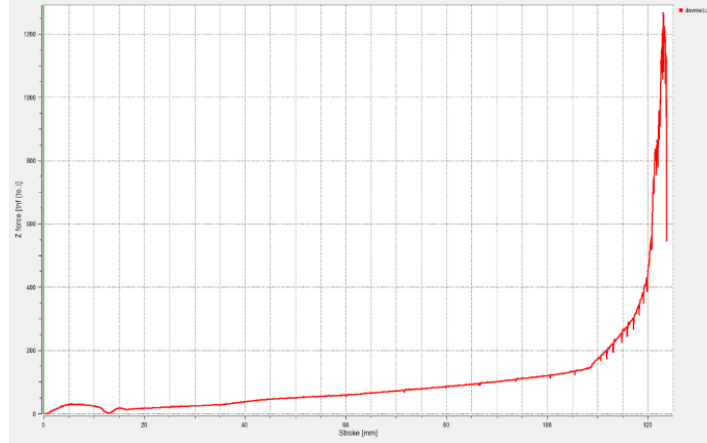
Şekil 4. 5. 1141M Dövme 1 Effective Stress

Effective stress ise 168,06 olarak belirlenmiştir. Çatallı flanşa ait görseller yukarıdadır.



Şekil 4. 6. 1141M Dövme 1 Yield Stress

Yield Stress 180,33 olarak tespit edilmiştir.

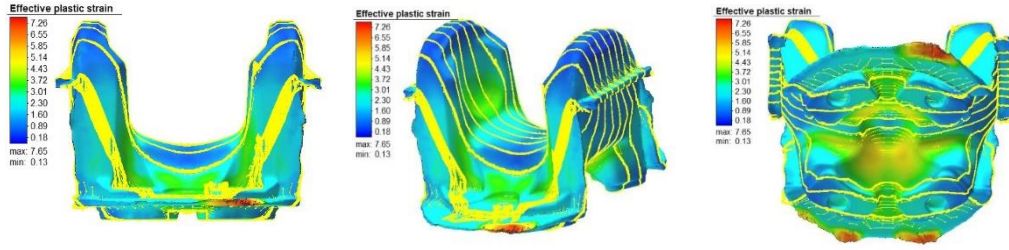


Şekil 4. 7. 1141M Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

## Dövme 2;

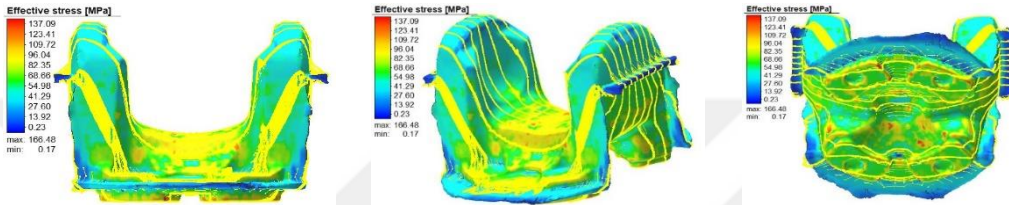
Dövme 2 operasyonunda ise kardan mili alt parçası olan çatallı flanşın teknik resimdeki özelliklerine en yakın şekli verilir.





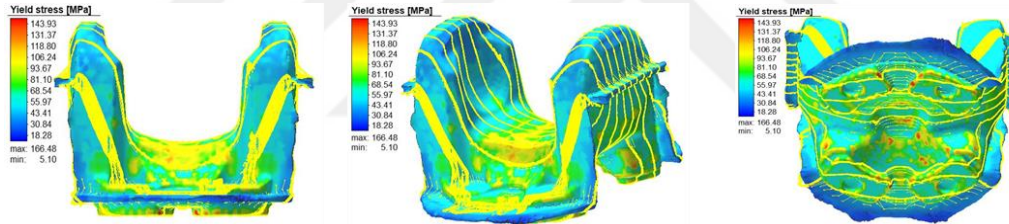
Şekil 4. 8. 1141M Dövm 2 Effective Plastic Strain

Effective plastic strain 7,26 olarak tespit edilmiştir.



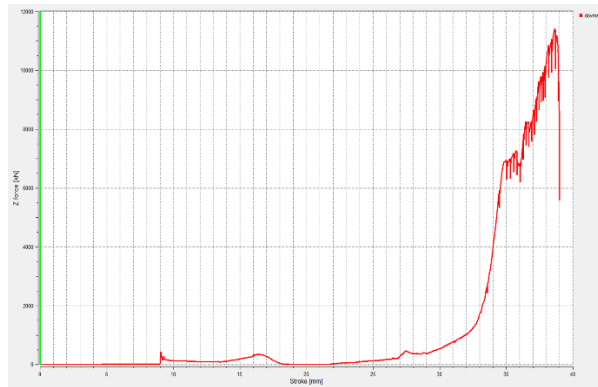
Şekil 4. 9. 1141M Dövm 2 Effective Stress

Effective stress ise 137,09 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 10. 1141M Dövm 2 Yield Stress

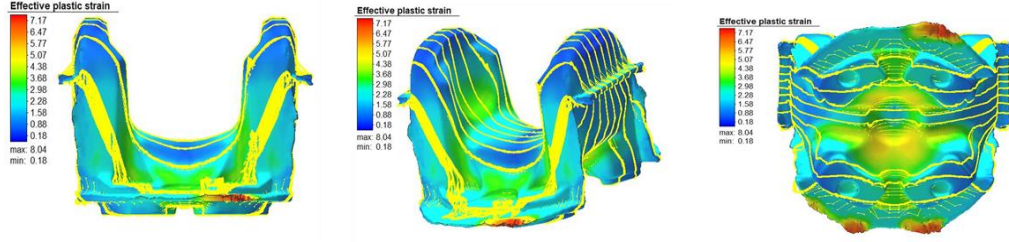
Yield Stress 143,93 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4. 11. 1141M Dövm 2 Kuvvet- Deplasman Eğrisi

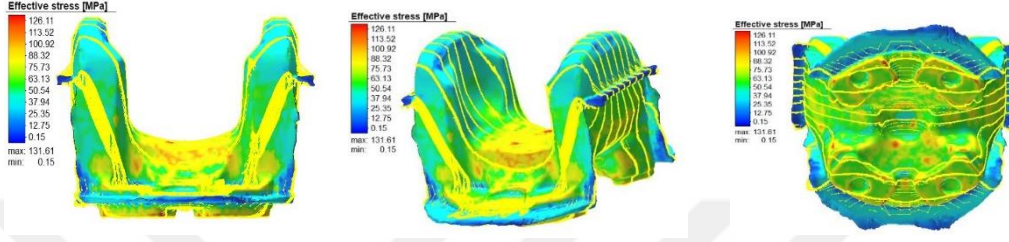
**Son Şekillendirme;**

Son Şekillendirme prosesi sonrası kardan mili nihai şekli verilir.



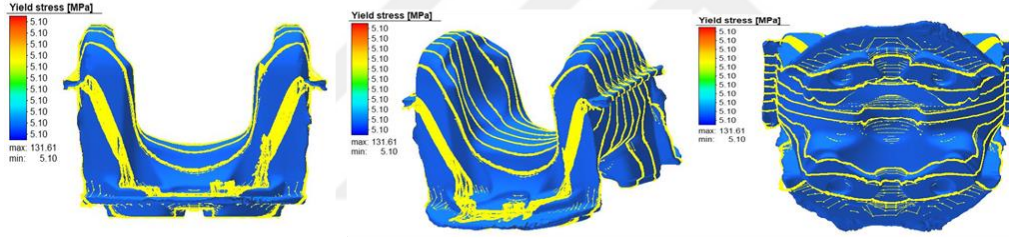
**Şekil 4. 12.** 1141M Son Şekillendirme Effective Plastic Strain

Effective plastic strain 7,17 olarak tespit edilmiştir.



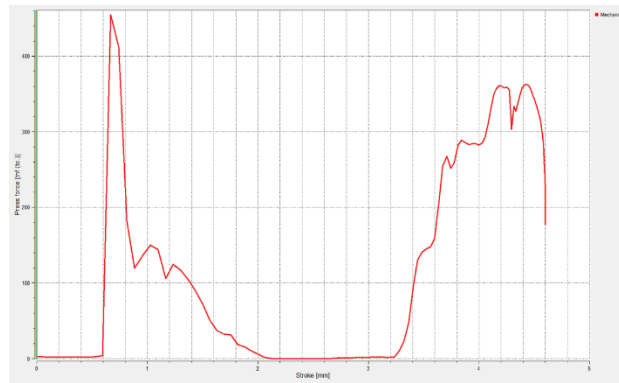
**Şekil 4. 13.** 1141M Son Şekillendirme Effective Stress

Effective stress ise 126,11 olarak belirlenmiştir.



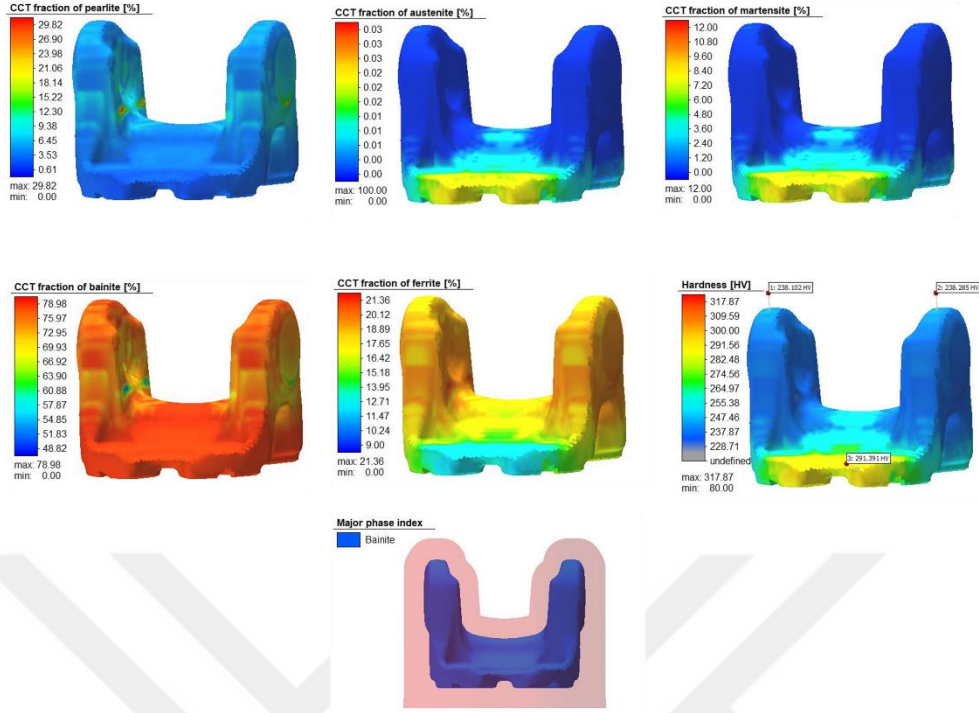
**Şekil 4. 14.** 1141M Son Şekillendirme Yield Stress

Yield Stress 5,10 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4. 15.** 1141M Son Şekillendirme Kuvvet- Deplasman Eğrisi

## Soğutma;



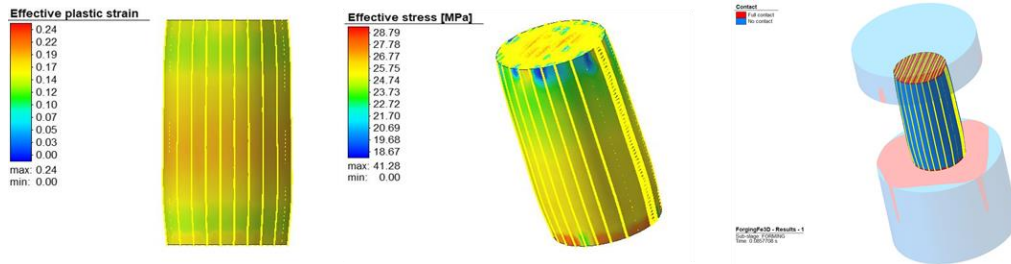
Şekil 4. 16. 1141M Soğuma Simülasyonu

Yapı içerisinde Beynit fazı oluşmuş olup sertlik değeri 317,87HV olarak tespit edilmiştir.

### 4.2.2. C45E Dövme Simülasyonları

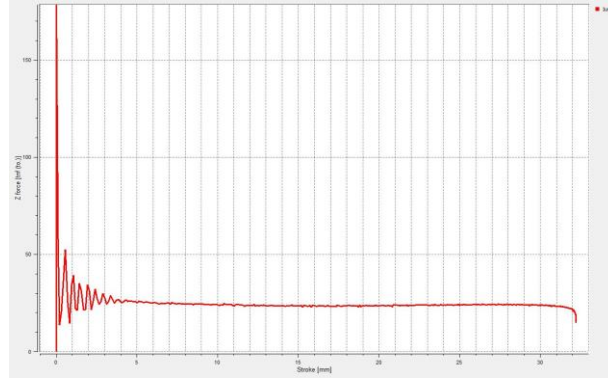
C45E malzeme ile 1200 °C de simülasyon ortamında 5 operasyonda (Ön Şekillendirme 1, Ön Şekillendirme 2, Dövme 1, Dövme 2, Son Şekillendirme) dövülen çatalı flanşa ait bilgiler aşağıdadır.

### Ön Şekillendirme 1;



Şekil 4. 17. C45E Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress

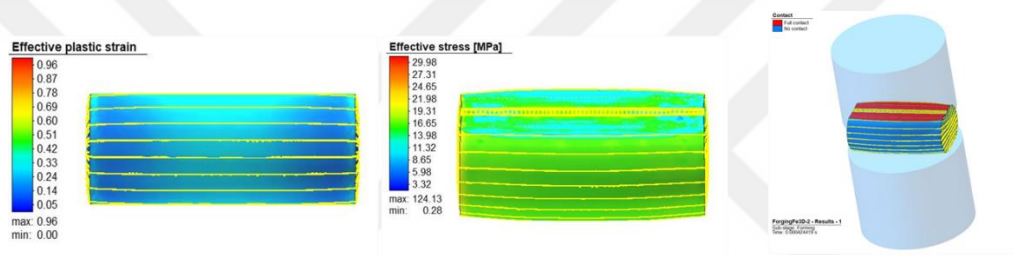
Ön Şekillendirme 1 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,24 – Effective stress 28,79 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



Şekil 4. 18. C45E Ön Şekillendirme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi

### Ön Şekillendirme 2;

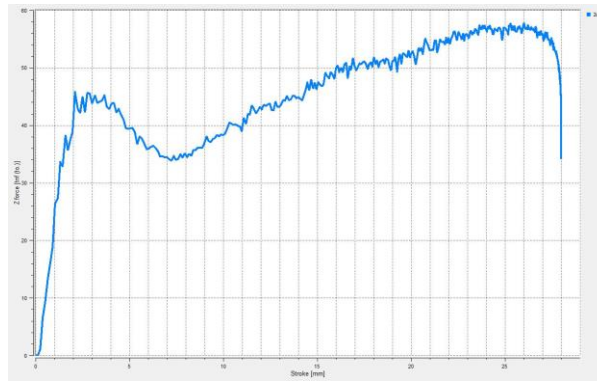
İkinci proses ise Ön Şekillendirme 2 olarak adlandırılan aşamadır. Bu aşamada ilk dövme yüzeyi yan yatırılarak ikinci bir dövme yapılır.



Şekil 4. 19. 1141M Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Effective plastic strain 0,96 – Effective stress 29,98 olarak tespit edilmiştir.

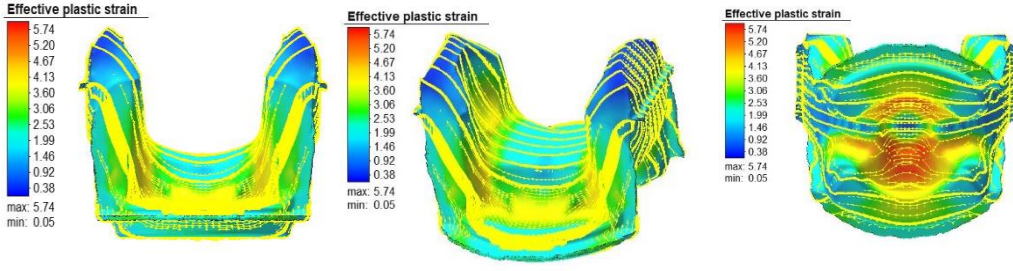
Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



Şekil 4. 20. C45E Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

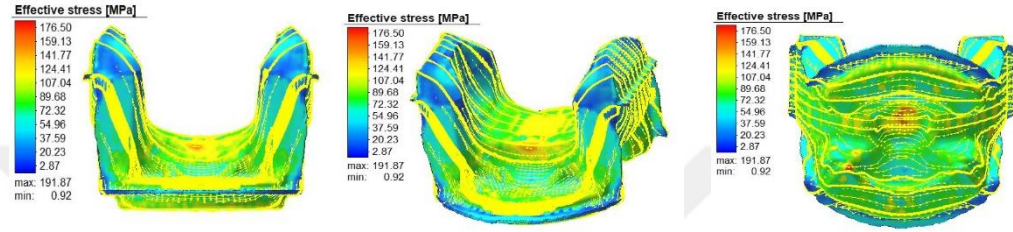


## Dövme 1;



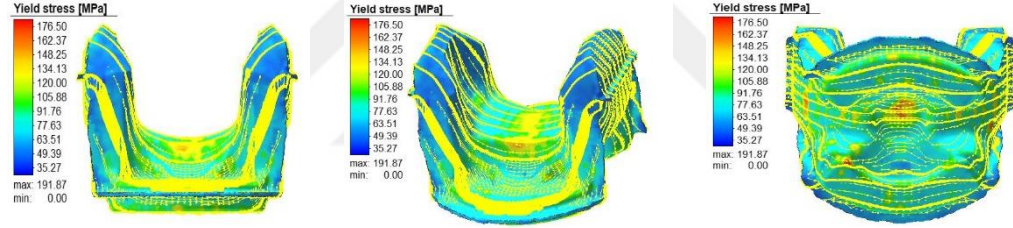
Şekil 4. 21. C45E Dövme 1 Effective Plastic Strain

Dövme 1 prosesi sonrasında elde edilen Effective plastic strain 5,74'dir.



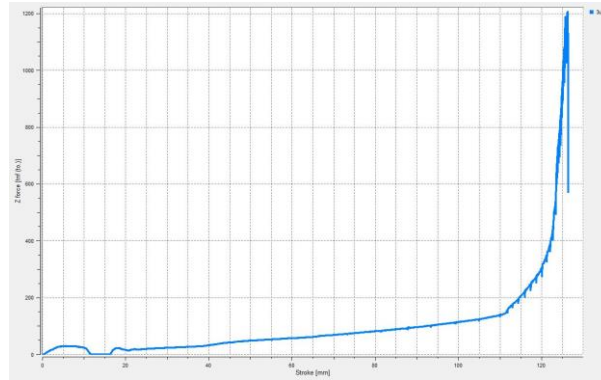
Şekil 4. 22. C45E Dövme 1 Effective Stress

Effective stress ise 176,50 olarak belirlenmiştir.



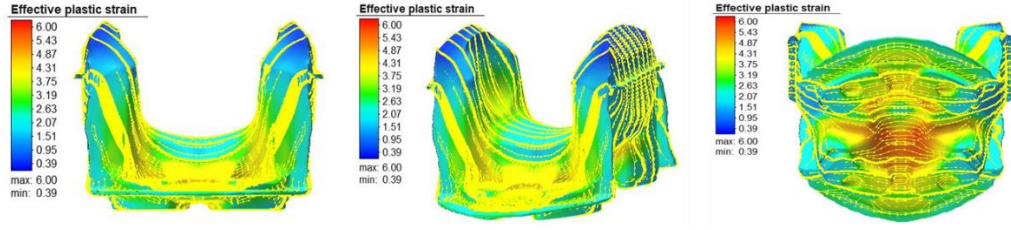
Şekil 4. 23. C45E Dövme 1 Yield Stress

Yield Stress 176,50 olarak tespit edilmiştir.



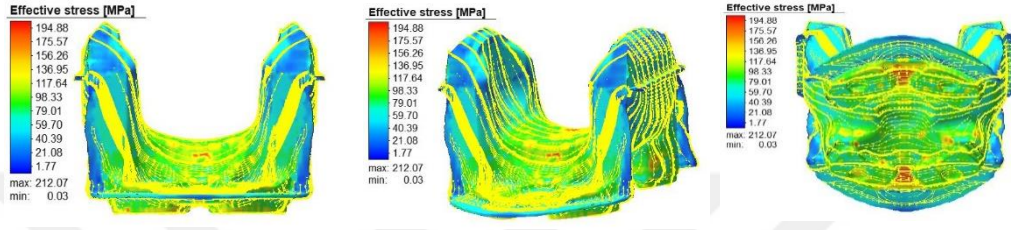
Şekil 4. 24. C45E Dövme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi

## Dövme 2;



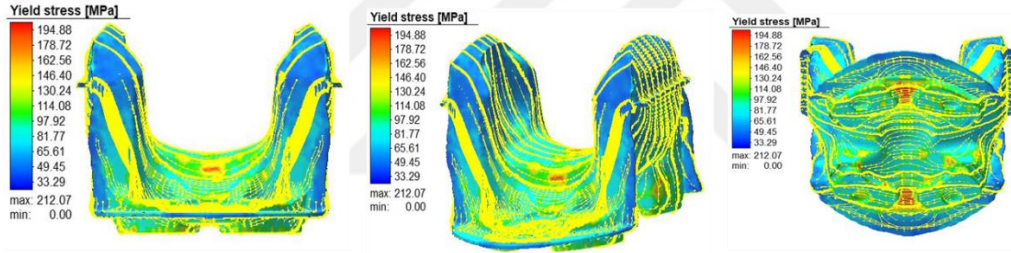
Şekil 4. 25. C45E Dövme 2 Effective Plastic Strain

Dövme 2 prosesi sonrasında elde edilen Effective plastic strain 6,00'dir.



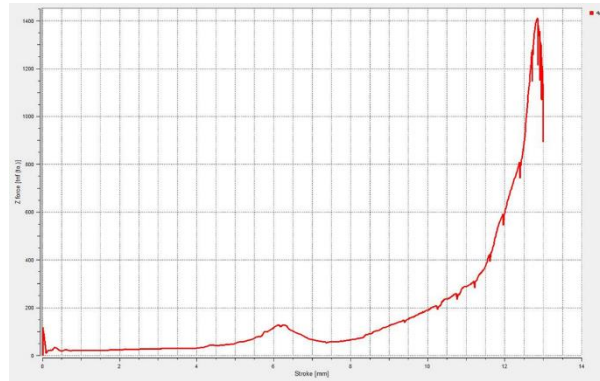
Şekil 4. 26. C45E Dövme 2 Effective Stress

Effective stress ise 194,88 olarak belirlenmiştir.



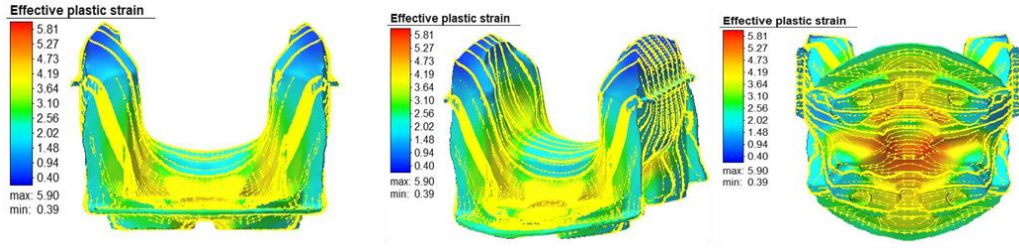
Şekil 4. 27. C45E Dövme 2 Yield Stress

Yield Stress 194,88 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdadır.



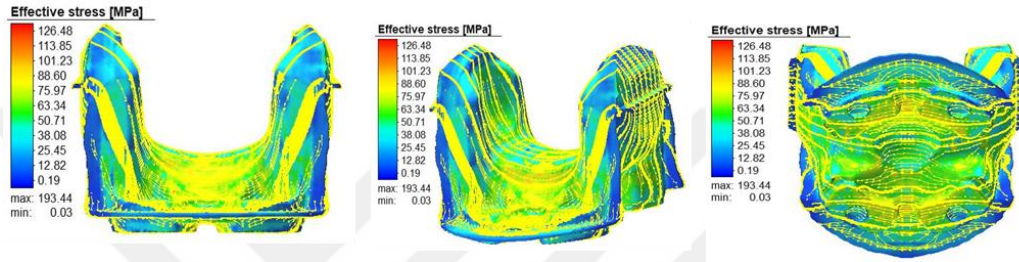
Şekil 4. 28. C45E Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

## Son Şekillendirme ;



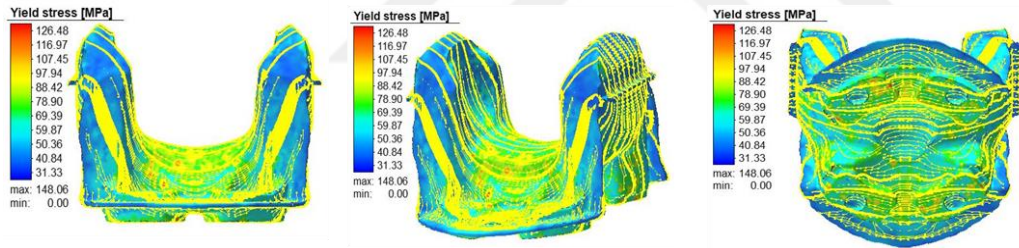
Şekil 4. 29. C45E Son Şekillendirme Effective Plastic Strain

Son Şekillendirme prosesi sonrasında elde edilen Effective plastic strain 5,81'dir.



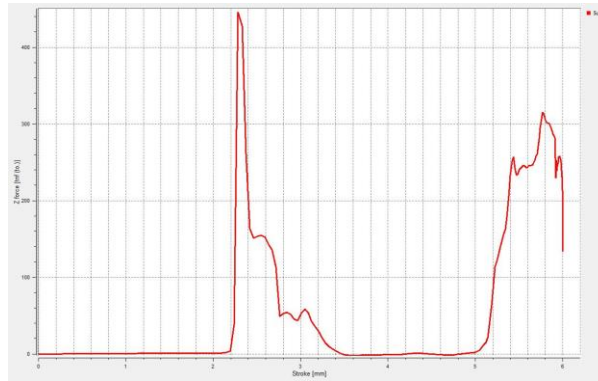
Şekil 4. 30. C45E Son Şekillendirme Effective Stress

Effective stress ise 126,48 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 31. C45E Son Şekillendirme Yield Stres

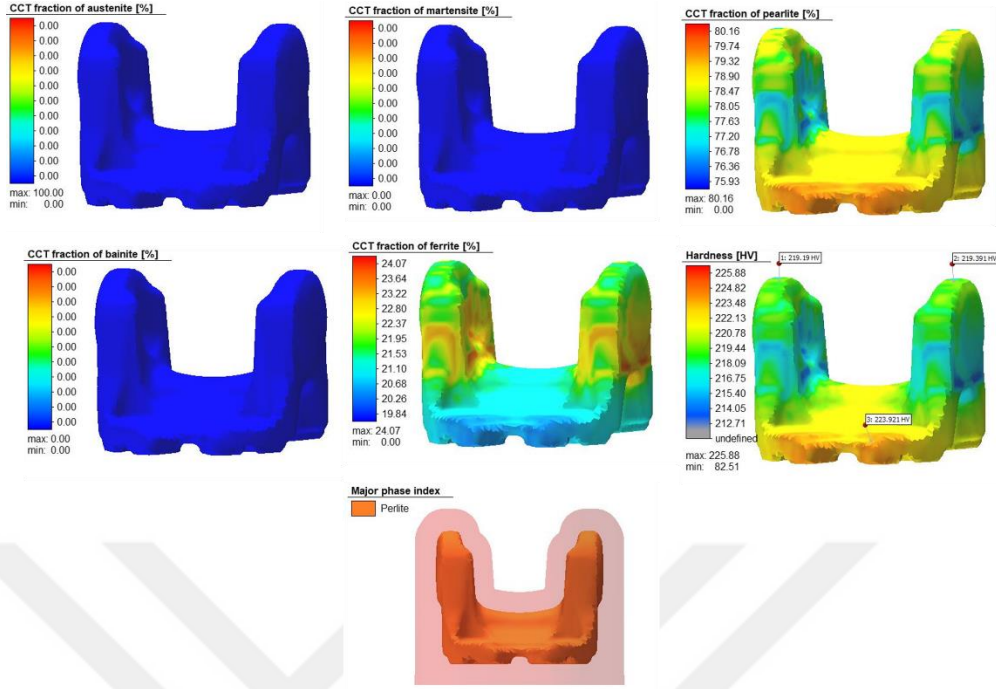
Yield Stress 126,48 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdadır.



Şekil 4. 32. C45E Son Şekillendirme Kuvvet- Deplasman Eğrisi



## Soğuma;



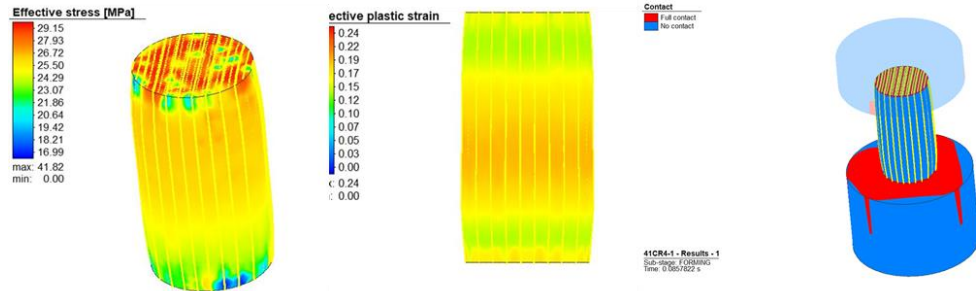
Şekil 4. 33. C45E Soğuma Simülasyonu

Yapı içerisinde Perlit fazı oluşmuş olup sertlik değeri 255.88 HV olarak tespit edilmiştir.

### 4.2.3. 41Cr4 Dövme Simülasyonları

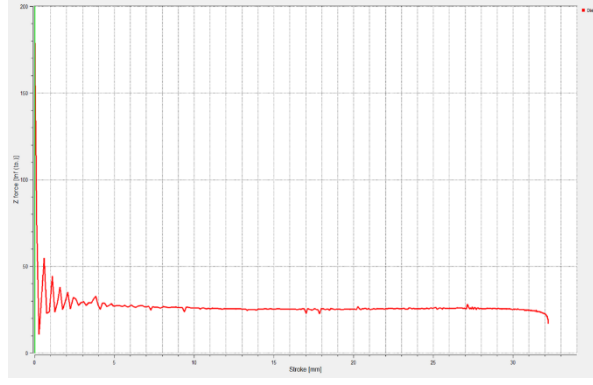
41Cr4 malzeme ile 1200 °C de simülasyon ortamında 5 operasyonda (Ön Şekillendirme 1, Ön Şekillendirme 2, Dövme 1, Dövme 2, Son Şekillendirme) dövülen çatalı flanşa ait bilgiler aşağıdadır.

#### Ön Şekillendirme 1;



Şekil 4. 34. 41Cr4 Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress

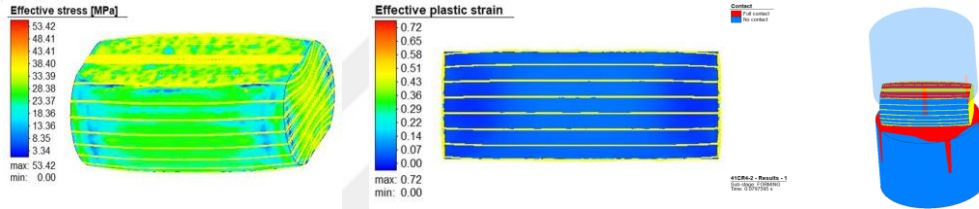
Ön Şekillendirme 1 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,24 – Effective stress 29,15 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



Şekil 4. 35. 41Cr4 Ön Şekillendirme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi

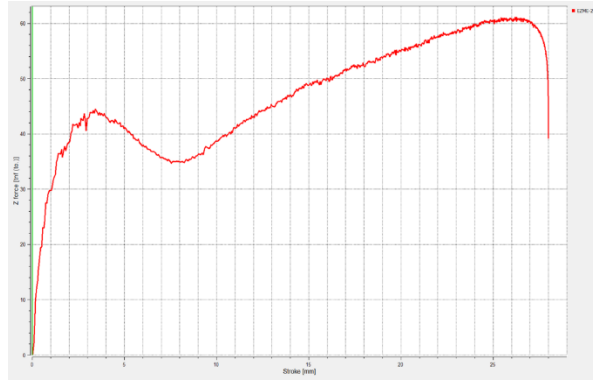
### Ön Şekillendirme 2;

İkinci proses ise Ön Şekillendirme 2 olarak adlandırılan aşamadır. Bu aşamada ilk dövme yüzeyi yan yatırılarak ikinci bir dövme yapılır.



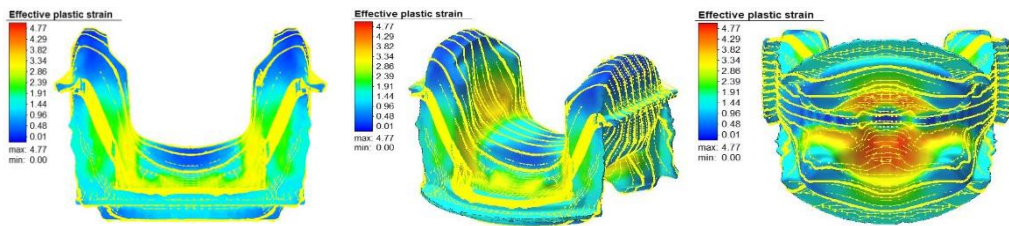
Şekil 4. 36. 41Cr4 Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Effective plastic strain 0,72 – Effective stress 53,42 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



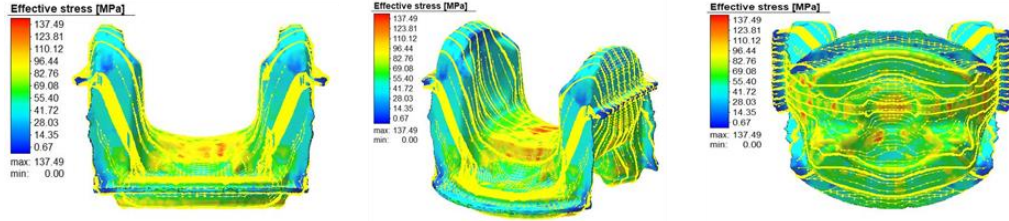
Şekil 4. 37. 41Cr4 Ön Şekillendirme 2 Kuvvet- Deplasman Eğrisi

### Dövme 1,



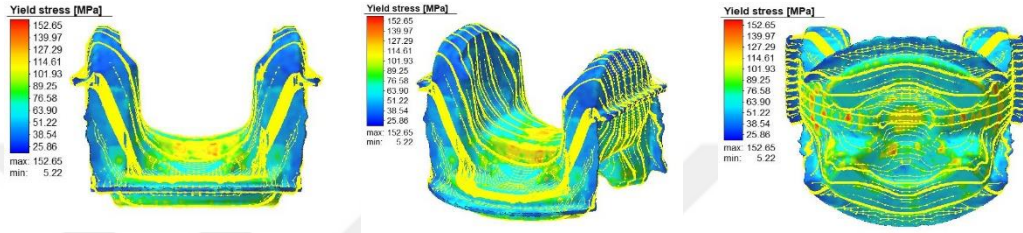
Şekil 4. 38. 41Cr4 Dövme 1 Effective Plastic Strain

Dövme 1 prosesi sonrasında elde edilen Effective plastic strain 4,77' dir.



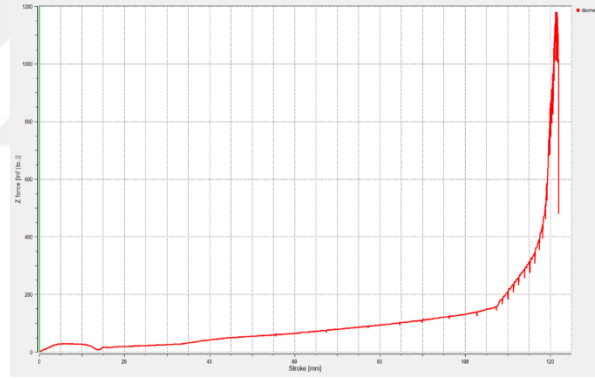
Şekil 4. 39. 41Cr4 Dövme 1 Effective Stress

Effective stress ise 137,49 olarak belirlenmiştir.



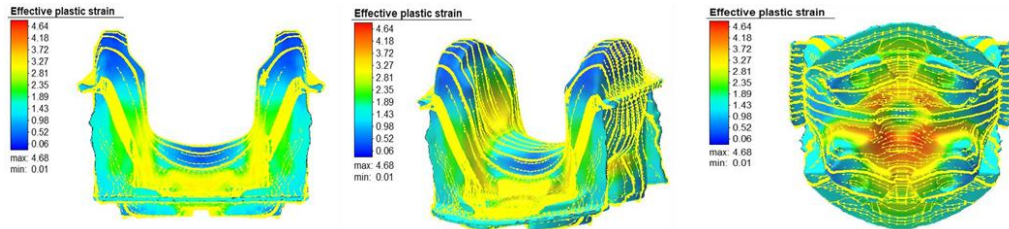
Şekil 4. 40. 41Cr4 Dövme 1 Yield Stress

Yield Stress 152,65 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdadır.



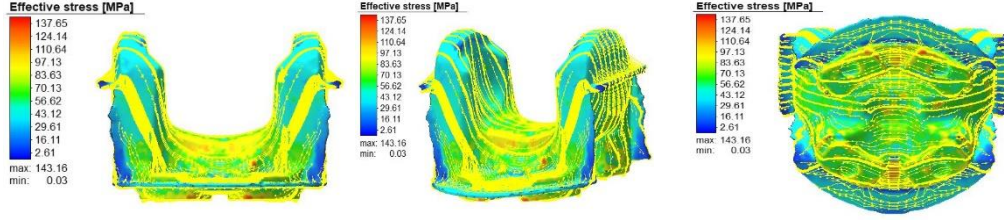
Şekil 4. 41. 41Cr4 Dövme 1 Kuvvet- Deplasman Eğrisi

Dövme 2;

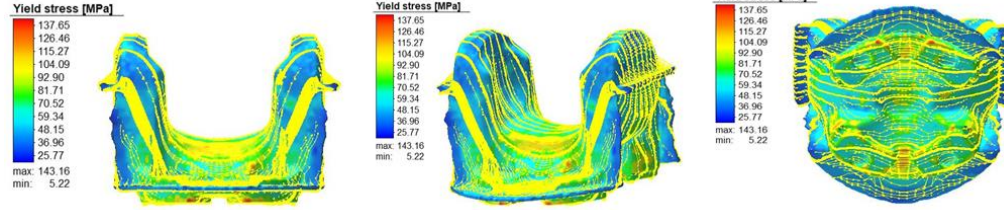


Şekil 4. 42. 41Cr4 Dövme 2 Effective Plastic Strain

Dövme 2 prosesi sonrasında elde edilen Effective plastic strain 4,64' dir.

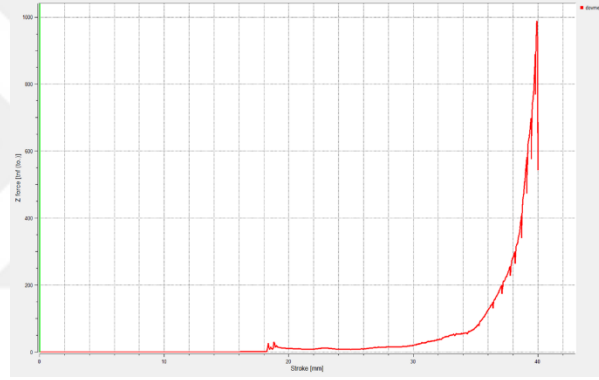


Şekil 4. 43. 41Cr4 Dövme 2 Effective Stress



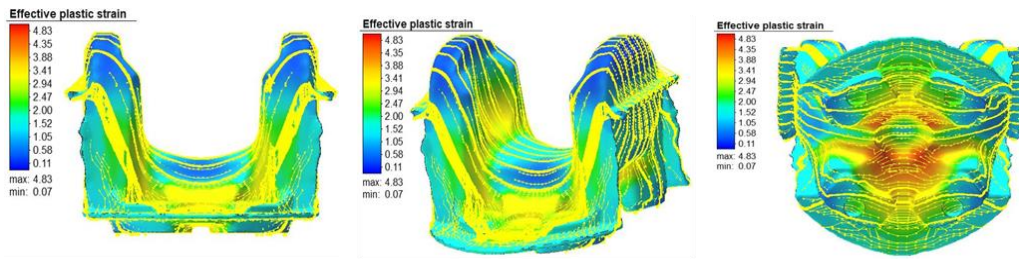
Şekil 4. 44. 41Cr4 Dövme 2 Yield Stress

Yield Stress 137,65 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdadır.



Şekil 4. 45. 41Cr4 Dövme 2 Kuvvet- Deplasman Eğrisi

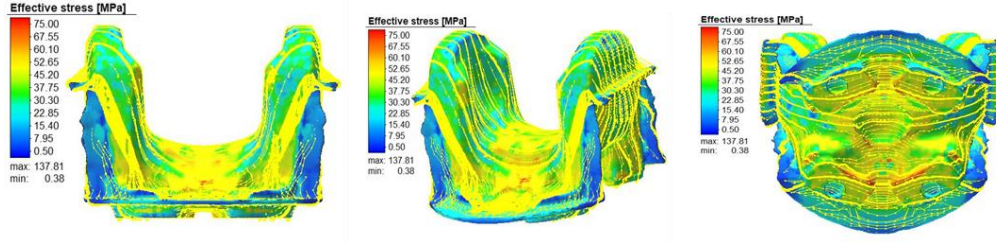
Son Şekillendirme;



Şekil 4. 46. 41Cr4 Son Şekillendirme Effective Plastic Strain

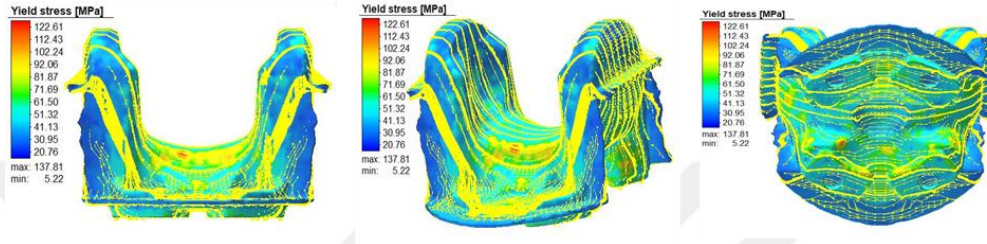
Son Şekillendirme prosesi sonrasında elde edilen Effective plastic strain 4,83'dir.





Şekil 4. 47. 41Cr4 Son Şekillendirme Effective Stress

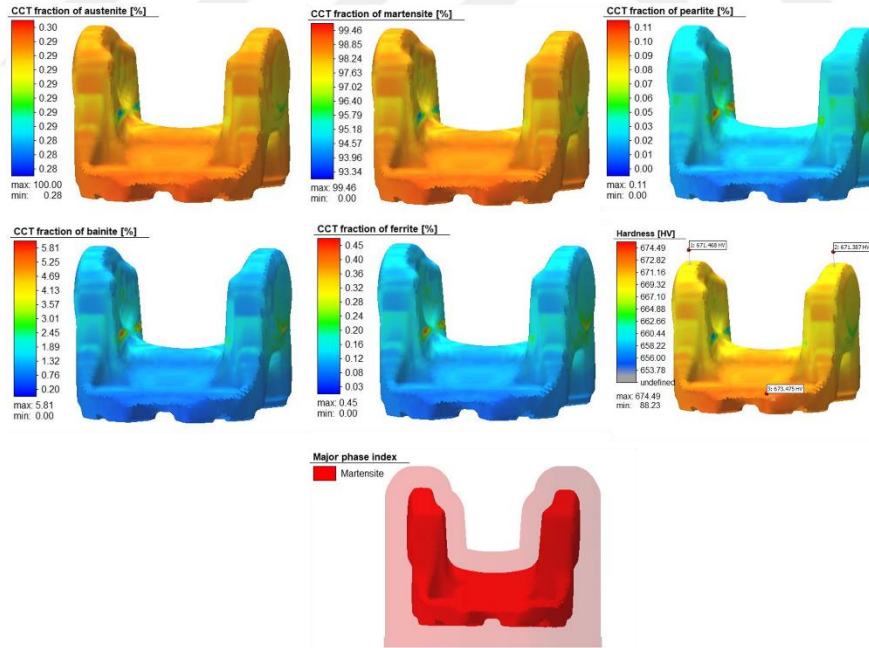
Effective stress ise 75,00 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 48. 41Cr4 Son Şekillendirme Yield Stress

Yield Stress 122,61 olarak tespit edilmiştir.

Soğuma;



Şekil 4. 49. 41Cr4 Soğuma Simülasyonu

Yapı içerisinde Martenzit fazı oluşmuş olup sertlik değeri 674,49 HV olarak tespit edilmiştir.



#### **4.2. Malzeme Kimyasal Kompozisyonunun Belirlenmesi**

Yukarıdaki metalografik incelemeler, sayasal destekli analiz ve simülasyonlar baz alınarak çalışmada gerçekleştirilen literatür araştırmaları sayesinde 48 adet kimyasal kompozisyon aralığı belirlenmiştir. Belirlenen mikro alaşımlı elik kompozisyonlarının mekanik zellikleri Simufact Forming yazılımına girilerek dokümante edilmiştir.



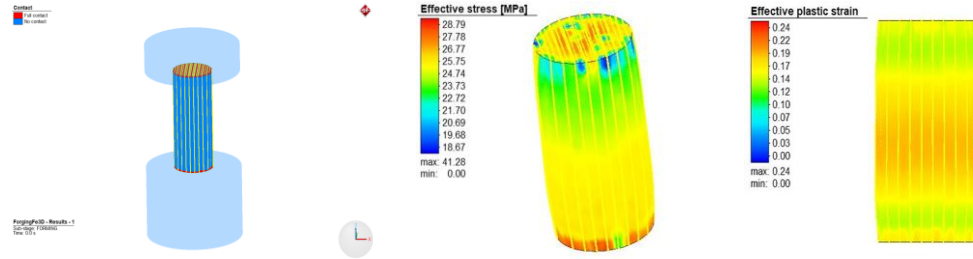
**Tablo 4. 1.** Geliştirilen alaşım elementleri

Alaşım Elementleri	1	2	3	4	5
	% Bileşim	% Bileşim	% Bileşim	% Bileşim	% Bileşim
<b>C</b>	<b>0,150</b>	<b>0,150</b>	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>
<b>B</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>
<b>N</b>	<b>0,007</b>	<b>0,007</b>	<b>0,007</b>	<b>0,007</b>	<b>0,007</b>
<b>Si</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>
<b>Mn</b>	<b>0,900</b>	<b>0,900</b>	<b>0,900</b>	<b>0,900</b>	<b>0,900</b>
<b>Cr</b>	<b>0,400</b>	<b>0,400</b>	<b>0,400</b>	<b>0,400</b>	<b>0,400</b>
<b>Mo</b>	<b>0,100</b>	<b>0,100</b>	<b>0,100</b>	<b>0,100</b>	<b>0,100</b>
<b>Ni</b>	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>
<b>Al</b>	0,015	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>V</b>	0,000	0,100	0,015	0,100	0,050
<b>Ti</b>	<b>0,000</b>	0,100	0,050	0,100	0,150
<b>Nb</b>	<b>0,000</b>	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>P</b>	<b>0,030</b>	<b>0,030</b>	<b>0,030</b>	<b>0,030</b>	<b>0,030</b>
<b>S</b>	<b>0,030</b>	<b>0,030</b>	<b>0,030</b>	<b>0,030</b>	<b>0,030</b>
<b>Cu</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>	<b>0,250</b>
<b>Ceq</b>	0,430	0,450	0,483	0,500	0,490

### 4.3 1. Alaşım Dövme Simülasyonları

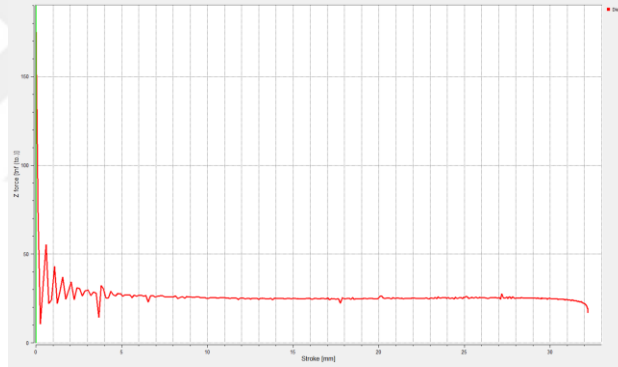
Çalışmalar kapsamında geliştirilen yeni nesil mikro alaşımlı çelik kompozisyonuna yapılan dövme simülasyon çıktıları aşağıdaki gibidir.

#### Ön Şekillendirme 1;



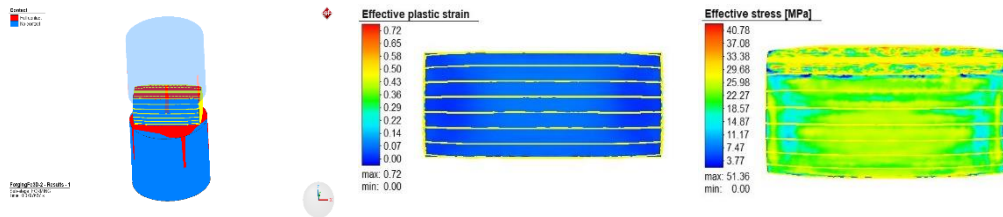
Şekil 4. 50. 1. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Ön Şekillendirme 1 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,24 – Effective stress 28,79 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



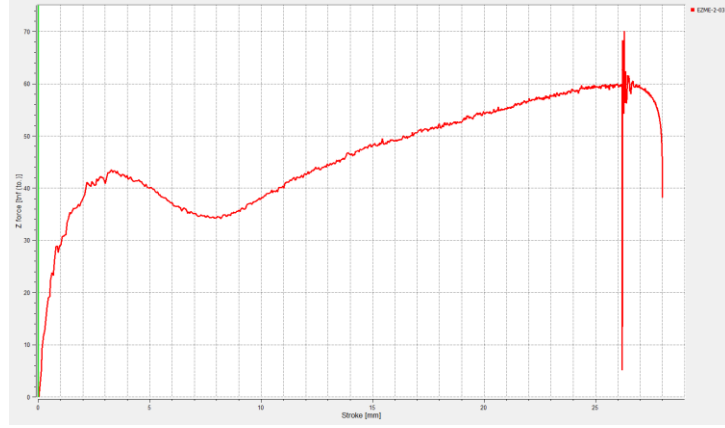
Şekil 4. 51. 1. Alaşım Ezme1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

#### Ezme2;



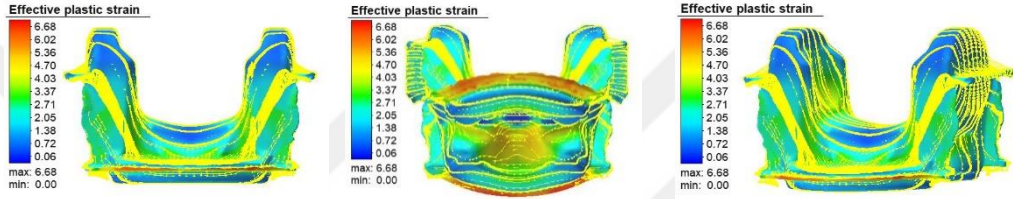
Şekil 4. 52. 1. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Ön Şekillendirme 2 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,72 – Effective stress 40,78 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



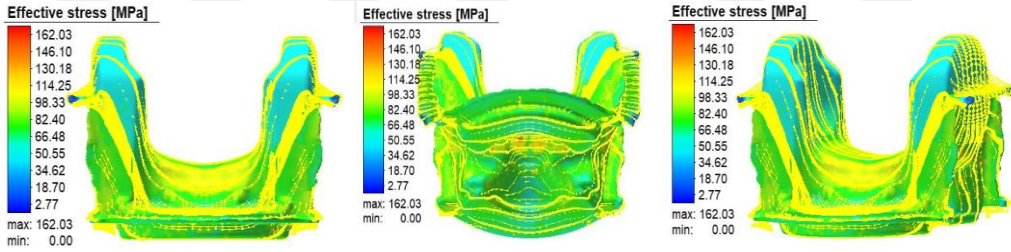
Şekil 4. 53. 1. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Dövme1;



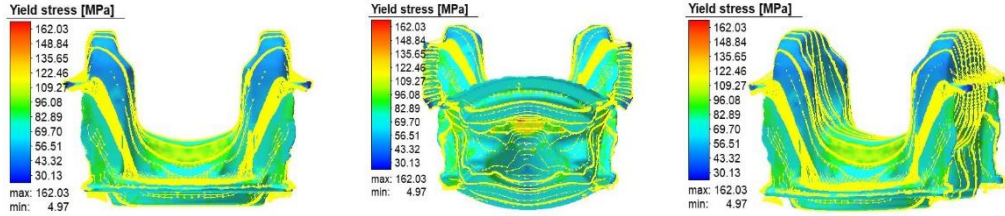
Şekil 4. 54. 1. Alaşım Dövme 1 Effective Plastic Strain

Dövme 1 prosesi sonrasında elde edilen Effective plastic strain 6,68 'dür.



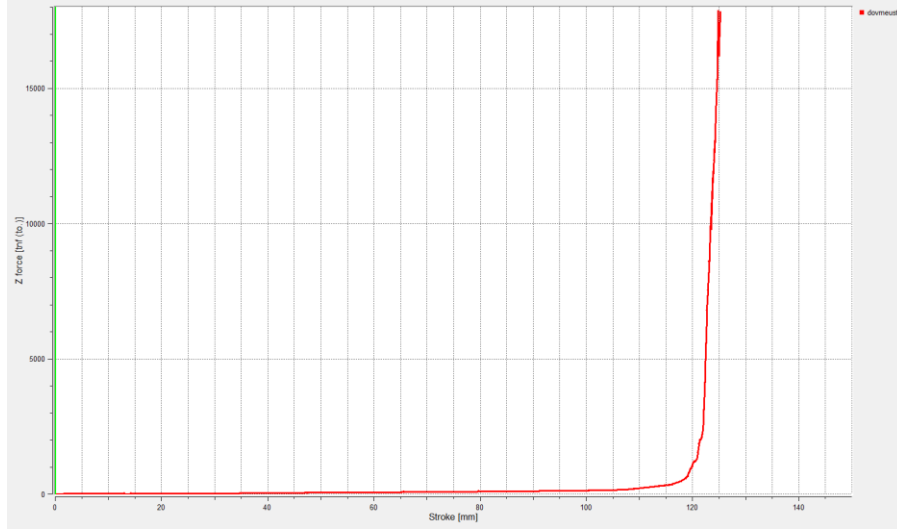
Şekil 4. 55. 1. Alaşım Dövme 1 Effective Stress

Dövme 1 prosesi sonrasında elde edilen Effective stress 162,03 'dür.



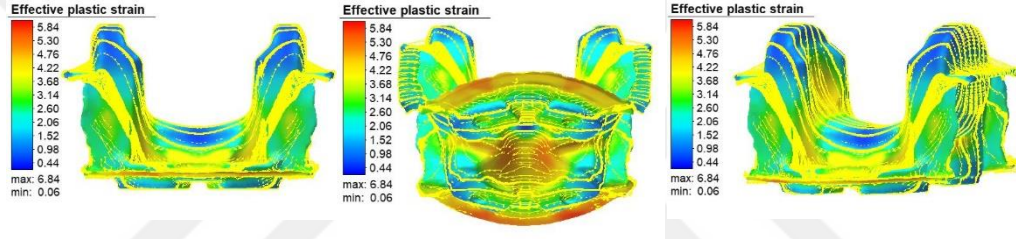
Şekil 4. 56. 1. Alaşım Dövme 1 Yield Stress

Dövme 1 prosesi sonrasında elde edilen Yield stress 162,03 'dür



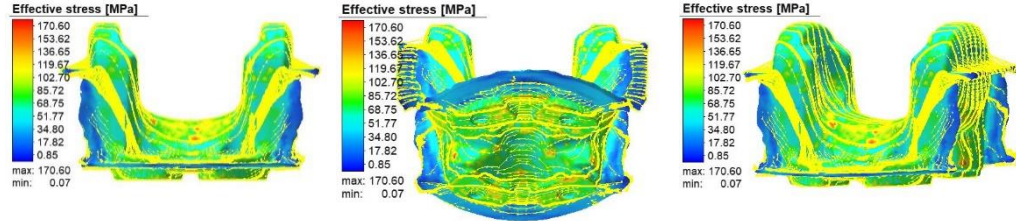
Şekil 4. 57. 1. Alaşım Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

**Dövme2;**



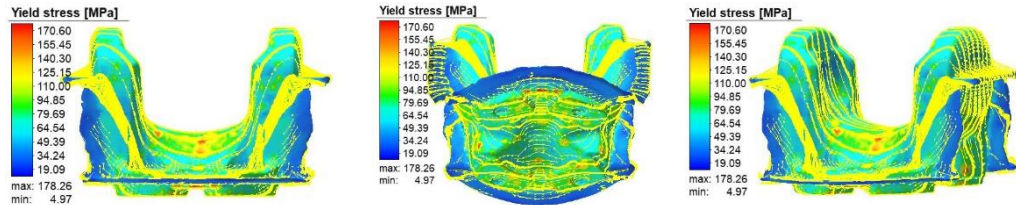
Şekil 4. 58. 1. Alaşım Dövme 2 Effective Plastic Strain

Dövme 2 prosesi sonrasında elde edilen Effective plastic strain 5,84'dür.



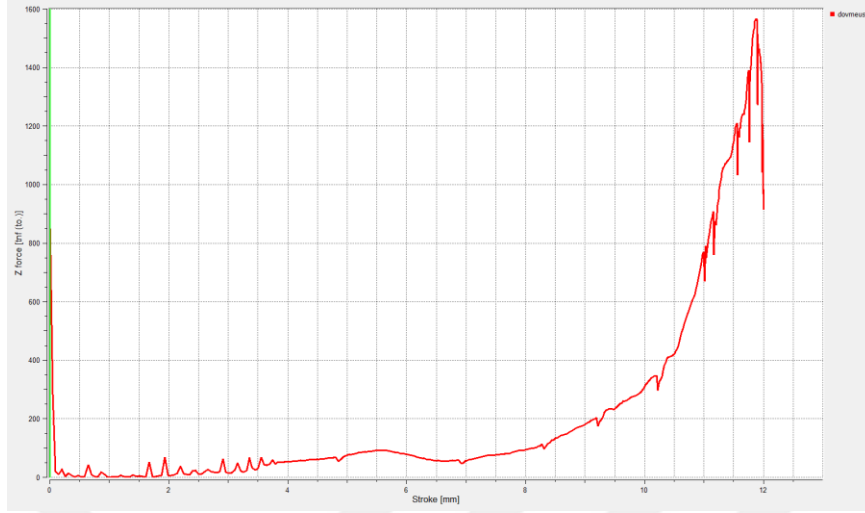
Şekil 4. 59. 1. Alaşım Dövme 2 Effective Stress

Dövme 2 prosesi sonrasında elde edilen Effective stress 170,60'dır.



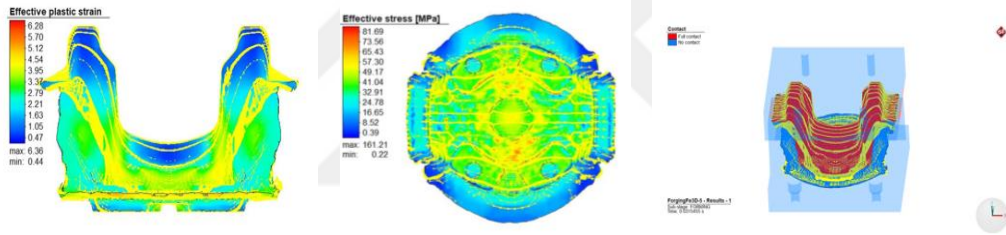
Şekil 4. 60. 1. Alaşım Dövme 2 Yield Stress

Dövme 2 prosesi sonrasında elde edilen Yield stress 170,60'tır. Dövme 2 prosesine ait kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdadır.



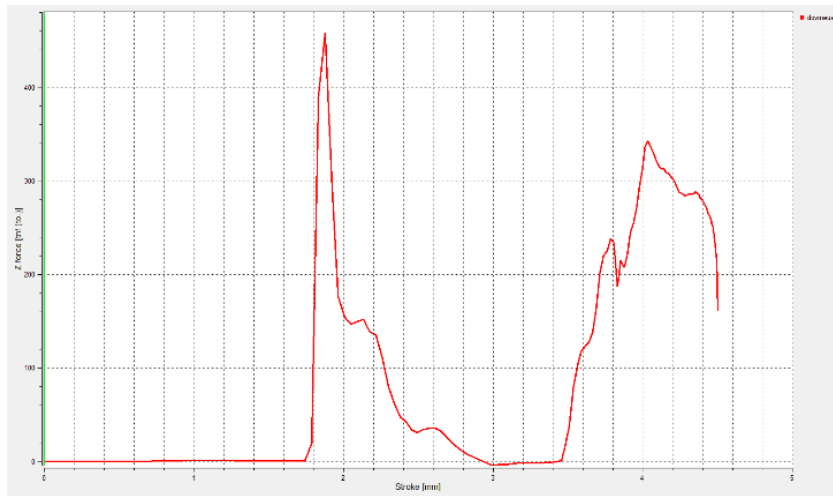
Şekil 4. 61. 1. Alaşım Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Son Şekillendirme;



Şekil 4. 62. Son Şekillendirme Effective Plastic Strain / Effective Stress

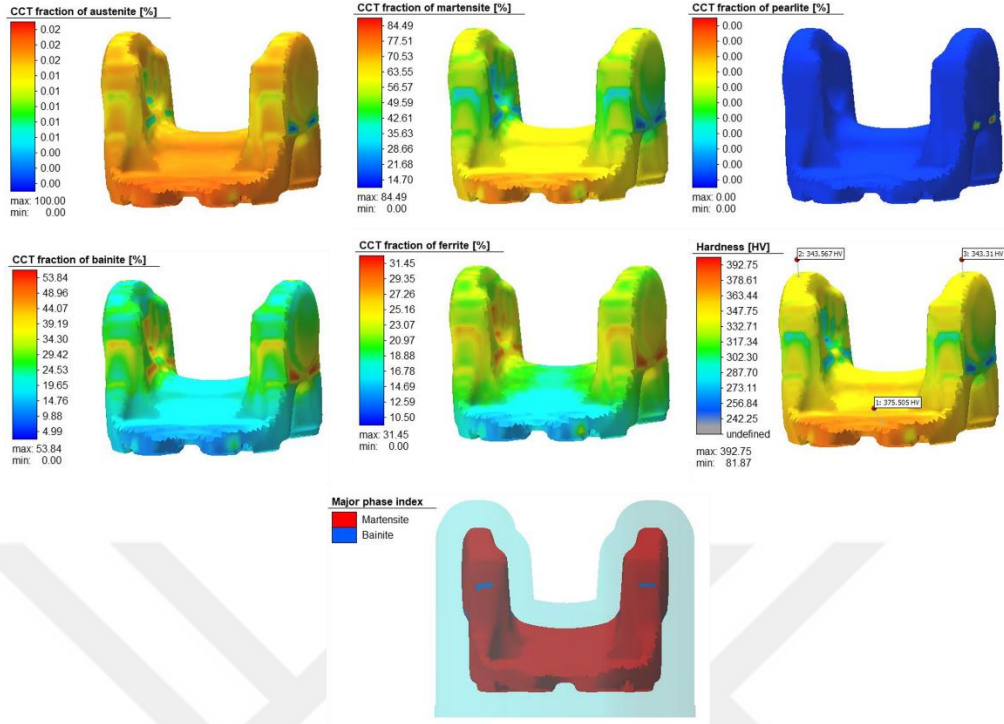
Son Şekillendirme sonucu elde edilen veriler ise Effective plastic strain 6,28 / Effective stress 81,69 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. 63. 1. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet- Deplasman Eğrisi



## Soğuma;



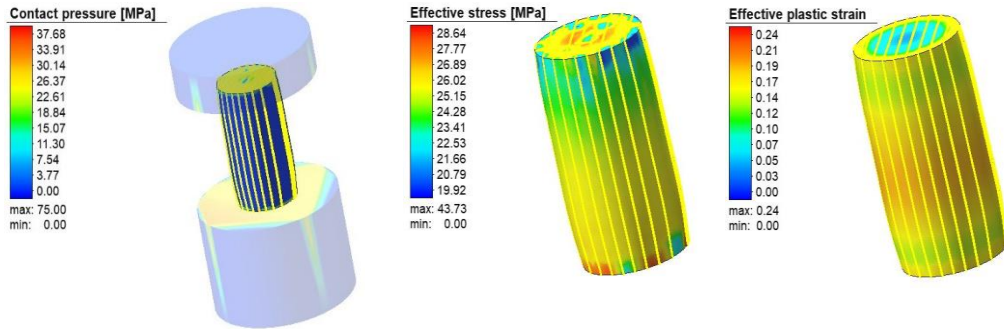
Şekil 4. 64. 1. Alaşım Soğuma Simülasyonu

Yapı içerisinde Martenzit ve Beynit fazları oluşmuş olup sertlik değeri 392,75 HV olarak tespit edilmiştir.

## 4.3 2. Alaşım Dövme Simülasyonları

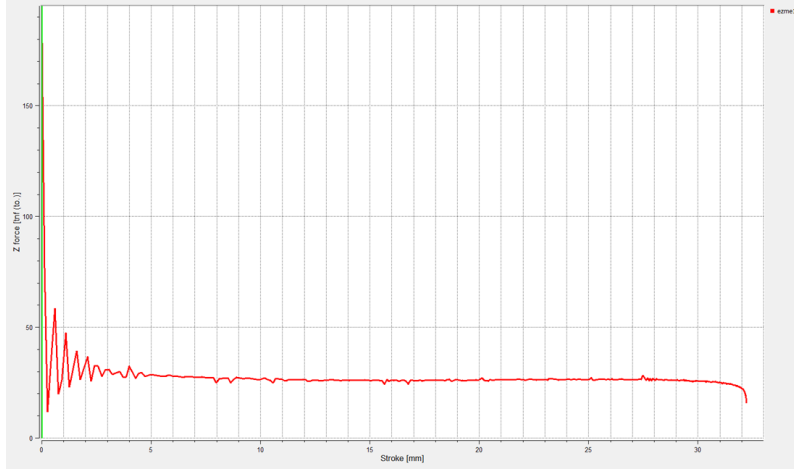
Geliştirilen bir diğer alaşıma ait simülasyonlar **incelendiğinde**,

## Ezme1;



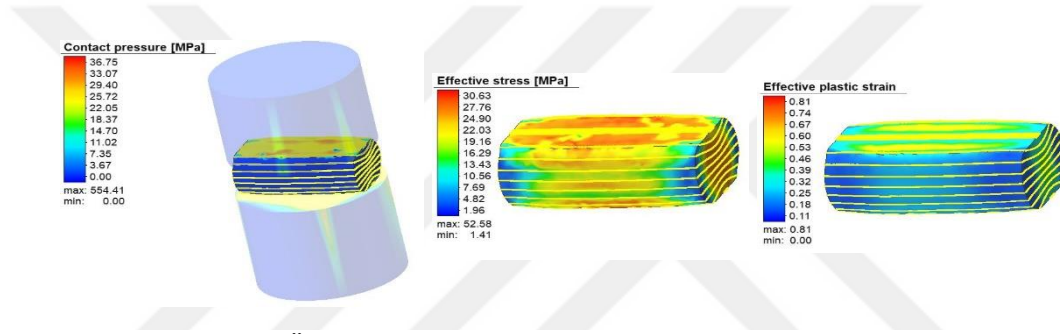
Şekil 4. 65. 2. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Ön Şekillendirme 1 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,24 – Effective stress 28,64 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



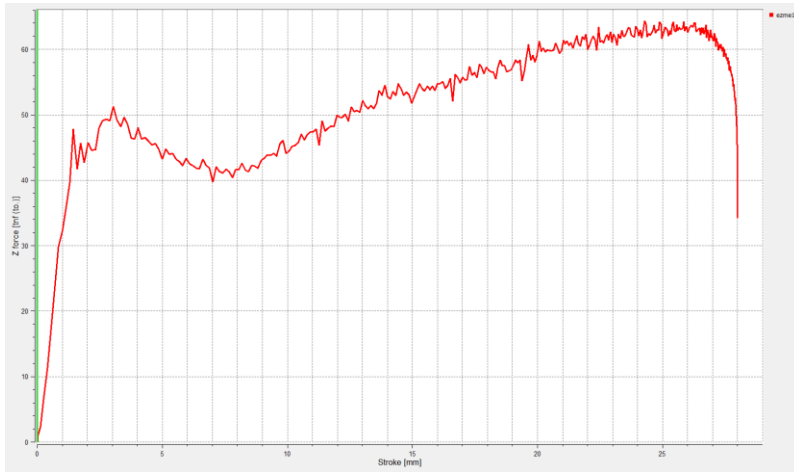
Şekil 4. 66. 2. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Ezme2;



Şekil 4. 67. 2. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress

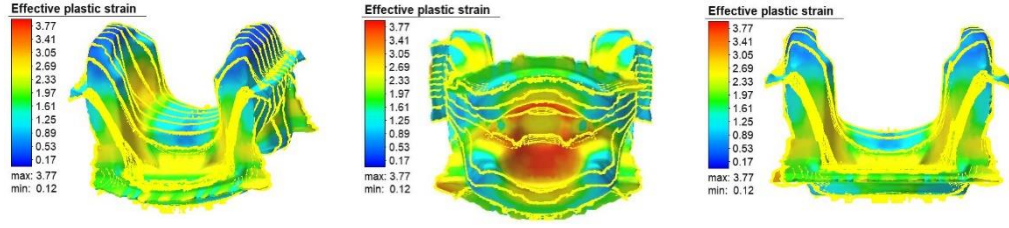
Ön Şekillendirme 2 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,81 – Effective stress 30,63 olarak tespit edilmiştir.



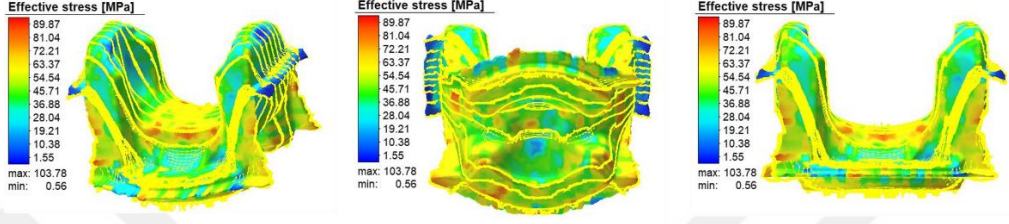
Şekil 4. 68. 2. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi



## Dövmel1;

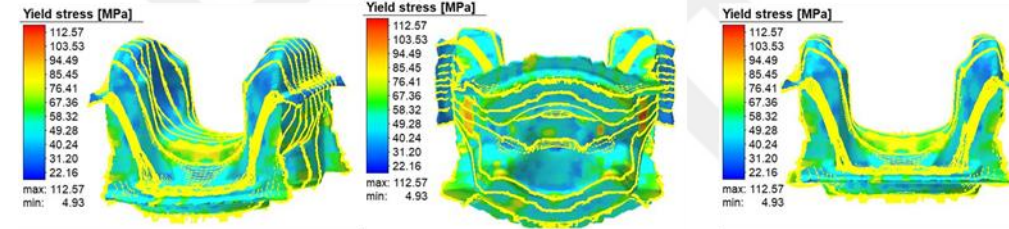


Şekil 4. 69. 2. Alaşım Dövmel 1 Effective Plastic Strain



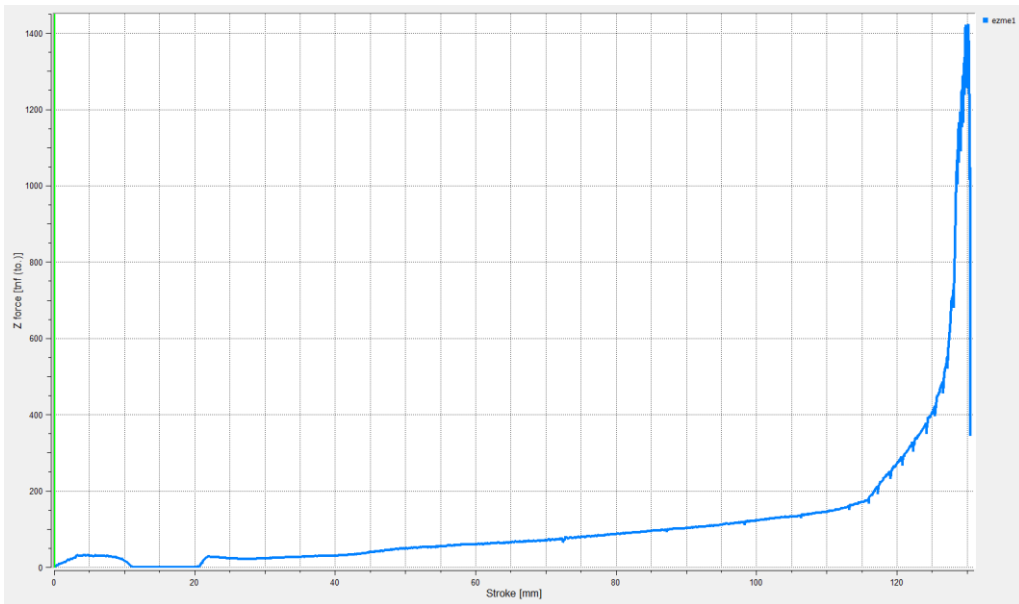
Şekil 4. 70. 2. Alaşım Dövmel 1 Effective Stress

Dövmel 1 Effective Stress 3,77'dir.



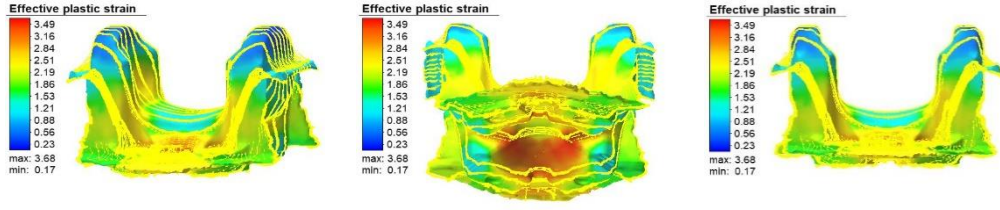
Şekil 4. 71. 2. Alaşım Dövmel 1 Yield Stress

Dövmel 1 Yield stress 112,57'dir. Kuvvet deplasman Eğrisi aşağıdadır.



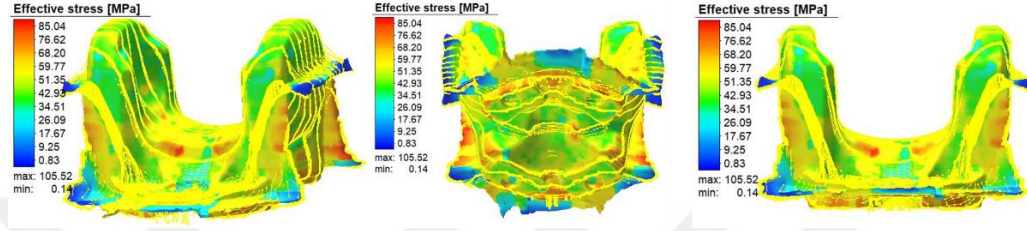
Şekil 4. 72. 2. Alaşım Dövmel 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Dövm2;



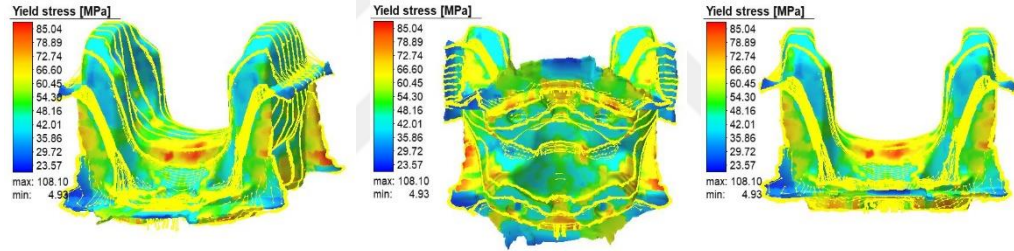
Şekil 4. 73. 2. Alaşım Dövm 2 Effective Plastic Strain

Dövm 2 Effective Plastic Strain 3,49' dir.



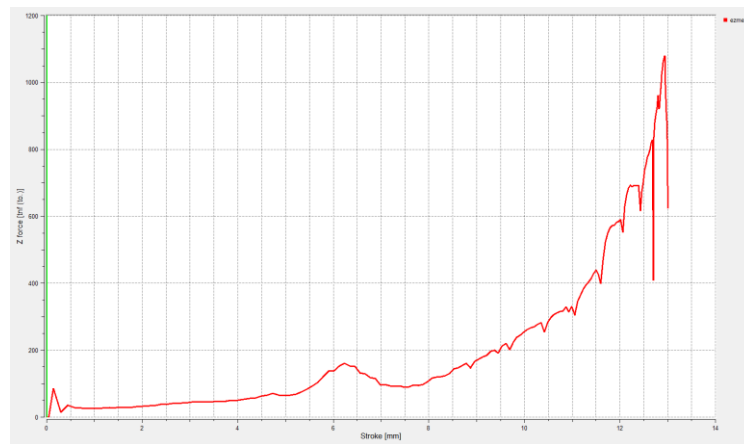
Şekil 4. 74. 2. Alaşım Dövm 2 Effective Stress

Dövm 2 Effective Stress 85,04' dir.



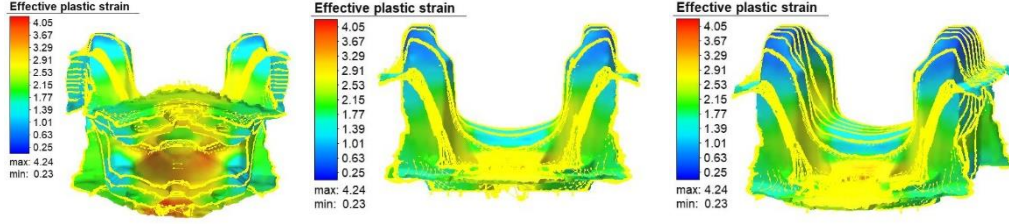
Şekil 4. 75. 2. Alaşım Dövm 2 Yield Stress

Dövm 2 Yield Stress 85,04'tir. Kuvvet deplasman eğrisi aşağıdadır.



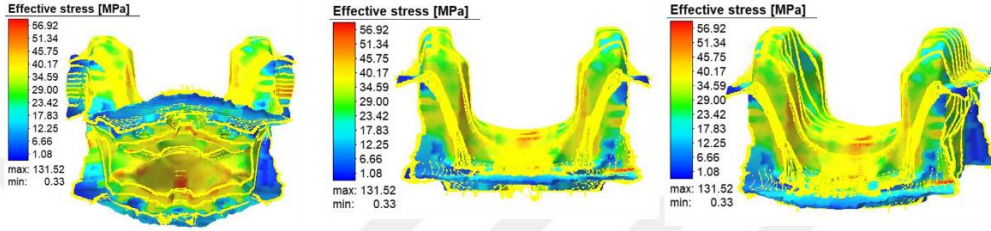
Şekil 4. 76. 2. Alaşım Dövm 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

## Son Şekillendirme;



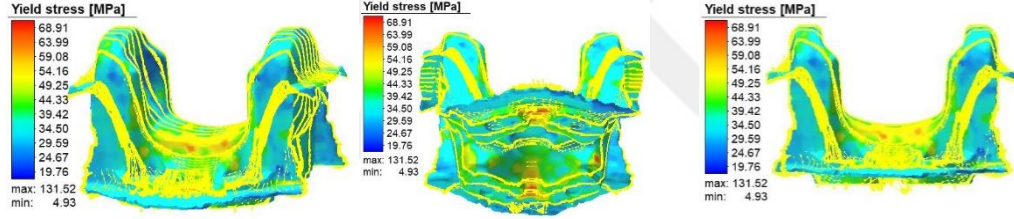
Şekil 4. 77. 2. Alaşım Son Şekillendirme Effective Plastic Strain

Effective Plastic Strain 4,05'dir.



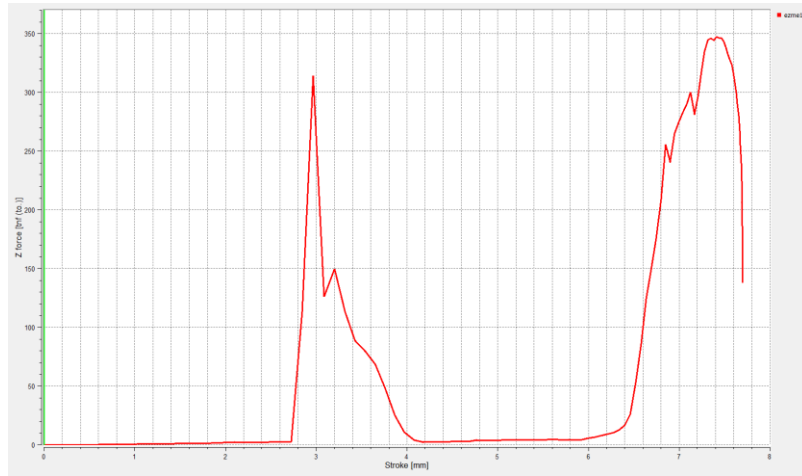
Şekil 4. 78. 2. Alaşım Son Şekillendirme Effective Stress

Effective stress 56,92'dir.



Şekil 4. 79. 2. Alaşım Son Şekillendirme Yield Stress

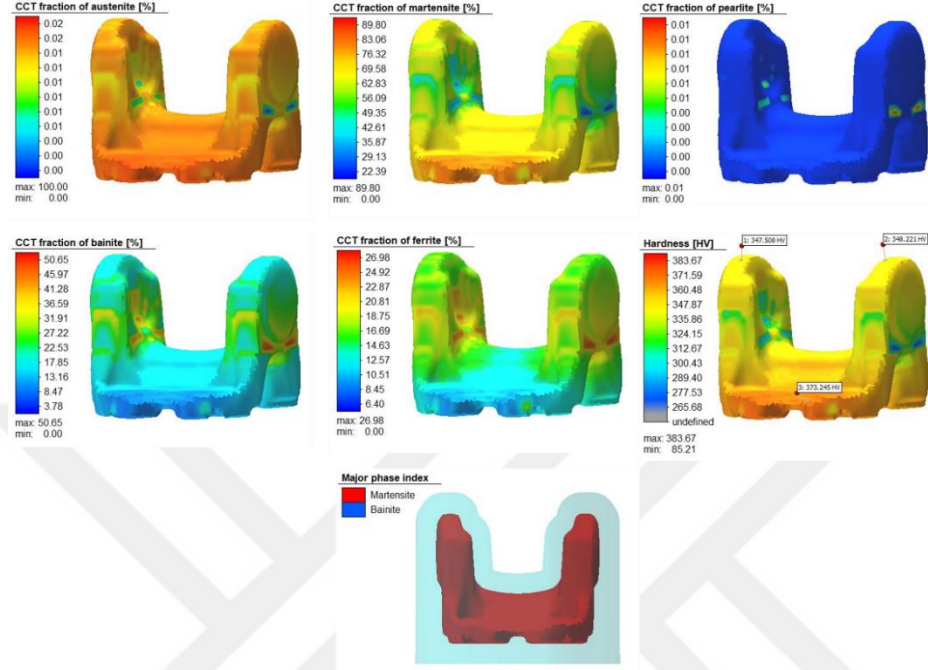
Yield Stress 68,91'dir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdadır.



Şekil 4. 80. 2. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet - Deplasman Eğrisi



## Soğuma;

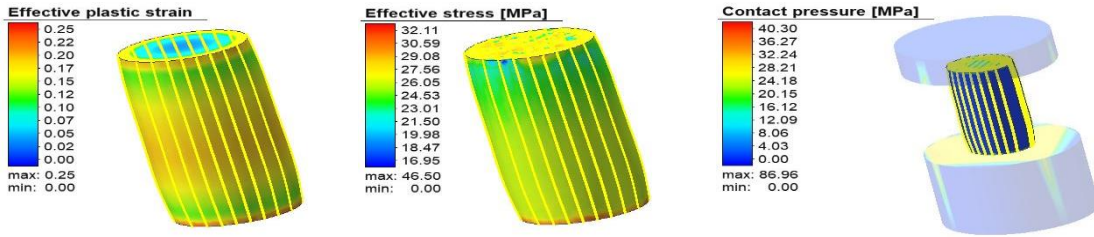


Şekil 4. 81. 2. Alaşım Soğuma Simülasyonu

Yapı içerisinde Martenzit ve Beynit fazları oluşmuş olup sertlik değeri 383,67 HV olarak tespit edilmiştir.

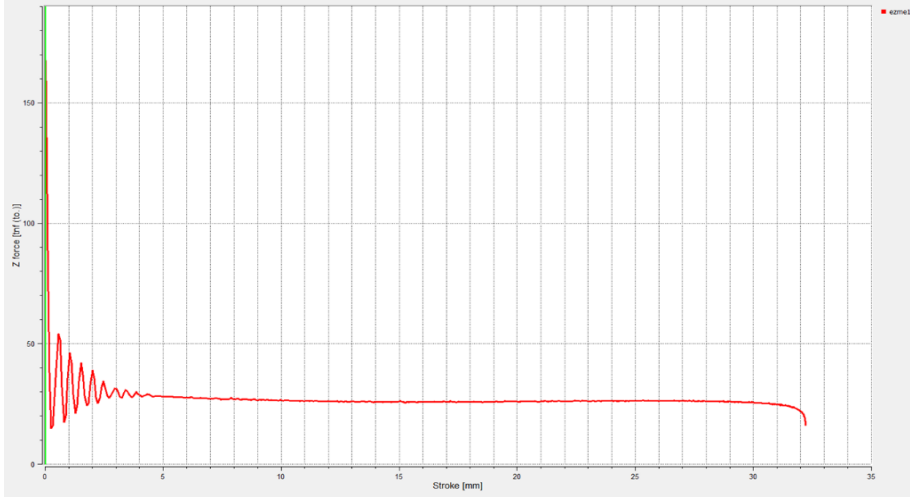
### 4.3 3. Alaşım Dövme Simülasyonları;

#### Ön Şekillendirme 1;



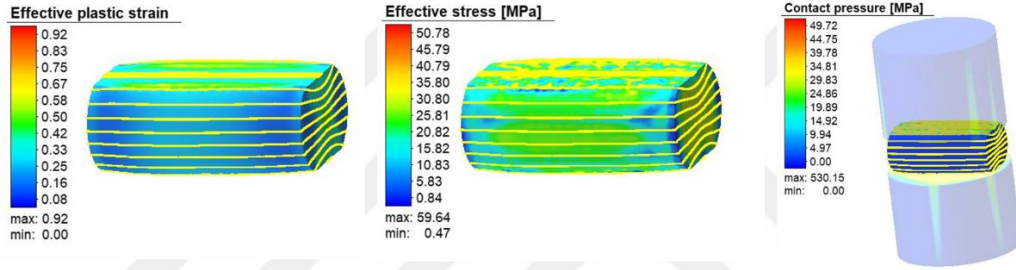
Şekil 4. 82. 3. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Ön Şekillendirme 1 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,25 – Effective stress 32,11 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



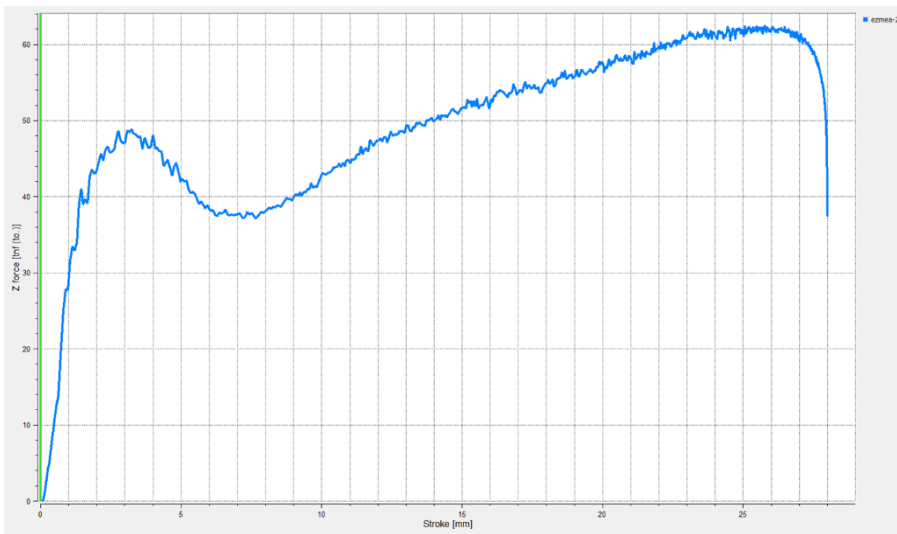
Şekil 4. 83. 3. Alaşım Ezme1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

### Ön Şekillendirme 2;



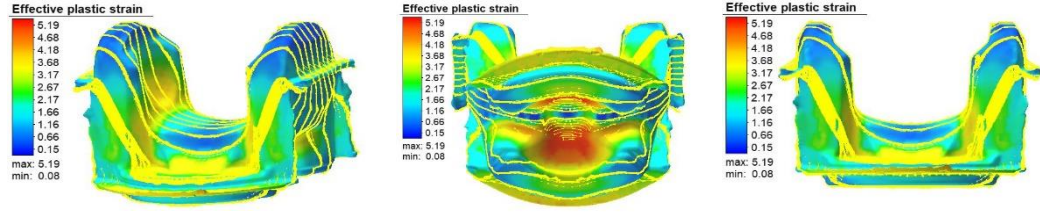
Şekil 4. 84. 3. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Ön Şekillendirme 2 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,92 – Effective stress 50,78 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



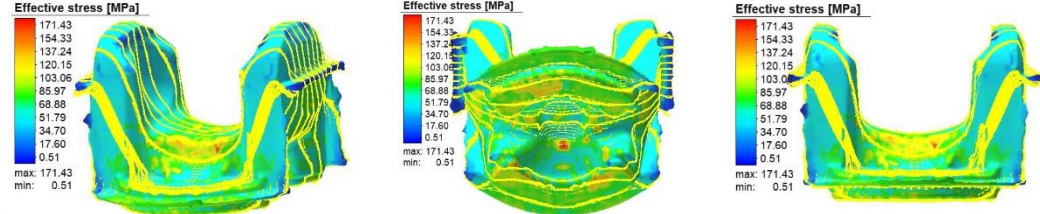
Şekil 4. 85. 3. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

## Dövmе 1;



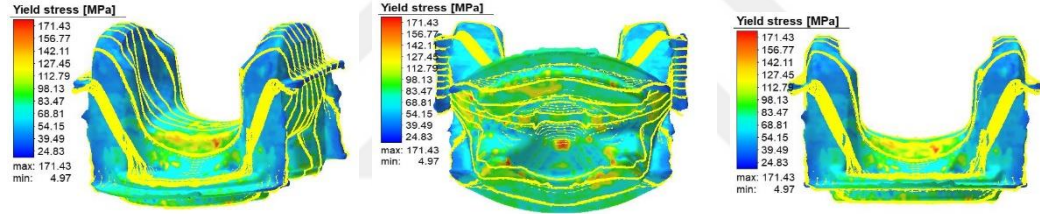
Şekil 4. 86. 3. Alaşım Dövmе 1 Effective Plastic Strain

Effective Plastic Strain değeri 5,19'dur.



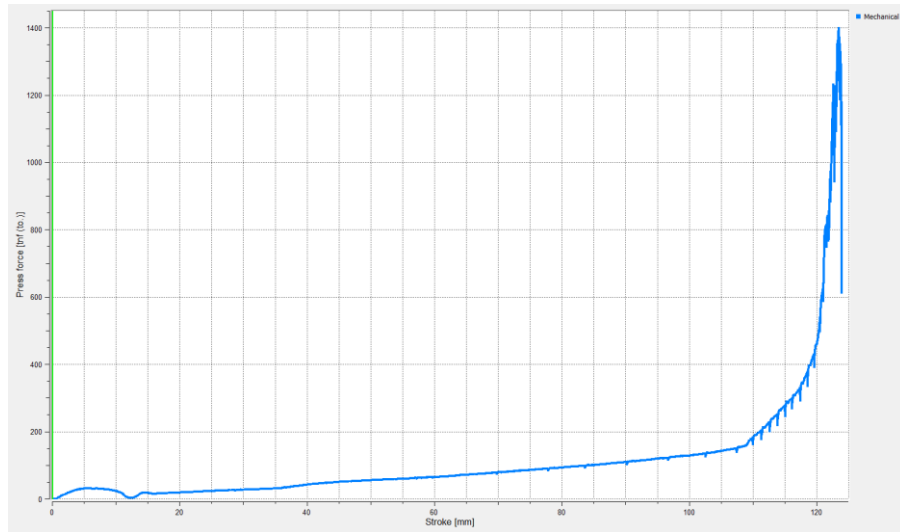
Şekil 4. 87. 3. Alaşım Dövmе 1 Effective Stress

Effective Stress değeri 171,43'dür.



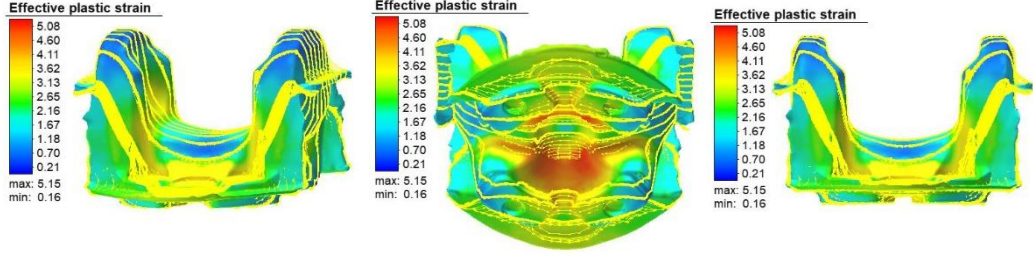
Şekil 4. 88. 3. Alaşım Dövmе 1 Yield Stress

Yield Stress değeri ise 171,43 olarak bulunmuştur. Kuvvet deplasman eğrisi aşağıdadır.



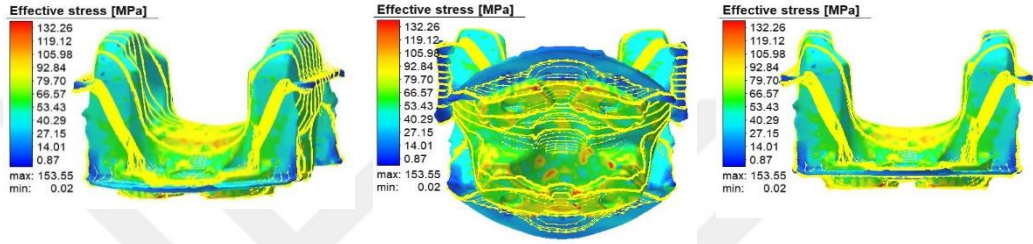
Şekil 4. 89. 3. Alaşım Dövmе 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

## Dövm 2;



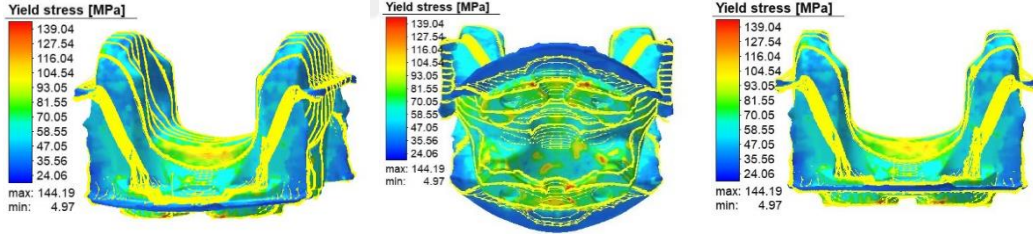
Şekil 4. 90. 3. Alaşım Dövm 2 Effective Plastic Strain

Dövm 2 simülasyonunda ise Effective Plastic Strain değeri 5,08'dir.

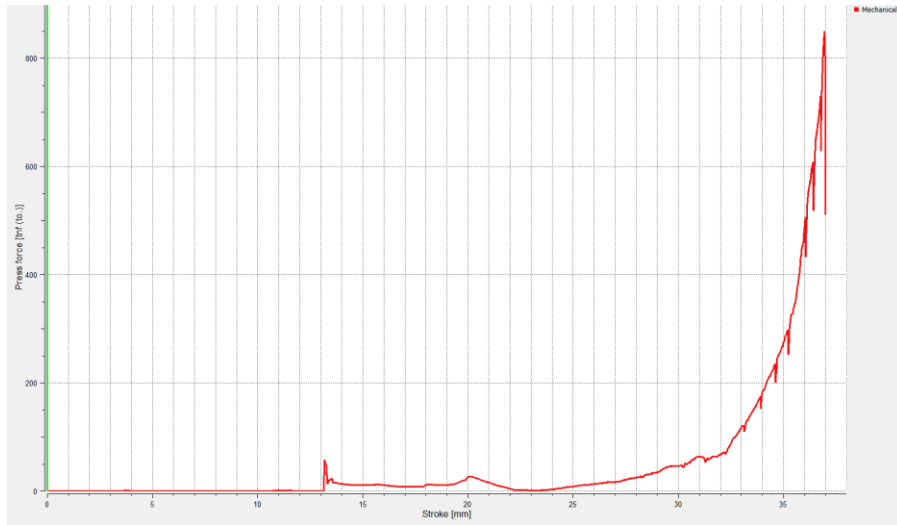


Şekil 4. 91. 3. Alaşım Dövm 2 Effective Stress

Dövm 2 simülasyonunda ise Effective Stress değeri 132,26'dir.



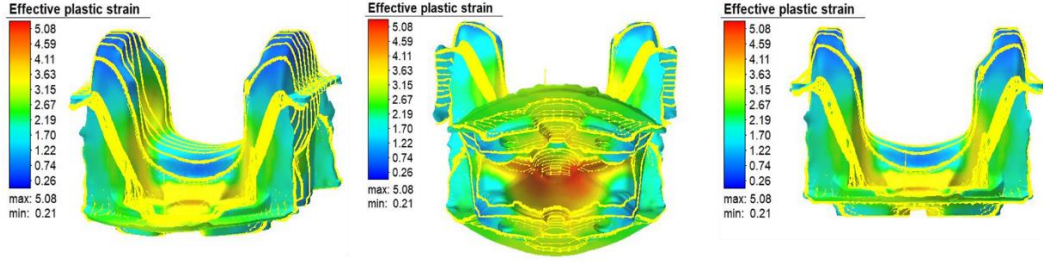
Şekil 4. 92. 3. Alaşım Dövm 2 Yield Stress



Şekil 4. 93. 3. Alaşım Dövm 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

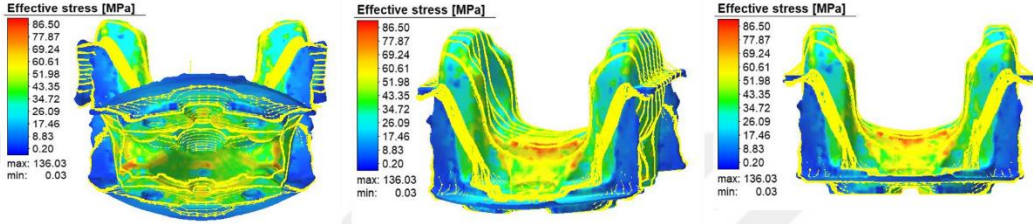


### Son Şekillendirme;



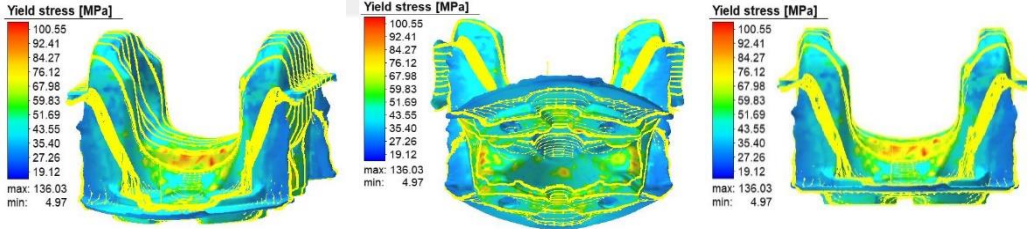
Şekil 4. 94. 3. Alaşım Son Şekillendirme Effective Plastic Strain

Elde edilen Effective Plastic Strain değeri 5,08'dir.



Şekil 4. 95. 3. Alaşım Son Şekillendirme Effective Stress

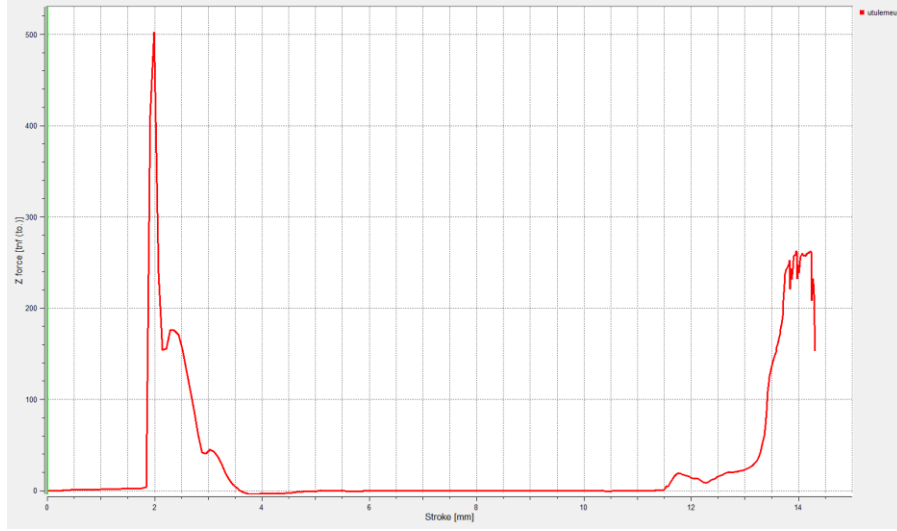
Effective Stress değeri 56,50'dir.



Şekil 4. 96. 3. Alaşım Son Şekillendirme Yield Stress

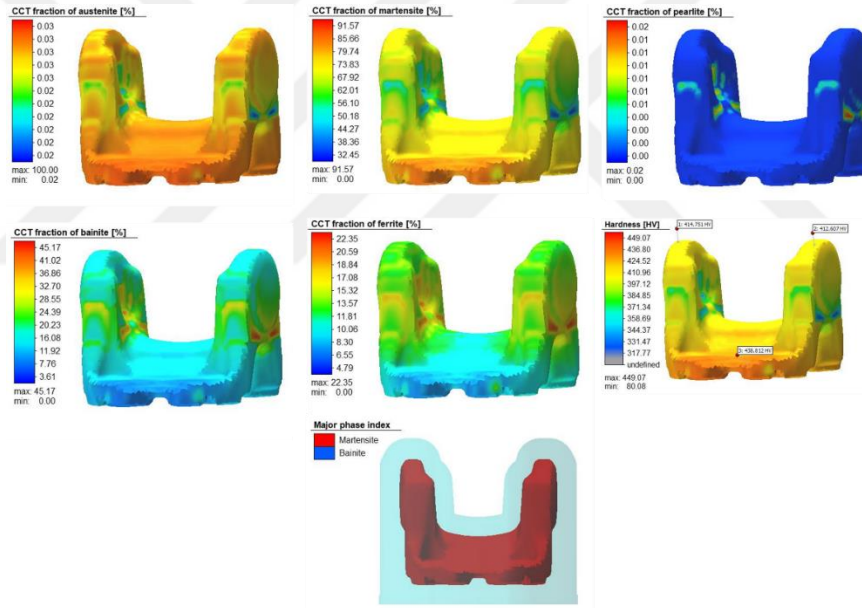
Yield Stress değeri ise 100,55 dir.





Şekil 4. 97. 3. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Soğuma;

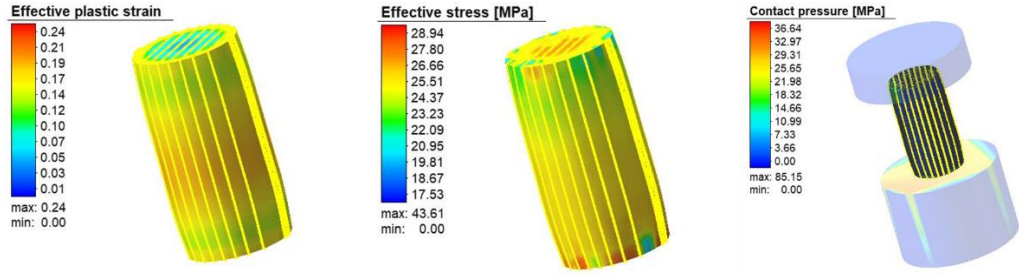


Şekil 4. 98. 3. Alaşım Soğuma Simülasyonu

Yapı içerisinde Martenzit ve Beynit fazları oluşmuş olup sertlik değeri 449,97 HV olarak tespit edilmiştir.

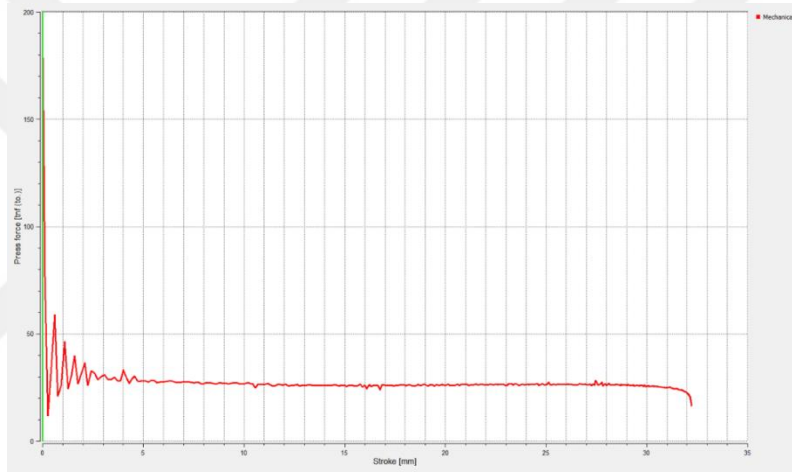
#### 4.3 4. Alaşım Dövme Simülasyonları;

##### Ön Şekillendirme 1;



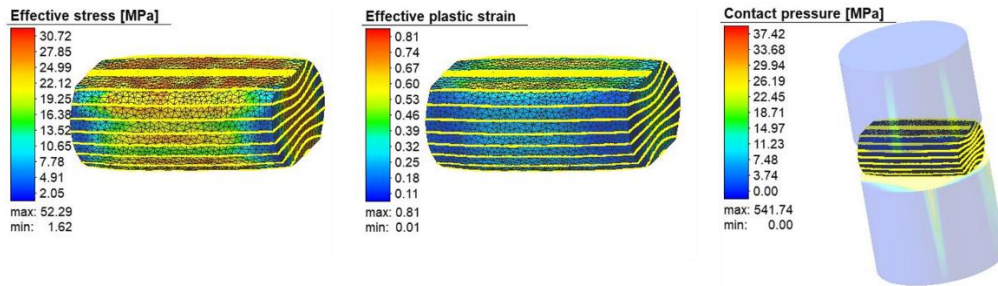
Şekil 4. 99. 4. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Ön Şekillendirme 1 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,24 – Effective stress 28,94 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



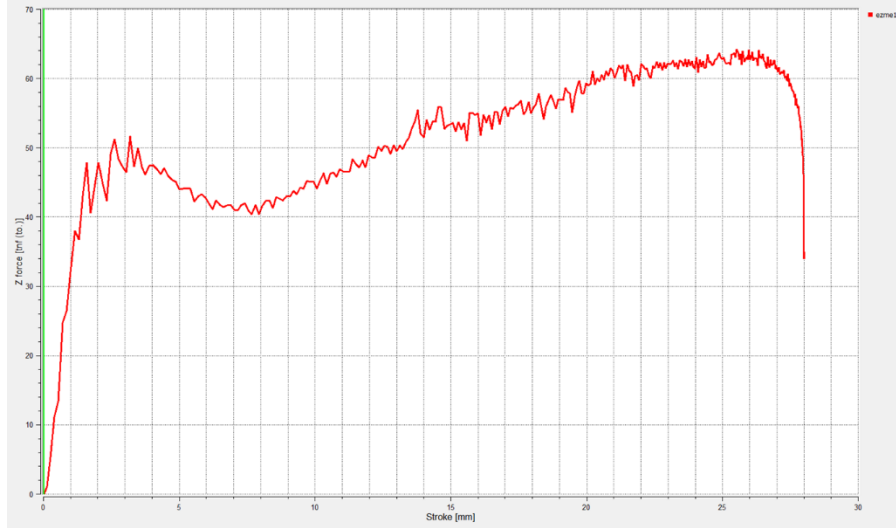
Şekil 4. 100. 4. Alaşım Ezme1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

##### Ön Şekillendirme 2;



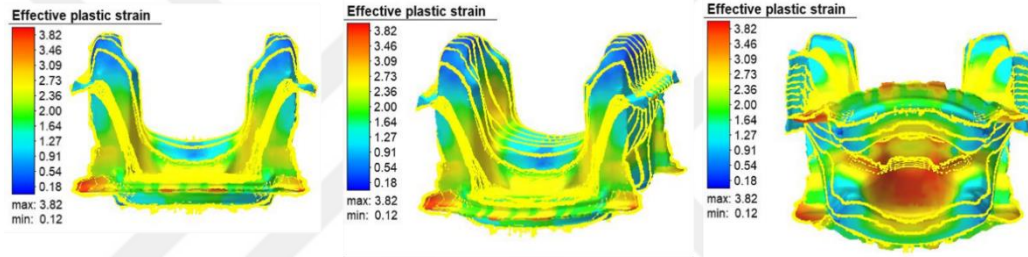
Şekil 4. 101. 4. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Effective plastic strain 0,81 – Effective stress 30,72 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



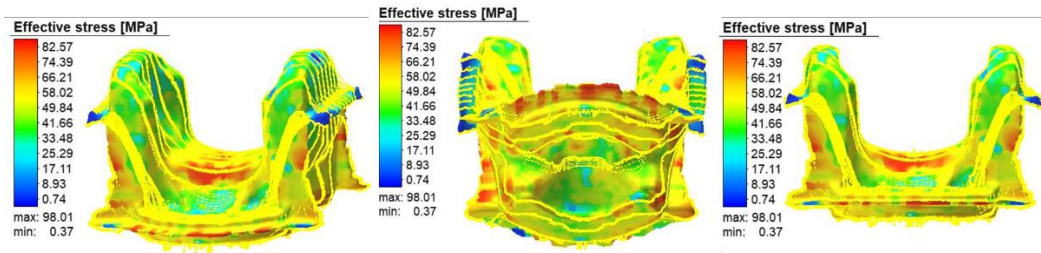
Şekil 4. 102. 4. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

**Dövme 1;**



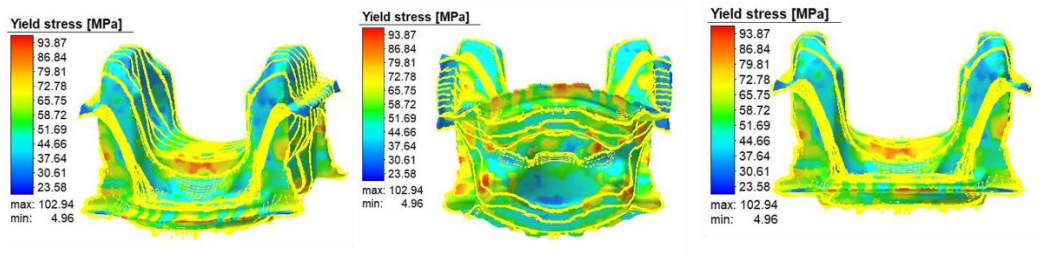
Şekil 4. 103. 4. Alaşım Dövme 1 Effective Plastic Strain

Effective plastic strain 3,82 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 104. 4. Alaşım Dövme 1 Effective Stress

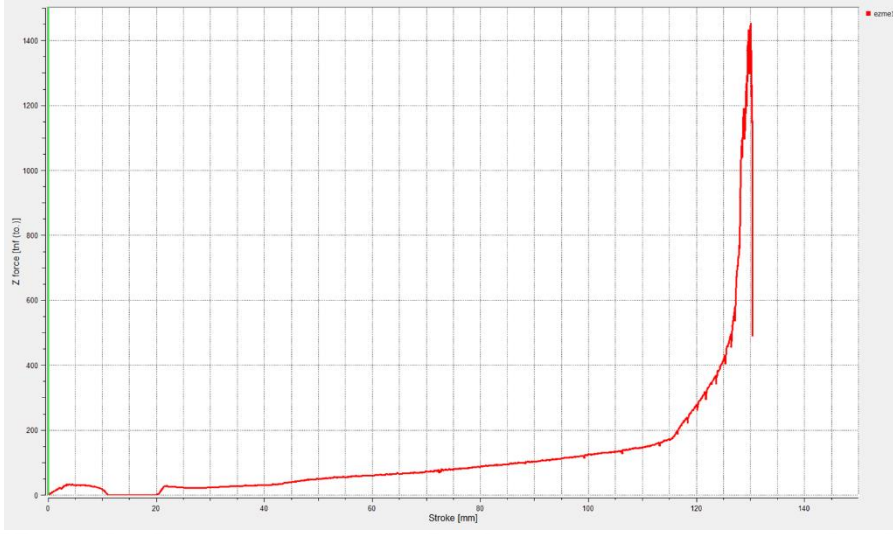
Effective stress ise 82,57' dir.



Şekil 4. 105. 4. Alaşım Dövme 1 Yield Stress

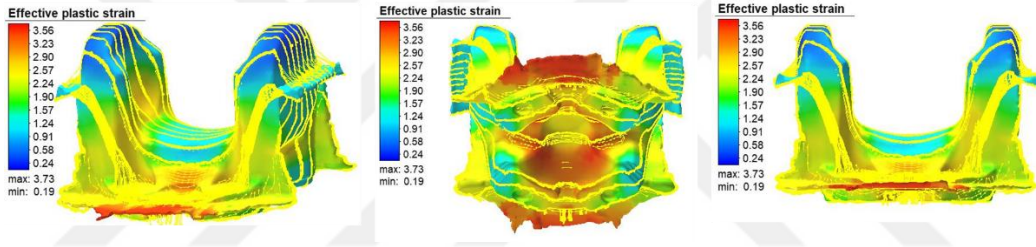


Yield Stress 93,87 olarak bulunmuştur.



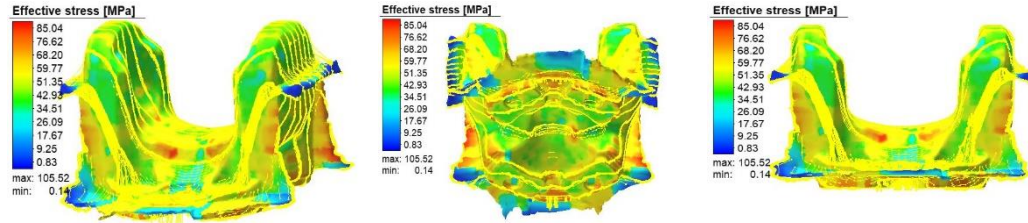
Şekil 4. 106. 4. Alaşım Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Dövme 2;



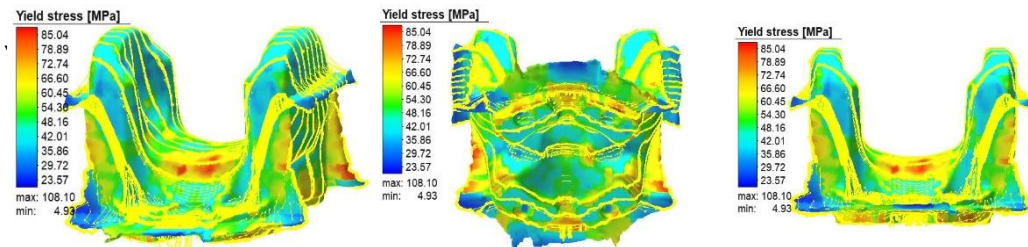
Şekil 4. 107. 4. Alaşım Dövme 2 Effective Plastic Strain

Effective plastic strain 3,56 olarak bulunmuştur.

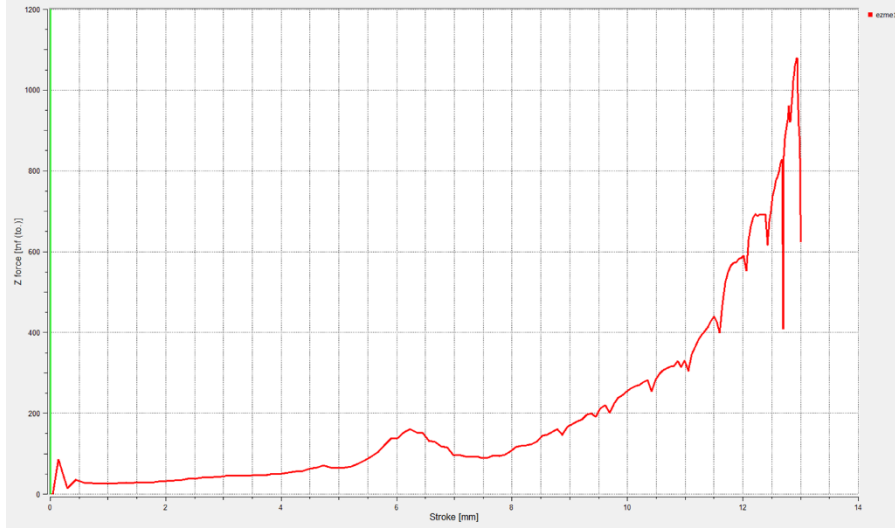


Şekil 4. 108. 4. Alaşım Dövme 2 Effective Stress

Effective stress ise 85,04'dir.

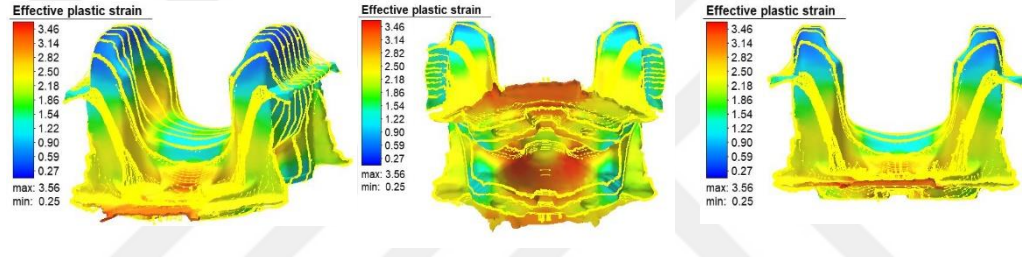


Şekil 4. 109. 4. Alaşım Dövme 2 Yield Stress



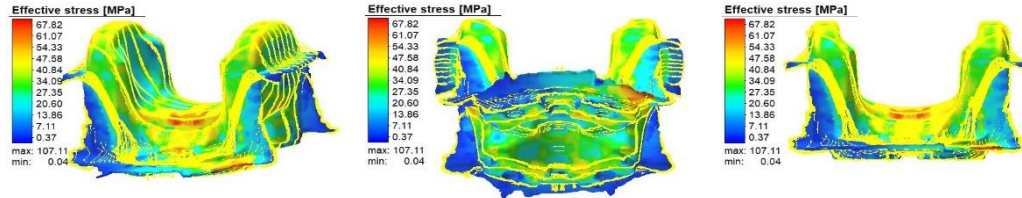
Şekil 4. 110. 4. Alaşım Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

### Son Şekillendirme;



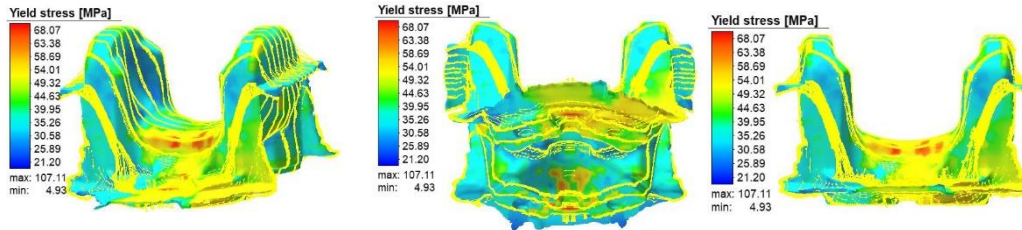
Şekil 4. 111. 4. Alaşım Son Şekillendirme Effective Plastic Strain

Effective plastic strain 3,46 olarak bulunmuştur.



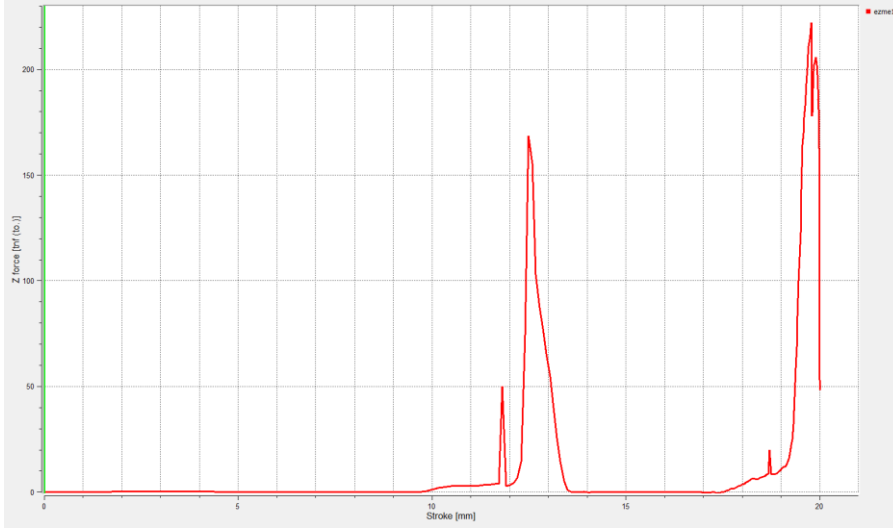
Şekil 4. 112. 4. Alaşım Son Şekillendirme Effective Stress

Effective stress ise 67,82'dir.



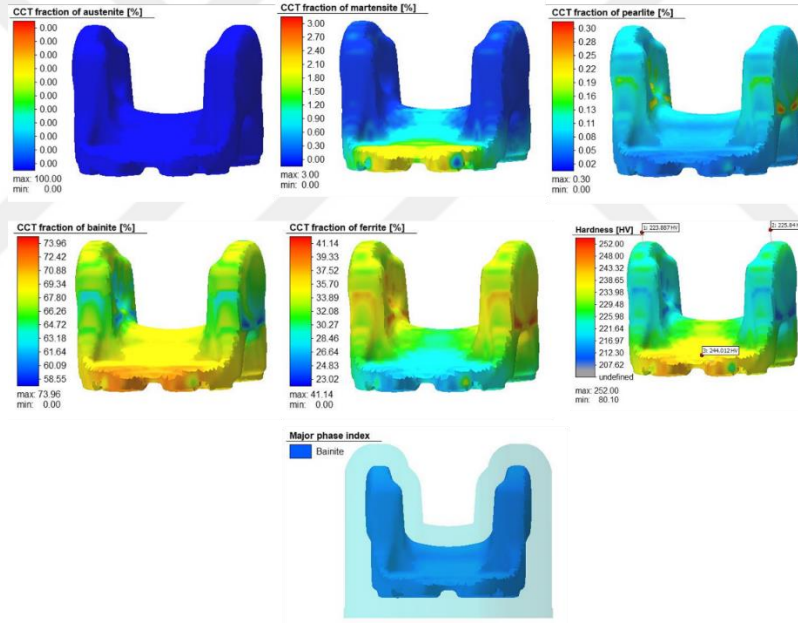
Şekil 4. 113. 4. Alaşım Son Şekillendirme Yield Stress

Yield Stress 68,08 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 114. 4. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Soğuma;

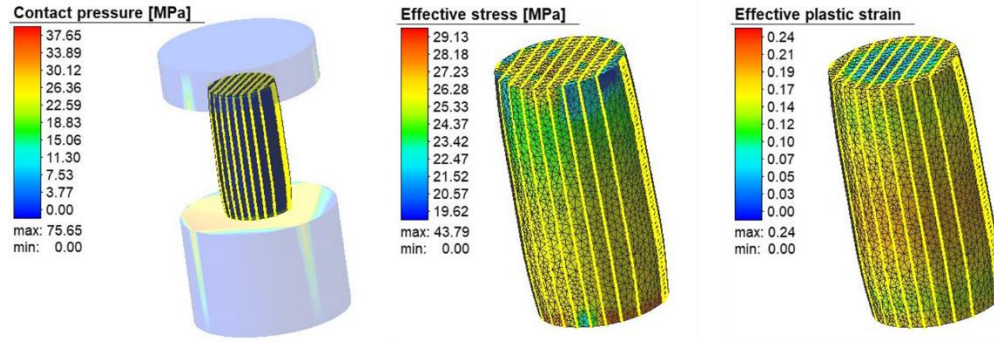


Şekil 4. 115. 4. Alaşım Soğuma Simülasyonu

Yapı içerisinde Beynit fazı oluşmuş olup sertlik değeri 252 HV olarak tespit edilmiştir.

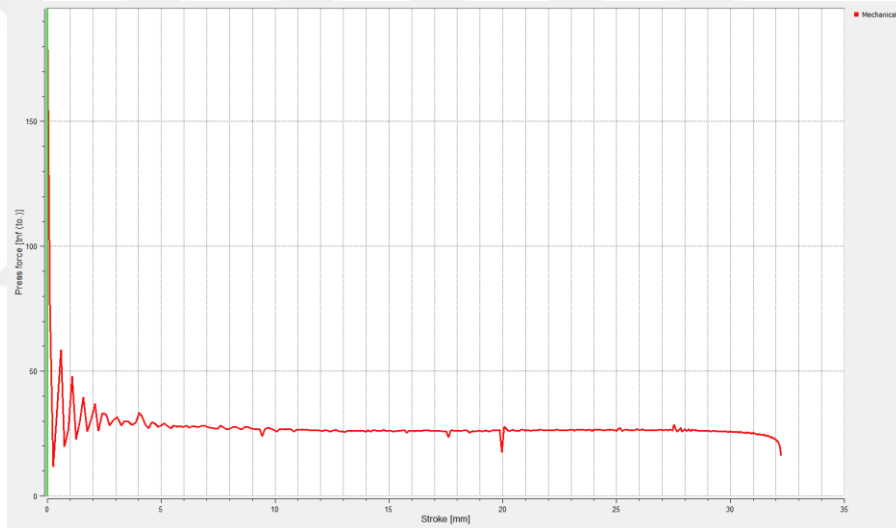
#### 4.3 5. Alaşım Dövme Simülasyonları;

##### Ön Şekillendirme 1;



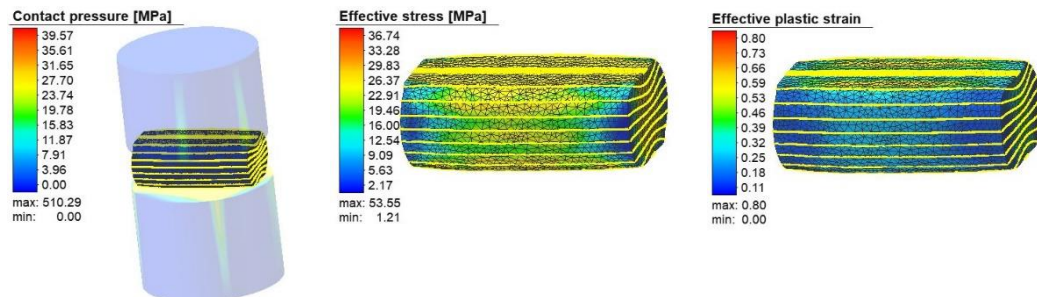
Şekil 4. 116. 5. Alaşım Ön Şekillendirme 1 Effective Plastic Strain / Effective Stress

Ön Şekillendirme 1 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,24 – Effective stress 29,13 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



Şekil 4. 117. 5. Alaşım Ezme1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

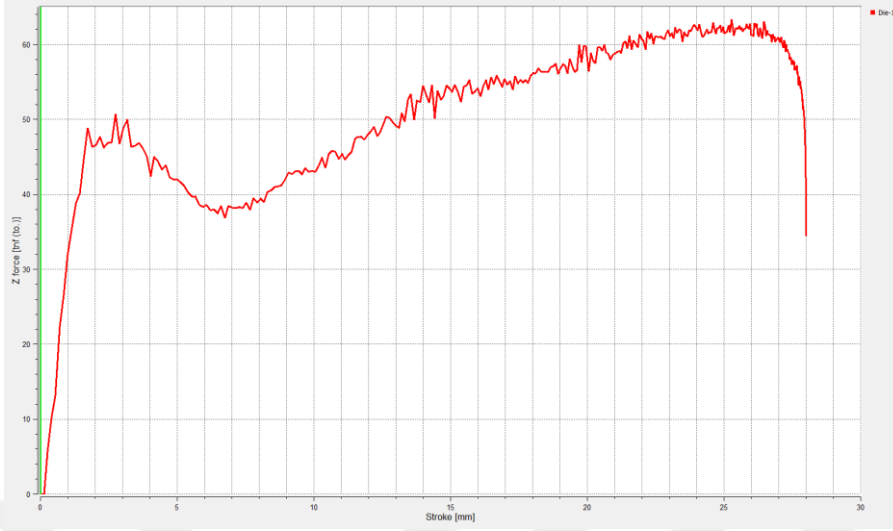
##### Ön Şekillendirme 2;



Şekil 4. 118. 5. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Effective Plastic Strain / Effective Stress

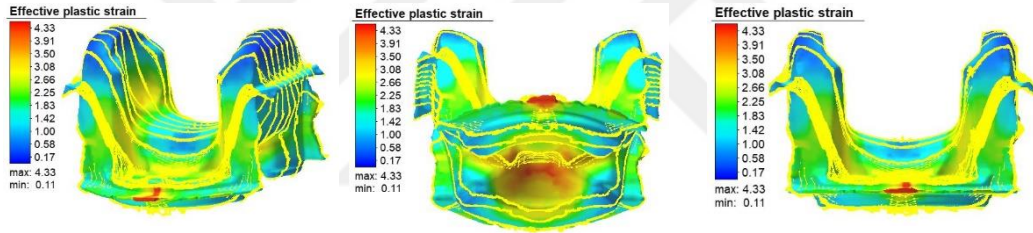


Ön Şekillendirme 2 prosesi sonrası Effective plastic strain 0,80 – Effective stress 36,74 olarak tespit edilmiştir. Kuvvet deplasman eğrisi ise aşağıdaki gibidir.



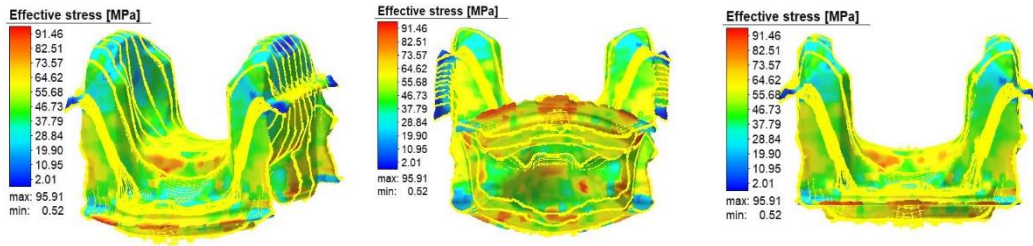
Şekil 4. 119. 5. Alaşım Ön Şekillendirme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Dövme 1;



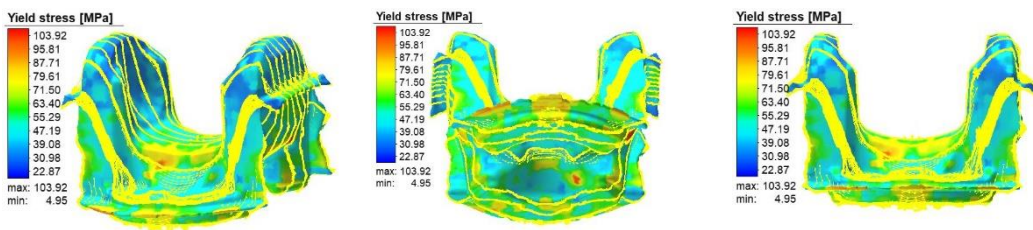
Şekil 4. 120. 5. Alaşım Dövme 1 Effective Plastic Strain

Effective Plastic Strain 4,33'dür.



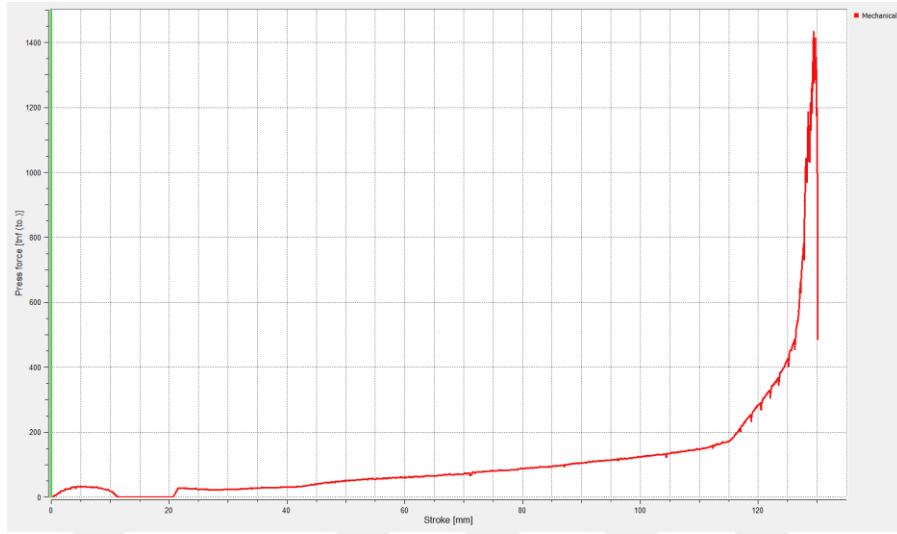
Şekil 4. 121. 5. Alaşım Dövme 1 Effective Stress

Effective Stress değeri 91,46'dır.



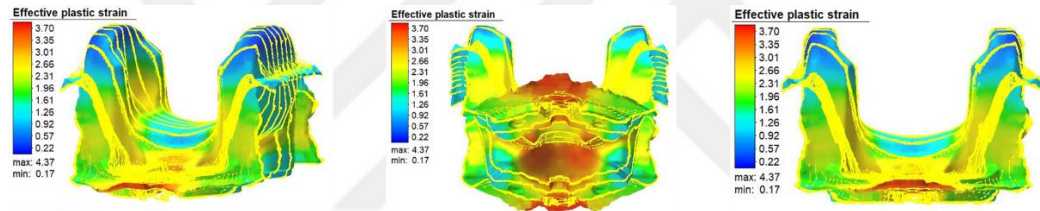
Şekil 4. 122. 5. Alaşım Dövme 1 Yield Stress

Yield Stress değeri 103,92 olarak bulunmuştur. Kuvvet deplasman eğrisi aşağıdadır.



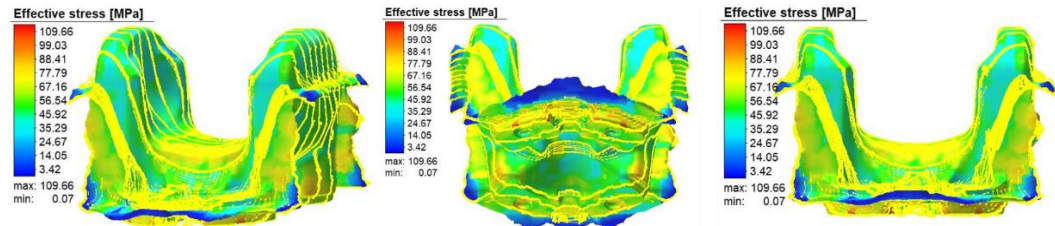
Şekil 4. 123. 5. Alaşım Dövme 1 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Dövme 2;



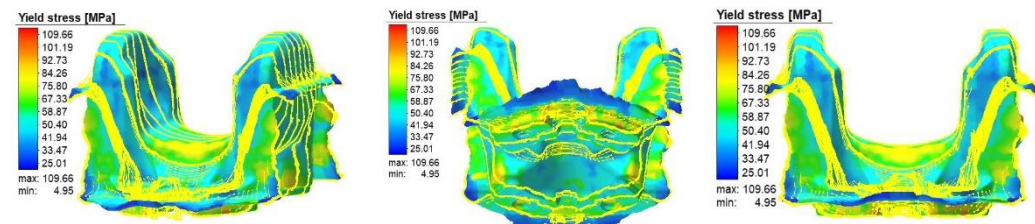
Şekil 4. 124. 5. Alaşım Dövme 2 Effective Plastic Strain

Effective Plastic Strain 3,70'dir.



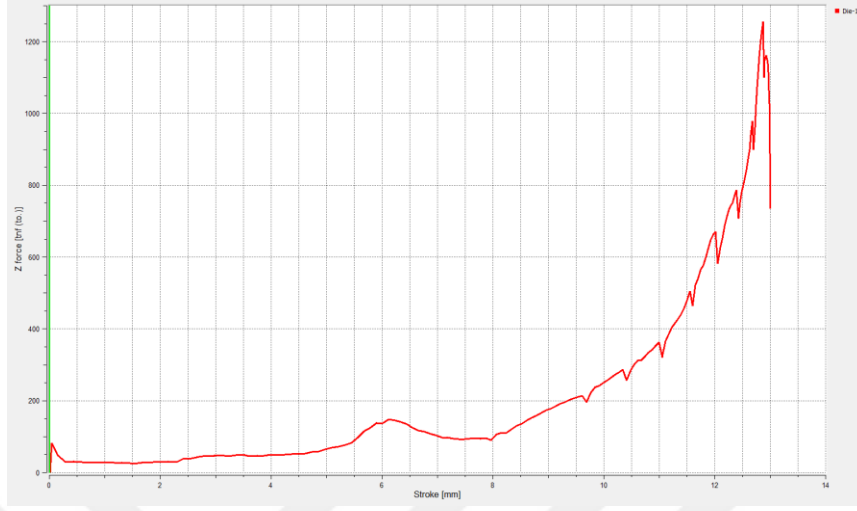
Şekil 4. 125. 5. Alaşım Dövme 2 Effective Stress

Effective Stress değeri 109,66'dır.



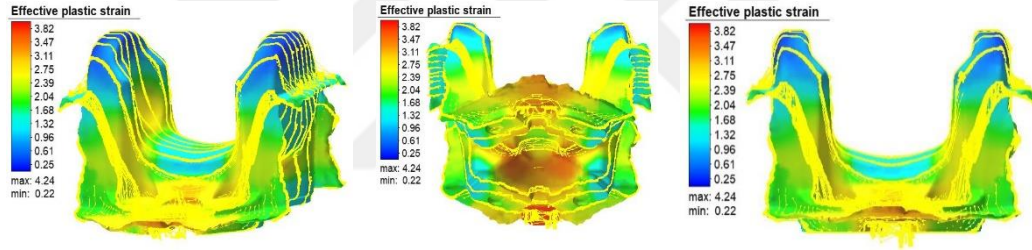
Şekil 4. 126. 5. Alaşım Dövme 2 Yield Stress

Yield Stress değeri 109,66 olarak bulunmuştur. Kuvvet deplasman eğrisi aşağıdadır.



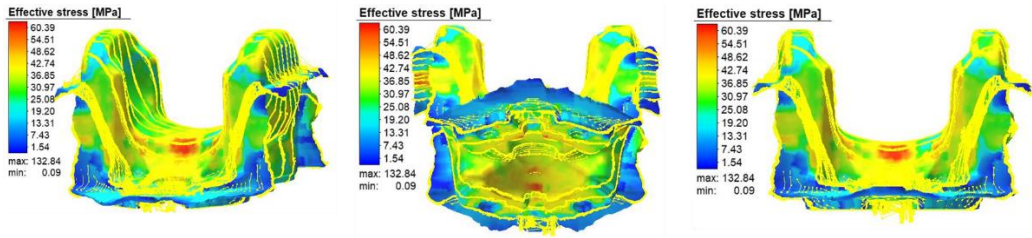
Şekil 4. 127. 5. Alaşım Dövme 2 Kuvvet - Deplasman Eğrisi

Son Şekillendirme;



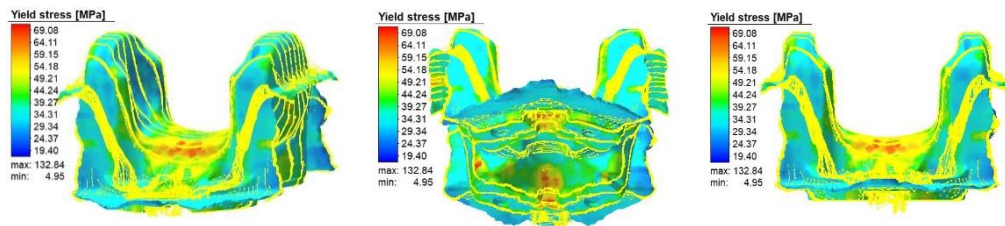
Şekil 4. 128. 5. Alaşım Son Şekillendirme Effective Plastic Strain

Effective Plastic Strain 3,82' dir.



Şekil 4. 129. 5. Alaşım Son Şekillendirme Effective Stress

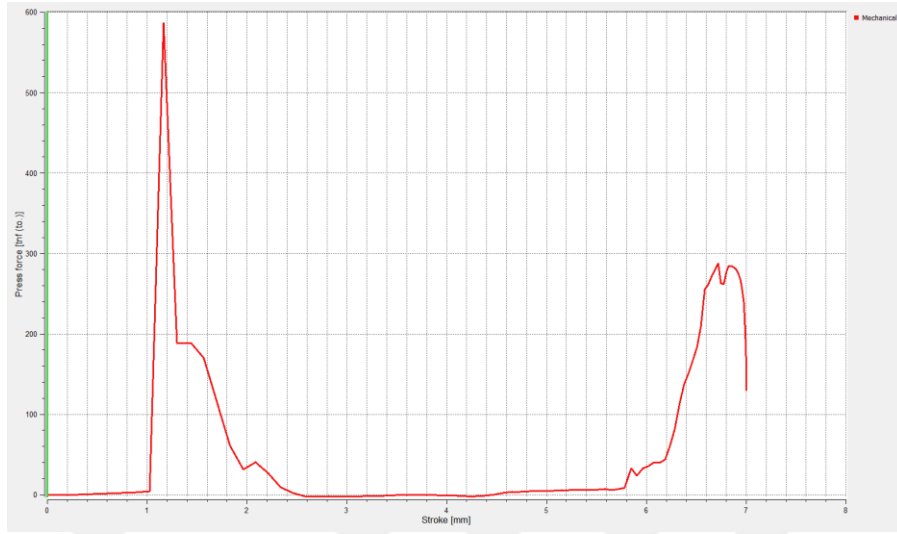
Effective Stress değeri 60,39'dır.



Şekil 4. 130. 5. Alaşım Son Şekillendirme Yield Stress

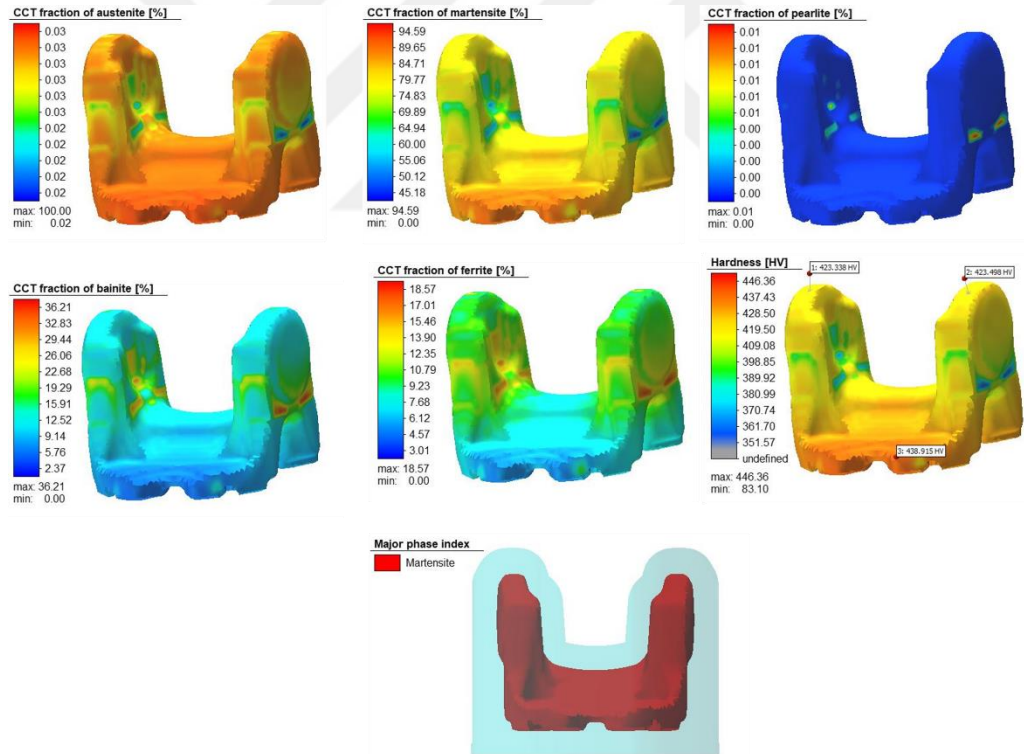


Yield Stress değeri 69,08 olarak bulunmuştur. Kuvvet deplasman eğrisi aşağıdadır.



Şekil 4. 131 5. Alaşım Son Şekillendirme Kuvvet- Deplasman Eğrisi

Soğuma;



Şekil 4. 132. 5. Alaşım Soğuma Simülasyonu

Yapı içerisinde Martenzit fazı oluşmuş olup sertlik değeri 346,36 HV olarak tespit edilmiştir.

## 5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında mikro alaşımlı mevcutta kullanılan çelik ve geliştirilen çeliğin incelemeleri yapılmış olup ilgili faaliyetler aşağıdadır;

1. 1141M, 41Cr4 ve C45E çelik bar malzemelerden numuneler alınarak metalografik incelemeler için hazırlanmıştır.
2. İlgili numunenin mikro yapı analizleri yapılmıştır.
3. Eş zamanlı olarak spektral analizleri yapılarak çelik bar içerisindeki kimyasal kompozisyon oranları tespit edilmiştir.
4. İncelemeleri tamamlanan çelik bar 1200 oC'ye ısıtılarak 6 dövme operasyonunda dövülmüştür.
5. Dövülen çatallı flanştan yine numunler hazırlanarak mikro yapı incelemeleri yapılarak çelik var ve sıcak dövülmüş numunler arasında mekanik özellik karşılaştırması yapılmıştır.
6. Mevcutta kullanılan çelik kompozisyonları Simufact Forming yazılımında kimyasal kompozisyonları yazılarak mekanik özellikleri elde edilmiş, Sanal ortam ve gerçek ortam karşılaştırılması yapılmıştır.
7. Simülasyon programında alaşım dizyanı yapıldıktan sonra 5 istasyonda çatallı flanş dövülmüştür.
8. 1200 derecededövülen çatallı flanş ve kontrollü soğuma prosesi simülasyon ortamında tamamlandığında gerçek ortam ile sanal ortam karşılaştırılmış olup sanal ortam ve gerçek ortam arasında %96 uyum elde edilmiştir.
9. Dövme sonrası üründen alınan numunler ile yapılan mikro yapı incelemelerinde elde edilen faz dağılımları vetane boyutu değerleri sanal ortamda da elde edilmiştir.
10. Mevcut durum çalışmaları baz alınarak yeni nesil mikro alaşımlı çelik kompozisyonları geliştirilmiştir.
11. Geliştirilen çelik kompozisyonlarının mekanik özellikleri Simufact Forming yazılımından elde edilmiş olup dövme simülasyonları gerçekleştirilmiştir.
12. Hedef çeliğimiz olan 41Cr4 çeliğimize en yakın mekanik özelliklerin elde edildiği kimyasal kompozisyona ait çalışmalar tezde sunulmuştur.

Yapılan çalışmalar kapsamında mevcut durumda kullanılan 1141M, C45E, 41Cr4 malzemelerin mekanik özelliklerine bakıldığında, hedef çeliğin özellikleri 41Cr4 malzemeye yakın olması hedeflenmişti.

Hesaplamalı malzeme mühendisliği programları ve metal şekillendirme programları kullanılarak çalışmalar yapılmış olup. Çalışma kapsamında 5 kimyasal kompozisyon geliştirilmiştir.



## KAYNAKLAR

- [1] A Study of Dynamic Recrystallization During Hot Rolling of Microalloyed Steels, Jajal Biglou, John G. Lenard, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo. Canada
- [2] Deformation of inclusion during hot Rolling of steels, Chunhui Luo, Ulf Stahlberg, Journal of Material processing technology, 114, 2001, 87-97
- [3] Effect of Nb Solute and NbC Precipitates on Dynamic or Static Recrystallization in Nb Steels, XIAO Fu-ren et al., journal of iron and steel research, international. 2012, 19(11): 52-56
- [4] Effect of processing parameters on the microstructure and properties of an Nb microalloyed steel, Adem Bakkaloglu, Materials Letters 56 (2002) 200–209
- [5] Fine-grained alloys by thermomechanical processing, F. John Humphreys\*, Philip B. Prangnell, Ronald Priestner, Current Opinion in Solid State and Materials Science 5 (2001) 15–21
- [6] Grain refinement and mechanical properties of asymmetrically rolled low carbon steel, Kyung-Moon Lee, Hu-Chul Lee, Journal of Materials Processing Technology, Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 1574–1579.
- [7] Heat treatment and mechanical properties of low-carbon steel with dual-phase microstructure, J. Adameczyk , A. Grajcar, Journal of of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 22, 1, 2007.
- [8] High-speed continuous casting of peritectic carbon steels, Toshihiko Emi\*, Hasse Fredriksson, Materials Science and Engineering A 413-414 (2005) 2–9
- [9] Effect of controlled-rolling parameters on the ageing response of HSLA-80 steel, A.A. Gornia, P.R. Mei, journal of materials processing technology 1 9 7 ( 2 0 0 8 ) 374–378
- [10] Effect of cooling rate on structure and properties of an ultra-low carbon HSLA-100 grade steel, A. Ghosh , S. Das , S. Chatterjee ,\*, P. Ramachandra Rao, Materials Characterization 56 (2006) 59–65
- [11] Influence of controlled rolling condition on microstructure and mechanical properties of low carbon micro-alloyed steels, P. Korczak, Journal of Materials Processing Technology 157–158 (2004) 553–556
- [12] Manufacturing of mass-scale products from structural microalloyed steels in integrated production lines, journal of of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 20, 1-2, 2007
- [13] Microstructure and Transformation Characteristics of Acicular Ferrite in High Niobium-Bearing Microalloyed Steel, YANG Jing-hong' , LIU Qing-you, SUN Dong-bai", LI Xiang-yang, journal of iron and steel research, international. 2010, 17(6): 53-59
- [14] Thermomechanical processing of metals and alloys, S. Ghosh Chowdhury and V. Rajinikanth, Special Metal Casting and Forming Processes
- [15] Thermomechanical treatment of HSLA steel QStE 480MC, J. Zrnika,\*, T. Kvakajb,\*, P. Horaka, V. Vrchovinskýa, 11. Internatioanal scientific conference, Achievements in
- [16] Thermomechanically-controlled Processing for Producing Ship-building Steels, B. Basu, S.M. Tripathi, and V.V. Modak, Defence Science Journal, Vol. 55, No. 1, January 2005, pp. 91-101
- [17] Çapan L., Plastik Şekil Verme, Makine Mühendisliği El Kitabı Cilt 2, 46-56, 1990



[18] Wen S.W., Hartley P., Pillinger I., Sturgess C.E.N., Roll Pass Evaluation for Three-Dimensional Section Rolling Using a Simplified Finite Element Method, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 211, pp. 143-158, 1997

[19] Meran C., Kovan V., Berberođlu O., Hadde Merdanelerinde Karşılaşılan Hasarlar ve Analizi, TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi, 177-186, 2006



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fulya EYÇİN  
Doğum Yeri ve Yılı : Söke/Aydın, 1992  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : [fulyababali@ogr.cbu.edu.tr](mailto:fulyababali@ogr.cbu.edu.tr)

### Eğitim Durumu

Lise : Hilmi Fırat Anadolu Lisesi 2010  
Lisans : MCBÜ Malzeme Mühendisliği, 2010  
Yüksek Lisans : MCBÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Devam

### Mesleki Deneyim

Tirsan Kardan San. Tic. A.Ş. 2016-Devam

### Yayımları

1. II Uluslararası Üniversite Sanayi İşbirliği, Ar-Ge Ve İnovasyon Kongresi - Hot Forging Process Simulation of Cardan Shaft Flange-2018
2. II Uluslararası Üniversite Sanayi İşbirliği, Ar-Ge Ve İnovasyon Kongresi - Sıcak Dövme ile Üretilen Kardan Mil Flaşının Karakterizasyonu-2018
3. Uluslararası Multi Disiplinler Akademik Çalışmalar Sempozyumu – İMASES - Sıcak Dövme Ve Soğutma Prosesi İle Üretimi Gerçekleştirilen Kayıcı Çatalın Mekanik Ve Metalografik Özelliklerinin Karakterizasyonu- 2019
4. Uluslararası Multi Disiplinler Akademik Çalışmalar Sempozyumu – İMASES - 42CrMoS4 Kalite Hammedenin Sıcak Dövme Ve Soğutma Prosesinin Sayısal Simülasyon Yöntemi Destekli Analizi Ve Geliştirilmesi
- 5.UDCS'19 - Investigation of Material Properties of Cardan Shaft Fixed Joint Forked Flange Produced by Hot Forging and Cooling in Different Environments
- 6.UDCS'19 - Investigation Of Hot Forged And Cooled Material Properties By Numerical Simulation Method