



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖKÜM, EKSTRÜZYON VE DÖVME İŞLEMLERİNİN 6082 Al ALAŞIMLI DÖVME SÜSPANSİYON PARÇALARINDA MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Onur ILGAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan-2014
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Onur ILGAZ

Tarih: 22.04.2014

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÖKÜM, EKSTRÜZYON VE DÖVME İŞLEMLERİNİN 6082 Al ALAŞIMLI DÖVME SÜSPANSİYON PARÇALARINDA MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Onur ILGAZ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mesut UYANER

2014, 106 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Mustafa ACARER
Doç. Dr. Mesut UYANER
Yrd. Doç. Dr. Hakan Burak KARADAĞ

Otomotiv dövme süspansiyon parçalarında alüminyum malzeme kullanım oranı son yıllarda büyük artış göstermektedir. Alüminyumun avantajları ve diğer malzeme gruplarına kıyasla üstün özellikleri, başta otomotiv sanayi ve diğer sektörlerde mühendislik malzemesi olarak kullanılmasının önünü açmış olup tercih sebebi oluşturmaya devam etmektedir.

Alüminyum dövme alaşımlarından olan EN AW 6082, yakın zamanda hem ekstrüzyon ürünlerinin hem de otomotiv sektöründe dövülerek üretilen araç süspansiyon sistemi elemanlarının öncelikli alaşımı olmuştur. Seçkin özelliklerinden dolayı kullanımı hızla artan bu alaşımın termo-mekanik proses metalurjisi önem arz eden konuların başında yer alarak Ar-Ge çalışmalarında önemli bir yer edinmeye başlamıştır.

Dövme öncesi yarı mamulün şekli ve hangi üretim yönteminden geçerek yarı mamul haline geldiği; 3 boyutlu tane yapısını, dinamik yeniden kristalleşme reaksiyonunu, dövülen parçaların üstün özelliklerini, dövme üretiminin verimliliğini, ısıl işlem sertleşme kapasitesini, nihai parça kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmada ekstrüzyon ve döküm ile üretilen yarı mamul içi dolu profiller, dövme ve T6 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Yarı mamul üretiminde ekstrüzyon ve döküm seçeneklerinin birbirlerine kıyasla avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurularak, nihai parçalara metalografik ve mekanik testler uygulanmıştır. Ekstrüzyon ve döküm seçeneklerinden dövülen ve T6 ısıl işlemi gören parçaların kesit tane yapıları, akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri karşılaştırmalı olarak detaylandırılmıştır. Bu çalışma ile alüminyum dövme rotilli kol parçalarında oluşan aşırı tane büyümesi mekanizması hem ekstrüzyondan dövme hem de dökümden dövme seçeneğinde engellenmiştir. Bu suretle üretimin tipine göre; parça kalitesinde alınan olumlu sonuçlar ortaya konularak, ülkemiz sanayisi için teknolojik açıdan iyileştirilmiş ürün ve süreç yeniliği sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Döküm, dövme, ekstrüzyon, EN AW 6082, otomotiv süspansiyon parçaları, yarı mamul.

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF THE CASTING, EXTRUSION AND FORGING PROCESSES ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 6082 Al FORGED SUSPENSION PARTS

Onur ILGAZ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN METALLURGICAL AND MATERIAL ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER

2014, 106 Pages

Jury
Prof. Dr. Mustafa ACARER
Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER
Asst. Prof. Dr. Hakan Burak KARADAĞ

Nowadays, usage of aluminum has increased for automotive forged suspension parts. The reason of aluminum option as engineering material for automotive and other industry is resulting from aluminums advantages and superior properties.

EN AW 6082, which is one of wrought aluminum alloys, has been primary alloy in recent times for both extruded parts and suspension parts made by forging in automotive industry. Due to superior properties, increasing applications of this alloy has gained a seat in research and development studies by being in as important subjects of thermo mechanic process metallurgy.

Semi-finished product shape before forging and which passing manufacturing method to be semi-finished product directly affect 3D grain structure, dynamic recrystallization reaction, properties of forged parts, forging productivity, heat treatment hardness capacity and final part quality.

In this study, semi-finished filled profiles made by both extrusion and casting were subjected to forging and T6 heat treatment. Considering of advantages and disadvantages of both extrusion and casting options at semi-finished production, final parts were applied to metallographic and mechanic tests. Cross- section grain structures, yield strengths and elongations at rupture were detailed comparatively for parts with T6 heat treatment made by extrusion and casting options. With this study, excessive grain growth on the aluminum forged control arm parts were prevented for both forging from extrusion and forging from casting options. In this way, according to production type, the positive results obtained on part quality were improved in terms of technologic and gained the process innovation.

Keywords: Automotive suspension parts, casting, EN AW 6082, extrusion, forging, semi-finished material.

ÖNSÖZ

Çalışanı olduğum Aydınlar Yedek Parça San. ve Tic. A.Ş. (AYD) ile TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsünün 3120679 numaralı TEYDEB projesi kapsamında sözleşmeli proje işbirliğinde bulunması vasıtasıyla bu tez çalışmasındaki deneysel araştırmaların büyük bir çoğunluğu MAM' dan Doç. Dr. Yücel BİROL ile birlikte ortak bir şekilde TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsünde ve Aydınlar Yedek Parça Ar-Ge Merkezinde yürütülmüştür.

Bu tez çalışmasında ve tüm lisansüstü eğitimim boyunca değerli yardım, katkı ve önerilerinden dolayı çok kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mesut UYANER' e en derin duygularımla teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında hiçbir zaman desteğini, değerli bilgi ve tecrübe birikimlerini esirgemeyen, tez konusunda fikir sahibi olan, çok değerli bilim adamı Sayın Doç. Dr. Yücel BİROL' a en içten duygularımla teşekkürü bir borç bilirim.

Her türlü sorunlarımı çözüme kavuşturarak her zaman yanımda olan, eşsiz öğreticilikleri ile beni motive eden, önerileri ve yol göstericilikleri ile ufkumu açan çok değerli müdürlerim Makine Yük. Müh. Erdem ÜNÜVAR' a ve Endüstri Müh. Ümit Ahmet ÇAKAL' a teşekkür ederim.

Tüm tez çalışmam boyunca daima yanı başımda olan, her konuda beyin fırtınası yaparak fikir alışverişinde bulunduğum, tüm uygulamalarda yardımını hiç esirgemeyen çok değerli mesai arkadaşım ve meslektaşım Seracettin AKDI' ya teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarımın büyük bir bölümünün tamamlanmasında imkânlarından faydalandığım TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü' ne ve değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarımın uygulama kısmını destekleyen, dövme ve ısıl işlem denemelerimi gerçekleştirdiğim, hammadde ve sarf malzeme tedariğini sağladığım ve aynı zamanda da çalışanı olduğum Aydınlar Yedek Parça San. ve Tic. A.Ş.' ye ve değerli personellerine teşekkür ederim.

Tez çalışmamın çekme testi deneylerinde imkânlarından faydalandığım İstanbul Teknik Üniversitesi Mekanik Metalurji Laboratuvarına, değerli çalışanlarına ve testlerin gerçekleştirilmesinde büyük emeği geçen öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN' a en içten duygularımla teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde, benden maddi ve manevi her türlü desteği hiçbir zaman esirgemeden her zaman yanımda olan çok kıymetli aileme en derin duygularımla teşekkürü bir borç bilirim.

Onur ILGAZ
KONYA-2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tarihçe 1
1.2. Alüminyumun Genel Özellikleri ve Uygulama Alanları 3
1.3. Dövme Alüminyum Alaşımları 7
1.3.1. Alüminyum 1XXX serisi 8
1.3.2. Alüminyum 2XXX serisi 9
1.3.3. Alüminyum 3XXX serisi 9
1.3.4. Alüminyum 4XXX serisi 9
1.3.5. Alüminyum 5XXX serisi 9
1.3.6. Alüminyum 6XXX serisi 10
1.3.7. Alüminyum 7XXX serisi 10
1.4. Al-Mg-Si Alaşımlarının (6XXX Serisi) Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri 10
1.5. Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Plastik Şekil Verme Yöntemleri 14
1.5.1. Dövme 14
1.5.2. Haddeleme 15
1.5.3. Ekstrüzyon 15
1.6. EN AW 6082 Dövme Süspansiyon Parçalarında Kullanılan Yarı Mamul Seçenekleri 15

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **19**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **38**

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **40**

4.1. Alüminyum Dövme Rotilli Kol Parçasının Ana Sanayi ve Yerli Üretiminin Karşılaştırılması 40
4.2. Alüminyum Dövme İmalatında Kullanılan Yarı Mamulün Döküm ve Ekstrüzyon Seçenekleriyle Optimum Üretimlerinin Gerçekleştirilmesi 47
4.2.1. Alüminyum dövme üretiminde kullanılan yarı mamulün döküm seçeneğiyle üretilip değerlendirilmesi 48
4.2.2. Alüminyum dövme üretiminde kullanılan ekstrüzyon yarı mamul seçeneğinin optimum şartlarda üretilip değerlendirilmesi 57

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA **64**

5.1. Dövme Üretiminde Kullanılan Döküm Yarı Mamul Seçeneğinin Nihai Parçaya Etkisi 64

5.1.1. Doğrudan Soğutmalı Döküm metoduyla üretilmiş profillerin dövme ve ısıl işlem sonuçları 64
5.1.2. Soğutma Plakasından Döküm metoduyla üretilmiş profillerin dövme ve ısıl işlem sonuçları 67
5.1.3. All-Round® ismine sahip tescilli profillerin dövme ve ısıl işlem sonuçları . 69
5.2. Dövme Üretiminde Kullanılan Ekstrüzyon Yarı Mamul Seçeneğinin Nihai Parçaya Etkisi 70
5.2.1. Ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığının dövme ve ısıl işlem sonuçlarına etkisi ... 71
5.2.2. EN AW 6082 alaşımına Cr elementi ilavesinin dövme ve ısıl işlem sonuçlarına etkisi 77
5.2.3. Düşük ekstrüzyon oranının dövme ve ısıl işlem sonuçlarına etkisi..... 86

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 89

6.1 Sonuçlar 89
6.2 Öneriler 91

KAYNAKLAR 94

1. GİRİŞ

Alüminyum üretim metalurjisi, genel üretim metalurjisi içinde yüksek saflıkta metal üretimi ve malzemenin kullanım çeşitliliğinden ötürü özel bir yere sahiptir (Car, 2011).

Alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra tabiatta en fazla bulunan elementtir. Metaller içerisinde de yer kabuğunun % 8 ini oluşturarak bileşikler halinde ve diğer metallerden daha fazla bulunur. Buna karşılık metal olarak 19. Yüzyılın ilk yarısında elde edilebilmiştir. Bunun nedeni ise alüminyumun doğada çok kararlı kimyasal bileşik olan alüminyum oksit şeklinde bulunması ve bu bileşiğin indirgenmesinin yüksek enerji gerektirmesidir. Bunu sağlayacak teknolojik yöntemler ise ilk kez 19. Yüzyılda gerçekleştirilebilmiştir (Weissbach, 1967).

1.1. Tarihçe

18. yüzyılın ortalarında Alman kimyacı Andreas Sigmund Margraff (1709-1782), o güne kadar bilinmeyen bir metalin oksijen ile bileşiği olarak alüminayı keşfetmiştir (Car, 2011).

Bilimsel anlamda ilk alüminadan alüminyum kazanımı, 1809 yılında İngiliz bilim adamı Sir Humphry Davy tarafından yapılmıştır. Davy, ‘alum’ kelimesinden yola çıkarak, bu yeni metale ‘aluminium’ adını vermiştir. Günümüzde İngilizce kaynaklarda ‘aluminium’ ve Amerikan kaynaklarında ise ‘aluminum’ olarak geçmektedir (Car, 2011).

Friedrich Wöhler'in, alüminyumu, 1827'de, susuz alüminyum klorürü potasyum ile karıştırarak ayrıştıran ilk kişi olduğu bilinirse de metal, o tarihten iki sene kadar önce, Danimarkalı bir fizikçi ve kimyacı olan Hans Christian Oersted tarafından saf olmayan bir formda üretilmiştir. Dolayısıyla almanaklarda ve kimya literatüründe Oersted'in adı alüminyumu bulan kişi olarak geçer (Anonymous, 1996).

Danimarkalı bilim adamı Hans Christian Oersted, 1825 yılında ilk kez saf alüminyumu elde etmiştir ve bu buluşunu ‘renk ve parlaklık açısından kalaya benzeyen metal parçası’ olarak tanımlamıştır. Bununla beraber Oersted detay çalışmalara girmemiş ve elindeki bulguları Alman kimyacı Friedrich Wöhler’ e vermiştir. Wöhler, Oersted’ in metodolojisini geliştirerek, onun elde ettiğinden daha büyük bir alüminyum parçası elde etmiş daha sonra alüminyumun yoğunluk, elektriksel iletkenlik, korozyon

direnci gibi bazı temel fiziksel ve kimyasal özelliklerini tanımlamıştır. Magnezyum klorür' den elektroliz yolu ile magnezyum elde etmeyi başaran Robert Wilhelm Bunsen 1854 yılında, sodyum alüminyum klorürü elektroliz ederek alüminyum kazanmayı başarmıştır (Car, 2011).

Bunsen ile aynı zamanda başka bir kimyacı da, Bunsen' den habersiz olarak, aynı yöntem üzerinde çalışmaktaydı ve bu kimyacı, ilk endüstriyel alüminyum üretimini gerçekleştirecekti. Alüminyum tarihinde önemli bir yere sahip olan bu bilim adamı, Fransız kimyacı Henri Ettiene Saint-Claire Deville' dir. Deville, Wöhler' in bulgularını geliştirerek, 1854 yılında ilk uygulamalı alüminyum elektroliz yöntemini geliştirmiştir. Deville' de Wöhler gibi, başlangıç malzemesi olarak alüminyum klorürü kullanmış, ancak indirgen olarak potasyum yerine daha ucuz ve kolay bulunabilen sodyumu tercih etmiştir. Bu bilimsel çalışmaların tarihsel önemi, Wöhler' in çalışmalarının alüminyum üretiminin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğine ilişkin ilk umutların oluşumuna kapı açmasıdır (Car, 2011).

Alüminyum metalinin endüstriyel anlamda üretim teknolojisini ancak 1886 yılında Paul Louis Toussaint Hèroult ve Charles Martin Hall birbirlerinden habersiz şekilde, ayrı ayrı çalışarak geliştirmiştir. Günümüzde Hall-Hèroult yöntemi olarak halen kullanılan bu proses de, bu iki bilim adamı, alüminyum oksidin (alüminanın) ergimiş kriyolitin içinde, üzerinden güçlü bir elektrik akımı geçirildiğinde, alüminyumun elektrolitin altında sıvı halde biriktiğini keşfetmişlerdir. Bu nedenle 1886 yılı alüminyum endüstrisinin başlangıç yılı olarak kabul edilmektedir. 1886 yılında Werner Von Siemens' in dinamoyu keşfi ve K. J. Bayer' in boksitten alümina eldesini sağlayan Bayer Prosesi' ni bulması ile endüstriyel alüminyum üretimi kolaylaşmıştır. Bu yöntemin keşfinden sadece iki yıl sonra, 1888' de İsviçre' nin Neuhausen kentinde Schweizerische Metallurgische Gesellschaft tarafından Hèroult patentiyle, yine aynı yıl A.B.D' deki Pittsburgh kentinde Şekil 1.1' de dıştan görünüşü verilen Pittsburgh Reduction Company tarafından Hall patentiyle ilk alüminyum elektrolizhaneleri kurulmuştur. Bu tarihten itibaren bu konuda çok hızlı teknik ve ekonomik gelişmeler yaşanmaya başlanmıştır. 1900 yılına gelindiğinde İsviçre ve Amerika ile birlikte Fransa (1889), İngiltere (1896), Almanya (1898) ve Avustralya da (1899) alüminyum üreten ülkeler arasındaki yerlerini almışlardır (Car, 2011).



Şekil 1.1. Pittsburgh Reduction Company 1889 (Car, 2011)

1905’ de Betts üç tabaka elektrolizinin ilkelerini ortaya koymuştur. Ardından 1905’ de Claessen ve 1906’ da Wilm alüminyum malzemelerin temperlenebileceğini bulmuşlardır. 1926’ da ise Söderberg, bugün de hala kullanılan, kendi kendine pişen anotların elektroliz hücresinin ilk uygulamasını gerçekleştirmiştir ve 1932’ de Gadeu, alüminyumun endüstriyel ölçekte elektrolitik rafinasyonuna ilişkin çalışmalar yapmıştır (Car, 2011).

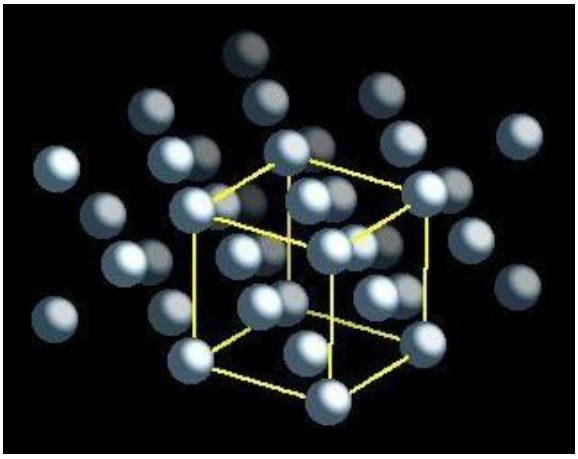
Günümüz dünyasında, ticari boyutta birincil alüminyum üretiminin tamamı elektroliz hücrelerinde gerçekleştirilmektedir. Hall-Heroult yöntemi olarak bilinen elektroliz yoluyla alüminyum üretim prosesi yerine, alternatif yöntemler üzerinde uzun süreden beri çalışılıyorsa da ve hatta bazı pilot tesisler kurulmuş olsa da, bu yöntemlerin endüstriyel uygulama alanı bulacaklarına dair umut verici teknik ve ekonomik sonuçlar henüz elde edilememiştir. 100 yılı aşkın geçerli olan klasik yöntemin daha uzun yıllar bizimle birlikte olacağı artık kesinleşmiş ve araştırmalar bu yöntemin performansını arttırma yönünde yoğunlaştırılmıştır. Dünyada yapım halinde olan ve planlanan tüm birincil alüminyum tesisleri Hall-Heroult yöntemine dayalıdır (Car, 2011).

1.2. Alüminyumun Genel Özellikleri ve Uygulama Alanları

Alüminyum, demir çelikten sonra günümüzün en çok kullanılan ikinci metalidir. Alüminyum mamuller; profil, boru, çubuk gibi ekstrüzyon ürünleri, levha, folyo gibi yassı ürünler, döküm ürünleri ve iletkenler seklinde sınıflandırılırlar. Tarih öncesi

çağlara adını veren on binlerce yıl öncesinin demir, bakır ve tunç gibi metalleri ile karşılaştırınca son derece genç olan, günümüzden 115 yıl önce endüstriyel çapta üretimine başlanan alüminyum, günlük yaşantımızın her yerinde kullanılmaktadır (Turbalıoğlu, 2008).

Alüminyum elementi periyodik tablonun III A grubunda bulunur. Alüminyum atomu 13 proton ve elektron ile çekirdekte yerleşik 14 nötrondan oluşur. Kristallografik yapısı kübik yüzey merkezlidir. Şekil 1.2' de alüminyumun kristal yapısı gösterilmektedir (Car, 2011).



Şekil 1.2. Alüminyumun kristal yapısı (Car, 2011)

Elektronları arasındaki yüksek çekme kuvvetlerinden ötürü, gümüşi renkte, hafif, manyetik olmayan, yanıcı olmayan ve dövülebilirlik özelliklerine sahiptir (Car, 2011). Saf alüminyumun bazı özellikleri Çizelge 1.1' de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Saf alüminyumun özellikleri (Car, 2011)

Kaynama noktası	2467 °C
Yoğunluk	2.69 g/cm^3
Ergime noktası	660.25 °C
Özgül ısısı	0.9 J/gK
Buhar basıncı	2.42 E-06 Pa
Elektriksel iletkenlik	0.377×10^6/cmΩ
Isısal iletkenlik	2.37 W/cmK
Hacimsel elastisite modülü	76 GPa
Rijitlik modülü	26 GPa
Young modülü	70 GPa
Füzyon entalpisi	10.67 kJ/mole
Buharlaşma entalpisi	293.7 kJ/mole
Molar hacim	9.99 cm^3/mole
Optik yansıma	% 71

Alüminyum metalinin mühendislik uygulamalarında kullanımını sağlayan çok önemli özellikleri vardır. Alüminyum yumuşak ve demirden yaklaşık üç kat daha hafiftir. Diğer metallerin yapısına ilave edilmesi ile alaşımlandırıldığı zaman, yoğunluğunun çok az artmasına karşılık mekanik dayanımında önemli oranlarda artışlar meydana gelmektedir (Su, 1988).

Demirin özgül ağırlığı 7.87 gr/cm^3, bakırın özgül ağırlığı 8.93 gr/cm^3 ve çinkonun özgül ağırlığı 7.14 gr/cm^3 iken alüminyumun özgül ağırlığı 2.69 gr/cm^3' dür. Bu özelliği ile otomotiv, uzay-uçak ve gemicilik endüstrilerinde, günden güne önem kazanmaktadır. Hafif malzemelerden üretilmiş taşıt araçları, düşük kütleden dolayı daha az enerji tüketirler ve daha yüksek manevra yeteneğine sahiptirler (Car, 2011).

Öte yandan hafiflik, daha az yakıt tüketimi nedeniyle daha az CO_2 salınımını da beraberinde getirir. Dünya atmosferine sera gaz salınımının % 19' u taşımacılık endüstri kaynaklıdır. Otomobillere eklenen her bir ton alüminyum, taşıtın kullanım süresi boyunca ortalama 20 ton daha az CO_2 salmasına neden olur (Car, 2011).

Alüminyum, ulaşım sektöründe taşıt araçlarının üretiminde kullanılan en önemli malzemelerden birisidir. Otomotiv ve uzay sanayinde alüminyum tercih edilen bir malzemedir. Hatta alüminyum kaporta veya tamamen alüminyum olan otomobiller üretme çalışmaları devam etmektedir. Orta büyüklükteki bir otomobilin ağırlığının %35'ini oluşturan kaporta üzerinde araştırmalar yapılarak üretimler gerçekleştirilmektedir. Audi-Alcoa işbirliği ile üretilen kaporta ve yapısal elemanların tümü alüminyumdan yapılmış olan prototip bir otomobilde % 47 oranında bir ağırlık tasarrufu sağlanmıştır. Her 2 kg çelik yerine 1 kg alüminyum kullanılarak yapılan çok daha hafif gövde sayesinde fren, süspansiyon ve motor aksamı gibi diğer elemanlarda da ağırlık tasarrufu sağlanabilmiş, bu sayede Audi 5000 model otomobilinde 370 kg çelik yerini 149 kg alüminyuma bırakmıştır. Alüminyum kullanımı ile 221 kg hafifleyen bu otomobilde sağlanan yakıt tasarrufu ile 150 bin km'de 3 bin 500 lt daha az benzin tüketilmiştir (Birol, 1991).

Alüminyum alaşımlandırılarak değişik mekanik dayanım değerlerine ulaşmak olanaklıdır. Alüminyum alaşımları, normal yapı çeliğine minimum eşit dayanımda malzemelerdir. Böylece otomotiv sanayisinden uzay sanayisine kadar çok değişik sektörlerde çok değişik ihtiyaçlara cevap verebilecek alüminyum malzemeler üretmek mümkündür. Çelik malzemelerin aksine yüksek dayanım özelliğini düşük sıcaklıklarda bile koruyabilir. Yüksek mekanik dayanımına karşın hafif olması, başta uzay ve uçak

endüstrisi olmak üzere birçok endüstri kolunda tercih edilmesine neden olur (Car, 2011).

Yüzeyinde oluşan doğal oksit filmi nedeni ile korozyon dayanımı yüksektir. Alüminyum metali, atmosfer, tuzlu su, petrokimyasal veya birçok kimyasal sistem içerisinde mükemmel bir korozyon direncine sahiptir. Bu nedenle alüminyum ve alaşımları inşaat, gemicilik, kimya sanayi için çok önemli malzemelerdir. Bu düşük bakım maliyeti ve uzun malzeme ömrü anlamına gelir (Car, 2011; Davis, J.R., 1993).

Alüminyumun oksijene olan yüksek kimyasal afinitesi sonucunda oda sıcaklığında ve normal hava koşullarında, alüminyum hava ile temas eder etmez, havadaki oksijen çok kısa bir süre içerisinde katı alüminyum yüzeyinde çok ince bir oksit tabakası oluşturulur. Bu oksit tabası sadece birkaç atom kalınlığında olmasına karşın, dış kimyasal etkilere karşı iyi bir koruyucudur. Oda sıcaklığında oluşan oksit filmi amorf yapıdadır. Ancak sıcaklık yükseldikçe, 550 °C civarında, amorf film kristalleşmeye başlar (Car, 2011).

Alüminyumun bir diğer önemli özelliği de elektrik iletkenliğidir. Alüminyum iletkenliği bakırın iletkenliğinin yalnızca %60'ı kadar olmasına karşılık düşük yoğunluğundan dolayı birim kütleye düsen iletkenlik bakımından bakırdan daha yüksek iletkenliği vardır. Mesela 10 mm çapındaki bir alüminyum telin elektrik direnci, 6 mm çapında bir bakır telin elektrik direncine eşit olmasına rağmen, alüminyum tel daha hafiftir. Enerji iletim hatlarında kullanılan teller için düşünüldüğü zaman bu çok önemli bir özelliktir (Su, 1988). Yüksek iletim yeteneği nedeni ile elektrik mühendisliği uygulamalarında alüminyum malzemeler geniş yer tutar. Maliyet ve ağırlık değerleri ile birlikte ele alındığında alüminyum diğer metallerden daha yüksek ısıl iletkenlik değerine sahiptir. Sahip olduğu bu yüksek özelliklerle; yüksek torklu elektrik motorlarında, çelik çekirdekli alüminyum takviyeli iletim kabloları yüksek voltaj uygulamalarında, ısı değiştirici aygıtlarda, buharlaştırıcı aygıtlarda, elektrik ısıtıcı cihazlarında, otomobil silindir kafalarında ve radyatörlerinde alüminyum alaşımları kullanılmaktadır (Car, 2011; Davis, J.R., 1993).

Alüminyum ışık, radyo dalgaları ve kızılötesi ışınıma karşın koruyucu olarak kullanılabilir. Isı ve ışık dâhil olmak üzere elektro-manyetik ışınlara karşı yansıtıcılığı sayesinde bu ışınları düşük oranlarda absorbe eder. Alüminyumun sahip olduğu üstün yansıtma özelliği, birçok farklı alanda özellikle dekoratif uygulamalarda kullanımına olanak sağlamaktadır (Car, 2011; Davis, J.R., 1993).

Çeşitli döküm yöntemleri ile karmaşık parçalar bile kolaylıkla dökülebilir. Bununla beraber tüp, levha, folyo, profil ve karmaşık kesitli birçok malzeme alüminyumdan üretilebilir. En tipik örnek, çok ince alüminyum levhadan üretilebilen içecek kutularıdır (Car, 2011).

Bütün kaynak ve yapıştırma teknikleri, alüminyumdan üretilmiş ürünlere uygulanabilir. Alüminyumdan üretilmiş parçaların kesilmesi ve çok kısa süreli proseslerle işlenebilmesi olanaklıdır. Gıda sektöründen ilaç sektörüne kadar birçok sektörde ambalaj malzemesi olarak kullanılabilir. Gıda sektöründe yiyeceklerin ürettiği birçok sıvı ve gaza dayanaklı olması nedeni ile tercih edilir. Birincil üretimdeki yüksek enerji girdisinden ötürü pahalı bir metaldir. Fiyatı LME (Londra Metal Borsası) tarafından saptanır. Ekonomik ömrünü doldurmuş ve proses sürecinde hurdaya çıkmış malzemeler başlangıçtaki metalurjik özelliklerini büyük ölçüde yitirmeden, birincil üretimin % 5' i kadar bir enerji tüketimi ile yeniden kullanılabilir. Bu aynı zamanda birincil üretimdeki CO_2 salınımlarının da sadece % 5' inin ikincil üretimde salınacağı anlamına da gelir. Yeniden değerlendirilebilme özelliği sürekli tekrarlanabilir bir özelliktir (Car, 2011).

Alüminyum malzemesi sahip olduğu yüksek mukavemet, yüksek süneklik, yüksek korozyon ve aşınma direnci, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, kolay işlenebilme özelliklerinden dolayı birçok uygulamada tercih edilmektedir. Alüminyumun sahip olduğu bu üstün özelliklerin yanı sıra teknolojik gelişmeler ile beraber kullanımı her geçen gün artmaktadır (Davis, J.R., 1993).

Alüminyum malzemesi inşaat, ulaşım, ambalaj, elektrik-elektronik, genel mühendislik, mobilya-ofis eşyaları, demir-çelik metalurji, kimya ve tarım ürünleri sanayi gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe Avrupa' da 1.2 milyon ton/yıl, ABD' de 1.05 milyon ton/yıl, Japonya' da 915.000 ton/yıl alüminyum kullanılmaktadır. En yüksek kullanım oranları incelendiğinde birinci sırada % 25' lik oranla inşaat sektörü yer alırken, bunu % 24' lük oranla ulaşım sektörü izlemektedir (Kılıç, 2005).

1.3. Dövme Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları ürüne şekil verme yöntemine göre mekanik işlem (dövme) alaşımları ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılır (Erdoğan, 2001).

Alüminyum işlem alaşımları için dünyada en yaygın olarak kullanılan simgeleme dizisi, Amerikan Standartlar Birliği (ASA) tarafından belirlenen simgeleme dizisidir. Daha önceden Amerikan Alüminyum Birliği tarafından kullanılan bu simgeleme 1957 yılında standart haline getirilmiştir (William, 2001).

Dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi olan dövme alüminyum alaşımlarını belirlemek için kullanılır. Dört basamaklı sayısal simgenin ilk rakamı alaşımın hangi temel alaşım elementini içerdiğini gösterir. Çizelge 1.2' de gösterildiği gibi 1XXX serisi saf alüminyumu ifade eder. Son iki basamak alüminyumun saflığını gösterir. İkinci basamak orijinal alaşımın modifikasyonunu veya impurite sınırlarını gösterir (Erdoğan, 2001). Dövme (işlem) alüminyum alaşım grupları Çizelge 1.2' de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Dövme (işlem) alaşımlarının kodlama sistemi (Erdoğan, 2001)

Dövme Alüminyum Alaşım Grupları		**Yaşlandırılma Kabiliyeti**
1XXX	%99.0 veya daha fazla Al içerir	Yaşlandırılamaz
2XXX	Cu ana alaşım elementidir	Yaşlandırılabilir
3XXX	Mn ana alaşım elementidir	Yaşlandırılamaz
4XXX	Si ve Cu veya Mg ana alaşım elementidir	Eğer Mg varsa yaşlandırılabilir
5XXX	Mg ana alaşım elementidir	Yaşlandırılamaz
6XXX	Si ve Mg ana alaşım elementidir	Yaşlandırılabilir
7XXX	Zn ana alaşım elementidir	Yaşlandırılabilir
8XXX	Diğer elementler	----
9XXX	Yaygın olarak kullanılmayan seri	----

Alüminyum alaşım grupları ve kullanım alanları aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir (Altenpohl, 1998; Öz, 2007).

1.3.1. Alüminyum 1XXX serisi

1XXX serisi ticari olarak saf alüminyumu ifade eder ve en az % 99 alüminyum içerir. Bu malzemelerin şekillendirilmesi, elektrik iletkenlikleri ve korozyon dirençleri oldukça yüksektir. 1XXX serisinin son iki rakamı ise, % 99 değerinden sonraki kısmı belirlemede kullanılır. Örneğin 1100 malzemesinin % 99,0 oranında, 1050 malzemesinin % 99,50 oranında ve 1060 malzemesinin ise % 99,60 oranında saf alüminyum içerdiğini belirtir (Altenpohl, 1998; Öz, 2007).

1.3.2. Alüminyum 2XXX serisi

Alüminyum – bakır – magnezyum alaşımları, ilk olarak çökelme sertleştirilmesi yapılabilen alaşımlardır. Çökelme sertleştirilmesi yapılan ilk alaşım 2017 alaşımıdır. Bu alaşımlar yapı içerisinde özellikle % 4 Cu, % 0.6 Mg ve % 0.7 Mn bulunmaktadır. Yapı içerisinde ağırlıkça bulunan % 4.4 Cu, % 0.5 Mg, % 0.8 Mn ve % 0.8 Si içeren 2014 alaşımı yapay yaşlandırmaya 2017 alaşımından daha fazla tepki vermesi için daha sonra geliştirilmiştir. Bugün en çok kullanılan Al-Cu-Mg alaşımlarından biridir. Yüksek dayanım, Mg içeriğini % 0.5' den % 1.5' e çıkarmakla elde edilmiştir. Magnezyumun, alüminyum - bakır alaşımlarına ilavesi alüminyum bakır alaşımlarında çökelti sertleşmesini oldukça hızlandırır ve yoğunlaştırır (Altenpohl, 1998; Öz, 2007).

1.3.3. Alüminyum 3XXX serisi

Alüminyum 3XXX serisinin en önemli alaşım elementi manganezdir. Alaşımda, düşük oranlarda yani % 1.2 oranında manganez, dayanımı arttırmaktadır. Bu serideki 3003, 3004 ve 3015 alaşımlarının, korozyon direnci ve işlenebilirliği yüksektir. 3XXX serisi alaşımlar, yaygın olarak çeşitli konstrüksiyonlarda, çatı sistemleri ve çatı kaplamaları gibi mimari alanlarda kullanılır (Altenpohl, 1998; Öz, 2007).

1.3.4. Alüminyum 4XXX serisi

Alüminyum 4XXX serisindeki alaşımlara, silisyum ilave edilerek, kaynak ve lehimleme işlemlerinde ergime noktası düşürülmekte, böylece alaşımın kaynak ve lehimleme kabiliyetleri iyileştirilmektedir. Silisyumun alaşımın akıcılık özelliğini arttırması nedeni ile özellikle döküm teknolojisinde, geometrisi karmaşık şekillerin üretilmesine imkân vermektedir. Alüminyum 4043 alaşımı, yaygın olarak kaynak dolgu teli olarak kullanılmaktadır (Altenpohl, 1998; Öz, 2007).

1.3.5. Alüminyum 5XXX serisi

Alüminyum 5XXX serisi, yüksek dayanım ve korozyon direnci sağlayan magnezyum elementini içermektedir. Gemi iskeletleri ve diğer denizcilik

uygulamalarında, kaynak tellerinde kullanılır. Bu serideki alaşımların dayanımı, magnezyum miktarının oranına bağlı olarak değişir (Altenpohl, 1998; Öz, 2007).

1.3.6. Alüminyum 6XXX serisi

Alüminyum 6XXX alaşımlar, belirli oranlarda magnezyum ve silisyum içermesi nedeni ile Mg_2Si çökeltisi oluştururlar. 6XXX serisi alaşımlarından olan 6082, yakın zamanda hem ekstrüzyon ürünlerinin hem de otomotiv sektöründe dövülerek üretilen araç süspansiyon sistemi elemanlarının öncelikli alaşımı olmuştur. Bu grubun içerisinde dövmeye ve T6 ısıl işlemine en uygun alaşım EN AW 6082 (EN AW-XXXX EN = European Standard A = Aluminium W = Wrought) dir. 6XXX grubundaki en yüksek dayanıma ve mükemmel korozyon direncine sahip olan EN AW 6082 nin bunun yanında kaynak edilebilirliği, şekillendirilebilirliği ve işlenebilirliği de daha iyidir (Zvinys ve ark., 2012). Bu tez çalışmasında kullanılan alüminyum alaşımı EN AW 6082 nin kimyasal analiz aralığı Çizelge 1.3' de verilmiştir.

Çizelge 1.3. EN AW 6082 kimyasal kompozisyonunun ağırlıkça yüzdesi (Davis, J.R., 1993)

EN AW 6082	**Si**	**Fe**	**Cu**	**Mn**	**Mg**	**Cr**	**Zn**	**Ti**	**Al**
Kimyasal analiz aralığı	0.7-1.3	≤ 0.5	≤ 0.1	0.4-1.0	0.6-1.2	≤ 0.25	≤ 0.2	≤ 0.1	kalan

1.3.7. Alüminyum 7XXX serisi

Bu serinin en önemli alaşım elementi çinkodur. 7XXX serisi, alüminyum – çinko – magnezyum alaşımları (örneğin 7005) alüminyum – çinko – magnezyum – bakır alaşımları (örneğin 7075 ve 7178) olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Minimum çekme dayanımı 580 MPa olan 7178 alaşımı, uçak yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Altenpohl, 1998; Öz, 2007).

1.4. Al-Mg-Si Alaşımlarının (6XXX Serisi) Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

6XXX serisi alaşımlardaki alaşım elementlerinden silisyum oranı % 0.2-1.2 arasında, magnezyum oranı ise % 0,35-0,9 arasında değişmektedir. AA 6XXX serisi

alüminyum alaşımlarındaki en önemli empürite elementi olan demir için bazı standartlarda alt ve üst sınırlar belirlenmiş, diğerlerinde ise sadece üst sınır verilmiştir. Empürite elementlerinden titanyum ile çinkonun miktarının genelde % 0.1-0.2' nin altında olması istenilmekle beraber, bazı standartlarda toplamı % 0,15'in altında olması gereken "diğer empürite elementleri" grubuna dâhil edilmişlerdir. Empürite elementlerinde bakır ve kromun ağırlığının % 0.05-0.25' in altında olması istenirken alaşımdaki manganez miktarının alt ve üst sınırları arasındaki fark geniş olup, % 0.1-0.6 arasında değişmektedir (Turbalıoğlu, 2008).

6XXX serisi alasımlar, bilesim açısından kendi aralarında 3 alt gruba ayrılırlar. Bunlar;

- Mukavemetin önemli olduğu uygulamalarda konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılacak olanlar; Bu grubun magnezyum ve silisyum yüzdesi yüksektir.
- Ekstrüzyon kabiliyetinin yüksek olması istenen alasımlar; Bu gruba dengelenmiş veya bir miktar fazla silisyumlu alasımlar girer. Bu grubun magnezyum ve silisyum içeriği orta değerdedir.
- Anodizasyon kabiliyeti yüksek olan alasımlar; Magnezyum içerikleri yüksektir. Mg_2Si' de % Si orta seviyededir. Fe, Zn gibi empürite sayılabilecek elementlerin çok düşük olması istenir (Turbalıoğlu, 2008).

Al-Mg-Si alaşımlarının ana bileşenleri magnezyum ve silisyum olup, bu elementler yapıdaki Mg_2Si metaller arası bileşiğini oluşturur. Genellikle demir, manganez ve krom gibi elementler düzenleyici olarak bulunur. Bazen korozyon direncinden ödün vermeden az miktarda çinko veya bakır mukavemeti arttırır. İletkenlerde titanyum ve vanadyumu almak için boron, tane boyutunu kontrol etmek için de zirkonyum veya titanyum bulunur. Malzemenin talaşlı işlenebilirliğini arttırmak için kurşun veya bizmut ilave edilir (Mondolfo, 1976).

Mg_2Si metaller arası bileşiğinde sitokiyometrik Mg/Si oranı 1.73' dür. 6082 alaşımının Mg ve Si içerikleri Mg_2Si oluşturacak şekilde seçilirler ve dengelenmiş alaşım olarak nitelendirilirler. Yapı içerisinde çoğunlukla serbest Mg ve Si bulunmaktadır. Silisyumun bir kısmı Al-Fe-Si fazlarının oluşumunda yer almaktadır. Çok sınırlı olmakla beraber bazı hallerde dökülebilirliği iyileştirmek için serbest veya fazla silisyuma müsaade edilmektedir. Serbest veya fazla magnezyum ekstrüde edilebilirliği olumsuz etkilediğinden kesinlikle istenmez (Turbalıoğlu, 2008).

Mg_2Si bileşiği (%63,2 Mg, %36,8 Si) kübik yapıya sahiptir; birim hücresinde 12 atom vardır. Kafes parametresi $a=6.35\text{-}6.40x10^{-10}m$' dir. Yoğunluğu 2,70 gr/cm^3, elektriksel özellikleri ile bir yarı iletkendir. Isıl iletkenliği 234 W/m°C olup elastiklik modülü 69 GPa'dır (Turbalıoğlu, 2008).

Hızlı soğuma gibi denge dışı şartlarda bölgesel segregasyon eğilimi görülür. Bu durumlarda silisyumun tamamının Mg_2Si halinde olması gereken alaşım bileşimlerinde silisyum kristalleri görülebilir. Denge şartlarında tek fazlı olan alaşımlarda yığılma Mg_2Si veya Mg_2Al_8 mevcut olabilir, fakat tamamıyla dengesizlik şartları önemli farklılıklar oluşturmaz (Eraslan, 1999).

Aşırı magnezyum korozyon direncini arttırır, fakat mukavemet ve deformasyon kabiliyetini düşürür. Aşırı silisyum ise daha yüksek mukavemeti deformasyon kabiliyetinden ödün vermeden sağlar (Turbalıoğlu, 2008).

Ticari alaşımların kafes parametresi magnezyum ve silisyum ilavesi ile kontrol edilir. Alasımda bakır, manganez, çinko ve krom çoğunlukla çok düşük miktarlarda mevcut olduğundan ölçülebilir bir etkisi yoktur. Yine demir, titanyum, bor gibi elementlerinde kafes parametresi üzerine önemli bir etkisi olmamaktadır. Alaşımların çoğunda magnezyum ve silisyum dışındaki bileşenlerin toplamı %1'den oldukça düşük miktardadır. Bu sebepten birçok özellikler saf alüminyumunkinden farklı değildir. Yüzey gerilimi, yoğunluğu, ısıl genleşmesi, özgül ısısı, katılaşmada kendini çekme gibi fiziksel özellikleri saf alüminyum ile karşılaştırıldığında farklar hesaplama hatası aşamasındadır. Örneğin 0-100 °C arasında ısıl iletkenliği 200 W/m°C olup saf alüminyumunkinden %10-20 daha düşük değerdedir (Aluminum Federation, 1983).

Suni yaşlandırılmış düşük miktarda fazla silisyum içeren % 0.4-0.5 Mg' lu alaşımlarda elektrik direnci 3.0-3.5 μΩcm %50-55 IACS) mertebesindedir. Daha fazla magnezyum, manganez ve bakır bu iletkenliği düşürür. Bu iletkenlik doğal yaşlandırılmış alaşımlarda daha da düşüktür. Fakat tavlanmış durumda % 55-60 IACS (metal ve alaşımlar için kullanılan elektrik iletkenliği birimi) değerine erişebilir (Eraslan, 1999). Çizelge 1.4' de Al-Mg-Si alaşımlarının fiziksel özellikleri verilmiştir (Aluminum Federation, 1983).

Çizelge 1.4. Al-Mg-Si alaşımlarının fiziksel özellikleri (Aluminum Federation, 1983)

Alaşım tipi ve temperleri	Yoğunluk (g/cm^3)	Ergime aralığı (°C)	Lineer genleşme katsayısı (20-1000) (10-6/°C)	Isıl iletkenlik (0-100 °C) (W/m °C) (%IACS)	Elektriksel direnç iletkenlik (20 °C) (μΩcm) (%IACS)
6061-T4	2.70	570-660	24	156 39.6	4.3 40.1
-T6	2.70	570-600	24	156 39.6	4.0 43.1
6063-T4	2.70	580-660	24	197 50.0	3.5 49.3
-T6	2.70	580-660	23.5	201 51.1	3.3 52.2
6082-T4	2.70	570-660	23	172 43.7	4.1 42.1
-T6	2.70	570-660	23	184 43.7	3.7 46.6

Al-Mg-Si alaşımları kıvılcıma en dayanıklı alüminyum alaşımıdır, berilyum ilavesi bu dayanımı arttırır (Brenner, 1976). %99,99 alüminyumdan hazırlanmış alaşımlarda yapılan testlerde elektro parlatma ve anodizasyon (eloksal) sonrasında %85 oranında ışığı yansıtma özelliği görülmüştür. Endüstride en çok kullanılan Al-Mg-Si alaşımlarının mekanik özellikleri Çizelge 1.5' de verilmiştir.

Çizelge 1.5. Al-Mg-Si alaşımının mekanik özellikleri (Aluminum Federation, 1983)

Alasım Tipi ve Temperi	%0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Aşınma Dayanımı (MPa)	Yorulma Dayanımı $50x10^6$ çevrim (MPa)	Sertlik Brinell	Elastiklik Modülü (GPa)
6061-T4	125	215	18	165	95	60-70	69
-T6	265	305	11	205	95	90-100	69
6063-T4	90	155	47	131	79	48	69
-T6	180	210	8	155	85	75	69
6082-T4	130	225	16	178	106	60-70	69
-T6	270	310	9	218	124	90-100	69

Yukarıdaki çizelgede gösterilen temper sembollerinden T4 ve T6; T4: Solüsyona alma ısıl işlemi ve doğal yaslandırma ardından stabilizasyon.T6: Solüsyona alma ısıl işlemi ve daha sonra suni yaslandırmayı ifade etmektedir (Aluminum Federation 1983).

Ticari alasımlar özellikle manganez veya krom içerirlerse %10 oranında daha yüksek dayanım gösterebilirler. Tamamen sertleştirilmiş alaşımların çekme testinde, taneler arası kırılma eğilimi görülebilir. Fakat manganez ilavesi bu eğilimi azaltır. Bu kırılganlığa plaka şeklinde çökelen silisyumun neden olduğu düşünülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda bile basma dayanımı, çekme dayanımı ile aynıdır (Sellars, 1976).

1.5. Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Plastik Şekil Verme Yöntemleri

Plastik şekil verme yöntemleri, alüminyuma katı halde plastik şekil değiştirmek suretiyle gerçekleştirilen dövme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi işlemleri kapsar. Doğal olarak plastik şekil değişimi metallere akma dayanımlarının üzerinde olacak şekilde uygulanan dış gerilmeler veya kuvvetler vasıtasıyla gerçekleştirilir. Alüminyum alaşımlarının çoğu bu yöntemlerin uygulanmasına izin verecek kadar, yani şekillenme sırasında çatlayıp kırılmayacak derecede yeterince sünek davranış (şekillendirilebilirlik) gösterir (Çapan, 2010).

Şekil değişimi alüminyumun yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde gerçekleşmesi durumunda işlem sıcak şekillendirme olarak tanımlanmaktadır. Bunun dışında erime sıcaklığının yaklaşık % 30' unun altında gerçekleştirilen işlemler ise soğuk şekillendirme olarak nitelendirilir. Birçok şekillendirme işlemini hem sıcak hem de soğuk koşullarda gerçekleştirmek mümkündür. Sıcak şekillendirme de malzemenin daha yumuşak ve sünek olması nedeniyle, büyük şekil değişimleri verilebilir, hatta bazen bu işlemler defalarca tekrarlanabilir. Aynı zamanda sıcak koşullarda gereken şekil değişimi enerjisi, soğuk şekillendirmedekinden çok daha düşüktür. Ancak metallerin çoğu sıcak koşullarda yüzeylerinin çabuk ve fazla oksitlenmesi nedeniyle malzeme kaybına uğrar ve dolayısıyla kötü bir yüzey görünümü kazanır. Soğuk şekil verme işlemi sırasında meydana gelen pekleşme nedeniyle bu işlem, sıcak şekil vermeye göre malzemenin dayanımında artışa ve bunun sonucunda da süneklikte azalmaya neden olur. Ayrıca soğuk şekillendirme, imal edilmiş parçalarda daha iyi bir yüzey görünümü, daha iyi mekanik özellikler ile daha hassas boyut ve toleransların elde edilmesi açısından sıcak şekillendirmeye göre daha üstündür. Bazı durumlarda toplam şekil değişimi, birbirini birkaç defa tekrarlayan bir seri soğuk şekillendirme ve yeniden kristalleştirme tavı uygulamalarıyla sağlanabilir. Ancak bu tür uygulamalar, hem daha zahmetli hem de maliyetlidir (Çapan, 2010).

1.5.1. Dövme

Dövme, alüminyumu normal olarak sıcak koşullarda mekanik olarak işleyen veya şekillendirmeye yarayan imalat yöntemlerinden biridir. Mekanik şekillendirme işlemi, ardı ardına gerçekleştirilen vuruşlar ya da sürekli basınç uygulamak suretiyle sıkıştırılarak gerçekleştirilir. Dövme işlemi, açık veya kapalı kalıpta dövme olarak

sınıflandırılır. Kapalı kalıpta dövmede kuvvet, çoğunlukla iki veya bazı durumlarda daha fazla parçadan oluşan kalıplar vasıtasıyla uygulanır. İki kalıp arasında parça geometrisine sahip bir boşlukta ezilen alüminyum boşluğun şeklini alır. Açık kalıpla dövmede, basit şekilli veya düz kalıp çiftleri arasındaki alüminyum ezilerek şekillendirilir. Genellikle açık kalıpla dövme, büyük parçaların kademeli olarak dövülmesinde kullanılır. Dövülmüş parçalar, çok üstün tane yapısına ve mekanik özelliklerin en iyi kombinasyonuna sahip olur. Araçların jant, direksiyon ve süspansiyon sistemlerinde, fren kompresörlerinin biyel kollarında alüminyum dövme üretimi sıklıkla tercih edilmektedir (Çapan, 2010).

1.5.2. Haddeleme

Alüminyum iki merdane arasından geçirilmesi sırasında ezilir ve kalınlığı merdane arasındaki boşluk değerine düşürülür. Soğuk haddeleme daha çok sac, levha veya folyo gibi yassı ürünlerin elde edilmesinde kullanılırken diğer kesitlere sahip malzemeler, sıcak haddelemeyle elde edilir (Çapan, 2010). Özellikle dövme öncesi yarı mamule ön şekli verilirken gererek haddeleme (rekvals) operasyonun uygulanması, doldurma problemlerini aynı hacimle ortadan kaldırmak adına sıkça başvurulan bir yöntemdir.

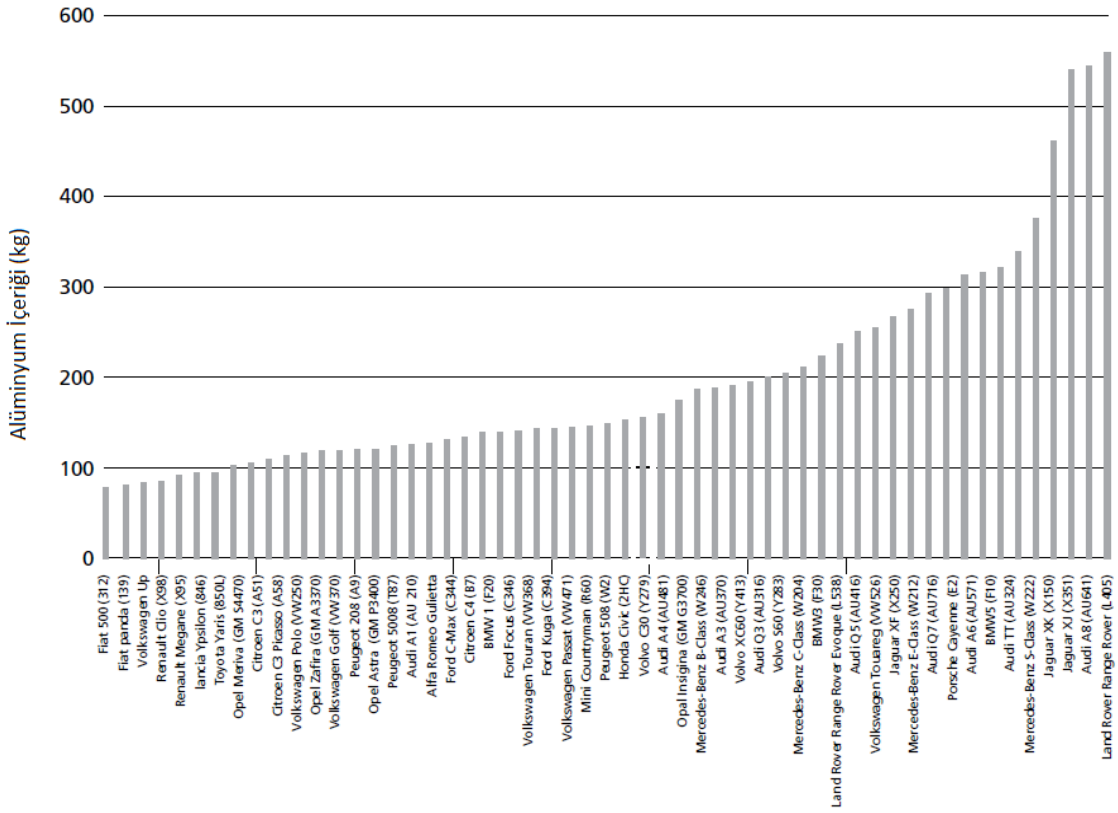
1.5.3. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon işleminde kovan içine yerleştirilmiş alüminyum biyetlere basma gerilmeleri uygulanır ve alüminyum bir kalıp deliğinden kesit alanı küçültülerek geçmeye zorlanır. Kalıp deliği imal edilmesi istenen ürünün kesitine sahip olup kuvvet bir piston yardımıyla biyetin kalıba doğru ittirilmesiyle uygulanır. Ekstrüzyon ürünlerine örnek olarak, muhtelif kesitlerdeki içi dolu çubuklar, dikişsiz borular, tüpler ve değişik kesit geometrisine sahip profiller sayılabilir (Çapan, 2010).

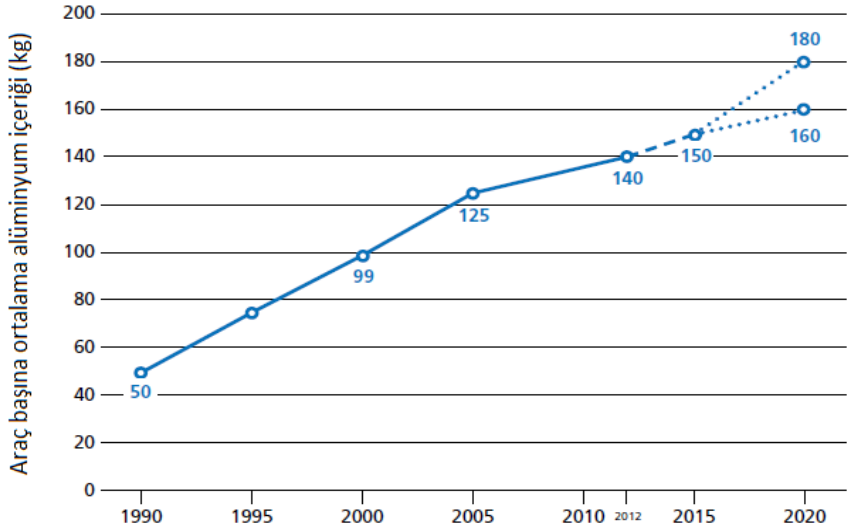
1.6. EN AW 6082 Dövme Süspansiyon Parçalarında Kullanılan Yarı Mamul Seçenekleri

EN AW 6082 alaşımı, otomotiv sanayisinde özellikle üst segmentlerdeki otomobillerde dövme şasi bağlantı parçalarında kullanılmaktadır. Gün geçtikçe de tüm

sınıflardaki otomobillerde kullanılan alüminyum miktarında artış gözlemlenmektedir. Avrupa' da üretilen bazı araçların içerdiği alüminyum miktarı Şekil 1.3' de, araç başına ortalama alüminyum içeriğinin gelişimi Şekil 1.4' de verilmiştir.



Şekil 1.3. Bazı Avrupa araçlarının içerdiği alüminyum miktarı (Anonymous, 2012)



Şekil 1.4. Avrupa' da üretilen araç başına ortalama alüminyum içeriğinin gelişiminin yıllara göre değişimi (Anonymous, 2012)

EN AW 6082; Reverber tipi fırınlarda alüminyum külçe ve hurdaların ergitilmesi daha sonra alaşım elementleri takviyesi ile döküm tesislerinde birbirinden farklı teknolojiler kullanılarak biyet olarak dökülüp ticari kullanıma hazır hale getirilmektedir.

Alüminyum ekstrüzyon üretimi yapan firmalarda, dökülmüş olan bu biyetlerin uygun boy ölçülerinde kesilip ön ısıtma fırınlarında pres öncesi ısıtma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Biyet uygun sıcaklığa ulaştıktan sonra ekstrüzyon preslerine alınır ve hizmet ettikleri sektörlere göre uygun kalıplarda baskı kuvveti uygulanarak şekillendirilmiş profiller üretilmektedir.

Alüminyum dövme üretiminde kullanılan yarı mamul çoğunlukla ekstrüde edilmiş içi dolu profillerdir. Dövülecek parçanın formuna göre ekstrüde edilmiş yarı mamulün çap ve boy ölçüleri belirlenmektedir. Çap ölçülerine göre ayrılan profiller parça geometrisine uyacak şekilde kesilerek ön ısıtma fırınlarında dövme sıcaklığına hazır hale getirilmektedir. Ön ısıtma fırını çıkışında dövme sıcaklığına erişen profiller, parça formuna göre eğer ihtiyaç görülürse rekvals (gererek haddeleme) işleminden geçirilmekte, parça kapasitesine göre belirlenen preslerde dövülmekte ve ısıl işlem sürecine hazır hale getirilmektedir. Sırasıyla önce çözeltiye alma fırınına yüklenen parçalar belirlenen sıcaklık ve süre parametrelerinde çözeltiye alınmakta, su verilmekte, devamında yine belirlenen süre ve sıcaklıkta yaşlandırma fırınında suni yaşlandırma işlemine tabi tutulmaktadır.

Alüminyum dövme işleminde süreç değerlendirilmesi yapılırken birbirini bağlayan birçok etken vardır. Biyet üretiminden başlayan ve ekstrüzyon, ön ısıtma, dövme, çözeltiye alma, su verme, yaşlandırma işlemleri gibi sırasıyla birçok aşamadan geçen alüminyum malzeme ister istemez sıcaklık ve deformasyon gibi etkili işlemlere devamlı maruz kalmaktadır. Parçaya yüklenen deformasyon ve sıcaklıklar 6082 alaşımının dinamik yeniden kristalleşme mekanizmasını tetiklemekte ve dövme öncesi çok küçük tanelere sahip olan yapı, çözeltiye alma sıcaklığını görünce aşırı büyük tanelere dönüşmektedir. Nihai üründe gerçekleşen bu olay ürün kalitesini kötü yönde etkilemektedir.

Süreç değerlendirilmesi yapıldığında ekstrüde olmuş profillerde yeniden kristalleşmiş bölgelerin oluştuğu ve bu bölgelerin dövme anında mekanik özellikleri kötü etkilediği bilinmektedir. Bunun yanında ekstrüzyondan gelen lifli yapının dövme akış çizgilerine ters düştüğü durumlarda da olumsuzluklar yaşanmaktadır.

Yaşanan bu olumsuzluklardan dolayı dövmeye alınan yarı mamul malzemesi olarak alüminyum sektörünün ileri gelen şirketleri alternatif bir seçenek bulmuşlardır. Yapılan literatür araştırmalarında dövme öncesi ön şeklin ekstrüzyon yerine dökümle de elde edildiği gözlemlenmiştir. Dünya alüminyum üretici liderlerinden Alcan firması geliştirdiği döküm teknikleri (NetCast, Isotropal) ile otomobil dövme parçalarının ön şeklini dökerek vermiştir. Biyet döküm sistemindeki Doğrudan Soğutmalı Döküm (Direct Chill Casting) prosesine çok yakın teknolojiler kullanılarak dövmeye alınan yarı mamul malzemesi ekstrüzyon yerine döküm metodu ile üretilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Gelişen ve sürekli değişen teknoloji, taşıtlarda minimum yakıt sarfiyatıyla maksimum verim elde etme çabalarının yanında konfor ve güvenlik sistemlerinin de geliştirilmesine yönelik çalışmaların önünü açmıştır. Taşıtın daha yüksek güvenlik ve konfora sahip olması, her türlü yük ve sürüş durumunda (frenleme, hızlanma, yüksek hız, viraj alma, çukur, kasis, iklim şartları) isteklere çok çabuk tepki vermesi, ayrıca lastiklerin yolu en iyi şekilde tutması; ancak gelişmiş bir süspansiyon sistemi sayesinde mümkündür. Bu nedenle otomotiv tasarım ve imalatçılarının süspansiyon sistemi üzerinde çok geniş araştırmaları vardır (Anonim, 2007).

Herhangi bir modern süspansiyon sisteminin tipik tasarım elemanları - McPherson süspansiyon kolu, arka aks taşıyıcı, çoklu bağlantı veya salıncak tipi - süspansiyon kontrol kollarıdır. Araçtaki kontrol kollarının âdeti süspansiyonun tipine bağlıdır (Anonymous, 2011).

Örneğin McPherson süspansiyon sistemi tekerlek poryası için bir alt yatak noktası oluşturan salıncaktan (veya ikinci bağlantı tarafından sabitlenmiş bir alt kontrol kolu) oluşur. Bu alt kontrol sistemi tekerleğin hem yanal hem boylamasına pozisyonunu sağlar. Taşıyıcının alt parçası kola rijit şekilde bağlanır. Bu kol süspansiyonu ayrıca dingili bağlayan bir direksiyon kolu içerir. Tüm montaj çok basit ve üst kontrol kolu olmadığından dolayı ayrıca motor bölgesinde geniş bir yere izin verir. Ön bağımsız süspansiyonun yaygın diğer tipide çift salıncak süspansiyonudur (double wishbone). Mümkün çeşitli yapılar varken bu tasarım tekerleği konumlandırmak için tipik olarak iki salıncak şekilli kolları kullanır. Şaside iki tane ve dingilde bir tane yataklama konumu olan her iki salıncak titreşimleri absorbe etmek için bir amortisör ve bir helezon yayını taşır. Çift salıncak süspansiyonları tekerleğin hareketi üzerinde kontrole izin verir. Bu özelliklerinden dolayı çift salıncak süspansiyonu geniş araçların ön tekerleklerinde yaygındır (Anonymous, 2011).

Süspansiyon kontrol kolları önemli kritik güvenlik parçalarıdır. Ticari olarak bu parçalar çelikten yapılır. Alüminyumun çelikle kıyasında kontrol kolunun ağırlığı % 50 ye kadar azalabilir ve/veya yapısal rijitliği ve mukavemeti çelik gibi geliştirilebilir. Ağırlık azaltma potansiyeli alüminyumun kullanılması için bir caziplik yaratmıştır. Yaysız ağırlığın azalması kayda değer ilave avantajlar sağlar. Bu yüzden süspansiyon parçaları alüminyum için güçlü bir şekilde büyüyen markettir (Anonymous, 2011).

Yük taşıyan kontrol kolları yönlendirilmiş fiberli mikro yapının yararlı olduğu alüminyumdan dövülmüş kontrol kollarının özel mekanik özellikleri ve yüksek kalite ihtiyaçları en iyi şekilde memnun edicidir. Ekstrüzyondan veya dökümden başlayan yüksek otomatik dövme prosesleri uygun maliyetli geniş seri üretime imkân sağlar. Sonuç olarak Şekil 2.1' de gösterilen yük taşıyan kontrol kolları otomobilde alüminyum dövmelerin en önemli uygulamasıdır (Anonymous, 2011).



Şekil 2.1. Dövülerek üretilmiş çeşitli şekillerdeki alüminyum kontrol kolları (Anonymous, 2011)

Taşıma endüstrisindeki hafiflik çözümlerinin büyük ihtiyacı yüksek performanslı alüminyum parçalarına avantajlar sağlamaktadır. Son yıllarda Norveç Alüminyum Komponent Endüstrisinde alüminyum alaşımları ve üretim teknolojileri konularındaki gelişmeler otomobiller için güvenlik parçalarının üretilmesine yol açmıştır (Jensrud ve ark., 2005; Jensrud ve ark., 2008).

Dövülerek üretilen güvenlik ve süspansiyon parçalarında istenen özel nitelikler (Anonymous, 2004);

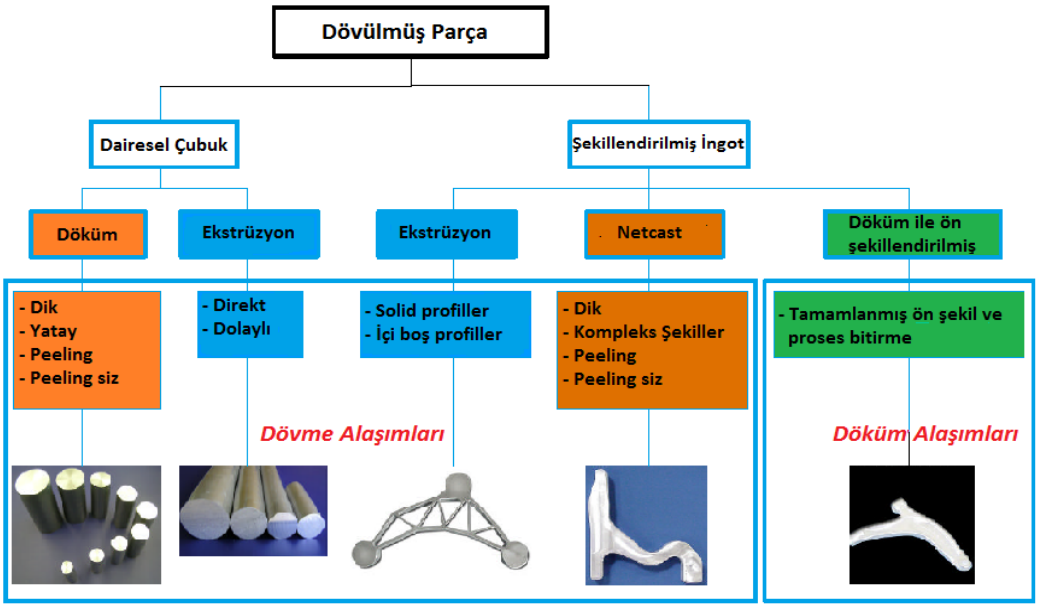
- Rekabetçi fiyatlar,
- Dar toleranslar,
- Araçların bağlantı konstrüksiyonlarında; güvenlik ve süspansiyon parçalarının tasarımının, sonradan boşluğa göre yapılmasından dolayı en sona bırakılması,
- Kontrol kollarında yüksek çekme mukavemeti,
- Elverişli süneklik ve çarpışma enerjisi sönümleme yeteneği,
- Korozyon ve korozyon yorulması direnci,

- Çatlak başlangıcına karşı dayanıklılık,
- İşlenebilirlik,
- Düzgün yüzey özellikleri,
- Homojen mikro yapı,
- Geri dönüştürülebilirliktir.

Bu taleplerin karşılanmasında ekonomik ve yeterli özelliklere sahip olan alaşım grubu ise 6XXX dir. Bu grubun içerisinde dövmeye ve T6 ısıl işlemine en uygun alaşım ise EN AW 6082 dir. 6XXX grubundaki en yüksek dayanıma ve mükemmel korozyon direncine sahip olan EN AW 6082 nin bunun yanında kaynak edilebilirliği, şekillendirilebilirliği ve işlenebilirliği de daha iyidir (Zvinys ve ark., 2012).

Karmaşık şekilli değişken karşıt bölümlerde kullanılan dövülmüş parçalarda baştanbaşa homojen malzeme özelliklerine ihtiyaç vardır (Płonka ve ark., 2008).

Dövmeye alınan malzeme üretiminde kullanılmakta olan teknolojiler, geleneksel ve Netshape üretim prosesi Şekil 2.2' de gösterilmektedir (Anonymous, 2004).



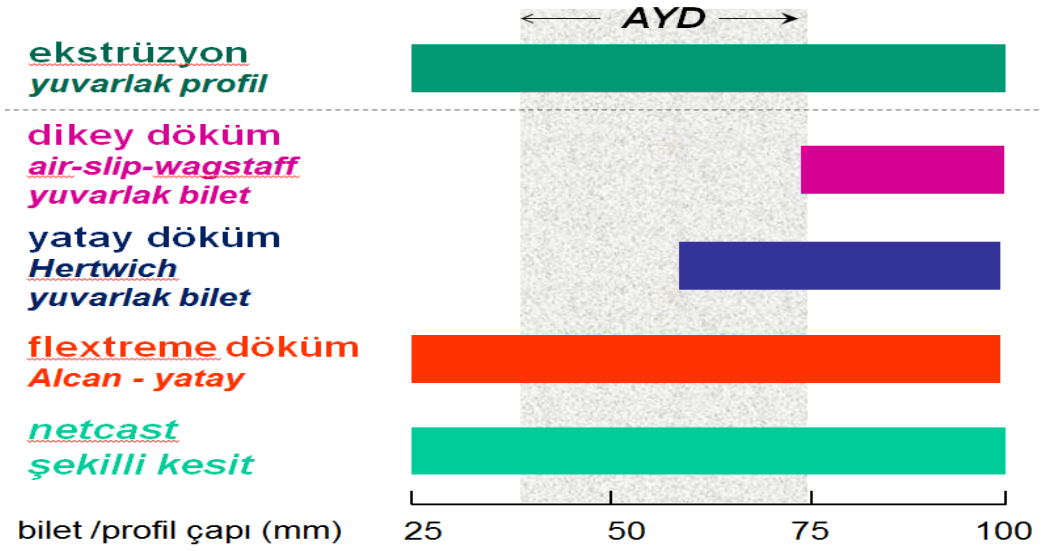
Şekil 2.2. Netshape üretim prosesi (Anonymous, 2004)

Alcan firmasının NetCast adını verdiği teknoloji ile ürettiği dövmeye alınan yarı mamullerin nihai ürüne kadar geçirdiği imalat süreci Şekil 2.3' de gösterilmektedir. Son şekle yakın yarı mamul dökümünü yaklaşık 5 metre uzunluğunda gerçekleştirerek piyasaya sunan Alcan bu alanda söz sahibi olmuş bir firmadır (Anonymous, 2004).



Şekil 2.3. NetCast üretim süreci (Anonymous, 2004)

Dünyada alanında tecrübe sahibi üreticiler kendi teknolojilerini oluşturarak dövmeye alınan yarı mamul üretiminde döküm işlemini farklı üretim metotlarıyla gerçekleştirmektedirler. Üretim yöntemlerinin biyet/profil çapına göre değişim grafiği, aynı zamanda yerli üretimi gerçekleştiren Aydınlar Yedek Parça San. ve Tic. A.Ş. firmasının da üretiminde kullanılan profillerin çap aralığını içerecek şekilde Şekil 2.4' de belirtilmiştir.

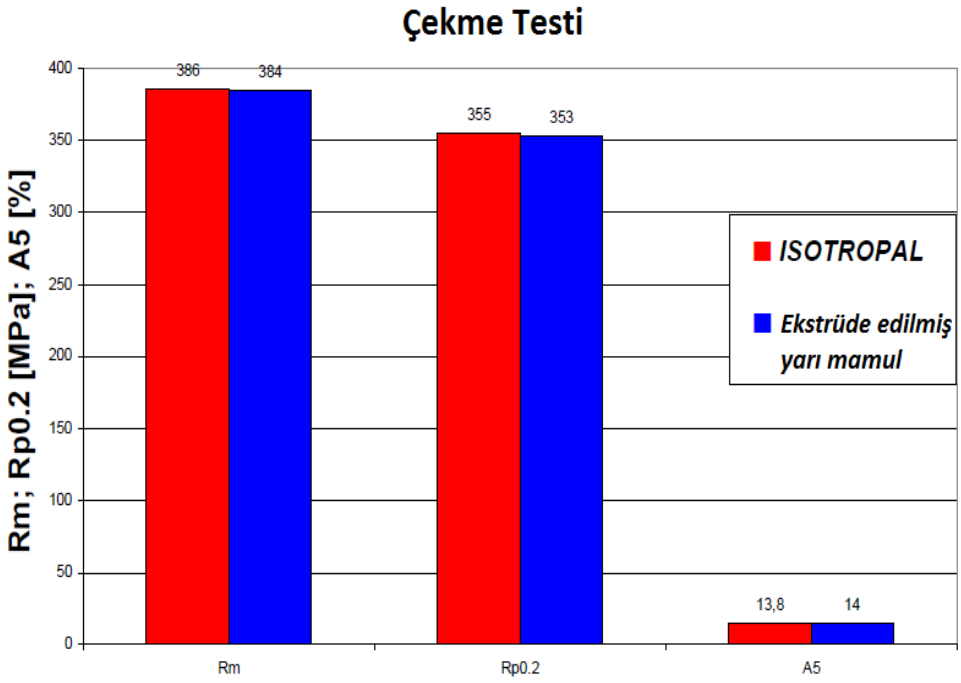


Şekil 2.4. Üretim yöntemlerinin biyet/profil çapına göre değişimi (Birol, 2013)

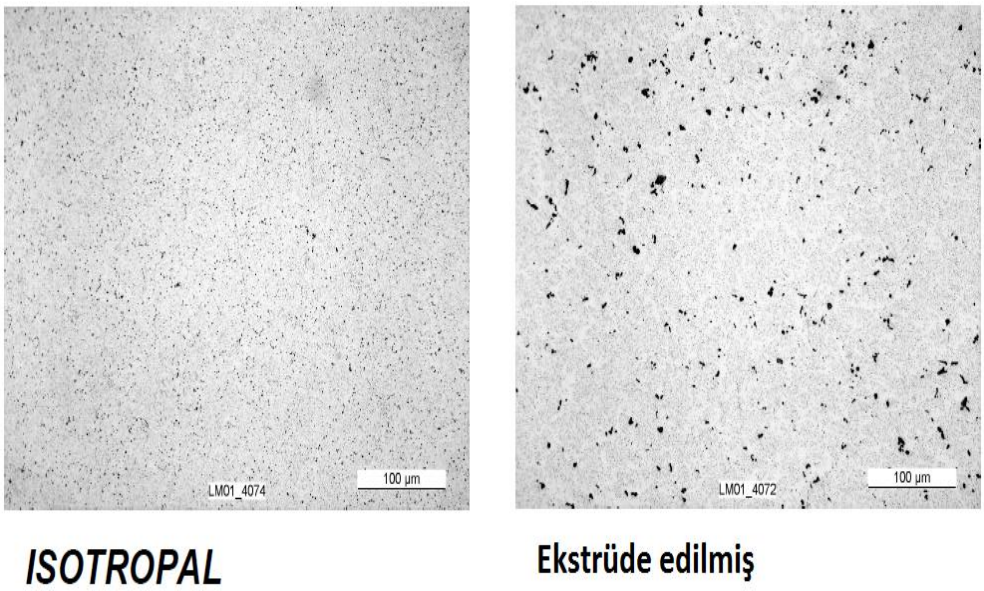
Alcan grubu, dövmeye alınan yarı mamul üretiminde döküm imalat yöntemini kullanarak araştırmalarını sürdürmüşler ve başarılı çalışmalarda bulunmuşlardır. Isotropal adını verdikleri dövmeye alınan yarı mamul üretimini döküm yoluyla yapmışlar ve ekstrüzyon profillere göre çok daha üstün özellikler elde etmişlerdir. Dövmeye alınan Isotropal malzemenin kendine özgü belli başlı özellikleri şunlardır (Anonymous, 2004):

- Homojen ve pürüzsüz yüzey yapısı,
- İnce kabuk bölgesi,
- Minumum ters yüzey segragasyonu,
- Homojen ince taneli yapı,
- Yönlenmesiz homojen deformasyon davranışı,
- Düşük toleranslar,
- Dövmeye alınan diğer mamul ürünlere göre düşük kırılganlık.

Isotropal ve ekstrüzyon ürünü olan yarı mamullerden dövülen 6082 alaşımı otomotiv parçalarının T6 ısıl işleminden sonra elde edilen; akma dayanımı ($R_{p0.2}$), çekme dayanımı (R_m), % uzama (A5) değerlerinin gösterimi ve mikro yapıları karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 2.5 ve 2.6' da verilmiştir (Anonymous, 2004).

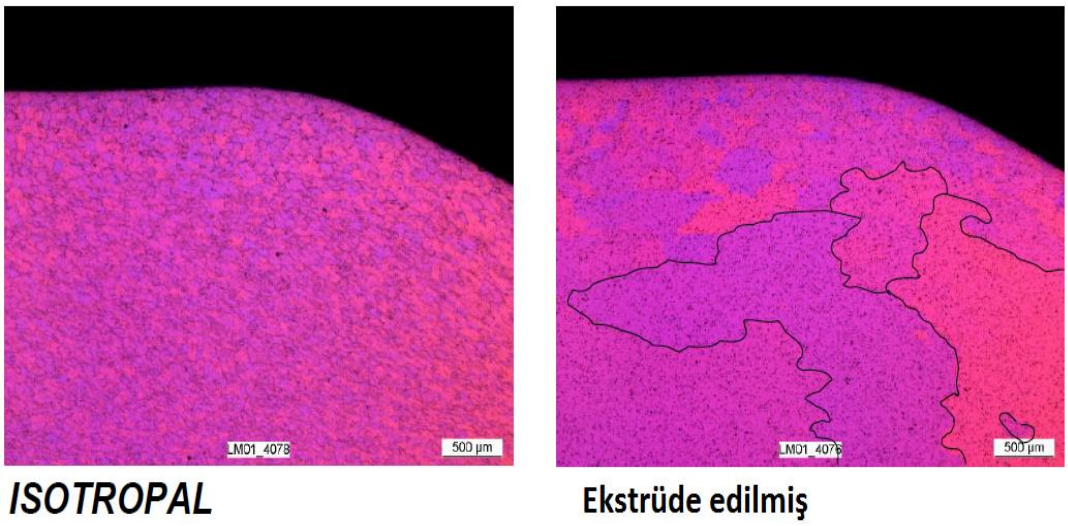


Şekil 2.5. Isotropal ve ekstrüzyon yarı mamullerinin mekanik özelliklere etkisinin karşılaştırılması (Anonymous, 2004)



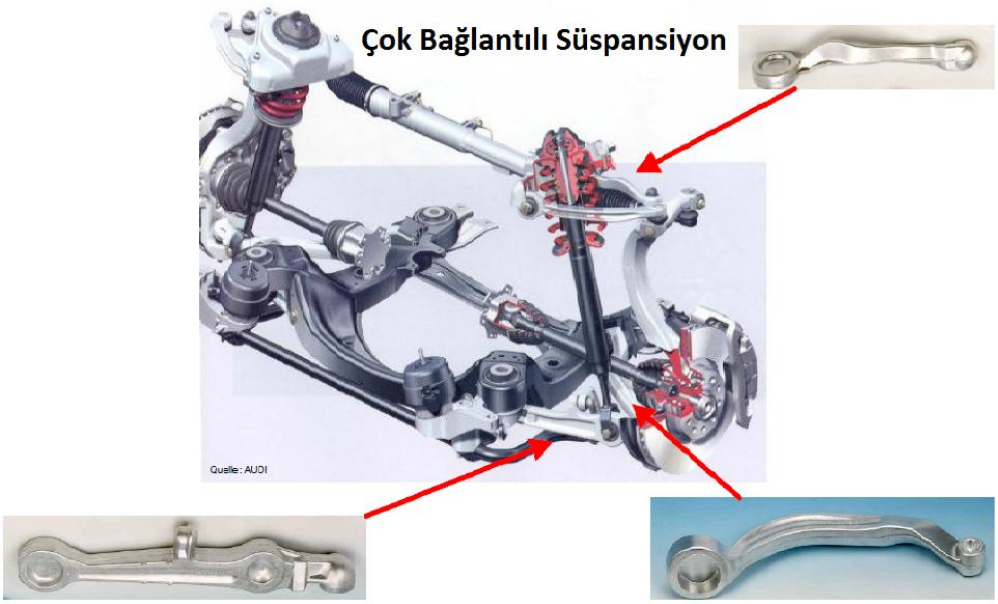
Şekil 2.6. Isotropal ve ekstrüzyon yarı mamullerden dövülen parçaların mikroyapıları (Anonymous, 2004)

Isotropal yarı mamul malzemeden dövülen parçada kalıntı gerilmeler mevcut değilken (toplam sıcak işlem sertleştirmelerinden daha az), ekstrüzyon yarı mamulden dövülen parçada kesme bölgesine yakın yüzeyde oluşan kaba taneler Şekil 2.7' de gösterilmektedir (Anonymous, 2004).



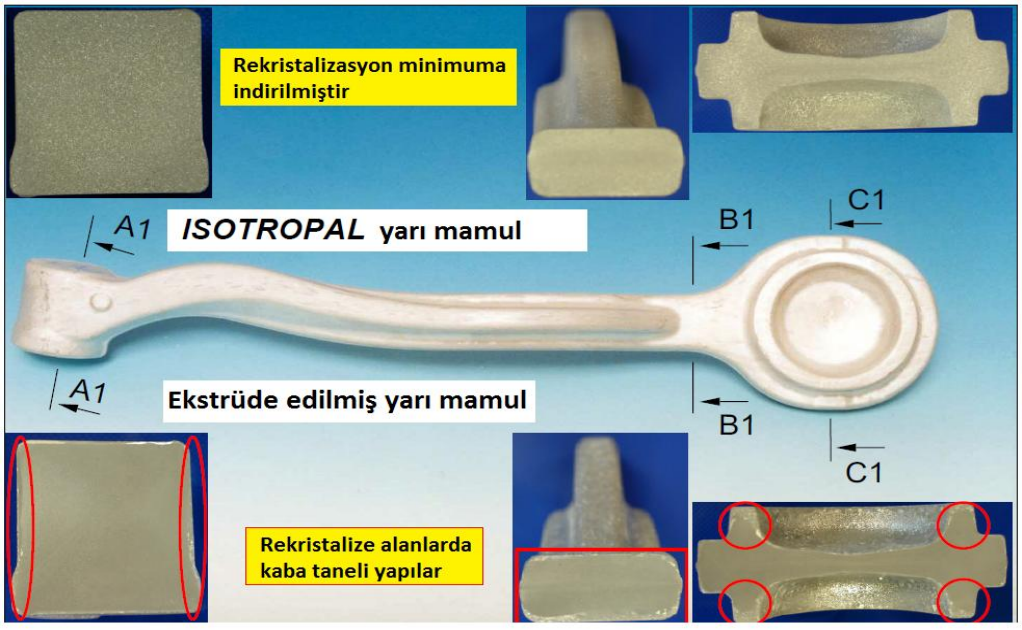
Şekil 2.7. Isotropal ve ekstrüzyon yarı mamullerden dövülen parçaların tane yapıları (Anonymous, 2004)

Şekil 2.8' de gösterilen otomotiv dövme parçalarında karmaşık şekilli ve değişken çarpraz aksamlarda baştan başa homojen malzeme özellikleri gerekliliği vardır (Anonymous, 2004).



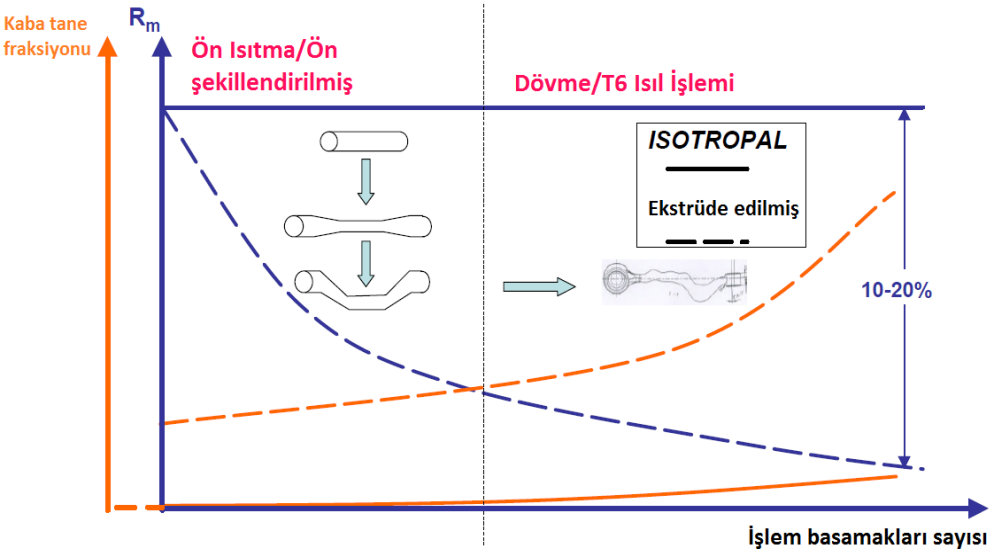
Şekil 2.8. Otomotiv dövme parçaları ve bağlandığı aksamların örnek bir görüntüsü (Anonymous, 2004)

Farklı üretim metotlarından imal edilen yarı mamuller kullanılarak, 6082 alaşımından dövülen T6 ısıl işlemi görmüş parçalarda tane yapılarının karşılaştırmalı olarak gösterimi Şekil 2.9' daki gibidir (Anonymous, 2004).



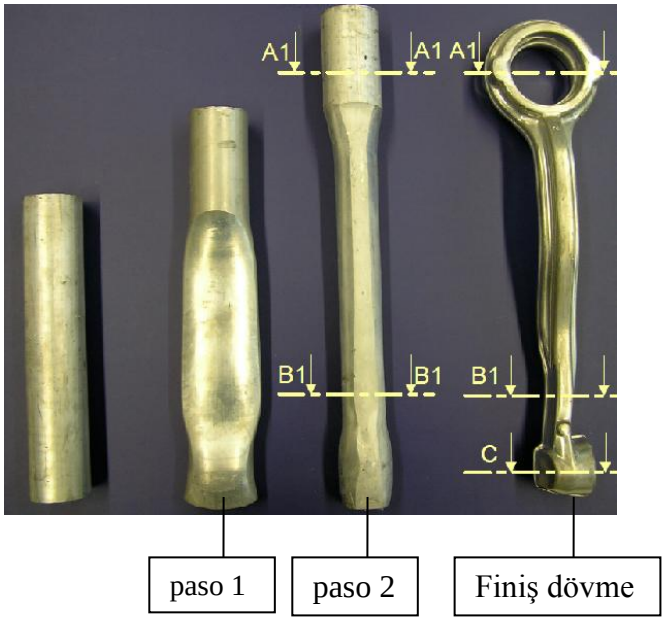
Şekil 2.9. Isotropal ve ekstrüzyon yarı mamullerden dövülen parçaların tane yapıları (Anonymous, 2004)

Çok aşamalı operasyonlar boyunca çevresel bölgede tane yapısı gelişiminin karşılıklı olarak gösterimi Şekil 2.10' daki gibidir (Anonymous, 2004).

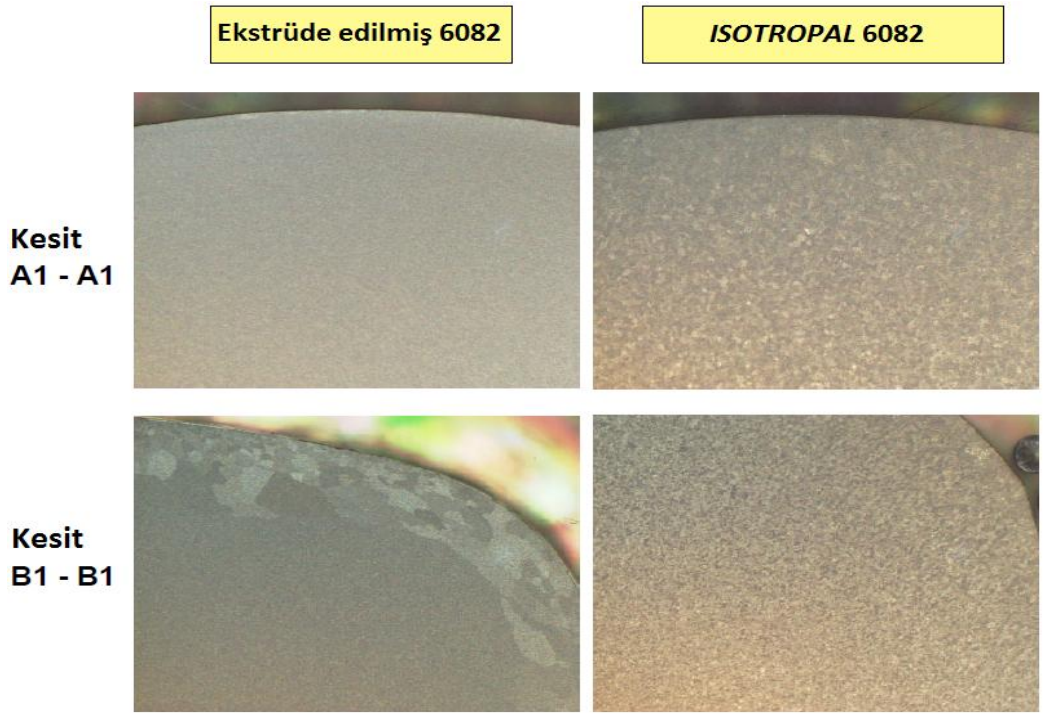


Şekil 2.10. Kaba tane fraksiyonunun ve çekme dayanımının işlem basamakları sayısı ile değişimi (Anonymous, 2004)

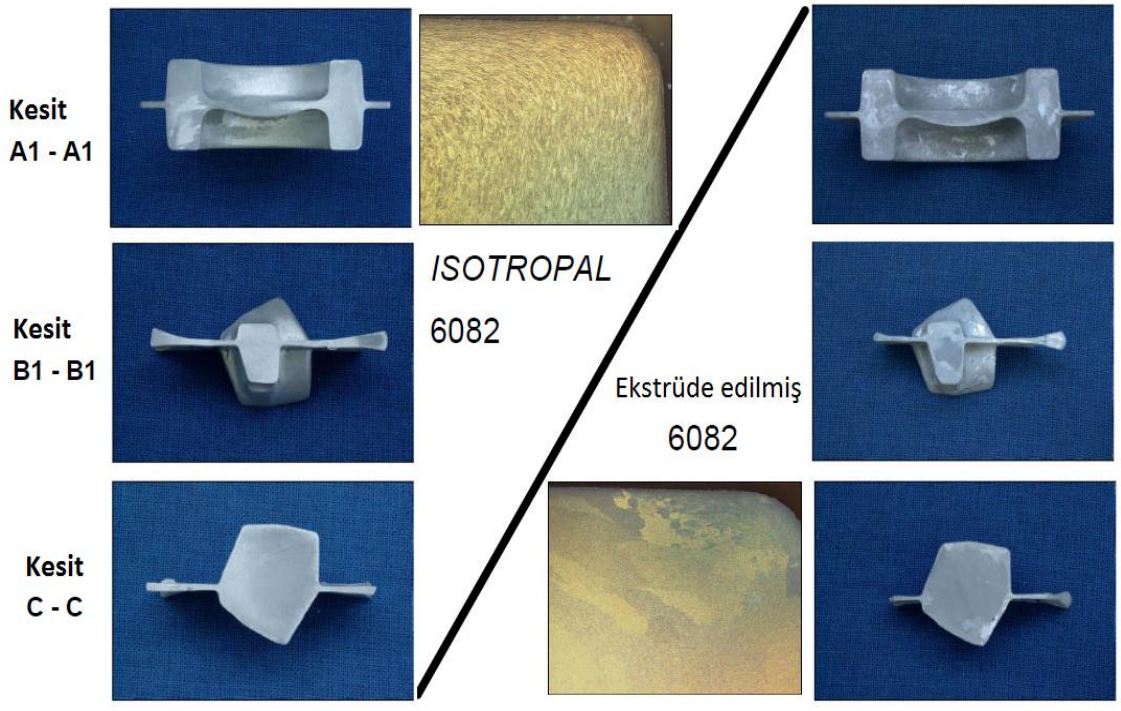
Çok aşamalı operasyonlar Şekil 2.11' de verilmiştir. Operasyonlar boyunca tane yapısı gelişimi, 2. paso sonrası tane yapısı artışı ve T6 ısıl işlemli dövülmüş parçalarda tane yapısı gelişimi sırasıyla Şekil 2.12 ve 2.13' de gösterilmiştir (Anonymous, 2004).



Şekil 2.11. İçi dolu profilin (yarı mamulün) nihai parçaya ulaşma yolunda almış olduğu şekillerin gösterimi (Anonymous, 2004)



Şekil 2.12. İkinci paso sonrası tane yapısı artışı (Anonymous, 2004)



Şekil 2.13. Dövme + T6 tane yapıları (Anonymous, 2004)

Isotropal yarı mamul malzeme için seçenekler şöyledir (Anonymous, 2004):

- İsteğe bağlı çarpraz aksamlar üretilebilir,
- Dekoratif dövmeler için uygulanabilir,

- Yeni pazar dilimleri için (örneğin: hava - uzay) yüksek dayanım, yüksek sıcaklık ve yüksek korozyon dirençli alaşımlar uygulanabilir,
- İleri düzey mekanik işleme yapılabilir.

Statik yeniden kristalleşme mekanizmasına karşı yüksek direnç; çok aşamalı şekillendirilen karmaşık geometriler ile tane sınırları kusurlarını ve T4 / T6 ısıl işlemi veya dövme sıcaklığına ısıtma sonrası oluşan kaba taneleri en aza indirmeye olanak sağlar (Anonymous, 2004).

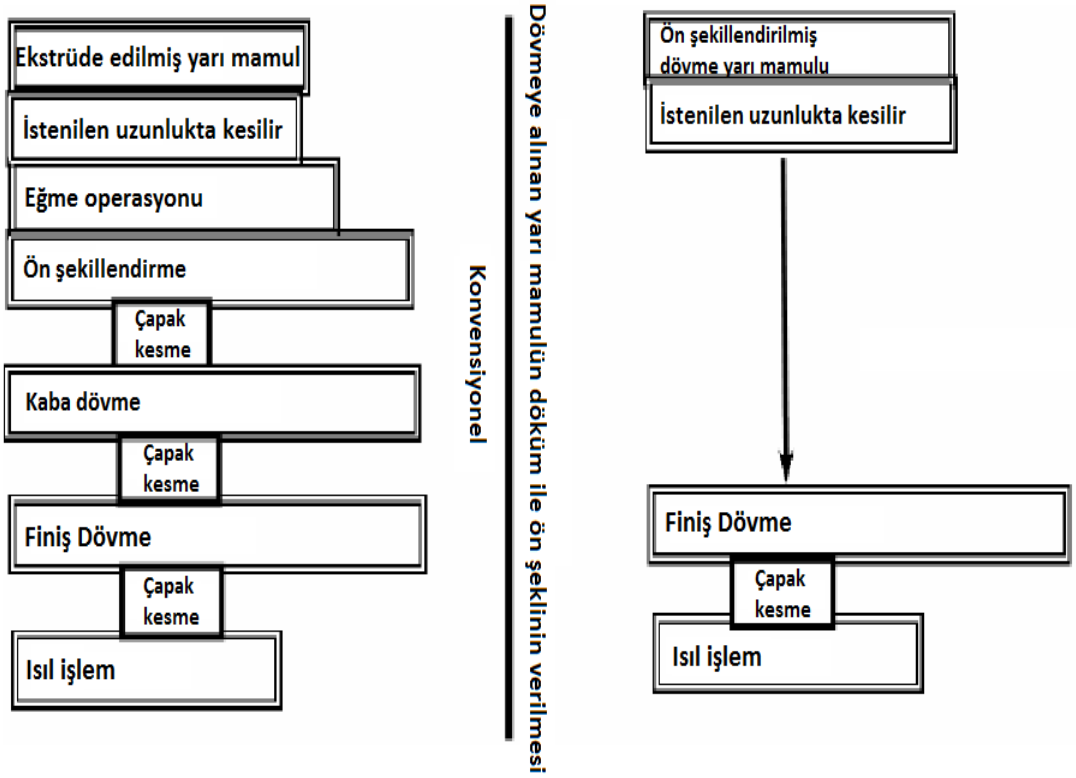
Isotropal malzeme ile dövülen ürünler mükemmel statik ve mekanik özellikler sağlar. Böylece güvenlik sistemleri ve otomotiv sektörü ile birlikte endüstriyel amaçlar için uygulanabilir (Anonymous, 2004).

Otomotiv komponentleri, ergiyikten nihai şekilli parçaya dönüşmesi süreç zincirinde yüksek masraflı prosesler ile konrol edilir. Temel metalden son geometriye olan süreç adımlarının adedini düşürmeye güçlü bir gereksinim vardır. Bunun için iki alternatif yöntem geliştirilmiştir. İlki, karmaşık önşeklin yerini almak adına dövme taslağı için önşekilli döküm kullanmaktır. Diğer yöntem ise dövme çubuğu için doğrudan sürekli döküm tercih edilmesidir (Kiuchi, 1999; Kim ve ark., 2002).

Yakın zamanda önerilen bir proses şekli de küçük çaplı ekstrüzyonsuz çubuklar elde etmek için yatay doğrudan soğutmalı döküm (HDC) tekniğiyle dövme taslaklarının dökümüdür. Döküm ve dövme teknolojisinin birleşimi harika bir potansiyele sahip görünmektedir. Sürekli dökümün özellikle mikroyapı homojenliği göz önünde bulundurulduğunda parça parça dökümle kıyaslandığında çok büyük avantajlara sahip olduğu görülmektedir. Yatay doğrudan soğutmalı döküm prosesi, dövme sırasında güzel şekillenebilirliğiyle kombinasyonunda parçanın iyileştirilmiş mekanik özellikleriyle umut verici bir teknolojidir (Jensrud ve Pedersen, 2001; Hertwich ve Niedermair, 1998).

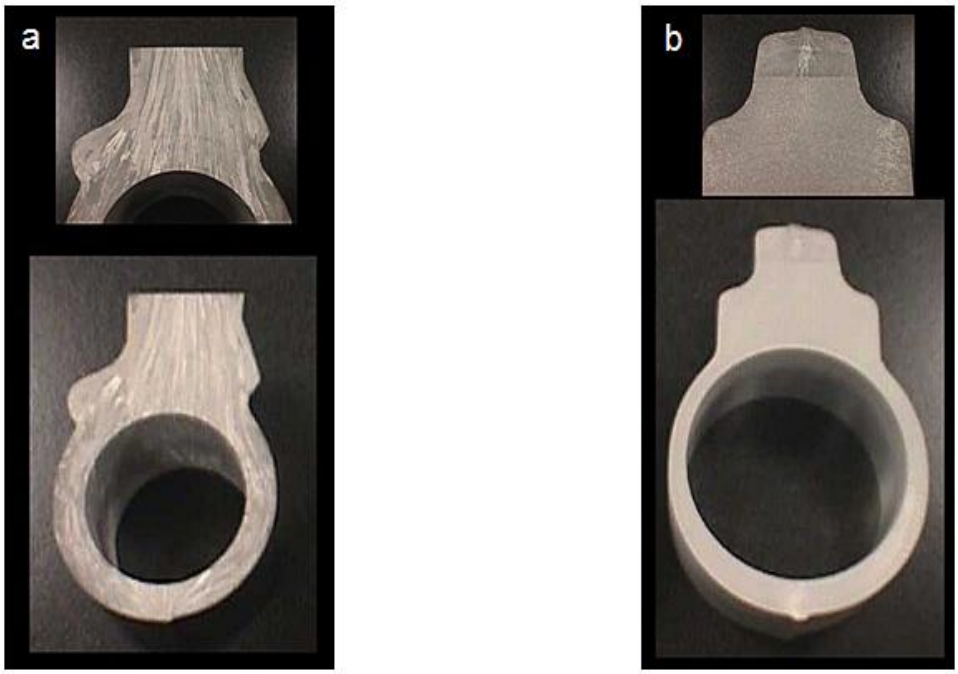
Alüminyum alaşımlarının şekillendirilmesinde yarı mamul olarak genellikle ekstrüde edilmiş profiller, levhalar ve saclar kullanılmaktadır. Fakat bir süreden beri Skawina Demir Dışı Metaller, Hafif Metaller Bölümünde dövmeye alınan yarı mamul malzemelerde bu ürünlerin yerine yarı sürekli dik döküm ile yatay sürekli döküm prosesleriyle yarı mamul üretimi üzerine yoğun bir şekilde araştırma geliştirme yapılmıştır. Alüminyum alaşımlarının dövmeye alınan yarı mamul malzeme uygulamalarında son yıllarda popüler olan değişik üretim metotları sunulmuştur. Ekstrüde edilmiş profillerin yerine, döküm ile üretilen yarı mamullerin kullanımı üretim maliyetini % 15-20 oranında azaltmaktadır (Płonka ve ark., 2008).

Dövmeye alınan yarı mamul malzeme kullanımında, döküm ve ekstrüzyon seçeneklerinin yarı mamulden ısıl işleme kadar uzanan üretim sürecindeki karşılaştırmalı aşamaları Şekil 2.14' de verilmiştir (Anderson ve ark., 2001).



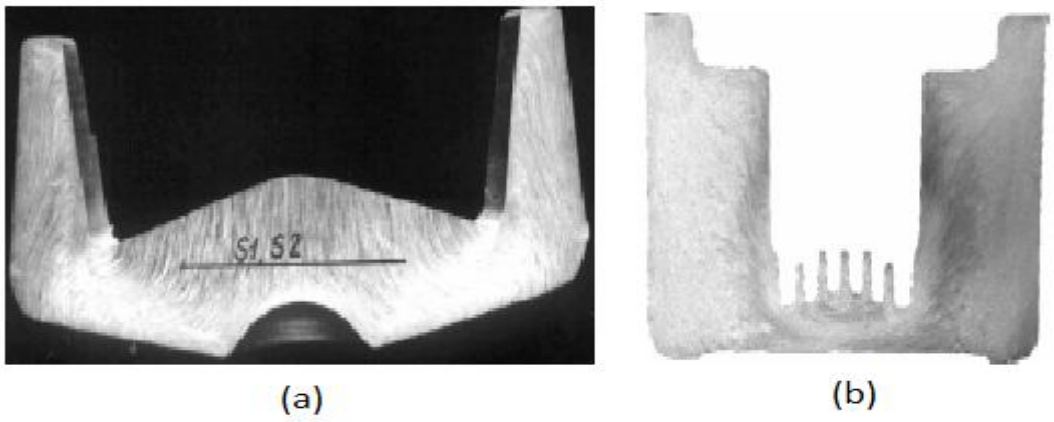
Şekil 2.14. Döküm ve ekstrüzyon seçeneklerinin üretim sürecindeki aşamaları (Anderson ve ark., 2001)

Ekstrüzyon ve dökümden kullanılan yarı mamullerden yapılan dövme işlemi sonrası elde edilen makro yapılar karşılaştırmalı olarak Şekil 2.15' de verilmiştir (Anderson ve ark., 2001).



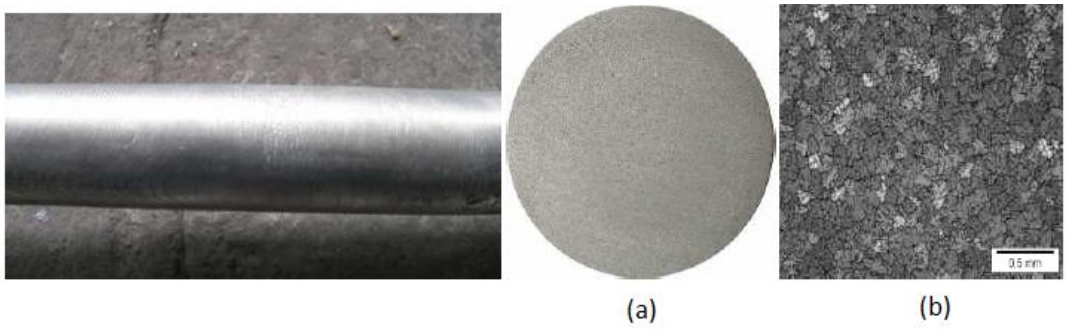
Şekil 2.15. Ekstrüzyon (a) ve döküm (b) yarı mamullerden dövülen parçaların makro yapıları (Anderson ve ark., 2001)

Döküm parça eş eksenli tane yapısı ile başlar ve dövme sırasında tane yapısı parça şekline göre gerçekleşir. Yani parçanın tane yapısı dövme sırasında parça geometrisine uyumlu olur. Oysa ekstrüde profilde tane yapısı baştan yönlenmiştir (profil ekseninde uzayan lifli taneler). Dolayısı ile bu yapıdaki profil dövüldüğünde lifli tanelerin bazen parça geometrisi ile uyumsuz kaldığı, lifli tanelerin parça konturuna uymadığı ve ona ters durduğu Şekil 2.16' da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir . Bu da mekanik özellikleri olumsuz etkiler (Płonka ve ark., 2008).



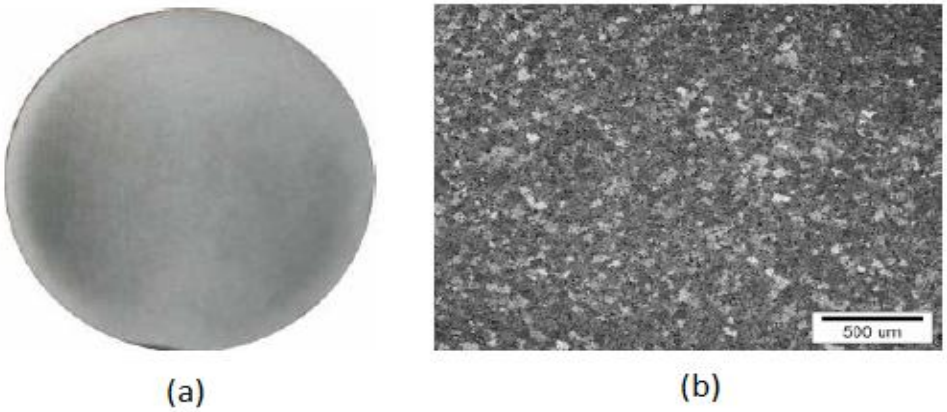
Şekil 2.16. Lifli yapıların dövme parça konturuna göre durumu; (a) ekstrüde profilden dövülmüş parçanın makroyapısı, (b) döküm yarı mamulden dövülmüş parçanın makro yapısı (Płonka ve ark., 2008)

IMN OML Skawina Enstitüsünde yakın zamanlarda pilot bir üretim standı kurularak otomotiv süspansiyon parçalarından rotilli kol, EN AW 6082 malzeme kullanılarak dövülmüştür. Dövmeye alınan yarı mamul malzeme olarak ekstrüzyon ve döküm üretimi karşılaştırılarak özellikleri belirlenmiştir. Döküm üretimi, bu enstitüde geliştirilen pilot stant ile yatay sürekli döküm prosesi ile gerçekleştirilmiştir. Yatay sürekli döküm üretimi kullanılarak imal edilen yarı mamulün makro ve mikro yapıları Şekil 2.17' de ayrı ayrı verilmiştir (Płonka ve ark., 2008).



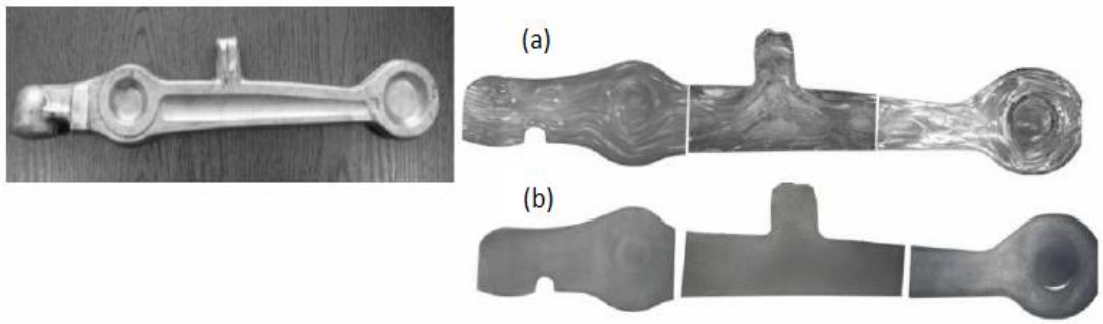
Şekil 2.17. Yatay sürekli döküm ürününün kesit makro (a) ve mikro (b) yapıları (Płonka ve ark., 2008)

Diğer yarı mamul malzemesi olarak dikey yarı sürekli döküm prosesiyle üretilen biyet den 50 mm lik çapa ekstrüde edilmiş profil kullanılmıştır. Şekil 2.18' de 50 mm çap ölçüsüne sahip ekstrüde edilmiş profilin makro ve mikro yapıları gösterilmiştir (Płonka ve ark., 2008).



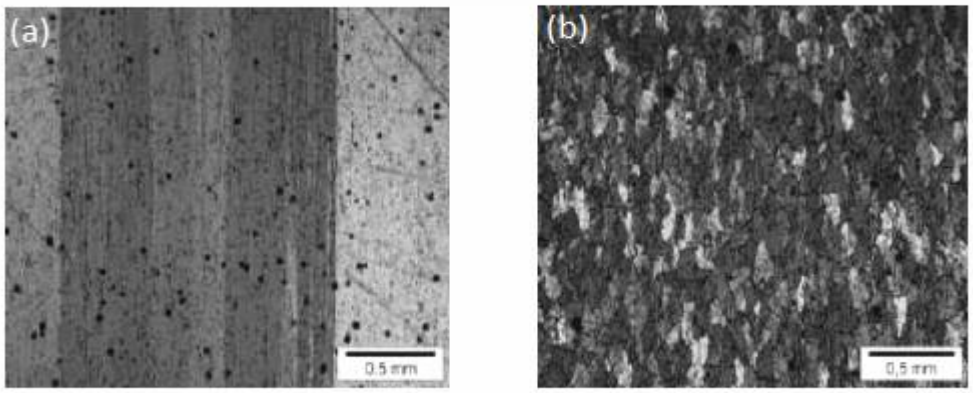
Şekil 2.18. EN AW 6082 alaşımından 50 mm lik çap ölçüsüne ekstrüde edilen profilin kesit makro (a) ve mikro (b) yapıları (Płonka ve ark., 2008)

Dövmeye alınan yarı mamul malzemelerden uzunlamasına dövülen rotilli kolların ısıl işlem sonrası elde edilen makro yapı görüntüleri Şekil 2.19' da karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Płonka ve ark., 2008).



Şekil 2.19. Ekstrüzyondan (a) ve dökümden (b) dövülen rotilli kolların makro yapı karşılaştırması (Płonka ve ark., 2008)

Döküm yolu ile üretilen yarı mamulden dövülen parçanın makro yapısında ince taneli ve homojen bir yapı gözlemlenirken, ekstrüzyon ile üretilen yarı mamul kullanılarak dövülen parçada büyük ve yeniden kristalleşmiş taneler (özellikle ısıl işlem sonrası) var olmaktadır. Bu olumsuzluk eşliğinde dövme akış çizgileri ile ekstrüzyon üretiminden gelen lifli yapı parça konturunda kesişir, bu da parçanın mekanik özellikleri gibi çeşitli özelliklerini ürün boyunca azaltır. Dökümden ve ekstrüzyondan dövülen rotilli kol parçasının karşılaştırmalı mikro yapısı Şekil 2.20' de gösterilmektedir (Płonka ve ark., 2008).



Şekil 2.20. Ekstrüzyondan (a) ve dökümden (b) dövülen rotilli kolların mikro yapı karşılaştırması (Płonka ve ark., 2008)

EN AW 6082 malzeme dövülürken yarı mamul kullanımında döküm seçeneği ile üretilen mamul tercih edildiğinde nihai dövme parçada iyi plastik özellikler elde edilmiştir. Yapısal özellikler incelendiğinde homojen ve ince taneli yapılar açıklığa kavuşmuştur. Ekstrüzyon ürünü olan yarı mamulden yapılan dövme işlemi sonucu ise ısıl işlem sonrası nihai parçanın birçok yerinde yüksek hızlı gerçekleşen yeniden kristalleşme mekanizması eşliğinde çarpıcı bir şekilde tane irileşmeleri meydana gelmektedir (Płonka ve ark., 2008).

Rotilli kol parçasına ısıl işlem sonrası yapılan testler sonucu elde edilen mekanik özellikler Çizelge 2.1' de, yarı mamul karşılaştırmasını da içerecek şekilde verilmiştir. Döküm üretimiyle elde edilen yarı mamulden dövülen parçada elde edilen mekanik özellikler, beklenen minumum değerleri bir hayli aşmıştır (Płonka ve ark., 2008).

Çizelge 2.1. Ekstrüzyondan ve dökümden dövülen rotilli kolların ısıl işlem sonrası elde edilen mekanik özellikleri (Płonka ve ark., 2008)

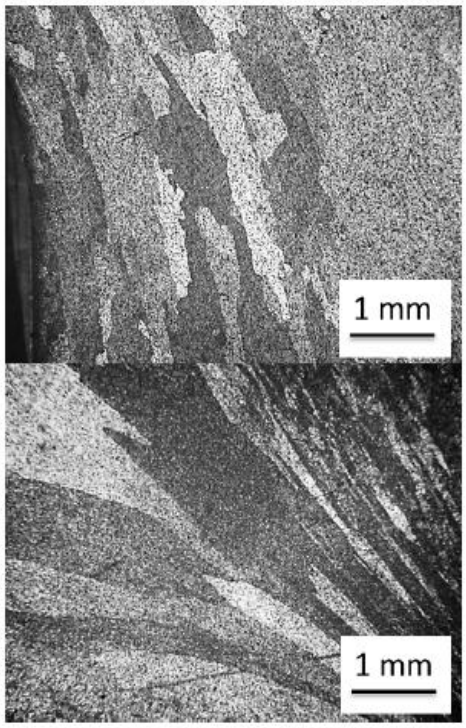
Alaşım	**Dövmeye alınan yarı mamul**	**Isıl işlem parametreleri**	**HB**	**Mekanik özellikler**		
				$R_{p0.2}$ **(MPa)**	R_m **(MPa)**	A_5 **(%)**
EN AW 6082	Ekstrüde profil	Çözeltiye alma 530 °C yaşlandırma 175 °C/8 sa	103	295	314	12.3
	Döküm		110	331	358	10

Termo mekanik işlemler boyunca alüminyum alaşımlarında bazı spesifik yapı kusurları (yeniden kristalleşme olan iri bölgeler) meydana gelmektedir. Yeniden kristalleşme bölgesi çoğunlukla kalıbın parçayla doğrudan temas ettiği yüzeysel tabakalarda ve/veya plastik deformasyonun meydana geldiği lokal değişim yerlerinde meydana gelmektedir. Yeniden kristalleşme tabakaları ve alanları iki farklı yapıya haiz bölgeler oluşturmakta ve dövme anında yorulma dayanımını, mekanik ve korozyon özelliklerini önemli derecede olumsuz etkilemektedir. Yeniden kristalleşme olmuş yapı, yeniden kristalleşme olmamış yapıyla karşılaştırıldığında kopma dayanımı değerleri yaklaşık 70-90 MPa daha düşük seviyelerdedir (Zvinys ve ark., 2012).

Tamamlanan termo mekanik işlem sonrası dövülen otomotiv parçalarında ana gereksinimler şöyledir: Yeniden kristalleşme olmamış ve ince taneli bir yapı istenmektedir. Sertlik değeri aralığı ise 90-120 HB dir, fakat en uygun değer 100-110

HB dir. Bunun yanında sertlik değerinin HB < 100 olduğu durumlarda işlenebilirlik çok kötü bir hal alır (Zvinys ve ark., 2012).

Zvinys ve ark. (2012) 6082 alaşımının optimum su verme sıcaklığı olarak 515-545 °C aralığını önermektedirler. 535 °C' de su verilip yapay olarak yaşlandırılan üründe gerekli olan 110-120 HB sertlik değerlerini elde etmişlerdir, ancak Şekil 2.21' deki gibi numuneyi enine kesip incelediklerinde, mikro yapı da yeni kristalleşmiş kaba taneleri gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.21. 6082 alaşımının 535 °C' de su verilip yapay yaşlandırılmış numunesinin enine kesitindeki ikincil yeniden kristalleşme sonucunda oluşan kaba kristaller (Zvinys ve ark., 2012)

Zvinys ve ark. (2012) oluşan bu yeniden kristalleşmiş yapının alaşımın sertlik değerlerine dikkate değer bir etki yapmadığını savunmaktadırlar. Buna rağmen, yeniden kristalleşme ile oluşan iri taneli yapıyı; darbe dayanımını ve özellikle çoklu çevrim yüklemelerinde ki yorulma ömrünü azaltan bir kusur olarak görmektedirler. Bu nedenle alaşımda ki mekanik ve yorulma özelliklerini arttırmak amacıyla pres etkilerini göz ardı ederek ince taneli bir yapının izlenmesi gerekliliğini düşünmektedirler.

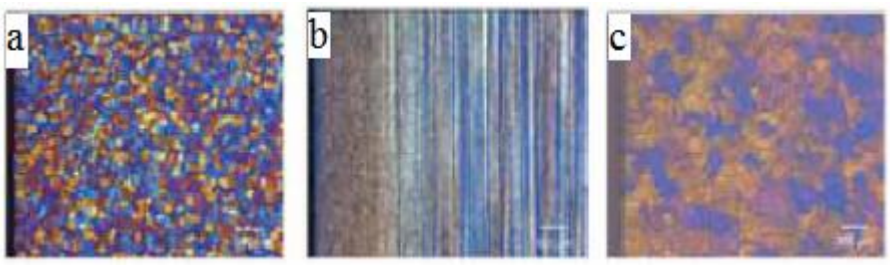
Jensrud ve ark. (2011) yapmış oldukları bir çalışmada ekstrüde edilmiş ve dökülmüş dövme taslağı ile döküm malzemenin kıyaslanmasını amaçlamışlardır. Bu çalışmada malzeme olarak dövme taslağı için AA6082 alaşımını, döküm için de A357

alaşımını seçmişlerdir. Kullanmış oldukları malzemelerin kimyasal analizi Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Dövme taslak malzemerinin ve döküm malzemenin kimyasal bileşimi (Jensrud ve ark., 2011)

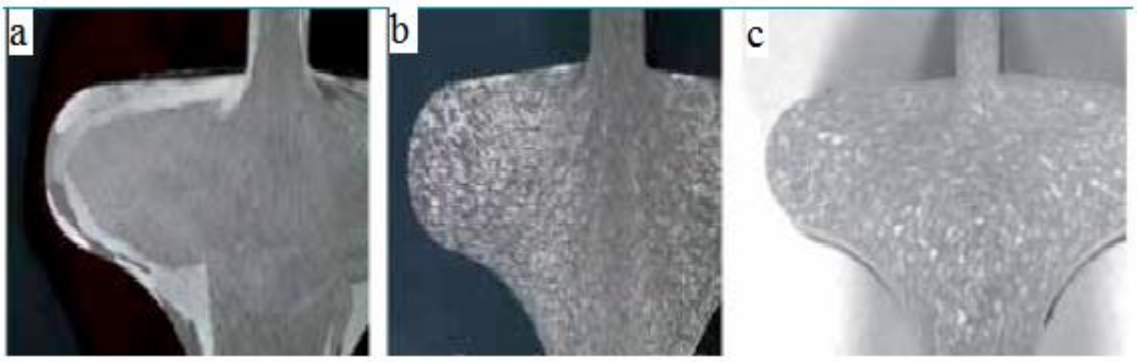
Malzeme	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Diğer
AA6082-döküm	0.99	0.20	0.54	0.91	0.13	≤ 0.1
AA6082-ekstrüzyon	0.99	0.20	0.54	0.93	0.13	≤ 0.1
A357-döküm	5.1	0.19	0.58	0.58	0.01	≤ 0.1

Jensrud ve ark. (2011) dövme taslağı olarak kullanacakları döküm çubuğu yatay doğrudan soğutmalı döküm makinesi içinde 50 mm çapda üretmişlerdir. Yine dövme taslağı olarak kullanacakları ekstrüde edilmiş çubuğu ise, endüstriyel ekstrüzyon pres hattında 205 mm çaptan 50 mm çapa döküm biletin direkt ekstrüzyon edilmesiyle üretmişlerdir. Yeniden kristalleşmeyi kontrol etmek için Mn ve Cr içeren dispersoidlerin düzgün dağılması adına ve katılaşma sırasında oluşan özellikle Mg_2Si ötektik partikülleri çözmek için her iki alaşımı da yüksek sıcaklıklarda homojenizasyon tavlamasına tabi tutmuşlardır. Şekil 2.22' de döküm çubuğun, ekstrüde edilmiş çubuğun ve döküm malzemenin kıyaslamalı mikro yapısı gösterilmektedir. Ekstrüde edilmiş malzeme, ekstrüzyon yönündeki tane yapısında tipik bir güçlü yönlülüğe ve kalınlığı 0.5 mm den 2.0 mm ye kadar değişen kaba yeniden kristalleşmiş yüzey tabakasına sahiptir. Bu tabaka, ekstrüzyon prosesinde homojen olmayan sıcaklık ve gerilme dağılımından dolayı oluşmaktadır. Döküm malzemeler ise tüm kesit boyunca homojen bir tane yapısına sahiptirler ve yatay doğrudan soğutmalı döküm AA6082 alaşımı A357 alaşımına kıyasla daha düzgün ve eş eksenli bir tane yapısına sahiptir (Jensrud ve ark., 2011).



Şekil 2.22. Farklı prosesler ile üretilmiş dövme taslaklarının mikro yapıları, (a) döküm AA6082, (b) ekstrüde edilmiş AA6082, (c) döküm A357 (Jensrud ve ark., 2011)

Jensrud ve ark. (2011), Şekil 2.22' de mikroyapıları verilen üretmiş oldukları dövme taslaklarını 500 °C' de dövme işlemine tabi tutmuşlardır. Dövme sonrası şekillenen süspansiyon kollarına T6 ısıl işlemi uygulamışlardır. T6 ısıl işlemi sonrası döküm taslaklardan dövülen parçalarda yeniden kristalleşme ve tane irileşmesi olayları gerçekleşmezken, ekstrüde edilmiş çubuktan dövülen parçanın kenar bölgelerinde yeniden kristalleşme ve tane irileşmesi gerçekleşmiştir. T6 sonrası parçalardan elde edilen kesit makro yapı görüntüleri Şekil 2.23' de verilmiştir.



Şekil 2.23. Dövme + T6 sonrası elde edilen karşılaştırmalı makro yapı görüntüleri, (a) ekstrüde çubuktan dövülen, (b) döküm AA6082 çubuktan dövülen, (c) ön şekilli döküm A357 alaşımından dövülen (Jensrud ve ark., 2011)

Jensrud ve ark. (2011), dövme taslakları farklı olan yarı mamullerden dövülmüş ve T6 ısıl işlemi görmüş parçaların yüzey ve merkez bölgelerinden çekme çubukları çıkartarak çekme testine tabi tutmuşlardır. Çizelge 2.3' de verilen sonuçlara göre döküm taslaklardan dövülen parçaların yüzey ve merkez bölgelerinin mekanik özelliklerinde belirgin bir fark oluşmazken, ekstrüde edilmiş çubuktan dövülen parçaların yüzey bölgesinin mekanik özellik değerleri merkez bölgesine kıyasla daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi olarak ise ekstrüde edilmiş çubuktan dövülen parçaların yüzey bölgelerinde oluşan iri taneleri göstermektedirler.

Çizelge 2.3. T6 ısıl işlemi görmüş dövülmüş parçaların çekme testi sonuçlarının karşılaştırmalı gösterimi (Jensrud ve ark., 2011)

Dövme taslağı alaşımı	Test pozisyonu	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	% uzama
AA6082 döküm	Yüzey	316	355	14
	Merkez	322	356	17
AA6082 ekstrüzyon	Yüzey	290	315	18
	Merkez	345	375	13
A357 döküm	Yüzey	328	364	6
	Merkez	340	367	9

Stabil mekanik özellikleri, su verme ve yapay yaşlandırma sonrasında elde edebilmek amacıyla, alüminyumdaki çözünmüş alaşım elementlerinin katı çözeltiden çökelememesi için matristeki intermetalik bileşiklerin yeterli çözünmesine erişmek ve hızlı soğutmak gereklidir (Altenpohl, 1982).

Tez yazarının çalışanı olduğu Aydınlar Yedek Parça San. ve Tic. A.Ş. (AYD) 01.08.2012 - 31.12.2013 tarihleri arasında TÜBİTAK TEYDEB 1501 programı kapsamında 3120679 numaralı, 'Mekanik Özelliklerini ve Özellikle Yorulma Dayanımını Artırmak Amacıyla Kimyasal Bileşimi Modifiye Edilmiş 6082 Alüminyum Alaşımının Dövme ve Isıl İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi' başlıklı projeyi gerçekleştirmiştir. Bu TEYDEB projesi kapsamında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü ile proje süresi boyunca sözleşmeli proje işbirliğinde bulunulmuştur. 6082 alaşımlı dövme parçaların üretim proseslerinin optimizasyonu konusunda Ar-Ge ve danışmanlık hizmetleri alınmıştır. 5135801 numaralı '6082 Alaşımlı Dövme Parçaların Üretim Prosesinin Optimizasyonu' başlıklı projede TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsünden Doç. Dr. Yücel BİROL ile Aydınlar Yedek Parça San. ve Tic. A.Ş.' den tez yazarı ve Seracettin AKDI proje personeli olarak her iki kurum da ortak çalışmalar yürütmüşlerdir. Proje çalışmaları sonucunda Aydınlar Yedek Parça A.Ş.' nin 6082 alaşımlı dövme parçalar için ana sanayi statüsü kazanabilmesi adına dövme parçaların yapısal özelliklerinden kaynaklanan sorunların üretim sürecine karşılık gelen nedenlerinin teşhis edilmesi ve giderilmesi için kapsamlı Ar-Ge çalışmaları yapılmıştır. Alüminyum dövmede kullanılacak 6082 alaşımı revize edilmiş, dövme ve ısıl işlem parametreleri iyileştirilmiştir.

Bu tez kapsamında, yapılmış proje çalışmalarından faydalanılmış, bu projeden ayrı olarak alüminyum dövme üretiminde kullanılan yarı mamul üretimleri incelenmiş ve bu yarı mamullerden dövülen parçaların T6 ısıl işlemi sonucunda elde edilen tane yapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Böylece ülkemizin sayılı araştırma merkezlerinden olan TÜBİTAK MAM ile sanayi işbirliği gerçekleştirilerek ülkemiz sanayisine büyük katkısı olacak çalışmalar ortaya konmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması süresince gerçekleştirilen faaliyetler, incelenen parametreler, bu parametrelerin incelenmesi için kullanılan yöntemler aşağıda verilmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen faaliyetler:

- Ana sanayi parçalarının temin edilerek incelenmesi
- Dövme öncesi yarı mamul için alüminyum ekstrüzyon ve döküm parametrelerinin araştırılması, uygulamadaki durumun değerlendirilmesi
- Alüminyum dövme işleminde belirleyici olan parametrelerin araştırılarak optimum değerlerin bulunması
- Birbirinden farklı teknolojilere sahip yöntemlerle döküm yarı mamullerin imal edilmesi
- Yurt dışından tedarik edilen döküm yarı mamullerin metalografik özelliklerinin incelenmesi ve uygulanabilirliğinin araştırılması
- Ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı birbirinden farklı olan içi dolu profillerin üretilmesi
- Cr elementi ilaveli biyetden basılan profillerin incelenmesi
- Düşük ekstrüzyon oranına sahip yarı mamullerin üretilmesi
- Döküm ve ekstrüzyon seçenekleriyle üretilmiş içi dolu profillerin (yarı mamullerin) dövülmesi ile alüminyum rotilli kol parçalarının üretilmesi
- Dövülerek üretilen parçaların T6 ısıl işlemine tabi tutularak nihai haline getirilmesi

Döküm ve ekstrüzyon yöntemleriyle üretilmiş yarı mamuller ve bu yarı mamullerden dövülmüş, T6 ısıl işlemi görmüş parçalar aşağıdaki yöntemlere göre incelenip değerlendirilmiştir:

- Kimyasal içerik
- Makro yapı
- Tane yapısı
- Mikro yapı
- Sertlik ölçümü
- Akma ve çekme dayanımı,
- % Kopma uzaması

Tez çalışması sürecinde uyulmuş ve tez çıktılarının uyduğu uluslararası standartlar şunlardır:

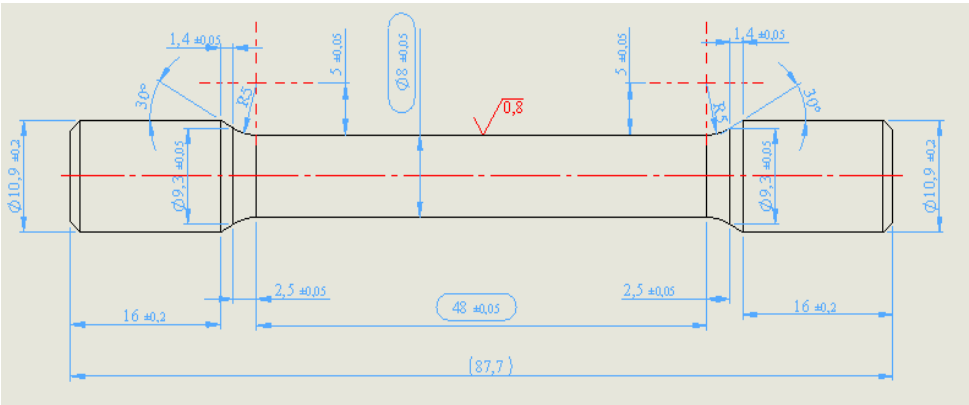
- Kimyasal içerik (EN 573-3, EN 573-4)
- Makro yapı (ASTM E112-10)
- Tane yapısı (Barker yöntemi) (ASTM E112-10, EN 603-3)
- Mikro yapı (ASTM E112-10)
- Sertlik ölçümü (ASTM E10)
- Çekme testi (ASTM E8M)

Tez çalışması boyunca uygulanan tüm metalografi çalışmalarında SiC zımparalar ve aşağıdaki reaktifler kullanılmıştır:

- Makro yapı uygulamalarında; % 32 HCl, % 32 HNO_3, % 32 saf su ve % 4 HF içeren reaktif hazırlanmıştır.
- Tane yapısı uygulamalarında; Barker reaktifi kullanılarak elektrolitik dağlama yöntemi uygulanmıştır. Barker reaktifi 200 ml saf suyun içerisine 5 ml lik HBF_4 (% 48) asidi karıştırılarak hazırlanmıştır. Tane yapıları görüntüleri polarize ışık altında kaydedilmiştir.
- Mikro yapı uygulamalarında; % 0.5 HF ve % 99.5 saf su içeren reaktif hazırlanmıştır. Mikro yapı görüntüleri Olympus BX51M model cihazda elde edilmiştir.

Tez çalışması boyunca uygulanan tüm sertlik ölçümleri mikro Vickers sertlik ölçüm cihazında 300 gf yük altında 20 s durma süresi uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Çekme testleri İTÜ mekanik metalurji laboratuvarında Instron 8801 model 100 kN kapasiteli dinamik üniversal çekme-basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1' de çekme çubuğunun teknik resmi yer almaktadır.



Şekil 3.1. Çekme çubuğu

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasının bu bölümünde ana sanayi ve yerli üretim parçaları karşılaştırılmış ve yerli üretim parçalarının kalitesinin arttırılması için dövme öncesi yarı mamul üretim seçenekleri ele alınmış, döküm ve ekstrüzyon üretim yöntemleri ile optimum yarı mamul elde edilmesi için deneysel çalışmalarda bulunulmuştur.

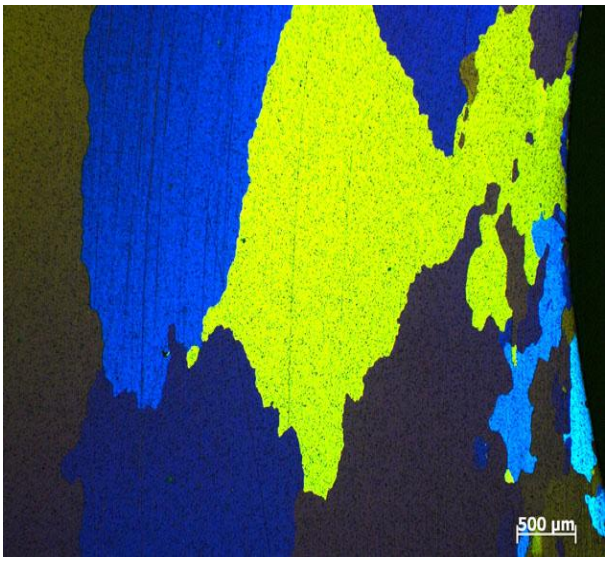
4.1. Alüminyum Dövme Rotilli Kol Parçasının Ana Sanayi ve Yerli Üretiminin Karşılaştırılması

Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak ana sanayi M* ve A* parçaları ile yerli üretim Aydınlar Yedek Parça San. ve Tic. A.Ş. (AYD) ürününün malzeme özellikleri karşılaştırılmıştır. Böylece ülkemizde ilk defa devreye alınan alüminyum dövme süspansiyon parçalarının kalitesinin ana sanayi parçalarının kalitesine ulaşabilmesi için nelerin yapılabileceği ortaya konulmuştur.

Yapılan deneysel araştırmalar sonucunda EN AW 6082 alaşımından dövülen ve devamında T6 ısıl işlemine tabi tutulan yerli üretim rotilli kol parçalarında aşırı büyük tanelere sahip yapılara rastlanmıştır. Rotilli kol parçasının Şekil 4.1' de makro ve Şekil 4.2' de tane yapılarının kesit görüntüleri yer almaktadır. Kabul edilemeyecek kadar kaba olan tanelerin büyüklüğü ne yazık ki cm boyutlarındadır. Başta yorulma ve tokluk gibi önemli mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyecek bu tane büyüklükleri süspansiyon parçaları gibi % 100 güvenlik parçalarında büyük risk teşkil etmektedir.

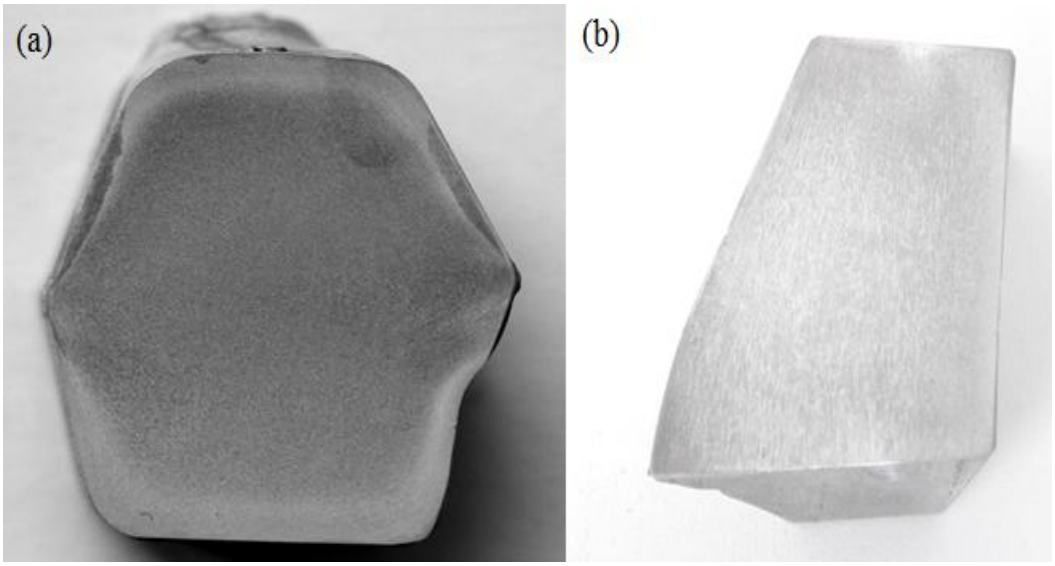


Şekil 4.1. AYD rotilli kol parçasının makro yapı görüntüsü

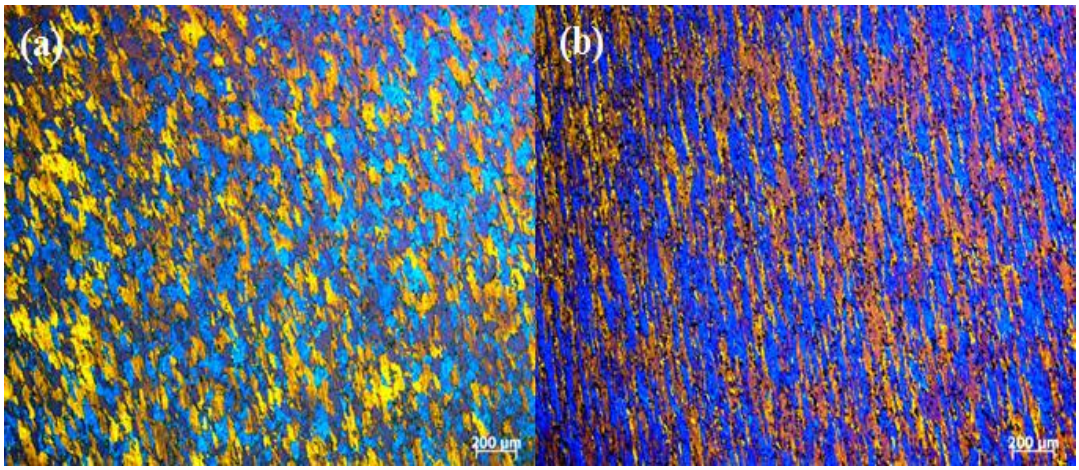


Şekil 4.2. AYD rotilli kol parçasının polarize mikroskoptan elde edilen tane yapısı görüntüleri

AYD üretiminin bu risk teşkil eden yapılarına karşın, ana sanayi üreticilerinin tane yapılarının olması gereken dağılım ve boyutlarda olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.3' de M* ve A* parçalarının makro, Şekil 4.4' de ise tane yapıları gösterilmiştir.



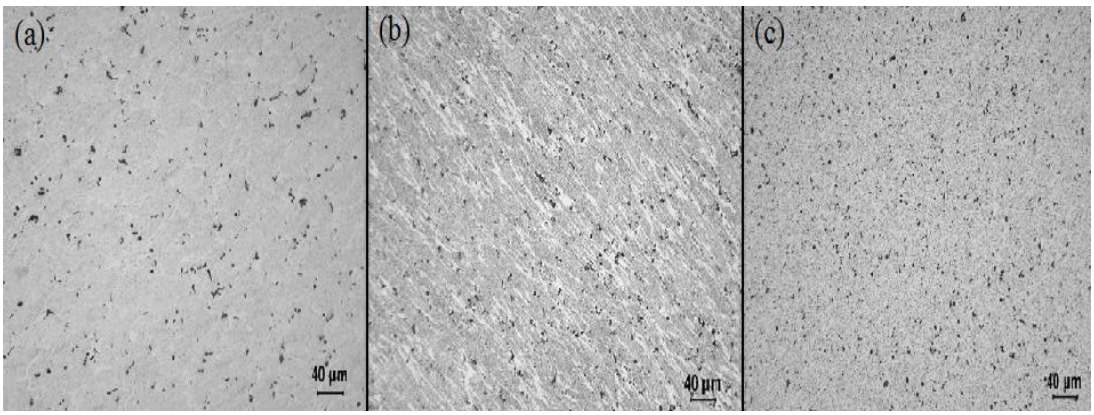
Şekil 4.3. Ana sanayi parçaların (a) M*, (b) A* makro yapıları



Şekil 4.4. Ana sanayi parçaların (a) M*, (b) A* polarize ışık altında elde edilen tane yapılarının görüntüleri

Dövülmüş ve T6 ısıl işlemi görmüş 6082 alaşımının tane yapıları yerli üretim parçalarında (AYD) oldukça büyük taneler ve tam çözeltiye alınamamış fazlar içermekteyken, ana sanayi parçalarında oldukça ince taneler ve çok daha ince çökeltilerin homojen olarak dağıldığı görülmüştür.

EN AW 6082 alaşımında sertlik özelliğini kazandıran durumun yapıda bulunan Mg_2Si çökeltilerinin boyutları ve dağılımı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle AYD ve ana sanayi ürünlerinin mikro yapıları hazırlanmış ve Mg_2Si çökeltilerinin durumu incelenmiştir. Şekil 4.5' de AYD ve ana sanayi ürünlerinin karşılaştırmalı mikro yapı görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4.5. (a) M*, (b) A*, (c) Yerli üretim parçalarının mikro yapıları

M* yapısında arka planda dikkati çeken açık gri bulutumsu bir yapıda bulunan Mg_2Si çökeltileri görülmektedir. Çözeltiye alındıktan sonra yapılan su verme işlemi ve devamında yaşlandırma işlemi ile oluşturulan Mg_2Si fazlarının olması gereken bir

şekilde homojen dağılım gösterdiği açıkça görülmektedir. A* mikro yapısında ise dövme deformasyonunun etkisiyle oluşan akış yönlenmeleri gözükmektedir. M* yapısına göre biraz daha kaba olan Mg_2Si fazları fulü bir görüntü yerine daha dikkat çekici koyu bir görüntü sergilemiş fakat ideale yakın bir mikro yapıya hâkim olduğu söylenebilmektedir. Yerli üretim (AYD) parçasında ise Mg_2Si fazları oldukça kaba bir şekilde oluşmuştur. Arka planda yer alan Mg_2Si fazları büyük oluştuğu için açık gri yerine koyu gri olarak görülmektedir ve bu durum parçanın sertlik değerlerini düşürmektedir.

EN AW 6082 alaşımlarındaki sertlik özelliği, oluşturulan Mg_2Si fazları ile doğrudan ilişkilidir. Mg_2Si fazlarının dağılımı ve boyutları parçaların sertlik değerlerini değiştirebilmektedir. Çizelge 4.1' de M*, A* ve AYD parçalarının sertlik değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi verilmiştir.

Çizelge 4.1. M*, A* ve AYD ürünlerinin sertlik değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi

NUMUNE	HV
M*	130 ± 3
A*	117 ±4
AYD	110 ± 10

Homojen bir faz dağılımı göstermeyen yerli üretim parçasının sertlik değerlerinin Ana sanayi üretim parçalarına göre düşük olduğu ve değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Ana sanayi ve yerli üretim parçalarından alınan numunelerden malzeme bileşim ve özelliklerinin belirlenebilmesi için kimyasal analiz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen çıktılar Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.2. M*, A* ve AYD ürünlerinin spektral analiz gösterimi ağ. %

Malzeme	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr	V	Zr
Standart	0.7-1.3	≤ 0.5	≤ 0.1	0.4-1.0	0.6-1.2	≤ 0.1	≤ 0.25	-	-
M*	0.926	0.0913	0.550	0.435	0.714	0.0505	0.120	0.0096	0.1056
A*	0.937	0.2181	0.0457	0.663	0.746	0.0361	0.169	0.0095	0.0028
AYD	1.022	0.1186	0.0168	0.597	0.842	0.0233	0.007	0.0124	0.0012

Ölçülen Ana sanayi M* parçasında Cu, Zr ve Cr elementlerinde farklılıklar görülmüştür. Bu farklılıkların, standart EN AW 6082 ile tam olarak uyuşmadığı saptanmıştır. Kimyasal içerik 6XXX serisinin standart alaşımlarıyla karşılaştırılmış

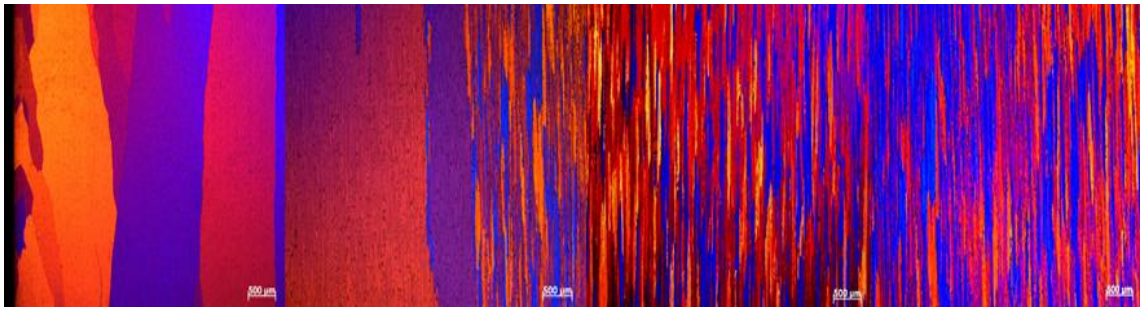
ancak hiçbiri ile örtüşmemiştir. En yakın uyuşma 6082 alaşımı ile olduğu için ana sanayi M* parçasının alaşımı Cu ilavesinden dolayı modifiye edilmiş 6082 alaşımı olarak adlandırılabilir. Ana sanayi A* parçasında ise standart 6082 alaşımının spektleri dışında olan kimyasal içerik farklılıkları görülmemiştir.

Ana sanayi parçaların aksine yerli üretim parçalarında meydana gelen aşırı tane büyümesi mekanizmasının alüminyum dövme üretiminin hangi safhasında meydana geldiğini bulabilmek için dövmede kullanılan ekstrüde edilmiş yarı mamul profillerin ön ısıtma öncesi, dövme sonrası ve T6 ısıl işlemi sonrası tane yapıları incelenmiştir. Bu çalışma için üst segment grubu araçlarda kullanılan amortisörlerin bağlandığı en kritik süspansiyon parçası olan alüminyum dövme rotilli kol parçasının incelenmesi uygun bulunmuştur. Tez çalışması devamında da tüm incelemeler bu parça üzerinden yürütülmüştür. İncelenen tez çalışma parçası Şekil 4.6' da görülmektedir.



Şekil 4.6. Alüminyum dövme rotilli kol parçası

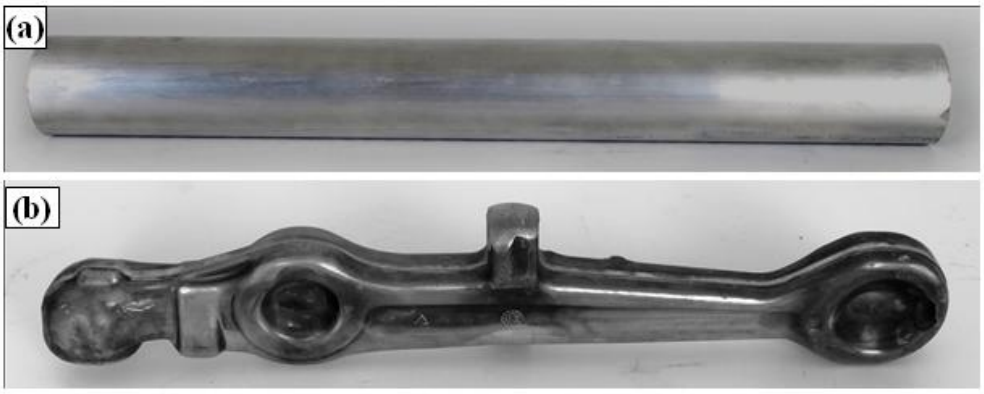
İlk olarak ekstrüde edilmiş profilin tane yapıları incelenmiş, Şekil 4.7' de profilin ekstrüzyon yönüne paralel kesitinden elde edilen, profil yüzeyinden başlayarak merkeze doğru çekilmiş tane yapıları görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.7. Ekstrüde edilmiş profilin kenarından merkezine doğru polarize ışık altında elde edilen tane yapıları görüntüleri

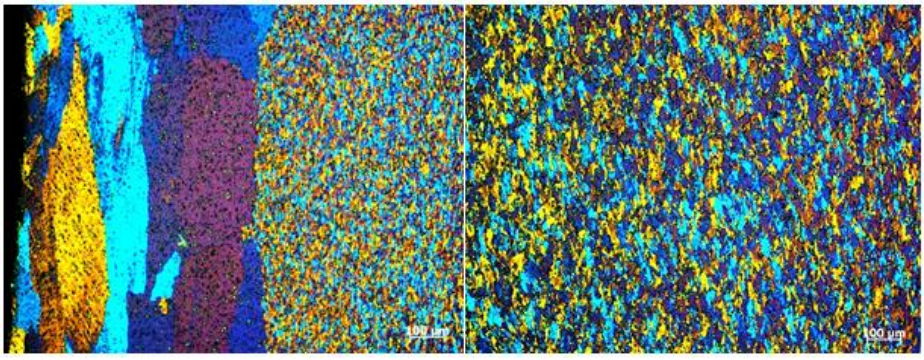
Şekil 4.7' de görüldüğü gibi ekstrüde edilmiş profilin yüzey ve kenar bölgesinde yeniden kristalleşmiş ve tane irileşmesi gerçekleşmiş bölge tabakasının oluştuğu,

merkeze doğru ilerledikçe ekstrüzyon üretiminden sonra oluşan lifimsi yapıların hakim olduğu görülmektedir. Özellikle 6XXX serisi alüminyum alaşımlarında yeniden kristalleşme reaksiyonu oluşma riski fazla, kontrol edilebilirliği güç bir mekanizma olduğu bilinmektedir. Yeniden kristalleşme reaksiyonunun en büyük risk oluşturma faktörü devamında oluşan tane irileşmesi reaksiyonlarıdır. Ekstrüde edilmiş profilin ve bu profilden dövülmüş parçanın görüntüleri Şekil 4.8' de verilmiştir.



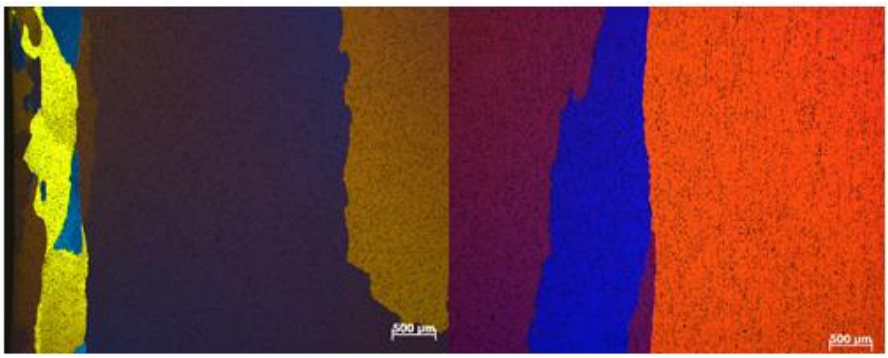
Şekil 4.8. (a) Ekstrüde edilmiş profil, (b) Ekstrüde edilmiş profilden dövülen parça

Ekstrüde edilmiş profilden dövülen Şekil 4.8 (b) de gösterilen parçanın da kesit tane yapıları incelenmiştir. Dövme sonrasında dinamik yeniden kristalleşme ve tane irileşmesi mekanizmasının gerçekleştiği farkedilmiş fakat bu irileşme sonlu derinlikte olup, bittiği yerden itibaren çok küçük yönlenmiş yeniden kristalleşmiş tanelerin tüm yapıyı kapladığı görülmüştür. Şekil 4.9' da ekstrüde edilmiş profilden dövülen parçanın kesit tane yapılarının görüntüleri verilmiştir.

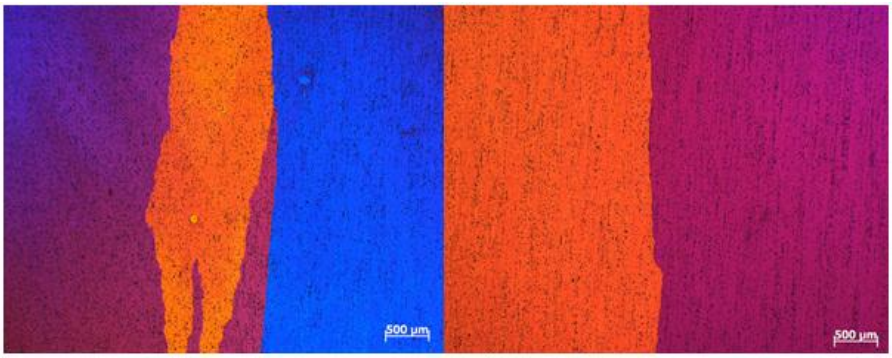


Şekil 4.9. Ekstrüde edilmiş profilden dövülen parçanın ekstrüzyon yönüne dik olan kesitindeki tane yapıları görüntüleri

Ekstrüde edilmiş profilden dövülen parça daha sonra T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş ve bu aşamadan sonra da tane yapıları kontrol edilmiştir. T6 ısıl işlemi kondisyonu, 520 °C' de 4 saat çözeltiye alma ve 180 °C' de 8 saat yaşlandırma şartlarında uygulanmıştır. Şekil 4.10' da dövülmüş ve devamında T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş parçanın ekstrüzyon yönüne dik ve Şekil 4.11' de ekstrüzyon yönüne paralel olarak incelenen kesitteki tane yapılarının görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.10. Dövülmüş ve T6 ısıl işlemi uygulanmış parçanın ekstrüzyon yönüne dik yüzeyinden merkezine doğru oluşan tane yapıları



Şekil 4.11. Dövülmüş ve T6 ısıl işlemi uygulanmış parçanın ekstrüzyon yönüne paralel kesitinde oluşan tane yapıları

Yerli üretim parçalarında aşırı tane büyümesi mekanizmasının alüminyum dövme üretiminin ısıl işlem safhasında gerçekleştiği bulunmuştur. Fakat bu olayın sadece T6 ısıl işleminden kaynaklandığını düşünmek son derece yanlış bir karar olacaktır. Çünkü dövülen ve çözeltiye alma ısıl işlemine girmeye hazır olan parçalarda çok ufak taneler oluştuğu görülmüştür. Bu ufak tanelerin termodinamiksel olarak oldukça kararsız olduğu düşünülmektedir. Aşırı tane büyümesi mekanizmasını tetikleyen bu ufak taneler çözeltiye alma sıcaklıklarını (520 °C) gördüğünde denge konumuna ulaşma isteğinden dolayı irileşmektedir. İrileşerek tüm yapıyı 3 eksende de

kaplayan taneler % 100 güvenlik parçaları olan alüminyum dövme rotilli kol ürünlerinde çok büyük risk teşkil etmektedir.

EN AW 6082 alaşımının biyet dökümünden sonra ekstrüzyon, dövme ve ısıl işlem safhalarından geçerek nihai ürüne dönüştüğü düşünülecek olursa, bu aşamalardan geçerken maruz kaldığı sıcaklık ve plastik deformasyon şartları, parçanın metalurjik birçok faktörünü zincir halkası gibi tetiklemektedir. Bu durumda alüminyum dövme üretiminde eğer ekstrüde edilmiş yarı mamul profil kullanılacaksa biyet dökümü ve homojenizasyonu, ekstrüzyon üretim parametreleri, dövme üretim parametreleri ve ısıl işlem şartlarının hepsinin kontrollü şartlar altında yapılması gerekliliği anlaşılmıştır.

Ekstrüzyon üretiminde gerçekleşen; biyet ön ısıtma sıcaklığı, ekstrüzyon oranı, pres çıkış sıcaklığı ve profil soğutma şartları dövmede kullanılan yarı mamul profil özelliklerini ve ısıl işlem sonrası nihai parça kalitesini doğrudan etkileyen parametrelerdir.

Dövme üretiminde; dövme öncesi yarı mamulün ön ısıtma sıcaklığı, dövme sıcaklığı, dövme kalıp sıcaklığı, dövme kalıp tasarımı, dövme kuvveti, strok mesafesi, kalıp yağlayıcısı, parça ile kalıp arasındaki sürtünme kuvveti gibi parametreler parça içyapısında gerçekleşen reaksiyonları doğrudan etkileyen parametrelerdir.

Isıl işlem prosesinde; çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi, parçaların ısıl işlem fırınına istiflenme biçimi, su verme süresi, su verme sıcaklığı, yapay yaşlandırma sıcaklığı ve süresi nihai parçanın özelliklerini doğrudan etkileyen parametrelerdir.

4.2. Alüminyum Dövme İmalatında Kullanılan Yarı Mamulün Döküm ve Ekstrüzyon Seçenekleriyle Optimum Üretimlerinin Gerçekleştirilmesi

Tez çalışmasının bu bölümünde EN AW 6082 alüminyum dövme rotilli kol parçasının üretiminde yarı mamul seçeneklerinin imalat yöntemleri değerlendirilmiştir. Dövmede kullanılacak yarı mamuller döküm ve ekstrüzyon seçeneklerini kullanarak üretilmiş ve dövmeye hazır hale getirilmiştir.

Döküm seçeneğinde birbirinden farklı teknolojiler kullanılarak yarı mamuller üretilmiş, ekstrüzyon sürecinde ise tüm parametreler optimize edilerek iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Alüminyum dövme üretiminde kullanılan yarı mamulün döküm seçeneğiyle üretilip değerlendirilmesi

Dövme için kullanılacak yarı mamul seçeneğinde EN AW 6082 alaşımının döküm üretimi üç farklı teknoloji kullanılarak elde edilmiştir. Bunlar:

- Air Slip teknolojisi kullanılarak Doğrudan Soğutmalı Döküm (Direct Chill Casting) yöntemiyle dökülmüş biyetden elde edilen profil numuneleri,
- Soğutma Plakasından Döküm (Cooling Slope Casting) metodu kullanılarak dökülmüş profil numuneleri,
- Yurt dışından ithal edilerek alınmış yatay sürekli döküm teknolojisi kullanılarak elde edilen All-Round® patent ismine sahip profil numuneleri.

Bu teknolojileri kullanarak elde edilen içi dolu profiller 42 mm çapında, 400 mm boyunda imal edilmiştir. Her teknik sonucunda aynı ölçülere sahip profiller üretilmiş ve devamında aynı geometriye sahip parçalar 1600 tonluk mekanik pres de dövülmüştür. Dövülen parçaların hepsi aynı şartlarda T6 ısıl işlem şartına tabi tutulmuştur. 520 °C' de 4 saat süreli çözeltiye alma işlemi yapılmış, ardından su verme ve devamında 180 °C' de 8 saat yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.2.1.1. Doğrudan Soğutmalı Döküm

Doğrudan Soğutmalı Döküm teknolojisi ile dökülmüş, kimyasal analizi Çizelge 4.3' de verilen 203 mm çap, 6 m uzunluk ölçüsüne sahip biyetler 580 °C' de 8 saat homojenizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Homojenizasyon işlemi; kaba ötektiklerin çözünmesi, katılaşma sırasında Mg_2Si partiküllerinin oluşması ve yeniden kristalleşmeyi kontrol altına alan dispersoid yapıcı elementler Mn ve Cr' un ince bir dağılımda elde edilmesi için gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.3. Biyet dökümünde kullanılan EN AW 6082 nin kimyasal analizi ağ. %

Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ti	Cr	Zr	V
1.022	0.1186	0.597	0.842	0.0168	0.0233	0.0020	0.0012	0.0124

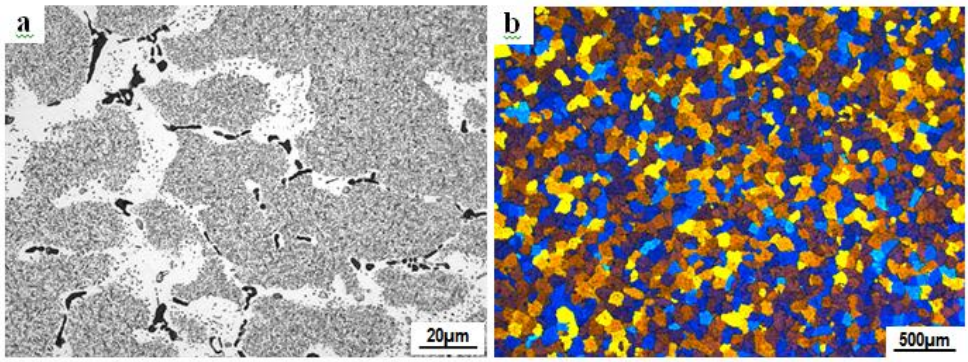
Homojenizasyon işleminin devamında çökelme ve çözünen doygunluk arasındaki hassas dengeyi gerçekleştirebilmek için saatte ortalama 400 °C soğutma hızı ile oda sıcaklığına soğutulmuştur. Daha sonra biyet dökümden, tel erozyon yöntemini

kullanarak 42 mm çapında 400 mm boyunda içi dolu profiller çıkartılmıştır. Böylece dövmede kullanılacak yarı mamul seçeneklerinden ilki döküm karakteristiğinde olan Doğrudan Soğutmalı Döküm metoduyla üretilmiş biyetden hazırlanmıştır. Yapılan prosesi anlatan fotoğraf Şekil 4.12' de paylaşılmıştır.



Şekil 4.12. Doğrudan Soğutmalı Döküm metodu ile dökülmüş biyet ve bu biyetden tel erozyonla çıkartılmış dövme öncesi yarı mamul

Döküm biyetden Şekil 4.12' de görüldüğü gibi 14 adet döküm profil çıkartılmıştır. Çıkartılan bu profillerin mikro yapıları Doğrudan Soğutmalı Döküm metodu ile dökülmüş biyet karakteristiğini taşımaktadır. Şekil 4.13 (a)' da gösterildiği gibi döküm profilin mikro yapısı α-Al katı çözelti matrisinin dendritik ağıyla, Mg_2Si çökeltilerinin ince yapılı dağılımıyla ve dendritik arası bölgelerdeki α_c- $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ partikülleri ile karakterize olmuştur. Şekil 4.13 (b)' de tüm kesit boyunca homojen, ince eş eksenli bir yapıya sahip ortalama tane çapı ölçüsü yaklaşık olarak 76 ± 4 µm mertebelerinde olan döküm profilin tane yapısı verilmiştir.



Şekil 4.13. (a) döküm yarı mamulün mikro yapısı, (b) döküm yarı mamulün tane yapısı

Hazırlanan bu döküm profiller ön ısıtma tünel fırınında ısıtılarak dövme işlemine tabi tutulmuş ve devamında T6 ısıl işlemi uygulanmıştır.

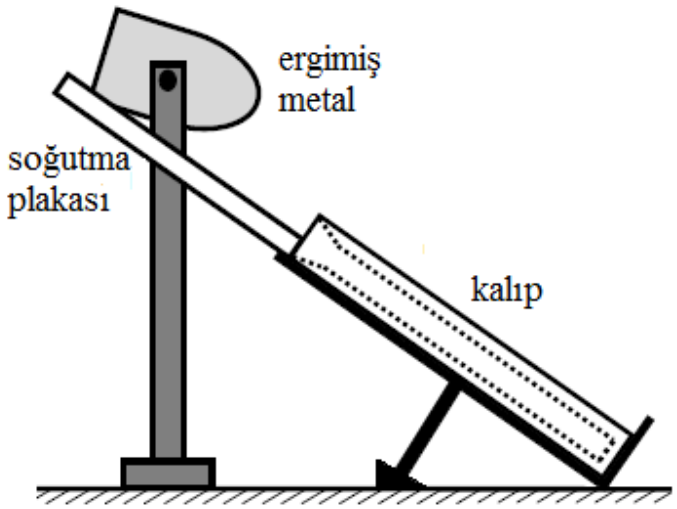
4.2.1.2. Soğutma Plakasından Döküm

Soğutma Plakasından Döküm yöntemi, son yıllarda yaygın olarak yarı katı proseslerinde kullanılan hammadde üretiminde incelenmektedir. Bu tez çalışmasında da alüminyum dövme rotilli kol parçasının üretiminde, yarı mamul seçeneklerinde alternatif oluşturması için kullanılmıştır. Soğutma Plakasından Döküm yöntemiyle dökülmüş ürünler, dövme sırasındaki plastik akışa daha az direnç göstermekte ve üniform eş eksenli bir tane yapısı sağlamaktadır.

Kimyasal analizi Çizelge 4.4' de verilen EN AW 6082 alaşımı indüksiyon ocağında 750 °C' de ergitilmiştir. Ergiyik daha sonra 700 °C' ye kadar soğumaya bırakılmış ve 45° eğimli duran 50 mm genişlik ve 300 mm uzunluk ölçülerine sahip soğutma plakası üzerinden akıtılarak kokil kalıp içerisine dökülmüştür. Ergimiş metalin yapışmaması için soğutma plakasının yüzeyi ince bir bor nitrür tabakası ile kaplanmıştır. Bu kalıba dökülen çubuk 42 mm çap ve 400 mm uzunluk ölçülerine sahiptir. Soğutma Plakasından Döküm düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 4.14' de, döküm gerçekleştirildikten sonraki fotoğraflanmış görüntüleri Şekil 4.15' de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Soğutma Plakasından Döküm yönteminde kullanılan EN AW 6082 alaşımının kimyasal analizi % ağırlıkça

Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Cr	Zr	V
0.947	0.204	0.612	0.720	0.041	0.025	0.022	0.006	0.001	0.013

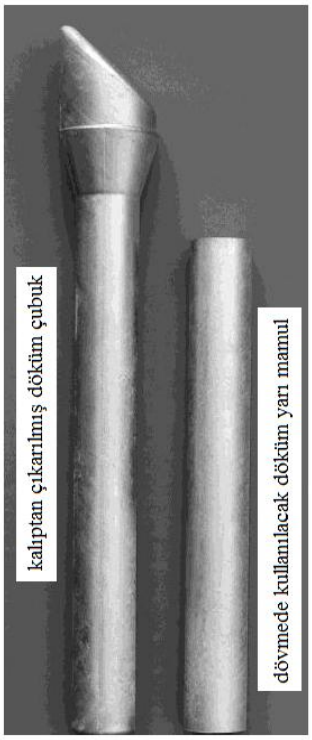


Şekil 4.14. Soğutma Plakasından Döküm düzeneği



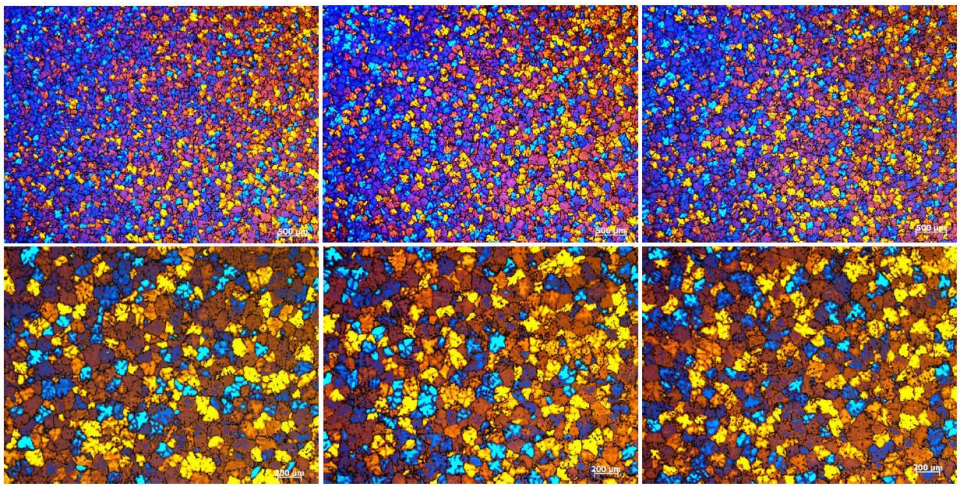
Şekil 4.15. Soğutma Plakasından Döküm düzeneği ile tamamlanmış döküm işlemi

Şekil 4.16' da dökülmüş çubuk ve dövmeye hazır hale getirilmiş döküm yarı mamulün görüntüleri yer almaktadır. Döküm işlemi tamamlanan çubuğun iki uç kesitlerindeki döküm tane yapıları incelenmiştir. İlk katılaşan taban yapısı ile son katılaşan tavan yapısı arasındaki fark oldukça sınırlı, ortalama tane çapı tüm profilde 200 μm nin altında, tane yapısı kesitte son derece homojen ve eş eksenli oluşmuştur.

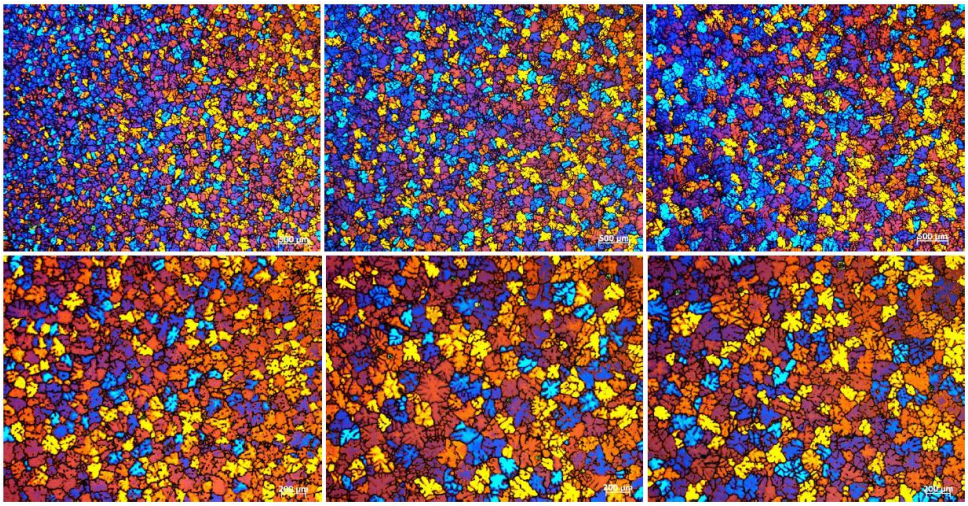


Şekil 4.16. Kalıptan çıkarılmış ve dövmeye hazır hale getirilmiş döküm profil

Döküm işlemi kokil kalıba tamamen laminar akış şartlarında doldurularak gerçekleştirilmiştir. Kokil kalıp eğimli konumlandırıldığından ve sıvı metal kalıp duvarından ve besleme amaçlı çıkıcısından akıtıldığından dolayı kalıp iç yüzeyinde kısmi kristalleşme başlamakta ve oluşan dendritler aşağıya doğru sürüklendiği için dendrit kolları kırılarak ekstra çekirdeklenmeyi desteklemektedir. Döküm profilin ilk katılaşan taban tane yapısı Şekil 4.17' de, son katılaşan tavan tane yapısı Şekil 4.18' de verilmiştir.

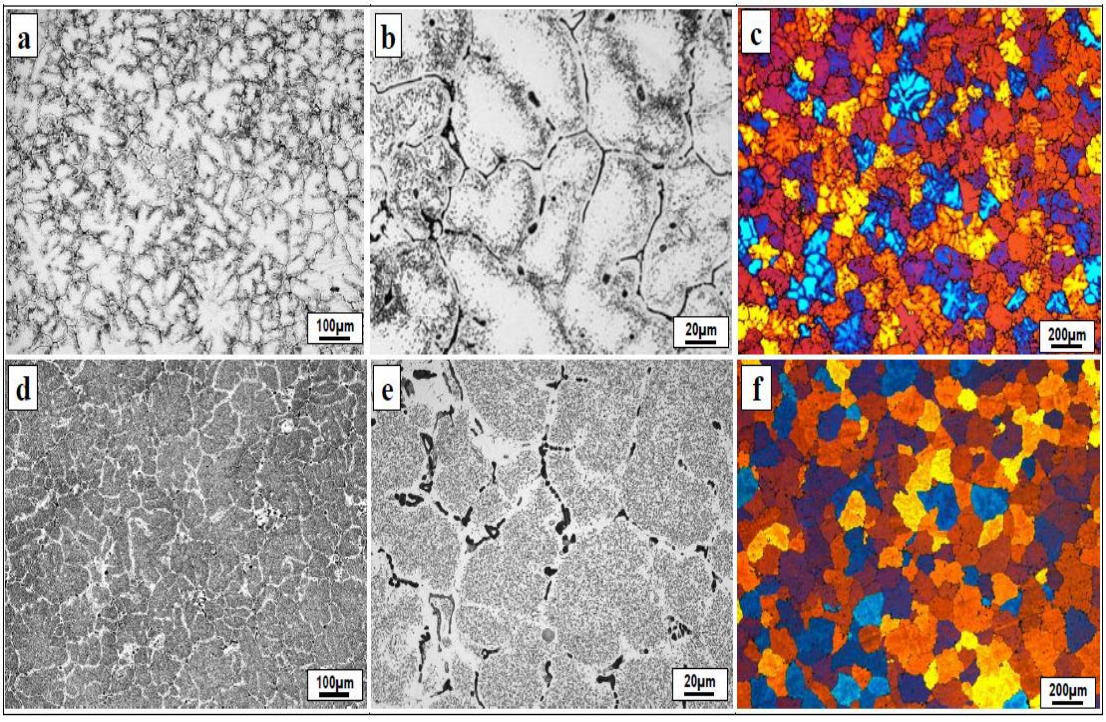


Şekil 4.17. 400 mm uzunluğundaki profilin taban tane yapısı



Şekil 4.18. 400 mm uzunluğundaki profilin tavan tane yapısı

400 mm uzunluğunda 42 mm çapında dökülen profiller, tıpkı Doğrudan Soğutmalı Döküm yönteminde olduğu gibi aynı amaç doğrultusunda 570 °C' de 8 saat süreli homojenizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra saatte ortalama 400 °C soğutma hızı ile oda sıcaklığına soğutulmuştur. Şekil 4.19' da döküm profillerin homojenizasyon işleminden önce ve sonra ki mikro yapı ve tane tapısı görüntüleri ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 4.19. Döküm profilin (a, b) homojenizasyon öncesi mikro yapısı, (c) homojenizasyon öncesi tane yapısı, (d, e) homojenizasyon sonrası mikro yapısı, (f) homojenizasyon sonrası tane yapısı

Homojenizasyon işlemi gerçekleştirilen döküm profiller daha sonra ön ısıtma tünel fırınında 500 °C' ye ısıtılmış ve 1600 ton kapasitesine sahip mekanik pres de dövme işlemi gerçekleştirilmiştir. Dövülmüş parçanın görüntüsü Şekil 4.20' de verilmiştir.



Şekil 4.20. Döküm profilden dövülmüş parça

4.2.1.3. All-Round®

Ülkemizde, dövmede kullanılan yarı mamulün döküm seçeneğiyle üretilmesi henüz gerçekleştirilmemektedir. Ülkemizde henüz çok yeni olan alüminyum dövme, yarı mamul üreticileri tarafından da yeni keşfedilecek bir pazar konumunda bulunmaktadır. Şu an ülkemizde alüminyum dövmede kullanılacak yarı mamul seçeneği sadece ekstrüde edilmiş içi dolu profillerdir. Ülkemizde durum bu şekilde seyrederken yurt dışında bu sektöre hizmet eden firmalar Forging Stock başlığı adı altında ürünlerini pazarlamaktadırlar. Ürün gruplarında dövme için kullanılacak yarı mamul seçeneklerini ekstrüde malzeme ve döküm malzeme olarak ayrı ayrı ele almaktadırlar. Yurt dışında ki üreticiler döküm yarı mamul seçeneklerini dövme şekline göre ön şekilli ve/veya içi dolu silindirik çubuk formunda sürekli yatay döküm veya sürekli dikey döküm yöntemleri ile imal etmektedirler. Hatta bu sektöre hizmet eden yurt dışı firmalarının çoğu, imal ettikleri ürünlerin patent ve telif haklarını almışlardır. Ülkemizde de alüminyum dövme üretimi kapasitesi artıp önem kazanmaya başladıkça dövme sektörünün yarı mamul ihtiyacını karşılayacak üreticilerimizin Forging Stock başlığı altında ürün gruplarını genişletip, proseslerini revize etmeleri yakın zamanda beklenmektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde Avusturya menşeli SAG Materials Group adlı firmadan tedarik edilen sürekli yatay döküm tekniğiyle üretilmiş All-Round® adı altında patenti alınmış yarı mamulün dövme performansları incelenmiştir. Tez çalışması

boyunca aynı parça üzerinden incelemelere devam edildiği için bu yarı mamulün ölçüsü de Şekil 4.21' de gösterildiği gibi 42 mm çapında istenmiş ve uzunluk ölçüsü 400 mm olarak hazırlanmıştır. Kimyasal analizi Çizelge 4.5' de verilen All-Round® döküm profilin dövme üretimine alınmadan önce mikro yapısı ve tane yapısı incelenerek karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

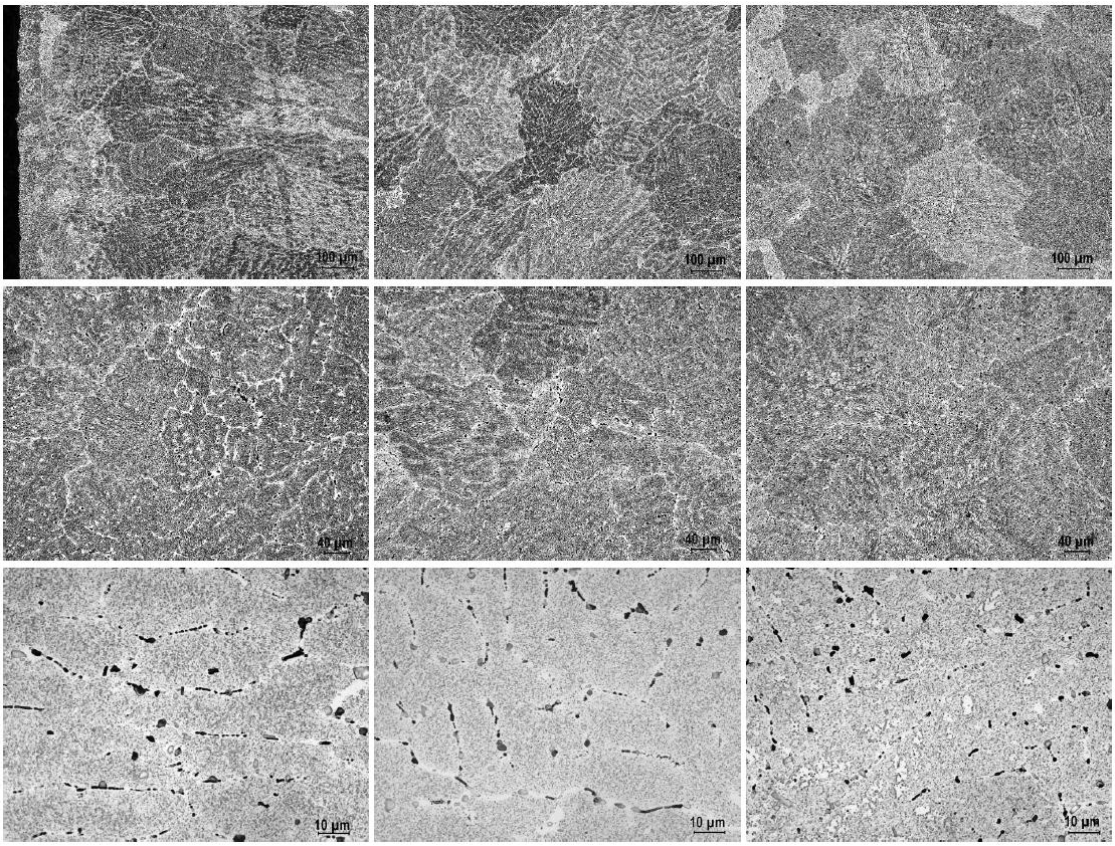
Çizelge 4.5. All Round döküm profilinin kimyasal analizi % ağırlıkça

Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Cr	Zr	V
0.813	0.2946	0.526	0.654	0.0205	0.0232	0.0649	0.0242	0.0023	0.0149



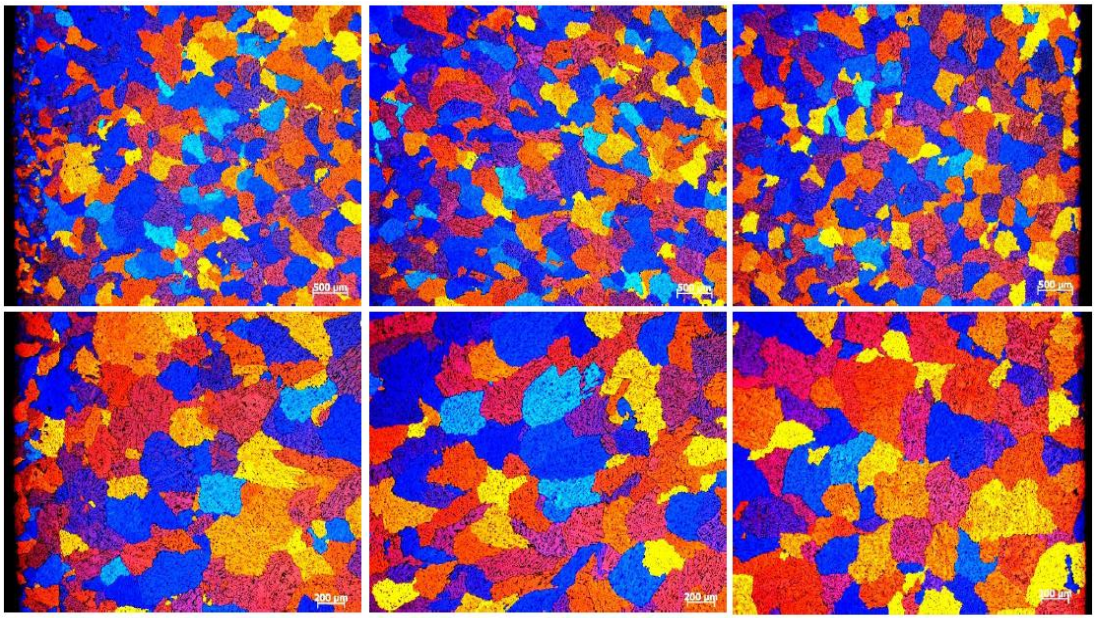
Şekil 4.21. All-Round® döküm profil

Yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda mikro yapısının Şekil 4.22' de gösterildiği gibi aşırı çökelmeli olduğu görülmüştür. Bu durumun homojen tavdan çok yavaş soğutulduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu denli aşırı çökelmiş Mg_2Si çökeltilerinin çözeltiye alma ısıl işlemi sırasında sorun yaratma ihtimali fazladır. Homojen tav uygulanmış olduğu bileşik partiküllerinin durumundan anlaşılmakta fakat dendritik segragasyonun izleri hala yapıda fark edilmektedir.



Şekil 4.22. All-Round® döküm profilin kesit mikro yapıları

Tane yapısı incelemelerinde ise ortalama tane boyutunun yaklaşık 200 µm nin üzerinde olduğu görülmüştür. Doğrudan Soğutmalı Döküm ve Soğutma Plakasından Döküm yöntemleriyle elde edilen ürünlerin tane boyutlarının ortalama 100 µm mertebelerinde olduğunu düşünecek olursak, All-Round® döküm profilinin tanelerinin iri olduğunu söyleyebiliriz. Bu durumun plastik akışın gerçekleşeceği dövme üretiminde bir fayda sağlanması beklenmemektedir. All-Round® döküm profilin tane yapıları Şekil 4.23' de verilmiştir.



Şekil 4.23. All-Round® döküm profilinin tane yapıları

Karakterizasyon çalışmaları tamamlanan All-Round döküm profiller ön ısıtma tünel fırınında 520 °C' ye ısıtılmış ve 1600 tonluk mekanik pres de dövülmüştür. Dövülen parçalar daha sonra 520 °C' de 4 saat çözeltiye alma, 180 °C' de 8 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur.

4.2.2. Alüminyum dövme üretiminde kullanılan ekstrüzyon yarı mamul seçeneğinin optimum şartlarda üretilip değerlendirilmesi

Dövülerek üretilen alüminyum otomotiv parçaları için ülkemizde bulunan en önemli girdi malzemesi ekstrüzyonla üretilen yuvarlak profillerdir. Bu profillerin pres çıkışındaki yapısal özellikleri dövme sürecini olduğu gibi dövme ve ısıl işlem sonrasındaki malzeme yapısal ve mekanik özelliklerini yakından etkilemektedir. Üstün dövme parça özellikleri ancak tüm bu süreçte ipliksi (lifli) tane yapısının korunması ile elde edilebilir. Fakat ana sanayi ve yerli üretim karşılaştırmasında da anlatıldığı gibi dövme üretiminde ekstrüde edilmiş profiller kullanıldığı zaman dövme ve devamındaki ısıl işlem sonrasında kesit tane yapısında aşırı derecede büyümüş tanelere rastlanmaktadır. Buna rağmen halen ülkemizde ve dünya üzerinde daha çok tercih edilmekte olan ekstrüde edilmiş yarı mamul profiller kullanıldığı için, tez çalışmasının bu bölümünde alüminyum dövme üretim sürecini olumsuz etkilememesi için ekstrüzyon üretimi, dövme üretimi ve kimyasal analiz içeriği optimize edilerek tane irileşmesi

mekanizması kontrol altına alınarak iyileştirmeler sağlanmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde tane yapısına:

- Ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı ve dövme sıcaklığı parametrelerinin etkileri
- Dispersoid yapıcı elementlerden Cr ilavesinin etkileri
- Ekstrüzyon üretimindeki düşük deformasyon oranının etkileri

detaylı olarak incelenmiştir.

4.2.2.1. EN AW 6082 alaşımlı profillerin kesit tane yapısına ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığının etkisi

EN AW 6082 yapısal profil uygulamaları için tercih edilen yüksek mukavemetli Al-Mg-Si alaşımları arasında yer almaktadır. EN AW 6082 alaşımında yaşlanma sertleşmesi kapasitesini arttırmak için Mg'un bağlayabileceğinden daha fazla Si, tane yapısını kontrol etmek için ise Mn kullanılmaktadır. Bu alaşımda mukavemet bileşime ve proses koşullarına bağlıdır. Bu alaşımdan üretilen profiller kesitlerinde kısmi kristalleşmiş yapılara sık sık rastlanır ve bu heterojen yapı malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Yüksek mukavemet için proses, kısmi kristalleşmeyi önleyecek ya da tüm kesitte ince bir ipliksi tane yapısı verecek şekilde tasarlanmalıdır.

EN AW 6082 alaşımının yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biri de otomotiv uygulamaları için dövme parça üretimidir. EN AW 6082 alaşımından ekstrüzyonla üretilen yuvarlak profiller dövme parça üreticileri için yarı mamül özelliğindedir. Alüminyumun hafiflik, yüksek mukavemet, kolay şekil verilebilme ve paslanmazlık gibi çok cazip özelliklerinin tümü 6082 alaşımında da mevcuttur. 6082 alaşımlı profillerden dövülen süspansiyon parçaları günümüz binek otomobillerinde çok geniş bir pazar payına ulaşmıştır.

Bu profillerin pres çıkışındaki yapısal özellikleri dövme sürecini olduğu gibi dövme ve ısıl işlem sonrasındaki malzeme yapısal ve mekanik özelliklerini yakından etkilemektedir. Üstün dövme parça özellikleri ancak tüm bu süreçte ipliksi tane yapısının korunması ile elde edilebilir.

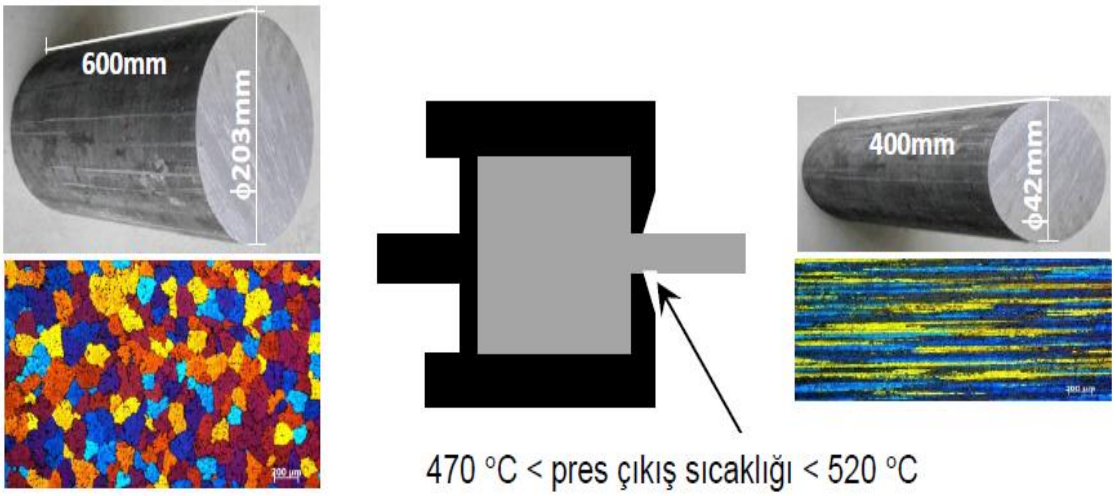
Bu çalışmada ekstrüzyonla hazırlanan EN AW 6082 alaşımlı yuvarlak profillerin kesit tane yapısına ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığının etkisi incelenmektedir. Biyet ön ısıtma aşamasında seçilen sıcaklıklar ve pres baskı hızları değişken kılınarak bir dizi pres çıkış sıcaklığında yuvarlak profil hazırlanmış ve bu profillerin kesit tane yapıları

incelenerek dinamik yeniden kristalleşmenin önlendiği ve ipliksi tane yapısının korunduğu pres koşulları tanımlanmıştır.

EN AW 6082 alaşımları Doğrudan Soğutmalı Döküm sistemi ile, 6000 mm boy, 203 mm çapa sahip yuvarlak ingotlar şeklinde dökülmüştür. Bu ingotların kimyasal analizleri Çizelge 4.6' da verilmektedir. Döküm ingotlar 580 °C' de 8 saat süreyle homojenleştirilmiş ve oda sıcaklığına 4 °C/dk' dan daha yüksek hızlarda soğutulmuştur. Homojen tav uygulanmış ingotlardan kesilen biyetler Şekil 4.24' de şematik gösterimi verildiği gibi 430 °C ile 460 °C aralığındaki sıcaklıklara ısıtılmış ve ekstrüzyonla 42 mm çapta içi dolu profiller şeklinde basılmıştır. Ön ısıtma sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı değişken kılınarak pres çıkış sıcaklıkları 470-520 °C aralığında ayarlanmıştır.

Çizelge 4.6. EN AW 6082 alaşımının kimyasal analizi ağ. %

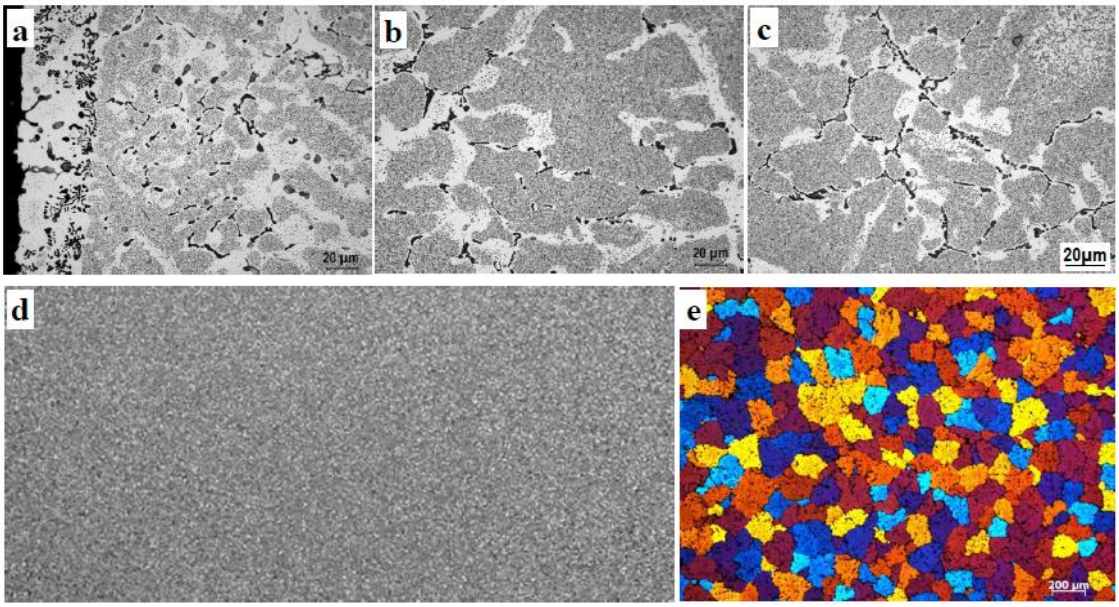
Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ti	Cr	Zr	V
1.022	0.1186	0.597	0.842	0.0168	0.0233	0.0020	0.0012	0.0124



Şekil 4.24. Döküm biyetden ekstrüde edilmiş profilin şematik gösterimi

Profiller daha sonra iki farklı sıcaklığa, 430 °C ve 500 °C, ısıtılarak sıcak dövme uygulaması ile daha önceki uygulamalarda da incelenen alüminyum rotilli kol parçasının aynısı üretilmiştir. Dövme parçalar daha sonra 520 °C' de 4 saat süre ile çözeltiye alınmış ve son işlem olarak 180 °C' de 8 saat süre ile yaşlandırma tavına girmiştir. Ekstrüzyonla farklı pres çıkış sıcaklıklarında elde edilen yuvarlak profiller, bu profillerden dövülen ve T6 ısıl işlemi uygulanan parçaların kesit yapıları, yuvarlak profillerin üretildiği biyetlerin mikroyapıları, faz yapıları ve tane yapıları incelenmiştir.

Homojen tav uygulanmış biyet mikroyapısı Şekil 4.25' de gösterildiği gibi α-Al dendritik örgüsü ve dendrit sınırlarına yerleşmiş Al-Fe(Mn)-Si bileşik partiküllerinden oluşmaktadır. Homojen tavdan soğutma sırasında önemli miktarda Mg_2Si fazı tane içlerinde çökelmiştir (Şekil 4.25). Biyetin yaklaşık 50 mikron derinliğinde bir kabuk bölgesi bulunmaktadır. Bu bölgede bileşik partikülleri biraz daha iri, çökelme hızlı soğuma nedeniyle daha sınırlıdır. Şekil 4.25 (d)' de gösterildiği gibi biyetin tane yapısı tüm kesitte ince ve eş eksenli ve son derece homojendir. Ortalama tane çapı 200 mikronun altında ölçülmüştür (Şekil 4.25 (e)). Bu mikroyapı özellikleri ile yuvarlak profil üretimi için kullanılan 6082 alaşımlı biyetlerin yeterli kalitede oldukları sonucuna varılmıştır. Bu biyetler biyet ön ısıtma sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı değişken kılınarak 470 °C, 490 °C ve 520 °C pres çıkış sıcaklıklarında yuvarlak profil şeklinde basılmış ve daha sonra her grup 430 °C ve 500 °C olmak üzere 2 farklı sıcaklığa ısıtılarak bu sıcaklıkta rotilli kol parçası şeklinde dövülmüştür. Tüm rotilli kol parçaları standart T6 ısıl işlemine (520 °C' de 4 saat çözeltiye alındıktan sonra en geç 4 saat içinde 180 °C' de 8 saat süreli yaşlandırma tavı) tabi tutulmuştur.



Şekil 4.25. Profil üretiminde kullanılan biyetin mikroyapısı: (a) kenar, (b) çeyrek derinlik ve (c) merkez bölge; (d) kesit tane yapısı ve (e) Barker yöntemi ile elde edilmiş detay tane yapısı

4.2.2.2. EN AW 6082 alaşımına Cr elementi ilavesinin etkileri

Tane büyümesi mekanizmasının ekstrüzyon üretimi kanadında kontrol altına alınması yönünde farklı ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıklarına sahip profiller farklı dövme

sıcaklıklarında dövülerek aynı şartlarda ısıl işleme tabi tutulmuştur. Yeniden kristalleşme reaksiyonunun oluşmaması için ekstrüzyon ve dövme sıcaklıkları yeniden kristalleşme sıcaklığının altında seçilmiş fakat buna rağmen yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan üretimlerde daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Böylece ekstrüzyon ve devamında ki dövme üretimlerinin plastik şekil verme operasyonları olduğunu düşünürsek yeniden kristallşeme reaksiyonunun depolanan deformasyon enerjisine daha hassas davrandığı anlaşılmıştır. Bu üretimlerde düşük sıcaklıklarda çalışılsa dahi statik yeniden kristalleşme reaksiyonunun yanında dinamik yeniden kristalleşme reaksiyonları da meydana gelmiştir. Bu nedenle ekstrüzyon ve dövme üretimlerinin düşük sıcaklıklarda yapılması bir fayda sağlamamış aksine depoladığı deformasyon enerjisi tane irileştirme mekanizmasını tetiklemiştir. Bunun için ekstrüzyon ve dövme üretimlerinin daha yüksek sıcaklıklarda yapılarak depolanan deformasyon enerjisinin azaltılması düşünülmüştür. Fakat bu seferde yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine çıkılacağından yeniden kristalleşme reaksiyonunun engellenebilmesi için kimyasal kompozisyonun revize edilmesi ile alternatif yollara baş vurulmuştur.

Dispersoid yapıcı elementlerden olan Cr' un tane sınırlarına çökelip tane irileşmesi mekanizmasını kilitleyerek tane irileşmesinin önüne geçmesi beklenmektedir. Bunun için kullanılan 6082 alaşımı Cr ilavesi yapılarak revize edilmiştir. Revize edilen alaşımın kimyasal analizi Çizelge 4.7' de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Revize edilen EN AW 6082 nin kimyasal analizi ağ. %

Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ti	Cr	Zr	V
0.993	0.206	0.642	0.722	0.091	0.040	0.134	0.005	0.013

Revize edilen alaşıma göre döktürülen biyetler homojen tava tabi tutulmuş ve ekstrüzyon üretimine hazır hale getirilmiştir. Ekstrüzyon üretimi sırasıyla 480 °C, 500 °C, 530 °C ve 555 °C olmak üzere birbirinden farklı 4 sıcaklık parametresinde gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı birbirinden farklı olan ekstrüde edilmiş profiller 2 farklı dövme sıcaklığında dövme işlemine tabi tutulmuştur. Dövme sıcaklıkları olarak sırasıyla 430 °C ve 500 °C seçilmiştir. Dövme işlemlerinin hepsi 1600 tonluk mekanik pres de gerçekleştirilmiştir. Dövülen parçaların hepsi daha sonra 520 °C' de 4 saat çözeltiye alma ısıl işlemine tabi tutulmuş, su verilmiş ve 180 °C' de 8 saat yaşlandırılmıştır.

4.2.2.3. Ekstrüzyon üretimindeki düşük deformasyon oranının etkileri

Tez çalışmasının bu bölümünde, plastik şekil verme işlemlerinde deformasyon miktarının tane yapısı üzerine negatif etkisi bilindiği için ve döküm karakteristiğini taşıyan yarı mamullerde tane irileşmesi mekanizmasının gerçekleşmemesinden dolayı, ekstrüzyon üretiminde biyet döküm karakteristiğini mümkün olduğunca yakalamak için düşük çaplı biyet kullanarak düşük ekstrüzyon oranlı profiller elde edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda kullanılan ekstrüde edilmiş yarı mamul profiller 203 mm çap ölçüsüne sahip biyetlerin 2700 tonluk endüstriyel ekstrüzyon presinde basılarak 42 mm çap ölçüsüne indirgenmesiyle elde edilmiştir.

Ekstrüzyon üretiminde ekstrüzyon oranı kriteri en önemli parametrelerden biridir. Ekstrüzyon oranı, biyet kesit alanının profilin kesit alanına oranlanmasıyla hesap edilmektedir. İdeal ekstrüzyon oranı 30 ila 60 arasındadır. Ekstrüde edilmiş profiller çoğunlukla ekstrüzyon işleminden sonra ısıl işlem görüp doğrudan kullanıldığı için, bu oran özellikle yapı sektöründe yük altında çalışan profillerde büyük önem kazanmaktadır. Fakat alüminyum dövme üretiminde ekstrüde edilmiş profiller sadece yarı mamul amacıyla kullanılmakta ve herhangi bir mukavemet beklenmemektedir. Çünkü dövme üretiminde ön ısıtma ve ikinci bir plastik şekil verme işlemi uygulanmakta olup dövme sonrasında da parçalar ısıl işleme tabi tutulmaktadır. Bu nedenle alüminyum dövme üretiminde kullanılan ekstrüde edilmiş profillerde ekstrüzyon oranınının yüksek olması bir fayda sağlamamakla beraber aksine malzeme de yüklü deformasyon enerjisini artırmakta bu da tane irileşmesini tetiklemektedir. Ayrıca ekstrüzyon oranı ne kadar düşük olursa elde edilen profil döküm karakteristiğine o denli yakın olacak bu da tane irileşmesi mekanizmasının engellenmesinde önemli bir katkı sağlamış olacaktır.

Tez çalışmasının bu bölümünde düşük ekstrüzyon oranını sağlamak için 127 mm çap ölçüsüne sahip biyetler 1100 tonluk endüstriyel ekstrüzyon presinde basılarak 42 mm çap ölçüsüne sahip profiller üretilmiştir.

203 mm çap ölçüsüne sahip biyet ile 127 mm çap ölçüsüne sahip biyetden üretilen 42 mm çap ölçüsüne sahip profillerin ekstrüzyon oranları Denklem 4.1 ve 4.2' de gösterildiği gibi hesap edilerek karşılaştırılmıştır.

Ekstrüzyon oranı = biyet kesit alanı / profil kesit alanı

$$\left(\pi.101.5^2\right)/\left(\pi.21^2\right)=23.26 \qquad (4.1)$$

$$\left(\pi.63.5^2\right)/\left(\pi.21^2\right)=9.14 \qquad (4.2)$$

Elde edilen ekstrüzyon oranları verilerine göre 127 mm çap ölçüsüne sahip biyet kullanıldığında ekstrüzyon oranında ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Böylece elde edilen profilin karakteristiği biyet döküme yakın olmuştur.

Tez çalışmasının bu bölümünde düşük ekstrüzyon oranıyla elde edilmiş yarı mamul profiller tek başına ekstrüzyon oranının etkisini gözlemleyebilmek için Cr elementi ilavesiz EN AW 6082 alaşımından üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan EN AW 6082 alaşımının kimyasal içeriği Çizelge 4.8' de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Düşük ekstrüzyon oranı çalışmasında kullanılan EN AW 6082 nin kimyasal analizi ağ. %

Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ti	Cr	Zr	V
0.931	0.216	0.4843	0.759	0.027	0.0151	0.0910	0.0017	0.0104

Bu çalışmada düşük ekstrüzyon oranıyla üretilmiş yarı mamul profiller, daha önceki üretim çalışmalarında denemesi yapılan dövme sıcaklığı değerlerinden farklı olarak 480 °C ve 520 °C olmak üzere iki farklı dövme sıcaklığında üretilmiştir. Dövme işlemi devamında parçaların hepsi aynı şartlar altında, 520 °C' de 4 saat çözeltiye alma, su verme ve 180 °C' de 8 saat yaşlandırma işlemlerine tabi tutulmuştur.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde alüminyum dövme üretim sürecini etkileyen tüm parametreler dövmede kullanılan yarı mamullerin döküm ve ekstrüzyon seçeneklerini kullanarak üretildiğinde, dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçanın özelliklerinin nasıl değiştirdiği detaylı bir şekilde ortaya konmuştur.

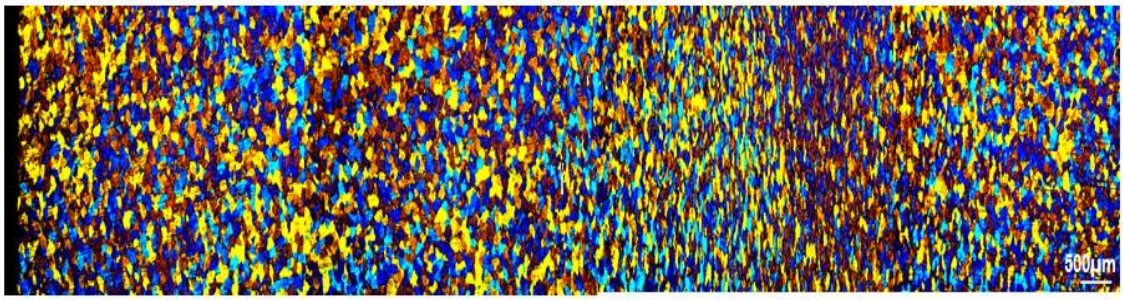
Yarı mamul üretim seçeneklerinde döküm ve ekstrüzyon yöntemleri uygulanarak tez çalışma parçası olan alüminyum rotilli kol ürününün formuna uygun ön şekil geometrisine sahip profiller üretilmiştir. Hem döküm hem de ekstrüzyon seçeneklerinde farklı üretim parametreleri uygulanmıştır. Farklı üretim teknikleri ve parametreler ile üretilen profiller farklı dövme sıcaklıklarında imal edilmiştir. Tüm bu üretim çalışmaları sonucunda ısıl işlem sonrası nihai parçada oluşan aşırı tane büyümesi, tane irileşmesi, tane irileşme bandı derinliği tane yapıları ve makro yapı görüntüleri ile karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Ayrıca tane yapılarının sertlik, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti değerlerine etkisi araştırılmıştır.

5.1. Dövme Üretiminde Kullanılan Döküm Yarı Mamul Seçeneğinin Nihai Parçaya Etkisi

Dövme üretiminde kullanılacak yarı mamul seçeneklerinde ilk olarak döküm yöntemi ele alınmış ve 3 farklı imalat tekniğine sahip profiller üretilmiştir. Bu profillerin hepsi aynı ön ısıtma fırınında ısıtılmış, aynı mekanik pres de dövülmüş ve aynı şartlarda ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlem sonrası parçaların hiçbir kesitinde tane irileşmesi mekanizmasına rastlanmamış, eş eksenli tane yapısı korunmuştur.

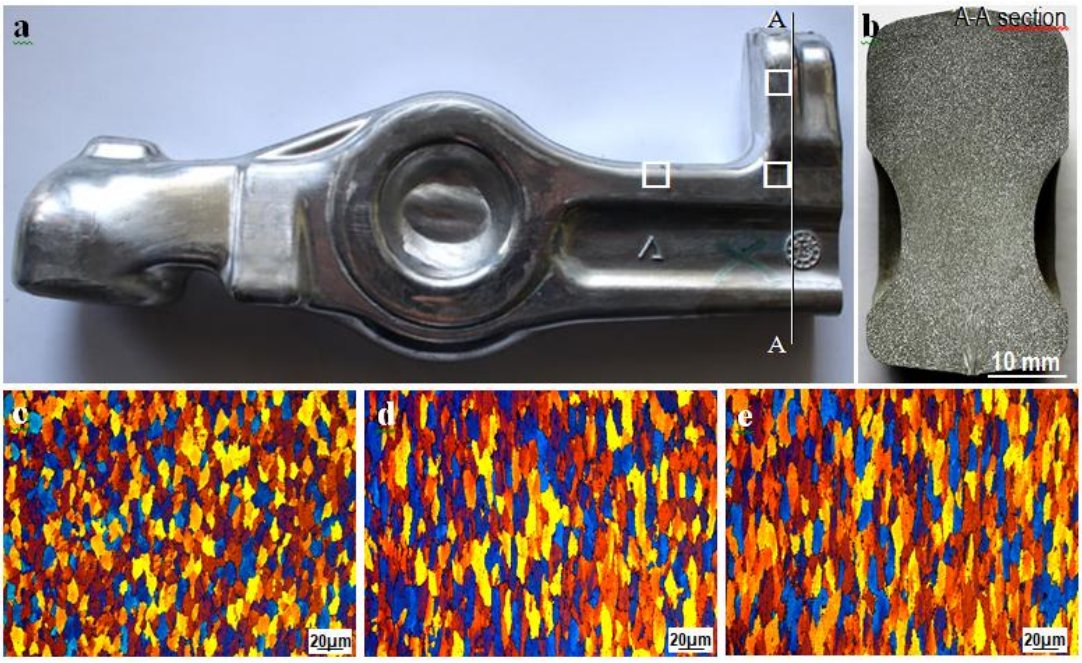
5.1.1. Doğrudan Soğutmalı Döküm metoduyla üretilmiş profillerin dövme ve ısıl işlem sonuçları

Dövme işlemine tabi tutulmuş döküm yarı mamul profilin T6 ısıl işlem öncesi tane yapısı Şekil 5.1’ de verilmiştir.



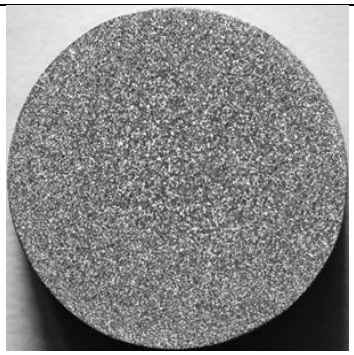
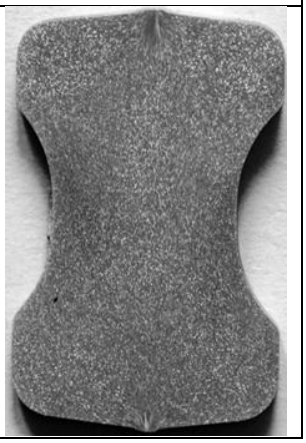
Şekil 5.1. Döküm profilden dövülmüş ve ısıl işlem görmemiş parçanın kesit boyunca tane yapısı

Döküm profilden dövülmüş parça 520 °C' de 4 saat çözeltiye alma ısıl işlemine ve 180 °C' de 8 saat yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. T6 ısıl işlemi sonucunda dökümden dövülen parçada tane irileşmesi mekanizması oluşmamış, eş eksenli döküm yapısı yine tüm yapıya hakim olmuştur. Sadece belirli kesit bölgelerinde dövme akış doğrultusunda eş eksenli tanelerde yassılaşmalar meydana gelmiştir. Döküm yarı mamulden dövülmüş ve devamında T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş parçanın kesit makro yapısı ve tane yapıları Şekil 5.2' de verilmiştir.



Şekil 5.2. (a) EN AW 6082 den dövülen alüminyum rotilli kolun bir bölümü, (b) kesit makro yapısı, (c, d, e) parça üzerinde işaretlenmiş yerlerin kesit tane yapıları

Döküm yarı mamulün ilk halinin, dövme sonrasının ve ısıl işlem sonrasının kesit makro yapısı Şekil 5.3' de verilmiştir.

	Dövme öncesi	Dövme sonrası	T6 sonrası
Doğrudan Soğutmalı Döküm profil			

Şekil 5.3. Doğrudan Soğumalı Döküm profilden dövülen alüminyum rotilli kol parçasının üretim aşamalarındaki tane yapısı gelişimi

Döküm profilin ilk halinin, dövme sonrasının ve ısıl işlem sonrasının sertlik değerleri Çizelge 5.1' de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Doğrudan Soğutmalı Döküm ürününün üretim aşamaları sonrası sertlik değerleri

Doğrudan Soğutmalı Döküm	HV
Döküm hali	45,7 ± 0,6
Dövme sonrası	51 ± 1
T6 sonrası	112 ± 1

Doğrudan Soğutmalı Döküm yöntemiyle üretilmiş biyetden tel erozyon yöntemiyle çıkarılmış profillerin dövülmesiyle elde edilen parçanın T6 ısıl işlemi sonrası elde edilen nihai üründen 3 adet çekme çubuğu çıkartılmıştır.

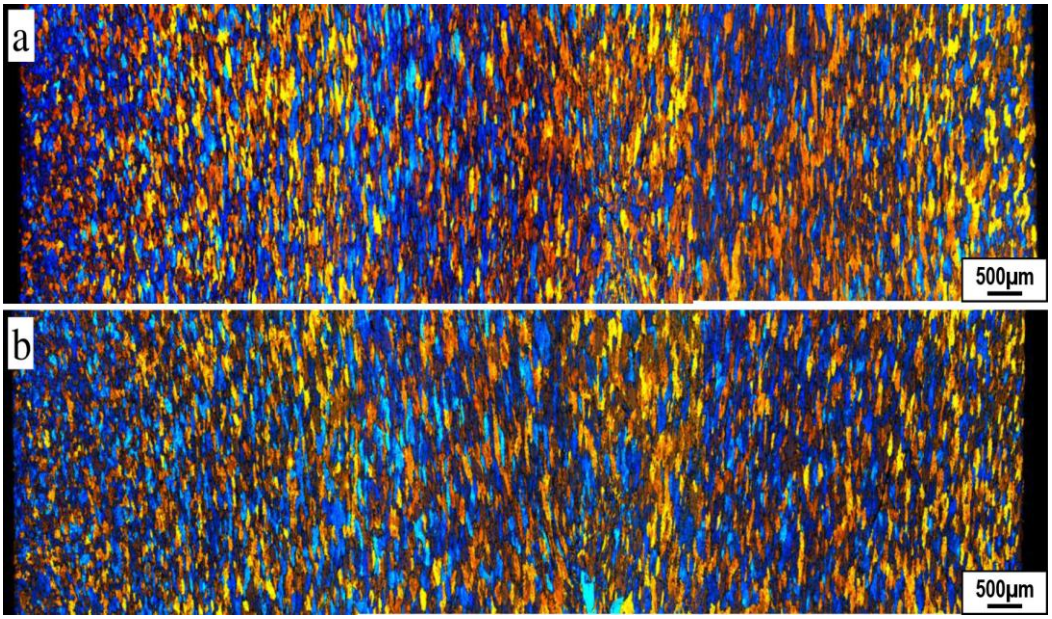
Çekme testi sonucunda elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % kopma uzaması değerleri Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Doğrudan Soğutmalı Döküm yönteminden elde edilen profillerin dövülmesiyle elde edilen parçaların T6 sonrası çekme testi sonuçları

	Akma dayanımı, MPa	Çekme dayanımı, MPa	Kopma uzaması %
Numune 1	329	344	11,8
Numune 2	310	326	7,6
Numune 3	311	333	10,1
Ortalama	317	334	10

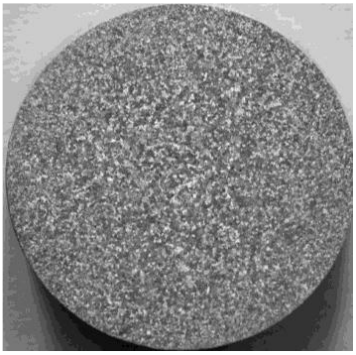
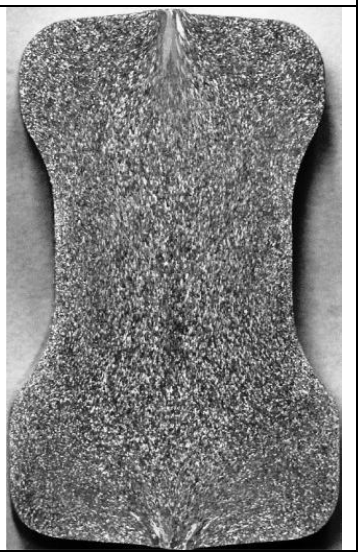
5.1.2. Soğutma Plakasından Döküm metoduyla üretilmiş profillerin dövme ve ısıl işlem sonuçları

Soğutma Plakasından Döküm yöntemi ile üretilmiş profilden dövülen parça daha sonra 520 °C' de 4 saat çözeltiye alma, su verme ve 180 °C' de 8 saat yaşlandırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Isıl işlem sonrası tıpkı Doğrudan Soğutmalı Döküm yönteminden elde edilen sonuçlar gibi tane irileşmesi mekanizması yapının hiçbir yerinde oluşmamıştır. Parça ve kalıp geometrisine göre dövme sırasında gerçekleşen plastik akışlar kesit tane yapısında gözlemlenmektedir. Dövme ve ısıl işlem sonrası elde edilen tane yapıları Şekil 5.5' de verilmiştir.



Şekil 5.5. (a) döküm profilden dövülmüş alüminyum rotilli kolun kesit tane yapısı, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapısı

Soğutma Plakasından Döküm yöntemiyle dökülmüş profilden dövülmüş parçanın T6 sonrasının ve dövme öncesi döküm halinin kesit makro yapıları Şekil 5.6' da verilmiştir.

	Dövme öncesi	T6 sonrası
Soğutma Plakasından Döküm Profil		

Şekil 5.6. Soğutma Plakasından Döküm profilden dövülen alüminyum rotilli kol parçasının üretim aşamalarındaki tane yapısı gelişimi

Soğutma Plakasından Döküm yöntemiyle üretilmiş profillerin homojen tav uygulanmadan önceki, homojen tavlı, dövülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlarının sertlik ölçüm değerleri Çizelge 5.3' de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Soğutma Plakasından Döküm ürününün üretim aşamaları sonrası sertlik değerleri

Soğutma Plakasından Döküm	HV
Dökülmüş homojenizasyon görmemiş	56 ± 2
Dökülmüş homojen tav görmüş	42 ± 1
Dövme sonrası	49 ± 1
T6 sonrası	110 ± 3

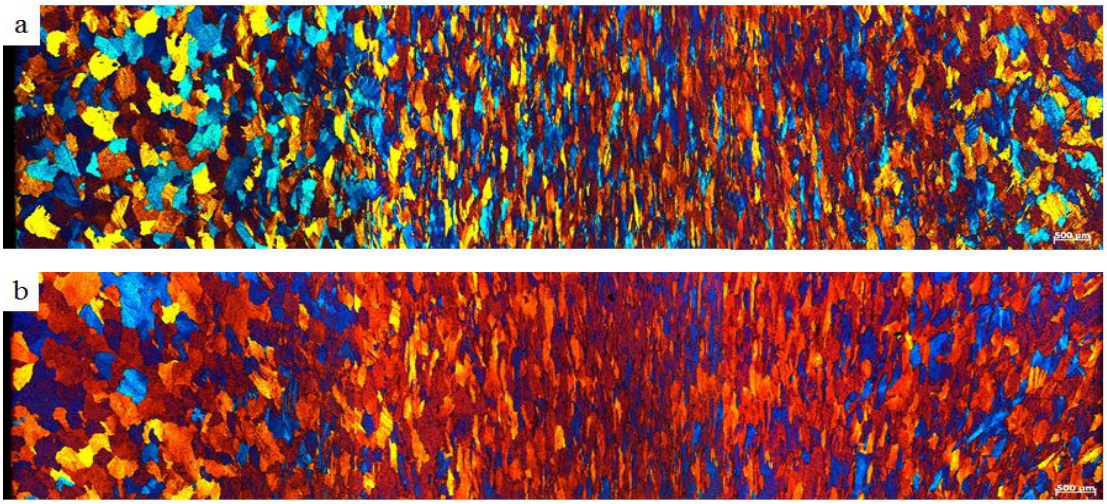
Soğutma Plakasından Döküm yöntemiyle üretilmiş profillerden dövülmüş ve T6 ısıl işlemi görmüş parçalardan çıkarılan çekme çubukları ile yapılan çekme testi sonuçları Çizelge 5.4' de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Soğutma Plakasından Döküm yönteminden elde edilen profillerin dövülmesiyle elde edilen parçaların T6 sonrası çekme testi sonuçları

	Akma dayanımı, MPa	Çekme dayanımı, MPa	Kopma uzaması %
Numune 1	126	130	2,0
Numune 2	132	138	1.85
Ortalama	129	134	1,92

5.1.3. All-Round® ismine sahip tescilli profillerin dövme ve ısıl işlem sonuçları

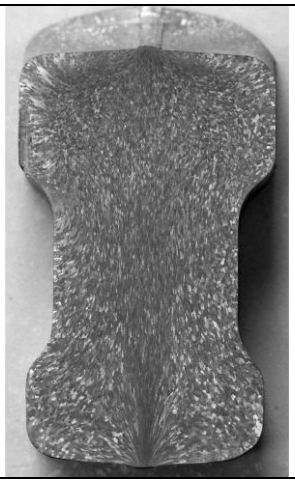
All-Round® markalı profillerden dövülmüş parçanın ve devamında T6 ısıl işlemi uygulanmış parçanın kesit tane yapıları Şekil 5.7' de verilmiştir.



Şekil 5.7. (a) All-Round döküm profilden dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrasındaki kesit tane yapıları

All-Round® döküm profillerin dövme sonrasında döküm tane yapısının plastik akma dışında büyük ölçüde korunduğu gözlemlenmektedir. Isıl işlem sonrasında ise özellikle plastik akmanın şiddetli olduğu yerlerde bir miktar tane büyümesi görülmüş fakat alarm verici boyutlarda olmadığına kanaat getirilmiştir. Bu örneklerin kesit yapıları daha önce incelenen Doğrudan Soğutmalı Döküm ve Soğutma Plakasından Döküm seçenekleriyle benzer özellikler teşkil etmiştir. All-Round® döküm profillerin diğer seçeneklerden belirgin bir üstünlüğü bulunmamakla birlikte döküm profil seçeneklerinin hepsinde tane büyümesi sorununun yaşanmayacağı ortaya konmuştur.

All-Round® döküm profilden dövülmüş parçanın ve T6 sonrasının makro yapı görüntüleri Şekil 5.8' de verilmiştir.

	Dövme sonrası	T6 sonrası
All-Round® profil		

Şekil 5.8. All-Round® profilden dövülen alüminyum rotilli kol parçasının üretim aşamalarındaki tane yapısı gelişimi

All-Round® döküm profilden dövülen parçaların ilk döküm halinin, dövme ve T6 sonrası sertlik ölçüm değerleri Çizelge 5.5' de verilmiştir.

Çizelge 5.5. All-Round® ürününün üretim aşamaları sonrası sertlik değerleri

All-Round®	**HV**
Döküm hali	49 ± 1,4
Dövme sonrası	45,6 ± 1
T6 sonrası	104,3 ± 1

All-Round® döküm profillerden dövülmüş ve T6 ısıl işlemi görmüş parçalardan çıkarılan çekme çubukları ile yapılan çekme testi sonuçları Çizelge 5.6' da verilmiştir.

Çizelge 5.6. All-Round® döküm profillerin dövülmesiyle elde edilen parçaların T6 sonrası çekme testi sonuçları

	Akma dayanımı, MPa	**Çekme dayanımı, MPa**	**Kopma uzaması %**
Numune 1	257	322	11
Numune 2	264	332	14
Numune 3	254	332	15
Ortalama	258	328	13

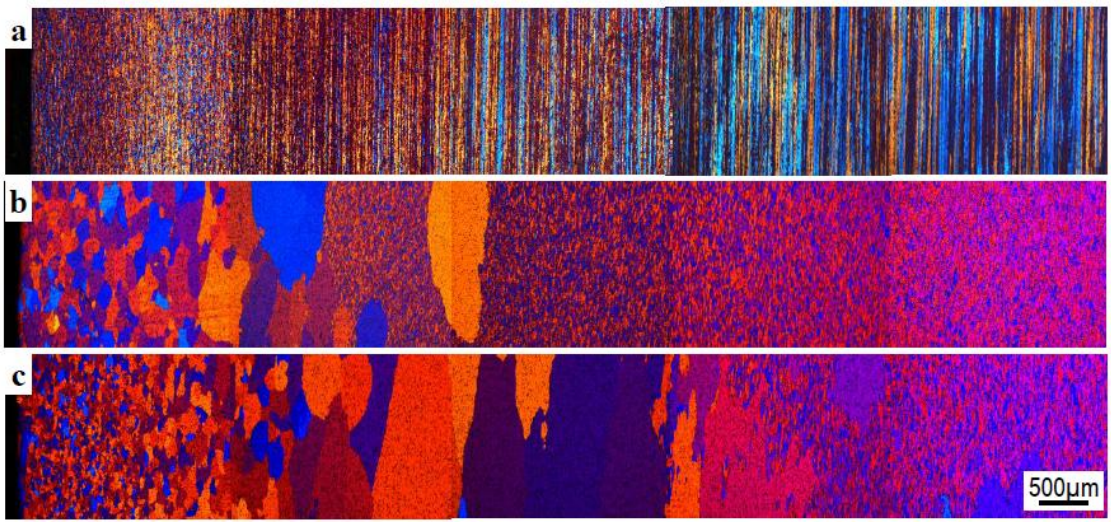
5.2. Dövme Üretiminde Kullanılan Ekstrüzyon Yarı Mamul Seçeneğinin Nihai Parçaya Etkisi

Dövme üretiminde kullanılacak yarı mamulde ikinci seçenek olarak mevcut üretimde kullanılan ekstrüde edilmiş profillerin üretim şartları optimize edilerek

ekstrüde edilmiş profilden dövülen parçaların ısıl işlemi sonrası tüm yapıyı kaplayan aşırı büyümüş tanelerin engellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıklarının, alaşıma Cr elementi ilavesinin ve düşük ekstrüzyon oranının etkileri araştırılmıştır. Yapılan iyileştirme çalışmaları sonucunda aşırı tane büyümesi engellenmiş, tane irileşmesi bandı sonlu derinlikte oluşturulmuş fakat döküm seçeneğinde olduğu gibi tane irileşmesi mekanizması tamamen ortadan kaldırılamamıştır. Bunun sebebi olarak alüminyum dövme üretiminde deformasyon miktarının, imalat sıcaklık değerlerinin, alaşım içeriğinin ve ısıl işlem parametrelerinin tane yapısına doğrudan etkisi olduğu söylenebilir. Aynı zamanda dövmede kullanılan yarı mamulün üretimi sırasında bünyesinde oluşan deformasyon enerjisinin de tane irileşmesi mekanizmasını en çok tetikleyen unsurlardan birisi olduğu ortaya konmuştur. Farklı üretim parametreleriyle ekstrüde edilmiş yarı mamul profillerde tıpkı döküm profilden dövülen parçalarda olduğu gibi aynı ön ısıtma fırınında ısıtılmış, aynı mekanik pres de dövülmüş ve aynı şartlarda ısıl işleme tabi tutulmuştur.

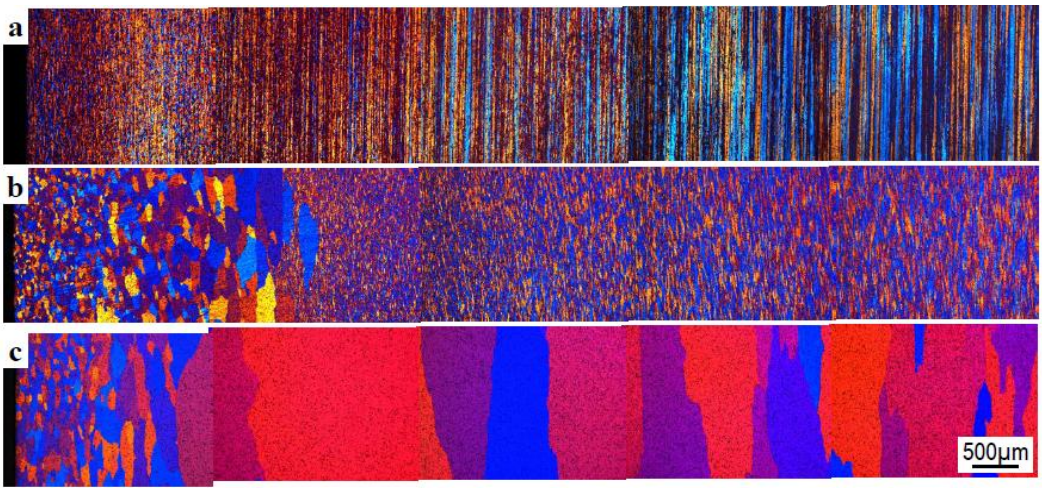
5.2.1. Ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığının dövme ve ısıl işlem sonuçlarına etkisi

Ekstrüzyon işleminde presten 470 °C' de çıkan ve daha sonra 500 °C' de dövülen profilin kesit tane yapısı Şekil 5.9 (a)' da görülmektedir. Bu şartlarda ekstrüzyon deformasyonu ile incelip uzayan ipliksi tanelerin tüm kesitte korunduğu ve yüzey bölgelerinde bile, 6082 alaşımlarında sıklıkla rastlanan bir yeniden kristalleşme tabakasının oluşmadığı görülmektedir. Ancak profil kesit yapısı dövme işlemi sırasında tamamen değişmektedir (Şekil 5.9 - b). Tüm kesit yeniden kristalleşmiş, yüzey bölgelerinde yeni kristaller büyümeye uğramıştır. Bu yapı, T6 ısıl işleminin çözeltiye alma tavı adımında bir miktar daha değişmiş ve tane büyümesi devam etmiştir (Şekil 5.9 - c).

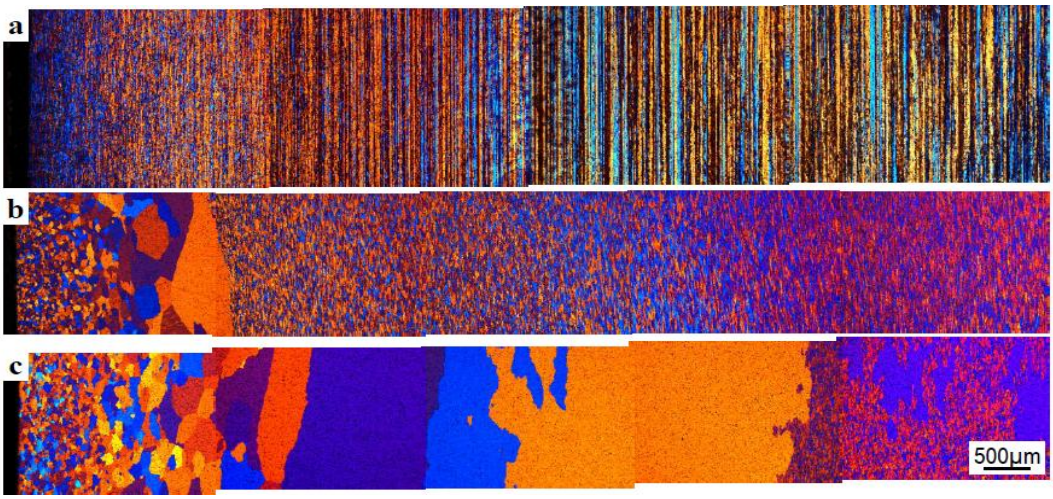


Şekil 5.9. 470 °C pres çıkış sıcaklığında üretilen profilin (a), bu profilden 500 °C'de dövülen (b) ve daha sonra T6 ısıl işlemi uygulanan (c) rotilli kol parçasının kesit tane yapıları

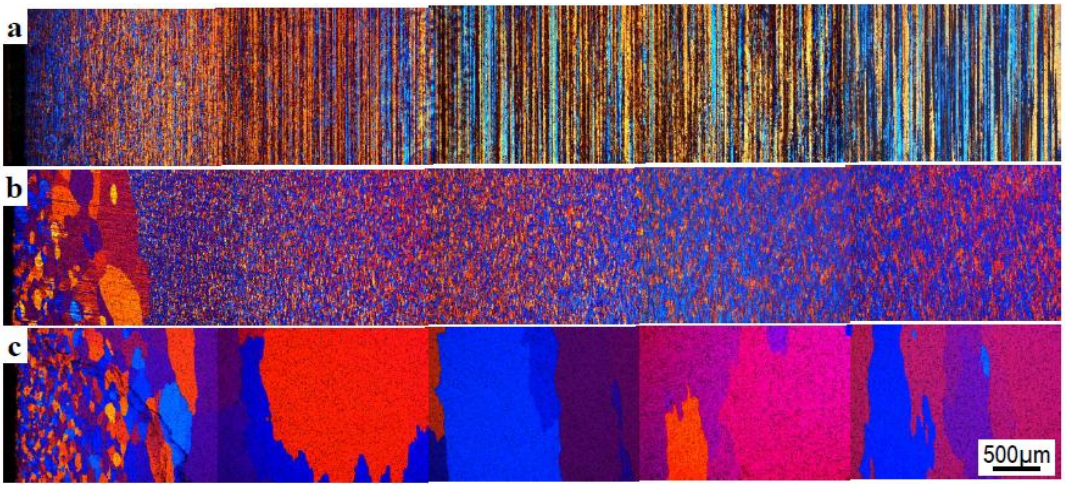
Ekstrüzyon işlemi benzer şekilde uygulanan fakat 500 °C yerine 430 °C' de dövülen profilin kesit yapısı ekstrüzyon ve dövme işlemleri sonrasında büyük ölçüde benzerdir (Şekil 5.10 a - b). Ancak bu parçada T6 ısıl işlemi sonrasında tüm kesit iri tanelidir (Şekil 5.10 - c). 490 °C ve 520 °C pres çıkış sıcaklıklarında basılan yuvarlak profillerin ve bu profillerden 430 °C ve 500 °C' de dövülen rotilli kol parçasının dövme işlemi ve T6 ısıl işlemi sonrasındaki kesit tane yapıları sırası ile Şekil 5.11, 5.12, 5.13 ve 5.14' de verilmektedir.



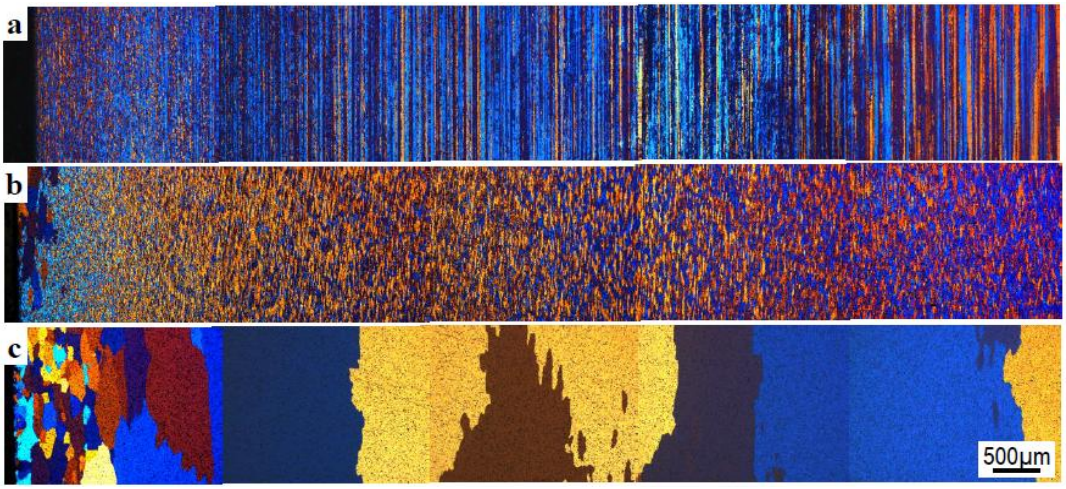
Şekil 5.10. 470 °C pres çıkış sıcaklığında üretilen profilin (a), bu profilden 430 °C' de dövülen (b) ve daha sonra T6 ısıl işlemi uygulanan (c) rotilli kol parçasının kesit tane yapıları



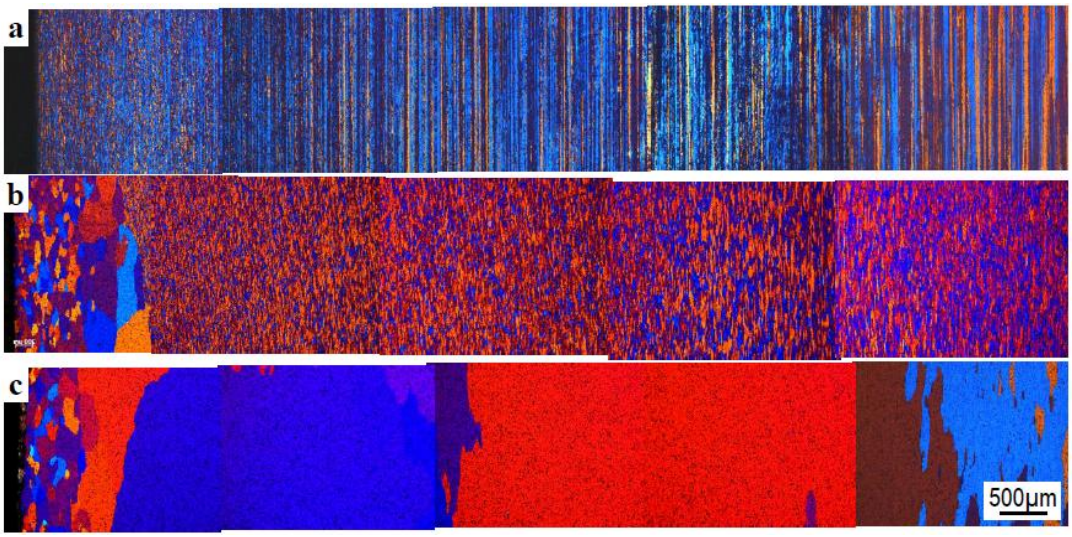
Şekil 5.11. 490 °C pres çıkış sıcaklığında üretilen profilin (a), bu profilden 500 °C' de dövülen (b) ve daha sonra T6 ısıl işlemi uygulanan (c) rotilli kol parçasının kesit tane yapıları



Şekil 5.12. 490 °C pres çıkış sıcaklığında üretilen profilin (a), bu profilden 430 °C' de dövülen (b) ve daha sonra T6 ısıl işlemi uygulanan (c) rotilli kol parçasının kesit tane yapıları



Şekil 5.13. 520 °C pres çıkış sıcaklığında üretilen profilin (a), bu profilden 500 °C' de dövülen (b) ve daha sonra T6 ısıl işlemi uygulanan (c) rotilli kol parçasının kesit tane yapıları



Şekil 5.14. 520 °C pres çıkış sıcaklığında üretilen profilin (a), bu profilden 430 °C' de dövülen (b) ve daha sonra T6 ısıl işlemi uygulanan (c) rotilli kol parçasının kesit tane yapıları

470 °C, 490 °C ve 520 °C pres çıkış sıcaklıklarında üretilen profillerin kesit tane yapıları ekstrüzyon deformasyon yapısının büyük ölçüde korunduğunu, yeniden kristalleşmenin kesitin büyük bir bölümünde yaşanmadığını göstermektedir. Bununla birlikte profil yüzey bölgesinde tane yapısı karakteri kesit içindekinden farklıdır. İpliksi taneler burada yerini çok küçük eş eksenli tanelere bırakmıştır. Ancak bu aşamada bir tane büyümesi söz konusu değildir. Buna karşın deneme koşullarının tümünde dövme işleminden çıkan parçaların kesit düzlemlerinde ekstrüzyon deformasyon yapısının yerini yeniden kristalleşmiş eş eksenli ve küçük taneli bir yapıya bıraktığı görülmektedir. Bu durum düşük dövme sıcaklığında gerçekleştirilen denemelerde de bu şekildedir. Üstelik yeniden kristalleşmenin tamamlanmasından sonra yüzey bölgesinde tane büyümesi başlamıştır. Fakat kesit tane yapısında en çarpıcı değişiklik T6 ısıl işleminden sonra meydana gelmektedir. Dövme işlemi sırasında oluşan yeni taneler aşırı büyüyerek iri taneli bir yapıya neden olmuştur. Tane büyümesini henüz dövme işleminde yaşayan yüzey bölgeleri iç enerjilerini erkenden tüketmiş olduklarından çözeltiye alma tavı sırasında meydana gelen tane büyümesi en çok kesit yapısını etkilemiştir.

470 °C - 520 °C aralığında pres çıkış sıcaklıklarında profil kesit yapısında ekstrüzyon deformasyon yapısı büyük ölçüde korunmuştur. Sadece yüzeyde sonlu derinlikte bir kesit bölgesinde yeniden kristalleşme yaşanmıştır.

470 °C ile 520 °C aralığında pres çıkış sıcaklıklarında üretilen profillerin tümünde dövme işlemi sonrasında yeniden kristalleşme gerçekleşmiş ve ayrıca yüzey

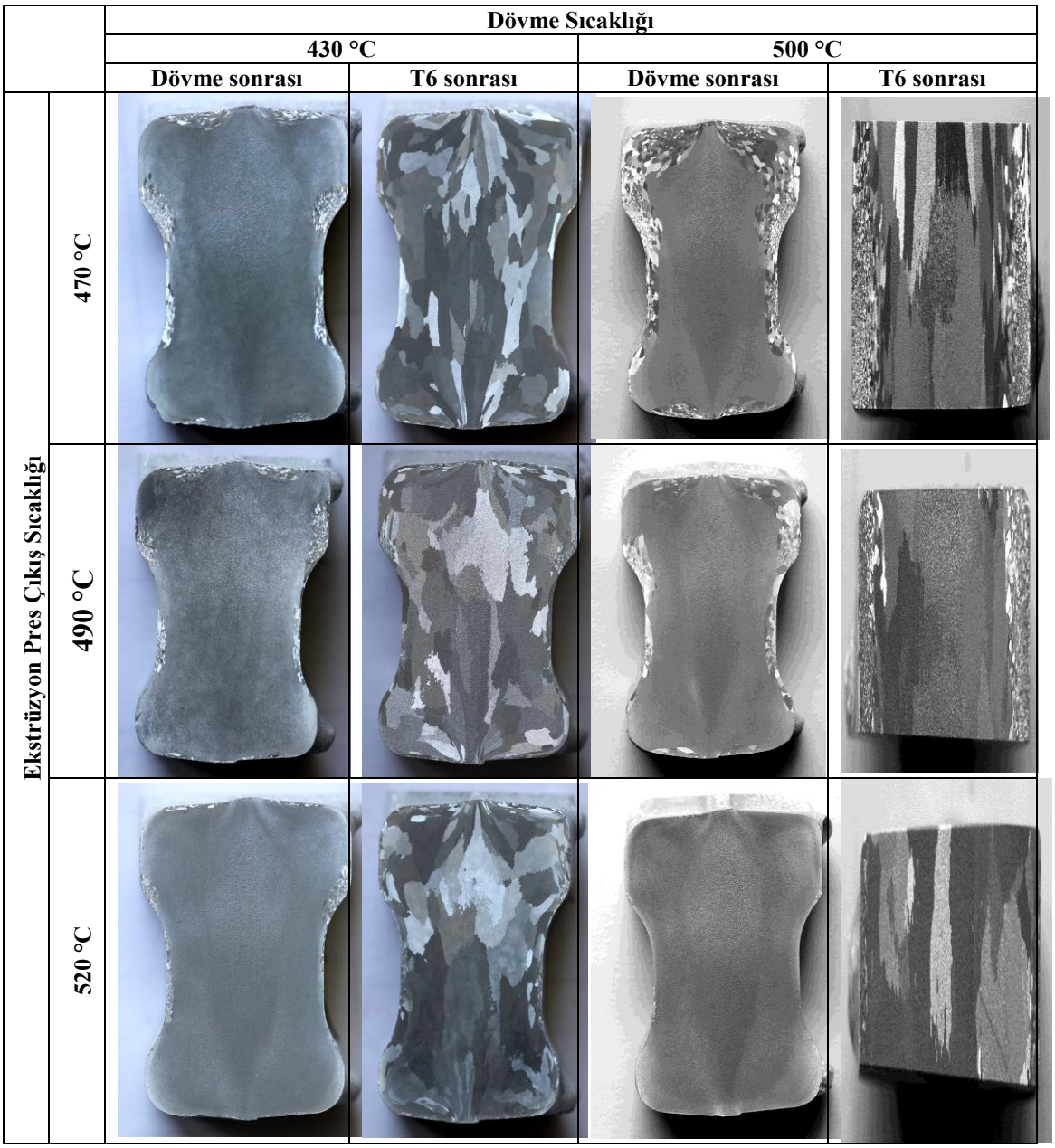
bölgesinde yeni taneler büyümeye uğramıştır. Kesit tane yapısı dövme aşamasında bozulmaktadır.

T6 ısıl işlemi sırasında tüm kesitte tane büyümesi başlamıştır. Çözeltiye alma sonrasında tüm dövme parçalarda kesit yapısı iri tanelidir.

Denemelerde incelenen parametrelerin dövme işlemi ve T6 ısıl işlemi sonrasındaki tane yapılarına etkisi dikkate alındığında pres çıkış sıcaklıklarından 520 °C' nin daha düşük pres çıkış sıcaklıklarından, 500 °C' deki dövme işleminin 430 °C' deki dövme işleminden daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

Standart 6082 alaşımında mevcut Mn oranı tane büyümesi kontrolü için yeterli olmamaktadır. Dispersoid tanecikler oluşturarak dövme ve T6 ısıl işlemi sırasında tane sınırlarının hareketini yavaşlatması ve böylece tane büyümesini kontrol etmesi için Mn' dan başka Cr ve Zr gibi geçiş elementlerinden yararlanmak gerektiği düşünülmektedir.

Ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıkları farklı olan profillerin farklı dövme sıcaklıklarında dövülen parçaların T6 ısıl işlem sonrası kesit makro yapı görüntüleri Şekil 5.15' de verilmiştir.



Şekil 5.15. Ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıkları farklı olan profillerin farklı dövme sıcaklıklarında dövme ve T6 sonrası kesit makro yapıları

Ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıkları farklı olan profillerden 430 °C ve 500 °C' de dövülen parçaların T6 ısıl işlem sonrası elde edilen sertlik değerlerinin sonuçları Çizelge 5.7' de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Farklı ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıklarına sahip profillerden farklı dövme sıcaklıklarında dövülmüş parçaların T6 sonrası sertlik değerleri

		Dövme Sıcaklığı	
		430 °C	500 °C
		T6 sonrası	T6 sonrası
		HV	HV
Ekstrüzyon Pres Çıkış Sıcaklığı	470 °C	115 ± 3	113 ± 3
	490 °C	107 ± 3	105 ± 2
	520 °C	106 ± 2	105 ± 3

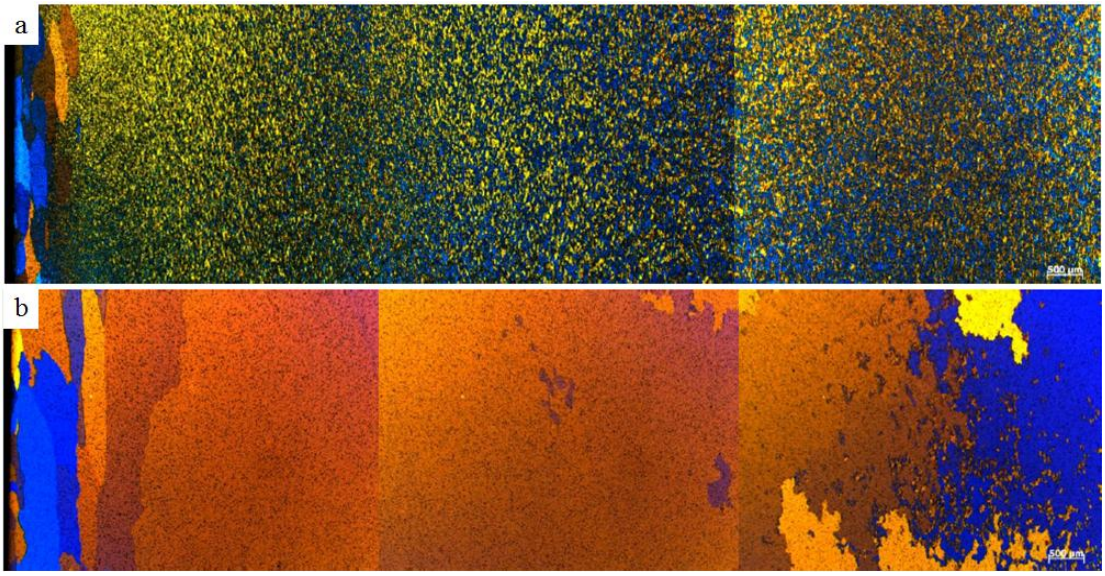
Ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıkları farklı olan profillerin 500 °C' de dövülmüş örnekleri imalat açısından daha uygulanabilir olmasından dolayı çekme çubukları 500 °C' de dövülmüş örneklerin T6 ısıl işlemi görmüş parçalarından çıkarılmıştır. Her bir örnekten 3' er adet çıkarılan çekme çubukları ile yapılan çekme testinin ortalama değer sonuçları Çizelge 5.8' de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Ekstrüzyon pres çıkış ve dövme sıcaklıkları farklı olan parçalardan çıkarılan çekme numunelerinin T6 sonrası çekme testi sonucu

		Dövme Sıcaklığı		
		500 °C		
		T6 sonrası		
		Akma dayanımı MPA	Çekme dayanımı MPa	Kopma uzaması %
Ekstrüzyon Pres Çıkış Sıcaklığı	470 °C	302	315	12,3
	490 °C	303	313	11,24
	520 °C	305	333	9,86

5.2.2. EN AW 6082 alaşımına Cr elementi ilavesinin dövme ve ısıl işlem sonuçlarına etkisi

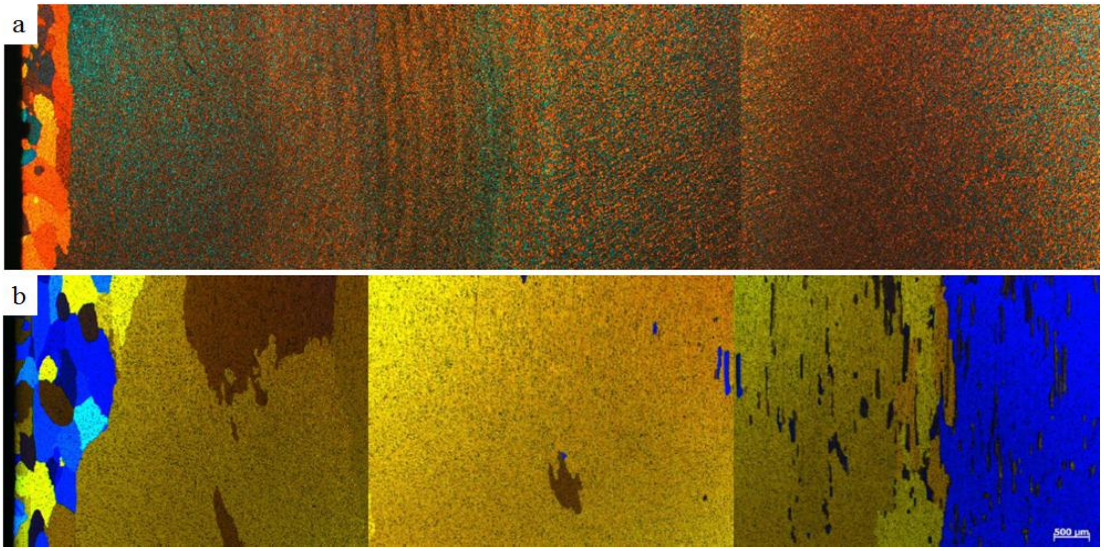
480 °C pres çıkış sıcaklığına sahip ekstrüde edilmiş profil, ön ısıtma tünel fırınında ısıtılarak 430 °C' de dövülmüştür. Dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçaların kesit tane yapıları Şekil 5.16' da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. 480 °C' de ekstrüde edilen profilden (a) 430 °C' de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

Şekil 5.16' da görüldüğü gibi dövülmüş parçada yeniden kristalleşmiş taneler oluşmuş, yüzeyden sonlu derinlikte tane büyümeleri meydana gelmiştir. Isıl işlem sonrası ise irileşmiş taneler tüm yapıyı kaplamışlardır. Her ne kadar alaşıma Cr ilavesi yapılmış olsa da ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı ve dövme sıcaklığının düşük olmasından dolayı tane irileşmesi mekanizması devam etmiştir.

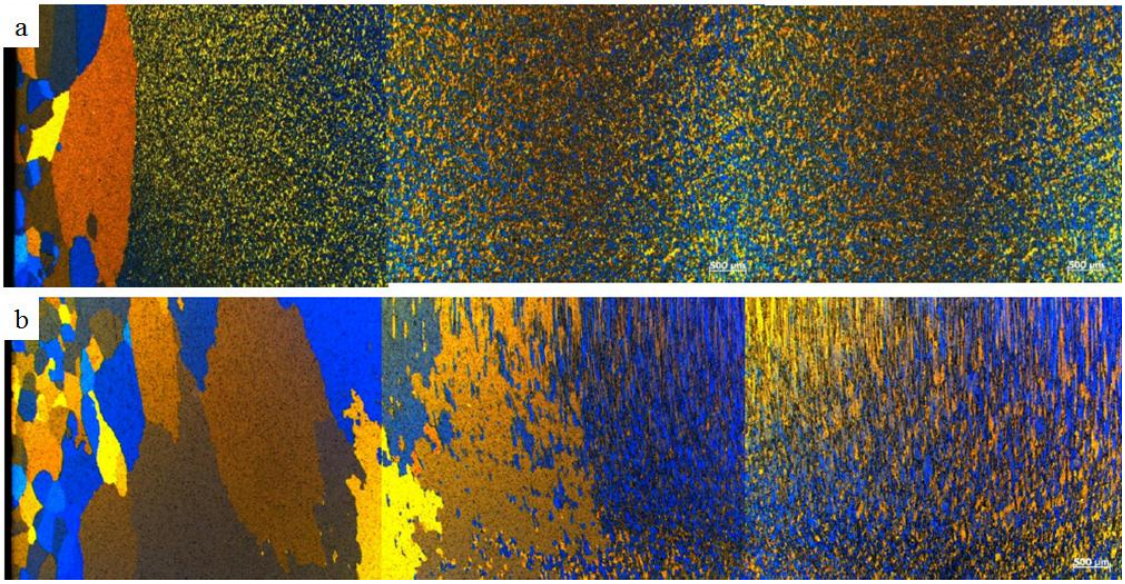
500 °C pres çıkış sıcaklığına sahip ekstrüde edilmiş profil, ön ısıtma tünel fırınında ısıtılarak 430 °C' de dövülmüştür. Dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçaların kesit tane yapıları Şekil 5.17' de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. 500 °C' de ekstrüde edilen profilden (a) 430 °C' de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

Şekil 5.17’ de görüldüğü gibi dövme sonrasında yine yeniden kristalleşme reaksiyonu gerçekleşmiş ve devamındaki ısıl işlemden sonra tane irileşmeleri tüm yapıya hakim olmuştur. Dövme sıcaklığı sabit tutularak ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı 500 °C’ ye arttırılan profilden dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçalarda herhangi bir değişiklik olmamış ve tane irileşmeleri devam etmiştir.

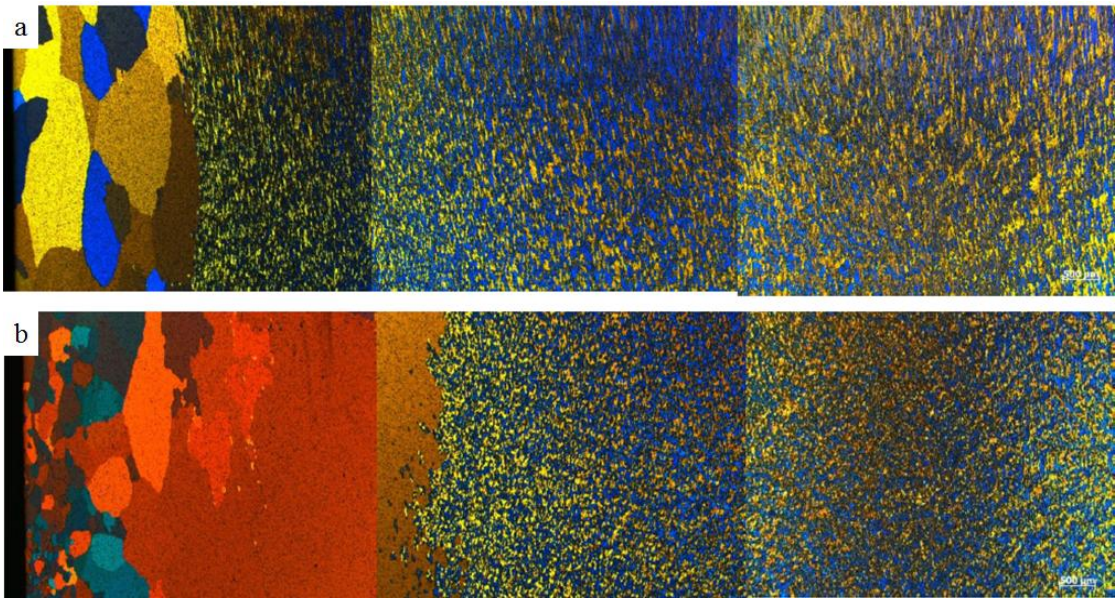
530 °C pres çıkış sıcaklığına sahip ekstrüde edilmiş profil, ön ısıtma tünel fırınında ısıtılarak 430 °C’ de dövülmüştür. Dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçaların kesit tane yapıları Şekil 5.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. 530 °C’ de ekstrüde edilen profilden (a) 430 °C’ de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

Şekil 5.18’ de görüldüğü gibi ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı 530 °C’ ye arttırıldığı zaman ısıl işlem sonrasındaki tane irileşmesi mekanizması tüm yapıyı kaplamamış, sonlu derinlikte elde edilmiştir. Ekstrüzyondan dövme parçalarda ilk kez bu parametrelerde başarılı sonuçlar elde edilerek, tane irileşmesi mekanizması oluşmuş olsa da tüm yapıyı kaplamadan ilerlemesi durdurulmuştur. Uygun sıcaklıklarda çalışılınca Cr elementinin etkisi gözlemlenmeye başlamıştır.

555 °C pres çıkış sıcaklığına sahip ekstrüde edilmiş profil, ön ısıtma tünel fırınında ısıtılarak 430 °C’ de dövülmüştür. Dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçaların kesit tane yapıları Şekil 5.19’ da gösterilmiştir.

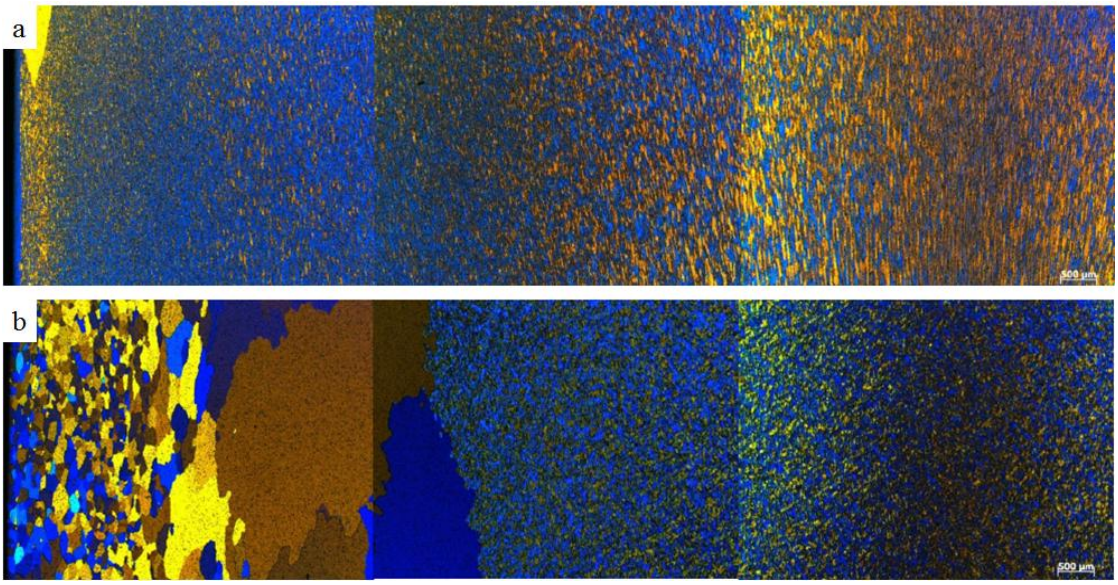


Şekil 5.19. 555 °C' de ekstrüde edilen profilden (a) 430 °C' de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

Şekil 5.19' da görüldüğü gibi ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı 555 °C' ye arttırıldığı zaman ısıl işlem sonrası kesit tane yapısında tane irileşmesi 530 °C' de ekstrüde edilmiş örneğe göre yaklaşık 1,5 mm daha geriden durdurulmuştur. Bu zamana kadar ki yapılmış olan çalışmalarda tek başına ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığının ve tek başına Cr elementi ilavesinin etkili olmadığı, sadece iki parametrenin birden uygun değerlerde uygulandığında başarılı olduğu anlaşılmıştır.

Cr ilaveli profillerin üretim şartlarında sıcaklık değerlerindeki artışın tane irileşmesi mekanizmasında uygun sonuçlar verdiği görülünce, farklı ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıklarına sahip profiller bu sefer 430 °C' de değil 500 °C' de dövme işlemine tabi tutulmuştur.

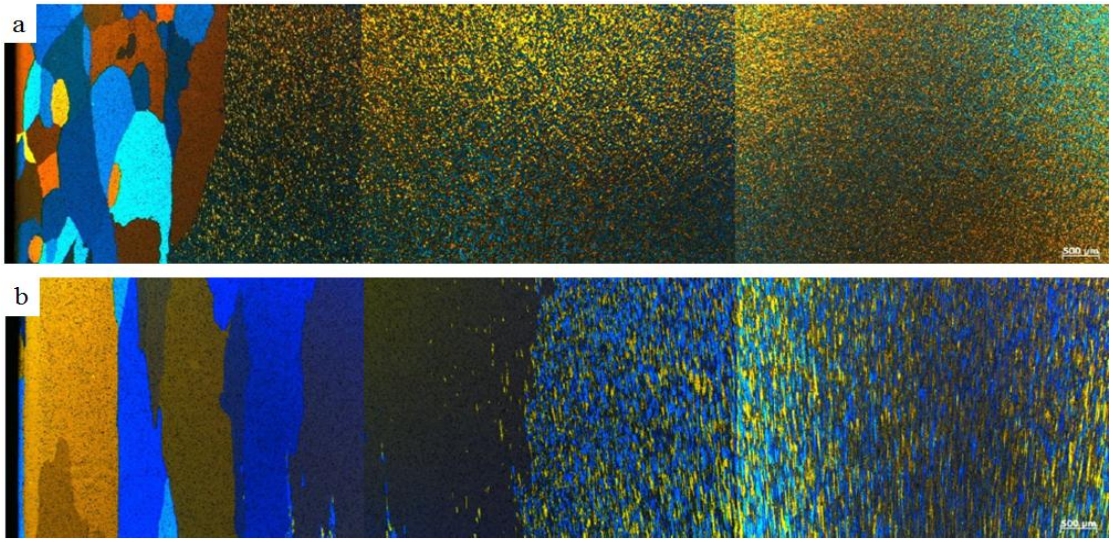
480 °C pres çıkış sıcaklığına sahip ekstrüde edilmiş profil, ön ısıtma tünel fırınında ısıtılarak 500 °C' de dövülmüştür. Dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçaların kesit tane yapıları Şekil 5.20' de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. 480 °C' de ekstrüde edilen profilden (a) 500 °C' de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

Şekil 5.20' de görüldüğü gibi ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı 480 °C olan profilin dövme sıcaklığı 430 °C' den 500 °C' ye çıkarıldığı zaman tane yapısında bariz bir iyileşme görülmüştür. Isıl işlemden sonra tane büyümesi sonlu derinlikte gerçekleşmiş ve tüm yapıyı kaplamamıştır. 480 °C' de ekstrüde edilen profilin 430 °C' de dövülmesiyle elde edilen parçada ısıl işlem sonrası tüm kesitte tane irileşmesi meydana gelmişken, 480 °C' de ekstrüde edilen profilin 500 °C' de dövülmesiyle elde edilen parçada tane irileşmesi sonlu derinlikte oluşmuştur. Dövme sıcaklığı artışında elde edilen bu olumlu sonuçlar çerçevesinde 500 °C dövme sıcaklığı parametresi ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıkları farklı olan diğer profillere de uygulanmıştır.

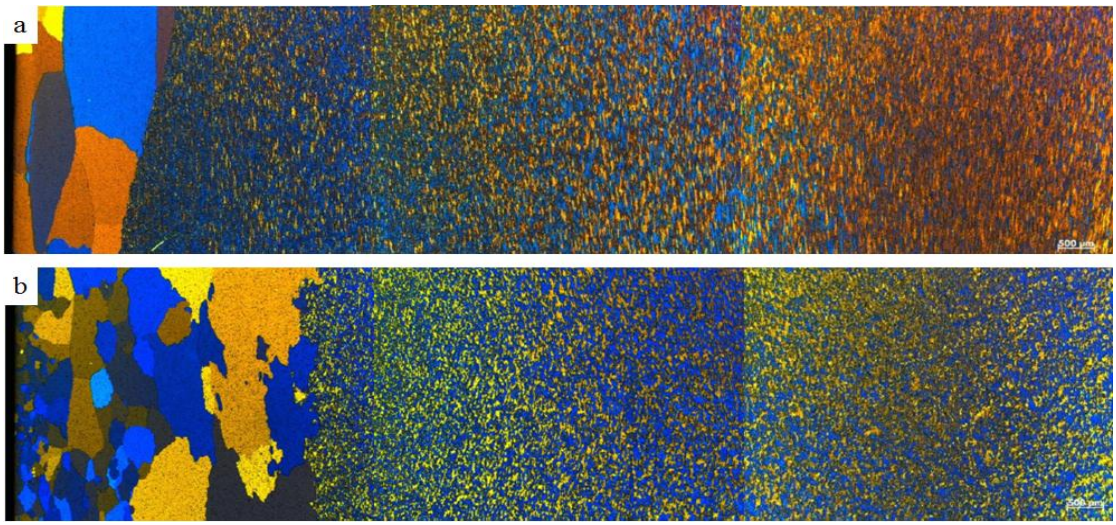
500 °C pres çıkış sıcaklığına sahip ekstrüde edilmiş profil, ön ısıtma tünel fırınında ısıtılarak 500 °C' de dövülmüştür. Dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçaların kesit tane yapıları Şekil 5.21' de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. 500 °C' de ekstrüde edilen profilden (a) 500 °C' de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

Şekil 5.21' de görüldüğü gibi ısıl işlem sonrasında tane irileşmesi mekanizması yine sonlu derinlikte oluşmuş fakat yapıdaki aşırı büyümüş taneler bir mühendislik malzemesi için risk oluşturacak boyutlardadır. 480 °C' de ekstrüde edilmiş profilin 500 °C' de dövülmesi ile 500 °C' de ekstrüde edilmiş profilin 500 °C' de dövülmesi arasında aşırı büyümüş tanelerin kesitteki derinliği arasında belirgin bir fark oluşmamıştır.

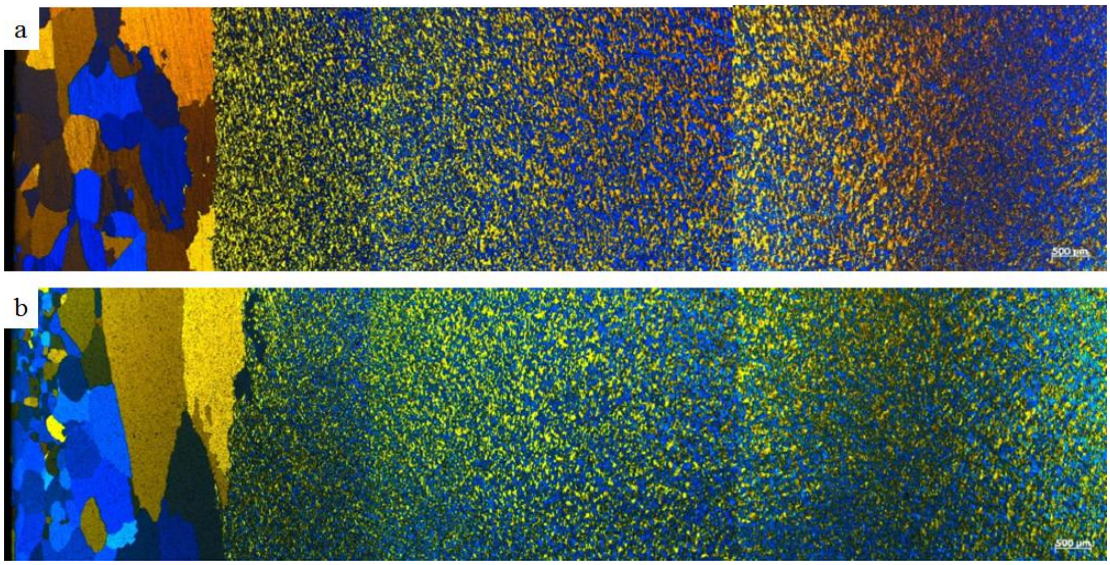
530 °C pres çıkış sıcaklığına sahip ekstrüde edilmiş profil, ön ısıtma tünel fırınında ısıtılarak 500 °C' de dövülmüştür. Dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçaların kesit tane yapıları Şekil 5.22' de gösterilmiştir.



Şekil 5.22. 530 °C' de ekstrüde edilen profilden (a) 500 °C' de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

Şekil 5.22’ de gösterildiği gibi ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı 530 °C olan ekstrüde edilmiş profil 500 °C’ de dövüldüğünde ısıl işlem sonrası tane irileşmesi mekanizması sonlu derinlikte oluşmuş fakat aşırı tane büyümesi reaksiyonu gerçekleşmemiştir. Ayrıca tane irileşmesi bandı da önceki örneklerden daha az derinlikte meydana gelmiştir.

555 °C pres çıkış sıcaklığına sahip ekstrüde edilmiş profil, ön ısıtma tünel fırınında ısıtılarak 500 °C’ de dövülmüştür. Dövülmüş ve ısıl işlem görmüş parçaların kesit tane yapıları Şekil 5.23’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.23. 555 °C’ de ekstrüde edilen profilden (a) 500 °C’ de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

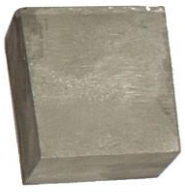
Şekil 5.23’ de gösterildiği gibi ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı 555 °C olan ekstrüde edilmiş profil 500 °C’ de dövüldüğünde ısıl işlem sonrası tane irileşmesi mekanizması sonlu derinlikte oluşmuş fakat aşırı tane büyümesi reaksiyonu gerçekleşmemiştir. Isıl işlem sonrası irileşmiş tanelerin derinliği 530 °C’ de ekstrüde edilmiş profilin 500 °C’ de dövülmesi ile elde edilen parçadan daha azdır.

Tez çalışmasının bu bölümünde Cr elementinin tane irileşmesine etkisi incelenmiş ve üretim sıcaklık parametrelerinin tek başına yeterli olmadığı gibi Cr elementinin de tek başına yeterli olmadığı anlaşılmıştır. İyileşmeler ancak Cr elementi takviyeli alaşımda uygun ekstrüzyon pres çıkış ve dövme sıcaklıkları uygulandığında elde edilmiştir. En iyi sonuçlara ekstrüzyon pres çıkış sıcaklığı en yüksek olan profilin dövme sıcaklığı arttırılarak üretilmiş olan parçada ulaşılmıştır. Tane irileşmesi mekanizmasının oluşması engellenememiş fakat sonlu derinlikte oluşturulabilmiştir.

Aynı zamanda düşük sıcaklıklarda gerçekleşen tane büyümesinin devamındaki aşırı tane büyümesi de yüksek sıcaklıklarda çalışıldığında engellenmiştir.

Tane büyümesi mekanizmasının dispersoid yapıcı Cr elementinin sayesinde ilerlemesinin engellenerek sonlu derinlikte oluşturulduğu, aşırı tane büyümesi reaksiyonunun ise yüksek sıcaklıklarda çalışıldığında parçanın deformasyon enerjisini ısıl işlemden önce tükettiğinden dolayı ısıl işlemden sonra oluşmadığı düşünülmektedir.

Cr elementi ilaveli alaşımdan üretilen biyetlerden farklı ekstrüzyon pres çıkış sıcaklıklarında basılan profillerin farklı dövme sıcaklıklarında üretilmesi çalışmasında parçalardan çıkarılan numunelerin T6 ısıl işlemi sonrasında kesit makro yapı görüntüleri Şekil 5.24' de verilmiştir.

		Dövme Sıcaklığı	
		430 °C	**500 °C**
		T6 sonrası	**T6 sonrası**
Ekstrüzyon Pres Çıkış Sıcaklığı	**480 °C**		
	500 °C		
	530 °C		
	550 °C		

Şekil 5.24. Cr elementi ilaveli alaşımdan üretilmiş profillerden farklı dövme sıcaklıklarında dövülmüş parçaların T6 sonrası kesit makro yapıları

Cr elementi ilaveli alaşımdan üretilmiş profillerden 430 °C ve 500 °C' de dövülen parçaların T6 ısıl işlem sonrası elde edilen sertlik değerlerinin sonuçları Çizelge 5.9' da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Cr elementi ilaveli alaşımdan üretilmiş profillerden farklı dövme sıcaklıklarında dövülmüş parçaların T6 sonrası sertlik değerleri

		Dövme Sıcaklığı	
		430 °C	**500 °C**
		T6 sonrası	**T6 sonrası**
		HV	**HV**
Ekstrüzyon Pres Çıkış Sıcaklığı	**480 °C**	122 ± 3	110 ± 1
	500 °C	123 ± 4	112 ± 2
	530 °C	108 ± 2	113 ± 4
	555 °C	110 ± 3	109 ± 3

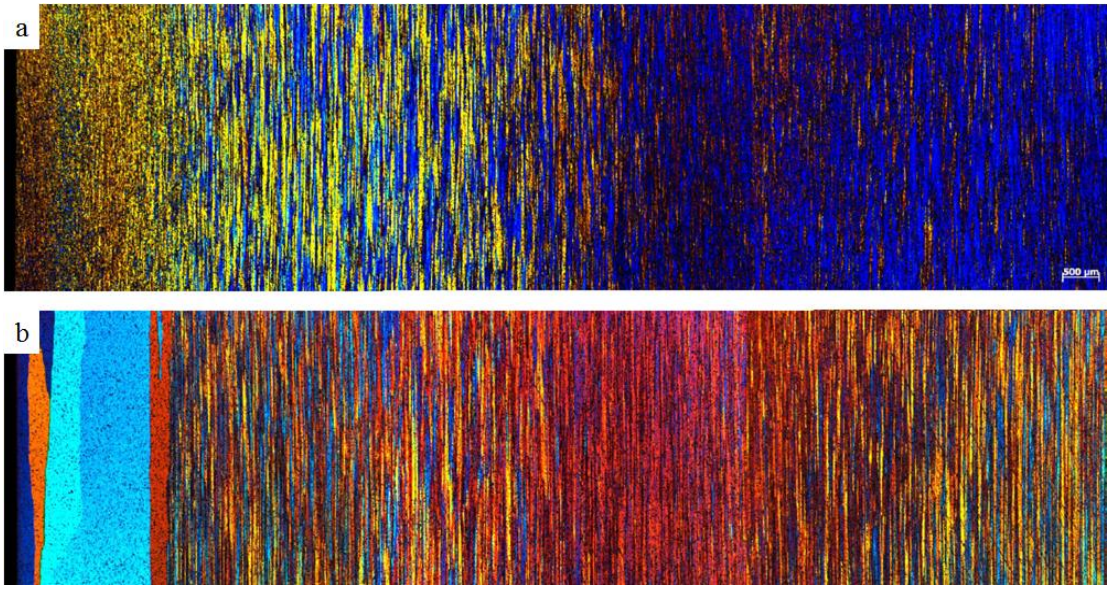
Cr elementi ilaveli olan profillerden 430 °C ve 500 °C' de dövülmüş parçalardan hepsi çekme testine tabi tutulmamış, aşırı tane büyümesi gerçekleşen ve gerçekleşmeyen parçaları temsil etmesi için 480 °C pres çıkış sıcaklığında basılan profillerin 430 ve 500 °C' de dövülen örnekleri ile 530 °C pres çıkış sıcaklığında basılan profillerin 430 ve 500 °C' de düvülen örnekleri seçilmiştir. Seçilen örneklerin T6 ısıl işlemi görmüş parçalarından çıkarılan 3' er adet çekme çubukları ile yapılan çekme testinin ortalama değer sonuçları Çizelge 5.10' da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Cr elementi ilaveli alaşımdan üretilmiş, ekstrüzyon pres çıkış ve dövme sıcaklıkları farklı olan parçalardan çıkarılan çekme numunelerinin T6 sonrası çekme testi sonucu

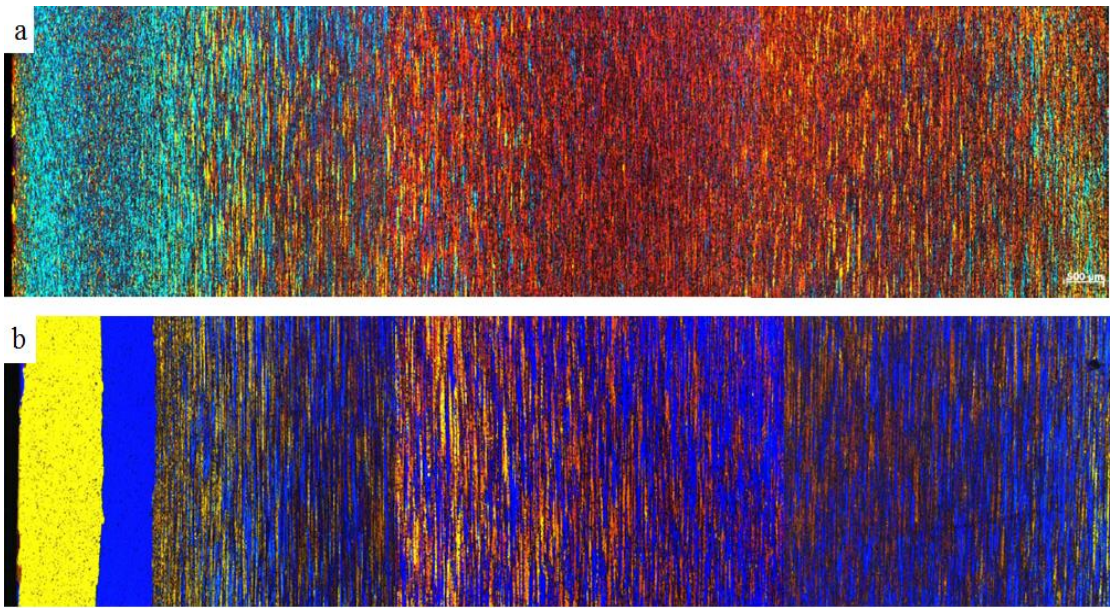
		Dövme Sıcaklığı					
		430 °C			**500 °C**		
		T6 sonrası			**T6 sonrası**		
		Akma mukavemeti MPa	**Çekme mukavemeti MPa**	**Kopma uzaması %**	**Akma mukavemeti MPa**	**Çekme mukavemeti MPa**	**Kopma uzaması %**
Ekstrüzyon Pres Çıkış Sıcaklığı	**480 °C**	284	292	13	335	350	11
	530 °C	328	348	12	330	344	11

5.2.3. Düşük ekstrüzyon oranının dövme ve ısıl işlem sonuçlarına etkisi

Ön ısıtma tünel fırınında 480 °C ve 520 °C' ye ısıtılan profiller, 1600 tonluk mekanik pres de dövülmüş ve devamında T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Parçaların dövme ve ısıl işlem sonrası kesit tane yapıları sırasıyla Şekil 5.25 ve 5.26' da verilmiştir.



Şekil 5.25. Düşük ekstrüzyon oranına sahip profilden (a) 480 °C' de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

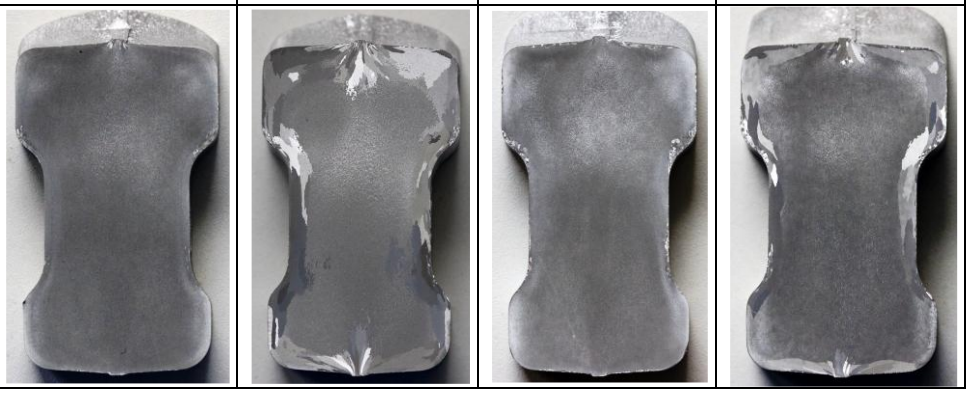


Şekil 5.26. Düşük ekstrüzyon oranına sahip profilden (a) 520 °C' de dövülmüş parçanın, (b) dövülmüş parçanın T6 sonrası kesit tane yapıları

Düşük ekstrüzyon oranında basılan profillerin kesit yapıları beklenilen türden sonuçlar göstermiştir. Ekstrüzyon oranının düşmesi bir iyileşme sağlamış, iri tane yapılı bölge derinliği azalmıştır. Dövme sıcaklığı olarak 520 °C, 480 °C' den daha üstün özellikler sergilemiştir. Fakat 520 °C' de dövülen parçada da yüzeyde yine 1.5 mm derinlikte bir iri tane bandı mevcuttur.

Sonuçlar Cr elementi ilaveli alaşımdan elde edilen sonuçlara benzer niteliktedir. Fakat düşük ekstrüzyon oranı olan örneklerde Cr elementi ilavesi olmadığını düşünürsek düşük ekstrüzyon oranı parametresinin de tek başına aşırı tane büyümesini engelleyerek tane irileşme bandınının merkeze doğru ilerlemediği anlaşılmıştır.

Düşük ekstrüzyon oranına sahip profillerden 480 °C ve 520 °C dövme sıcaklıklarında dövülen parçaların T6 ısıl işlem sonrası kesit makro yapı görüntüleri Şekil 5.27' de verilmiştir.

		Dövme Sıcaklığı			
		480 °C		**520 °C**	
		Dövme sonrası	**T6 sonrası**	**Dövme sonrası**	**T6 sonrası**
Ekstrüzyon Pres Çıkış Sıcaklığı	**510 °C – 550 °C**				

Şekil 5.27. Düşük ekstrüzyon oranına sahip profillerin farklı dövme sıcaklıklarında dövme ve T6 sonrası kesit makro yapıları

Düşük ekstrüzyon oranına sahip profillerden 480 °C ve 520 °C dövme sıcaklıklarında dövülen parçaların T6 ısıl işlem sonrası sertlik ölçüm değerleri Çizelge 5.11' de verilmiştir.

Çizelge 5.11. Düşük ekstrüzyon oranına sahip profillerden farklı dövme sıcaklıklarında dövülmüş parçaların T6 sonrası sertlik değerleri

		Dövme Sıcaklığı	
		480 °C	520 °C
		T6 sonrası	T6 sonrası
		HV	HV
Ekstrüzyon Pres Çıkış Sıcaklığı	510 °C - 555 °C	114 ± 1	111 ± 1

Düşük ekstrüzyon oranına sahip profiller işletmenin rutin üretim şartlarında 510 °C - 555 °C sıcaklık aralığındaki bir sıcaklıkta ekstrüde edilmiş ve 480 °C ve 520 °C olmak üzere iki farklı dövme sıcaklığında dövülmüştür. Çekme çubukları her iki dövme sıcaklığını temsil eden örneklerden 3' er adet çıkartılmıştır. Çekme testi sonuçlarının ortalama değerleri Çizelge 5.12' de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Düşük ekstrüzyon oranına sahip profillerden farklı dövme sıcaklıklarında dövülmüş parçalardan çıkarılan çekme numunelerinin T6 sonrası çekme testi sonuçları

		Dövme Sıcaklığı					
		480 °C			520 °C		
		T6 sonrası			T6 sonrası		
		Akma mukavemeti MPa	Çekme mukavemeti MPa	Kopma uzaması %	Akma mukavemeti MPa	Çekme mukavemeti MPa	Kopma uzaması %
Ekstrüzyon Pres Çıkış Sıcaklığı	510 °C - 555 °C	262	363	11.5	321.5	355.5	12

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular sonuç kısmında paylaşılmış, öneriler bölümünde ise bu tez çalışmasının devamı niteliğini taşıyacak tamamlayıcı unsurları konu alan uygulama örneklerinden bahsedilmiştir.

6.1 Sonuçlar

Bu tez kapsamında, ülkemizde EN AW 6082 dövme süspansiyon parçalarının üretiminde dövmeye alınan yarı mamul olarak ilk defa döküm seçeneği ele alınmıştır. Farklı döküm tekniklerinin ürünleri kullanılarak alüminyum dövme üretiminde ekstrüde edilmiş profil yerine döküm profiller tercih edilerek ulusal anlamda iyileştirilmiş bir ürün ve süreç yeniliği sağlanmıştır.

Alüminyum dövme üretiminde ekstrüde edilmiş yarı mamul profiller kullanıldığı zaman dövme ve devamındaki ısıl işlem sonucunda aşırı tane büyümesi ve tane irileşmesi mekanizmaları gerçekleşirken, döküm yarı mamuller kullanıldığı zaman tane irileşmesi olayı meydana gelmemektedir.

Aşırı tane büyümesini doğrudan etkileyen parametrelerden biri olarak, dövme üretiminde kullanılan ekstrüde edilmiş ve dökülmüş yarı mamullerin, barındırdıkları deformasyon enerjileri olduğu düşünülmektedir. Döküm yarı mamulde herhangi bir deformasyon enerjisi bulunmadığından dolayı dövme ve T6 sonrasında tane irileşmesi gerçekleşmemiştir. Fakat ekstrüde edilmiş profiller plastik şekil verme prosesi ile üretildikleri için tane irileşmesi mekanizmasını kontrol altına almak oldukça güç bir hal almıştır.

Döküm yarı mamuller seçeneklerinden dövülen ve devamında T6 ısıl işlemi gören parçaların bütün örneklerinde tane yapıları oldukça ideal oluşmuştur. Mekanik özelliklerinde ise akma ve çekme mukavemeti değerleri Doğrudan Soğutmalı Döküm ve All Round® profillerden dövülen parçalarda EN AW 6082 alaşımı için beklenen değerlerde oluşurken Soğutma Plakasından Döküm yöntemiyle elde edilen profilden dövülen ve ısıl işlem gören parçalarda tane yapısı ideal oluşmuş fakat akma ve çekme mukavemeti değerleri % 100 güvenlik parçası için oldukça aşağılarda kalmıştır. Fakat bu profillerin dökümü laboratuvar şartlarında açık atmosferde gerçekleştirilmiş ve döküm yapısı oksitlere, kirliliklere, gözeneklere sahiptir. Bu profiller sadece tane yapısının gelişimini görme adına hazırlandığından dolayı mekanik özelliklerinin dikkate

alınmaması gerekmektedir. Aynı zamanda seri üretimde profilleri parça parça dökmek yerine sürekli döküm tekniklerini kullanmak hem çevresel hem de yapısal kusurları bertaraf ederek daha uygulanabilir bir durum oluşturacaktır.

Ekstrüde edilmiş yarı mamul seçeneklerinde Cr elementi ilavesinin tane irileşmesi mekanizmasını kontrol ettiği açıkça ortaya konmuştur. Bu nedenle alüminyum dövme üretimi için kullanılan alaşımda Cr elementinin ilavesi önemsenmesi gereken bir parametredir. Ayrıca ana sanayi (M*, A*) ürünlerinde de hatırı sayılır miktarda Cr elementi ilavesi dikkat çekmektedir.

Düşük ekstrüzyon oranının da tane irileşmesi mekanizmasını sonlu derinlikte oluşturduğu görülmüştür. Düşük ekstrüzyon oranının mümkün olduğu kadar döküm karakteristiği taşımasından dolayı bünyesinde barındırdığı deformasyon enerjisi azalmış, bu da dövme ve T6 sonrasında gerçekleşen tane irileşmesini durdurmuştur.

Ekstrüde edilmiş yarı mamul profillerden dövülmüş ve devamında T6 ısıl işlemi görmüş parçaların, mekanik özelliklerinden akma ve çekme mukavemeti değerlerinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Aşırı tane büyümesi gerçekleşen örneklerin akma ve çekme mukavemeti değerleri sonlu derinlikte tane irileşmesi bandı olan örneklere göre daha düşük çıkmıştır. Aşırı tane büyümesi mekanizmasının tüm yapıyı kapladığı örneklerin statik testler sonucunda düşük değerler vermesi, parçanın servis şartlarında dinamik zorlamalara karşı cevap verebilme yeteneğinin yetersiz olacağı düşüncesini oluşturmuştur.

Ekstrüzyon ve döküm yöntemleriyle üretilmiş yarı mamul profillerden dövülmüş ve devamında ısıl işlem görmüş parçaların mekanik özellikleri karşılaştırıldığında belirgin farklar oluşmamıştır. Ekstrüzyon seçeneğinden dövülmüş, tane irileşmesi bandı sonlu derinlikte olan başarılı örneklerin çekme mukavemeti değerleri, döküm profilden dövülen örneklere göre daha yüksek seyretmiştir. Bunun sebebi olarak ekstrüzyon üretimi sırasında yapıya kazandırılan lifli tanelerin çekme yönünde uzamasından dolayı çekme kuvvetine karşı direnç sağladığı düşünülmektedir. Döküm profilden dövülen parçalardan elde edilen sonuçlar ise ekstrüzyon yarı mamul seçeneğinin yerini alabilecek seviyede EN AW 6082 alaşımı için kabul edilebilir değerlerde sonuçlar sergilemiştir.

Alüminyum dövme üretiminde kullanılan döküm ve ekstrüzyon yarı mamul seçenekleri farklı parametrelerle üretilmiş, dövme ve ısıl işlem denemeleri yapılmıştır. Isıl işlem sonucunda tüm örneklerin sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik değerleri sonucunda aşırı tane büyümesinin ve tane irileşmesinin sertlik değerlerine belirgin bir

etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Sadece üretim aşamalarında düşük sıcaklıklarda çalışıldığında sertlik biraz daha yüksek seyretmiştir. Bilindiği üzere yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlarının ısıl işlem sonucunda mukavemet kazanma sistemi çökelme sertleşmesine dayanmaktadır. 6082 alaşımında çökelme sertleşmesi Mg_2Si (β) fazları ile gerçekleştirilmektedir. Mg_2Si fazının oluşum miktarı, boyutu ve dağılımı 6082 alaşımında sertliği doğrudan etkileyen parametrelerin en başında yer alır.

6.2 Öneriler

Alüminyum dövme süspansiyon parçalarının servis koşullarında dinamik şartlar altında çalışılacağı düşünülecek olursa bu tez çalışmasında incelenen dökümden dövme ve ekstrüzyondan dövme ile elde edilen parçaların yorulma dayanımlarının karşılaştırılması parçaların ömrünü tayin etmede fikir edinilmesine yardımcı olacaktır. Böylece aşırı tane büyümesine sahip olan parçaların, tane irileşmesi sonlu derinlikte olan parçaların ve tane irileşmesi kesitin hiçbir yerinde gerçekleşmeyen parçaların dinamik şartlar altındaki ömürleri kıyaslanabilecektir. Fakat yorulma testi için parçalardan yorulma numunesi çıkarmak yerine parçaların doğrudan kendisini test etmek daha sağlıklı olacaktır. Çünkü tane irileşmesi olan bölgelerin hepsini temsil etmesi için parçanın içinden numune çıkarmak yerine parçanın tamamını kullanmak ömür tayininde bulunabilmek adına daha doğru olacaktır.

5. bölümde de paylaşıldığı gibi Cr ilaveli alaşımdan üretilmiş profillerin dövülmesi seçeneğinin sonucunda ve Cr ilavesi olmayan ama düşük ekstrüzyon oranıyla üretilmiş profillerin dövülmesi seçeneğinin sonucunda; tane irileşmesi sonlu derinlikte oluşturularak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Fakat Cr elementi ilaveli alaşımdan düşük ekstrüzyon oranına sahip profiller üretilmemiştir. Bu tez çalışmasının devamında Cr elementi ilaveli alaşımdan düşük ekstrüzyon oranına sahip profiller üretilerek, bu profillerin dövme ve devamında ısıl işlem performansları incelenebilir. Böylece tane irileşmesi gerçekleşen bant, yüzeye daha yakın oluşabilir veya tamamen kaybolabilir.

Süspansiyon parçaları araç tasarımında en son ele alınan araçta kalan boşluklara göre en son dizayn edilen ürün gruplarıdır. Bu nedenle şekil geometrileri oldukça karmaşık olabilmektedir. Bu nedenle bu parçaların plastik şekil verme yöntemleri üretilmesi çok aşamalı ve zahmetli bir sürece dönüşebilmektedir. Süspansiyon sistemlerinde rotilli kol ve salıncak parçaları; tekerleğin dikey hareketini sınırlandırarak, tekerlekleri araç şasisine bağlayan süspansiyon parçalarıdır. Sürüş güvenliğini ve

konforunu doğrudan etkilediklerinden dolayı süspansiyon sisteminin en önemli parçalarıdırlar. Öngörülen araç sürüş dinamiğine bağlı olarak 3 nokta (salıncak) veya 2 nokta (rotilli kol) bağlantı gözetilerek tasarımları yapılır. Rotilli kol parçaları 2 noktadan bağlandığı için dövme parçaların ön şekilleri silindirik içi dolu profillerden kısmen kolaylıkla verilebilmektedir. Fakat salıncak parçaları 3 noktadan bağlandığı için şekilleri üçgene benzemektedir ve dövme ön şekilleri silindirik içi dolu profilden yola çıkılarak çok zor verilmektedir. Silindirik profilleri dövme sonucunda salıncak parçasına dönüştürmek için dövme öncesinde rekvals (gererek haddeleme) ve eğme gibi operasyonlar gerekmektedir. Aynı zamanda parçaların boyutları büyük olduğu için verilen ön şeklin dövme sonucunda salıncak parçasına dönüşmesi için kalıp içerisinde şiddetli plastik akışlar meydana gelebilmektedir. Dövme parçalarda bu denli şiddetli plastik akışlar parçada kat oluşma riskini, doldurmama problemlerini, parça yüzey kalitesini, kalıp ömrünü ve tane yönlenmesini etkilemektedir. Ayrıca bu tez kapsamında incelendiği üzere ekstrüzyondan dövme ürünlerde parçaya yüklenen termo mekaniksel işlemler aşırı tane büyümesini tetiklemektedir. Tüm bu sorunları yaşamamak adına üçlü bağlantı yapılan salıncak türü parçaların dövülmesinde kullanılan silindirik ekstrüde edilmiş profiller yerine döküm yarı mamuller tercih edilebilir. Silindirik biyet dökmek yerine aynı teknolojiyi kullanarak pre-form döküm biyetler üretilebilir ve bu biyetler parça kalınlığına uygun şekilde kesildikten sonra sadece ön ısıtma yapılarak doğrudan dövülebilir. Aradaki rekvals ve eğme gibi üretim adımları kaldırılarak üretim maliyetleri oldukça aşağılara çekilebilir. Aynı zamanda ekstrüde edilmiş yarı mamullerden dövülen parçalarda karşılaşılan aşırı tane büyümesi riski de ortadan kaldırılmış olur. Yurt dışında ön-şekilli döküm uygulamaları mevcuttur. Örneğin Dünya alüminyum sektör liderlerinden olan Alcan grubunun J* marka aracın alüminyum dövme salıncağına yönelik geliştirmiş oldukları NetCast^{TM} isimli pre-form döküm çalışmaları bulunmaktadır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Alcan grubunun geliştirmiş olduğu NetCast teknolojisi, kompleks şekilli dikey pre-form döküm biyet (Anonymous, 2004)

Ülkemizde henüz döküm yarı mamul üretimi dahi yapılamadığı için pre-form döküm imalatı da bilinmemektedir. Fakat alüminyum dövme üretimi yapan firmalar için pre-form döküm kullanımı alüminyum dövme üretimi arttıkça önem kazanmaya başlayacaktır.

KAYNAKLAR

Altenpohl, D., 1982, Aluminum viewed from within an introduction into the metallurgy of aluminum fabrication, *Aluminium-Verlag*, Dusseldorf, 133-147.

Altenpohl, D., 1998, Aluminum: Technology, applications and environment, the aluminum association and the minerals, metals materials, Washington.

Aluminium Federation, 1983, The properties of aluminium and its alloys, Broadwayhouse, Calthorpe Road, Birmingham.

Anonim, 2007, Süspansiyon sistemleri, MEGEP (Meslekî eğitim ve öğretim sistemini güçlendirme projesi motorlu araçlar teknolojisi), Ankara.

Anderson, M., Bruski, R., Groszkiewicz, D., Wagstaff, B., 2001, NETCAST^{TM} shape casting technology: Technological breakthrough that enhances the cost effectiveness of aluminium forgings, *The Minerals, Metals and Materials Society*, DOI: 10.1002/9781118806364.ch18.

Anonymus, 1996, http://www.chemicalelements.com/elements/al.html [Ziyaret Tarihi, 3 Mart 2013].

Anonymus, 2011, Applications – Chassis & Suspension – Suspension parts, *European Aluminium Association*, 5-6.

Anonymous, 2012, Aluminium in cars unlocking the light-weighting potential, *European Aluminium Association*, Brussels – Belgium, 5-10.

Anonymous, 2004, Alcan automotive production of high quality forgings by means of cast stock, *Innovations in Metal Forming Conference*.

Birol, Y. 1991, Alüminyum kaporta neden olmasın ?, Alüminyum, Nisan-Aralık, Sayı:11, İstanbul.

Birol, Y., 2013, EN AW 6082 alaşımlı otomotiv süspansiyon parçaları üretiminde dövme proses teknolojisi, *Seminer Notları*.

Brenner, P., 1976, JIMMA 26, 744.

Car, E., 2011, Alüminyum üretim süreçleri, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, İstanbul, 2-15.

Çapan, L., 2010, Metallere plastik şekil verme, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul,

Davis, J.R., 1993, ASM specialty handbook, aluminum and aluminum alloys, ASM International, United States of America, 23, 59-86, 248-327, 649-690.

Eraslan, Y., 1999, Etial-60 alaşımında döküm ve homojenizasyon uygulamalarının ekstrüzyon kabiliyetine etkileri, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Erdoğan, M., 2001, Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 378.

Hertwich, G., Niedermair, F., 1998, The universal caster, aluminium, 6.

Jensrud, O., Pedersen, K.O., 2001, New development in thermomechanical processing and forging of high strength aluminium, *4th ESAFORM Conference Proceedings.*

Jensrud, O., Østhus R., Solerød, H., 2005, New improved forging technology and high volume serial production of aluminium wheel suspension arms, *Steel Grips*, 2, 141-146.

Jensrud, O., Høiland, T., 2008, A new advanced profile shaping technique for design and manufacturing of automotive components - the ExtruForm®, *Proceedings of the ET08*, Vol 2, Orlando.

Jensrud, O., Pedersen K., Syvertsen, F., 2011, Automotive sector: the Castforge potentiality, *Aluminium and its Alloys*, 5, 69-74.

Kılıç, N., 2005, *A&G Bülten*, 15-20.

Kim, H.R., Seo, M.G., Bae, W.B., 2002, A study of the manufacturing of tie-rod ends with casting/forging process, *J. of Matr. Proc. Tech*., 125-126, 471-476

Kiuchi, M., 1999, Technology fusion in metal forming field, *Advanced Technology of Plasticity*, Vol 1, Proceedings of the 6th ICTP, 19-24

Mondolfo, L.F. 1976, Aluminium alloys: structure and properties, Butterworts London. Dusaugey E., JIM 37, 452; 39, 484; 41, 438;42, 437.

Öz, Ö., 2007, Yaşlandırma ısıl işleminin AA 7075 malzemeli dikdörtgen plağın burkulma yükü üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 54.

Płonka, B., Kłyszewski, A., Senderski, J., Lech-Grega, M., 2008, Application of Al alloys, in the form of cast billet, as stock material for the die forging in automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8 (2), 149-156, Skawina – Poland.

Sellars, C., Tegart W.J., 1976, Materials Science Rev. Met. 63, 731.

Su, Ş., 1988, 2XXX grubu alaşımlarda katı eriyiğe alma sıcaklık ve süresinin yaslanma sonrası özelliklere etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Turbalıoğlu, K., 2008, 6063 Alüminyum alaşımının düşey sürekli döküm yönteminde üretim parametrelerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 5.

WEISBACH, 1967, Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Malzeme bilgisi ve muayenesi, çeviri Anık, S., Anık, E.S., 215-217, İstanbul.

William, F.S., 2001, Malzeme bilimi ve mühendisliği, çeviri Kınıkoğlu, N.G., *Literatür*, İstanbul.

Zvinys, J., Kandrotaite Janutiene, R., Meskys, J., Juzenas, K., 2012, Investigation of thermo mechanical effect on structure and properties of aluminium alloy 6082, *Machines, Technologies, Materials : International Virtual Journal For Science, Technics And Innovations For The Industry*, 9, 3-6, Lithuania.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Onur ILGAZ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya 20.06.1987
Telefon : 0505 4963342
Faks : 0332 2216401
e-mail : metalurji15@gmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Karatay Anadolu Lisesi, Konya	2006
Üniversite	:	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir	2011
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Konya	
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2011	Akış Asansör Makina Motor Döküm San. ve Tic. Ltd.	Dökümhane Mühendisi
2012-halen	Aydınlar Yedek Parça San. ve Tic. A.Ş.	Proje Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Alüminyum dövme ve döküm üretimi
Alüminyum alaşımlarının ısıl işlemi
Lamel ve küresel grafitli dökme demirlerin üretimi
Demir ve demir dışı alaşımların metalografisi

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Birol, Y., Ilgaz, O., 2013, Effect of cast and extruded stock on the grain structure of EN AW 6082 alloy forgings, *Materials Science and Technology,* DOI 10.1179/1743284713Y.0000000407

Birol, Y., Ilgaz, O., Akdı, S., Ünüvar, E., 2013, Comparison of cast and extruded stock for the forging of AA6082 alloy suspension parts, *16th Int. Conf. Advances in Materials and Processing Technologies,* Taiwan

Ilgaz, O., Akdı, S., Ünüvar, E., Birol, Y., 2013, EN AW 6082 alaşımının dövme ürünlerindeki T4, T6 ısıl işlem süreçlerinin kıyaslanması ve optimizasyonu, *6. Alüminyum Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, İstanbul , 152-163.

Akdı, S., Ilgaz, O., Ünüvar, E., Birol, Y., 2013, 6082 alaşımlı dövme parçaların üretiminde plastik deformasyonun ve sıcaklığın dinamik yeniden kristalleşme reaksiyonuna etkisi, *6. Alüminyum Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, İstanbul , 86-93.

Birol, Y., Ilgaz, O., Akdı, S., Ünüvar, E., 2013, 6082 alaşımlı profillerin kesit tane yapısına pres çıkış sıcaklığının etkisi, *6. Alüminyum Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, İstanbul , 409-415.