

# Experimental Study on Cutting Force and Surface Roughness in Turning with CVD-TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN Coated Cutting Insert of Al-12Si-(0.02-1)Sr Alloys Manufactured by Permanent Mold Casting Method

Ali Paşa HEKİMOĞLU<sup>1</sup>  Şenol BAYRAKTAR<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Recep Tayyip Erdoğan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 53100, RİZE

## Graphical/Tabular Abstract

In this study, machinability properties were investigated for optimum Sr ratio in machining Al-12Si-Sr alloys.

### Article Info:

Research article  
Received: 18.11.2021  
Revision: 28.12.2022  
Accepted: 3.01.2022

### Highlights

- Effects of different Sr additions on machinability properties
- BUE formation on cutting tool
- Effects of cutting speed and feed rate on cutting force, surface roughness and tool wear.

### Keywords

Al-Si Alloy  
Cutting Force  
Surface Roughness  
Built Up Edge

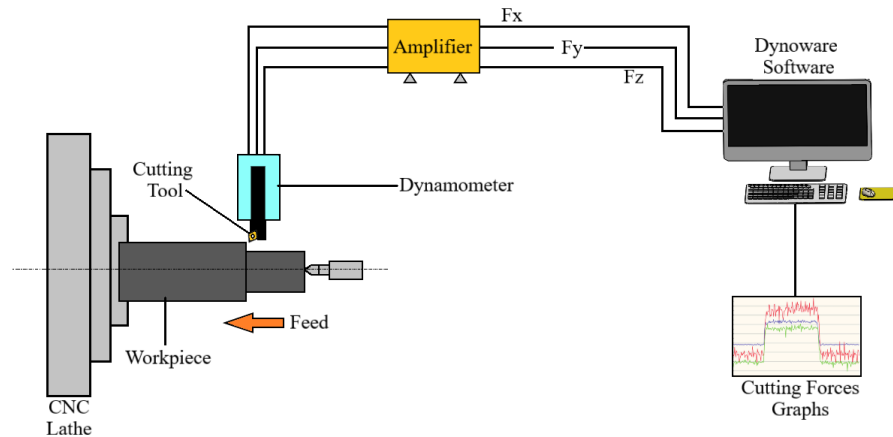


Figure A. Experimental setup for cutting force measurement

**Purpose:** In this study, it was aimed to investigate the effect of strontium (Sr) additions at different rates (0.02; 0.1 and 1%) on the cutting force, surface roughness and BUE (Built up edge) formation in Al-12Si-Sr alloy.

**Theory and Methods:** Al-12Si-Sr alloys were produced by permanent method. Machining experiments of the produced alloys were carried out in CNC vertical machining center. Hardness and tensile strength of the experimental alloys were measured by conventional methods. Kistler dynamometer and Mahr perthometer M1 roughness measuring devices were used for cutting force and surface roughness measurement, respectively. Microstructure and BUE images were obtained with optical and digital microscopes, respectively.

**Results:** Highest hardness and tensile strength values were obtained from Al-12Si-0.1Sr alloy. The elongation to fracture value of the alloys decreased continuously with increasing Sr ratio. It was determined that the cutting force, surface roughness and BUE formation decrease with the increase in cutting speed, and these values increase in case of an increase in feed rate. The lowest cutting force and surface roughness values were measured in the machining of the Al-12Si-0.1Sr alloy, while the highest values were measured in the Al-12Si-0.02Sr alloy. The least BUE formation was observed in the machining of the Al-12Si-0.1Sr alloy, while the highest BUE formation was observed in the Al-12Si-0.02Sr alloy.

**Conclusion:** It was determined that a combination of maximum cutting speed and minimum feed rate should be used for minimum cutting force, surface roughness and BUE. It was observed that the optimum results in terms of mechanical and machinability properties were obtained with the addition of 0.1 Sr.



## Experimental Study on Cutting Force and Surface Roughness in Turning with CVD-TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN Coated Cutting Insert of Al-12Si-(0.02-1)Sr Alloys Manufactured by Permanent Mold Casting Method

Ali Paşa HEKİMOĞLU<sup>1</sup> Şenol BAYRAKTAR<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 53100, Merkez/RİZE

### Abstract

In this study, three Al-12Si-Sr alloys containing different ratios (0.02; 0.1 and 1%) strontium (Sr) were manufactured by the permanent mold casting method. The microstructures of the manufactured alloys were determined by standard metallographic methods, and the hardness and tensile strength values were stated by the Brinell method and tensile test, respectively. The effects of different Sr ratios and cutting parameters on the cutting force and surface roughness during turning of these alloys were investigated using CVD-TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN coated carbide inserts under the different cutting speeds (200, 300 and 400 m/min), feed rate (0.05; 0.1 and 0.15 mm/rev) and constant depth of cut (1.5 mm) conditions. Metallographic examinations revealed that the microstructure of the Al-12Si-0.02Sr alloy consists of  $\alpha$ , eutectic aluminum-silicon, Al-Fe-Si ( $\delta$ ) phases and primary silicon particles, while the Al-12Si-0.1Sr contains Al-Sr-Si phase in addition to the phases observed in the Al-12Si-0.02Sr alloy. In these investigations, it was also observed that as the Sr ratio increased, the Al-Sr-Si phase grew and/or the number of these phase particles increased. The highest hardness and tensile strength values were obtained from Al-12Si-0.1Sr alloy among the produced alloys. The elongation to fracture value of the alloys decreased continuously with increasing of Sr ratio. It was seen that the cutting force and surface roughness decreased with the increase of cutting speed, whereas increased with the increase of feed rate in the machining tests. The lowest cutting force and surface roughness values were measured in the machining of Al-12Si-0.1Sr alloy, while the highest values were measured in Al-12Si-0.02Sr alloy in turning tests. Built-up edge (BUE) formation was observed during the turning of the alloys. It was revealed that BUE formation could be reduced by using a combination of high cutting speed and low feed rate. While the least BUE formation was observed in the Al-12Si-0.1Sr alloy at the cutting tool rake face, the highest BUE formation was observed in the Al-12Si-0.02Sr alloy. The findings obtained from the turning tests were discussed in based on the structural and mechanical properties of the alloys.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 18.11.2021  
Düzeltilme: 28.12.2022  
Kabul: 3.01.2022

### Keywords

Al-Si Alloy  
Cutting Force  
Surface Roughness  
Built Up Edge

### Anahtar Kelimeler

Al-Si Alaşımı  
Kesme Kuvveti  
Yüzey Pürüzlülüğü  
Yığıntı Talaş

## Kokil Kalıba Döküm Yöntemi ile Üretilmiş Al-12Si-(0,02-1)Sr Alaşımlarının CVD-TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN Kaplamalı Kesici Uç ile Tornada İşlenmesinde Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Deneysel Çalışma

### Öz

Bu çalışmada, farklı oranlarda (%0,02; 0,1 ve 1) stronsiyum (Sr) içeren üç adet Al-12Si-Sr alaşımı kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların içyapıları standart metalografik yöntemlerle, sertlik ve çekme dayanımı değerleri ise sırasıyla Brinell ölçüm yöntemi ve çekme deneyi ile belirlendi. Farklı Sr oranları ve kesme parametrelerinin bu alaşımların tornada işlenmesi esnasındaki kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri, farklı kesme hızı (200, 300 ve 400 m/dak), ilerleme (0,05; 0,1 ve 0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (1,5 mm) koşullarında CVD-TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN kaplamalı karbür kesici uç kullanılarak araştırılmıştır. Metalografik incelemeler, Al-12Si-0,02Sr alaşımının içyapısının  $\alpha$ , ötektik alüminyum-silisyum, Al-Fe-Si ( $\delta$ ) fazları ile primer silisyum parçacıklarından, Al-12Si-0,1Sr alaşımının içyapısının ise Al-12Si-0,02Sr alaşımında gözlenen fazlara ilave olarak Al-Sr-Si fazından oluştuğunu göstermiştir. Bu incelemelerde ayrıca Sr oranı arttıkça Al-Sr-Si fazının büyüdüğü ve/veya bu faz parçacıklarının sayısının arttığı gözlenmiştir. Üretilen alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve çekme dayanımı değeri Al-12Si-0,1Sr alaşımından elde edilmiştir. Alaşımların kopma uzaması değeri ise artan Sr oranı ile sürekli azalmıştır. İşleme testlerinde kesme hızının artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerlemenin artması durumunda ise bu değerlerin de arttığı tespit edilmiştir. Tornalama testlerinde en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri, Al-12Si-0,1Sr alaşımının işlenmesinde ölçülürken, en yüksek değerler ise Al-12Si-0,02Sr alaşımında ölçülmüştür. Alaşımların tornalanması esnasında yığıntı talaş (YT) oluşumu gözlenmiştir. YT oluşumunun yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme kombinasyonları kullanılarak azaltılabileceği ortaya konulmuştur. Kesici uçta en az YT oluşumu, Al-12Si-0,1Sr alaşımında gözlenirken, en fazla YT oluşumu ise Al-12Si-0,02Sr alaşımında gözlenmiştir. İşleme deneylerinden elde edilen bulgular, alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerine dayandırılarak irdelenmiştir.

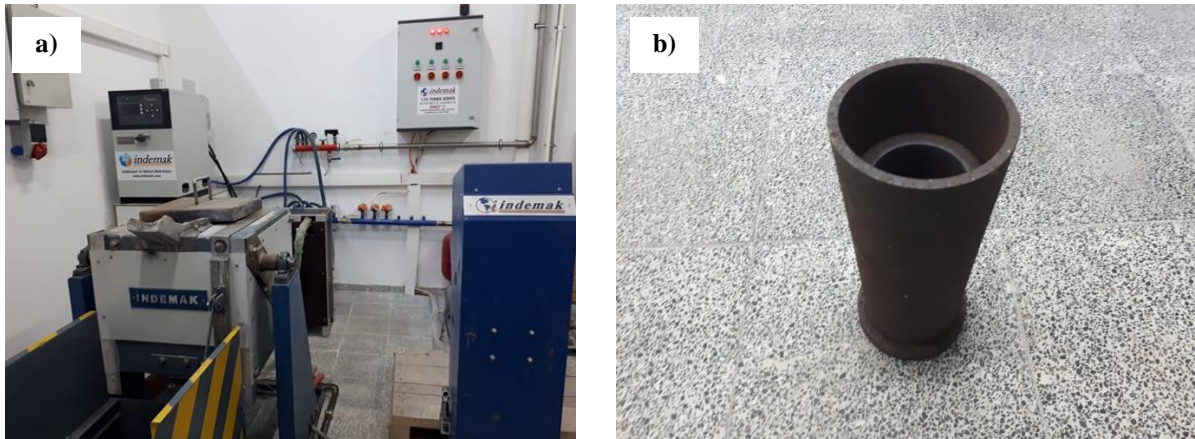
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Al-Si esaslı alaşımlar, ağırlıklı otomotiv endüstrisinde içten yanmalı motorların ve yüksek özgül mukavemet gerektiren bazı parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Farklı döküm teknikleri ile üretilebilmesi, yüksek özgül mukavemet ve düşük ergime derecelerine sahip olması bu alaşımların önemli avantajlarından [1]. Bu alaşımların mekanik sistemlerde hassas bileşen olarak kullanılabilmesi için tornalama, delme ve frezeleme gibi talaşlı imalat işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, bu alaşımların işlenebilirliği farklı nedenlerden dolayı zordur. Düşük Si içeriğine sahip Al-Si alaşımlarının işlenmesinde kesici takım malzemelerine alüminyum fazın yapışması veya yığıntı talaş oluşumu, özellikle kuru işleme şartlarında ana sorundur. Yüksek Si içerikli alaşımlar ise genellikle kesici takımın serbest yüzey aşınmasına neden olmaktadır. Bu nedenle Al-Si alaşımların işlenmesinde hem YT hem de takım aşınması, Si içeriğine bağlı olarak kesici takım geometrisinin bozulmasına ve takım ömrünün azalmasına sebep olmaktadır [2-4]. Diğer taraftan bu durum, işleme esnasında kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü çıktılarını arttıran bir etkidir. Bu bağımlı değişken çıktılarının işleme üzerindeki verimliliği, kesme parametreleri, kesici takım geometrisi, kesici takım malzemesi ve soğutma teknikleri gibi bağımsız değişkenlerin kontrol altına alınması artırılabilir. Buna göre bu alaşımların istenilen hassasiyette üretilebilmesi için kesme parametrelerinin optimum seçimi son derece önem taşımaktadır. Al-Si esaslı alaşımların işlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda; Kuczmaszewski vd., Al10SiMg alaşımının iki ağızlı kaplamasız, TiB<sub>2</sub> ve TiAlCN kaplamalı kesiciler ile frezelenmesinde TiAlCN kaplamalı kesicilerin daha iyi işleme performansı sergilediğini [5], Barooah vd., basınçlı döküm yöntemi ile üretilen Al-12Si alaşımının kaplamasız HSS ile vida açma işleminde, YT ve abrasif aşınma mekanizmalarının etkili olduğunu ve Al fazı içerisindeki sert silisyum parçacıklarının abrasif aşınmaya neden olduğunu belirtmişlerdir [6]. Bayraktar ve Demir, kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilen Al-12Si-0.6Mg alaşımının tornada işlenmesinde, kesme hızının artması ile kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve YT'nin azaldığını ve ilerlemenin artması ile arttığını tespit etmişlerdir. Kaplamasız kesici uçların TiCN/TiN ve TiAlN/TiN kaplamalı kesicilere göre daha iyi performans sergilediği ve T6 ısıl işlemin işlenebilirlik özelliklerini iyileştirdiği ortaya konulmuştur [7]. Bayraktar ve Afyon, kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilen Al-7Si alaşımında Zn ve Cu ilavelerinin delme işleminde kaplamasız karbür matkap kullanarak sabit kesme parametreleri şartları altında işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. En düşük ilerleme kuvveti, tork, yüzey pürüzlülüğü ve YT'nin sırasıyla Cu ve Zn ilaveli alaşımlarda ölçüldüğünü ortaya koymuşlardır [8]. Steininger vd., AlSi9Cu3 alaşımının kaplamasız, TiCN, CrN, SiCN-TiCN, TiB<sub>2</sub> and DLC kaplamalı kesiciler ile vida açma işleminde YT oluşumunun gözlemlendiği ve bunun kesme hızına ve sıcaklığa bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. YT oluşumunun düşük kesme hızının etkisi ile arttığı ve DLC kaplamalı karbür kesiciler ile daha iyi yüzey kalitesi, minimum YT ve kesme torkunun elde edildiğini ortaya koymuşlardır [9]. Wain vd., Al-Si-Cu (A319) alaşımının kuru delinmesinde düşük sürtünmeli Dyman-iC, Graphit-iC, MoST ve MoS<sub>2</sub> esaslı kaplamaların performansını inceledikleri çalışmada, Graphit-iC kaplamalı kesicilerin en uzun takım ömrüne sahip olduğu ve en az YT sergilediğini tespit etmişlerdir [10]. Marani vd., kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmiş Al-Si-Cu alaşımının tornada işlenmesinde stronsiyum (Sr), Bizmut (Bi) ve Antimon (Sb) ilavelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sr ilavesi ile kesme kuvveti artarken Bi ilavesi ile kesme kuvvetinin azaldığını ve ANFIS (Adaptive neuro-fuzzy inference system) ile optimum kesme şartları olarak maksimum kesme hızı (250 m/dak) ve minimum ilerleme (0,05 mm/dev) kombinasyonunun kullanılmasını gerektiğini tespit etmişlerdir [11]. Kumaran vd., Al-Si<sub>7</sub>-Cu<sub>4</sub> alaşımının sementit karbür kesici uç ile farklı kesme hızı (800, 8500 ve 9000 dev/dak), ilerleme (0,6125; 0,634 ve 0,645 mm/dev), kesme derinliği (0,4; 0,6 ve 0,8 mm) ve uç yarıçapı (0,5; 0,75 ve 1 mm) kullanarak frezelenmesinde kesme parametrelerini yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı, artık gerilme ve talaş kalınlığı performans kriterlerine göre optimize etmişlerdir. Taguchi-TOPSIS ile optimum kesme şartları 8000 dev/dak kesme hızı, 0,6125 mm/dev ilerleme, 0,5 mm kesme derinliği ve 0,5 mm uç yarıçapı olarak belirlenmiştir [12]. Döküm yöntemi ile üretilen alaşımların mekanik sistemlerde optimum tolerans aralıklarında nihai ürün olarak kullanılabilmesi için talaşlı imalat operasyonlarına tabi tutulması gerekmektedir. Ayrıca, bu alaşımların mekanik sistemlerdeki servis ömürleri, talaşlı imalat operasyonları esnasında ölçülen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü çıktıları ile yakından ilişkilidir. Bu çıktılarının performansı, optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi ile kontrol altına alınabilmektedir. Optimum kesme parametreleri ise alaşımların yapısal ve mekanik özellikleri ile yakından ilişkilidir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda içyapı modifikasyonu ve mukavemet artırma amacıyla Al-Si alaşımlarına stronsiyum elementi ilave edilmiş ve belli oranlardaki stronsiyum katkılarının bu alaşımların içyapısındaki

ötektik silisyum parçacıklarını inceltip küreselleştirdiği ve bunun sonucunda da mukavemetlerinde artışa yol açtığı belirlenmiştir [13-15]. Ancak stronsiyum ilavelerinin bu alaşımların tornalama işlemi sırasında kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini ortaya koyan bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu nedenle; bu çalışmada, Al-12Si esaslı alaşıma farklı oranlarda Sr ilaveleri ile birlikte farklı kesme hızı, ilerleme ve sabit kesme derinliği parametrelerinin tornalama işlemi esnasında kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin ortaya konulması hedeflenmiştir.

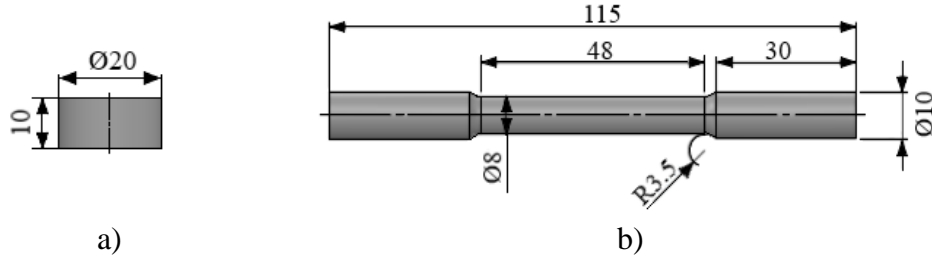
## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Al-12Si-0,02Sr, Al-12Si-0,1Sr ve Al-12Si-1Sr alaşımları, kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen Al-Si-Sr alaşımlarının kimyasal bileşimi, literatürden [13-15] faydalanılarak belirlendi ve üretimlerinde yüksek saflıkta ticari alüminyum, silisyum ile Al-15Sr alaşımı kullanıldı. Belirtilen kimyasal bileşimleri sağlayacak şekilde 1gr hassasiyetine sahip bir terazide tartılan alaşım bileşenleri, fotoğrafı Şekil 1a'da verilen orta frekanslı bir indüksiyon ocağında ergitildi. Homojen karışımın sağlanabilmesi amacıyla ergimiş durumdaki sıvı metale  $670 \pm 5$  °C'lik döküm sıcaklığında üçer dakika ara ile 30'ar saniye karıştırma işlemi uygulandı. Bu işlem beş kez tekrarlandı ve ayrıca alaşım bileşimlerinin difüzyonuna zaman vermek amacıyla sıvı metal döküm sıcaklığında 20 dakika bekletildi. Ergimiş durumdaki alaşım karışımları yukarıda belirtilen döküm sıcaklığından oda sıcaklığında tutulan, 60 mm taban ve 110 mm ağız çapına sahip 260 mm yüksekliğindeki bir kokil kalıba [13-15] dökülerek katılaştırıldı. SAE 8620 çeliğinden yapılmış olan bu kalıbın fotoğrafı, Şekil 1b'de verilmektedir.



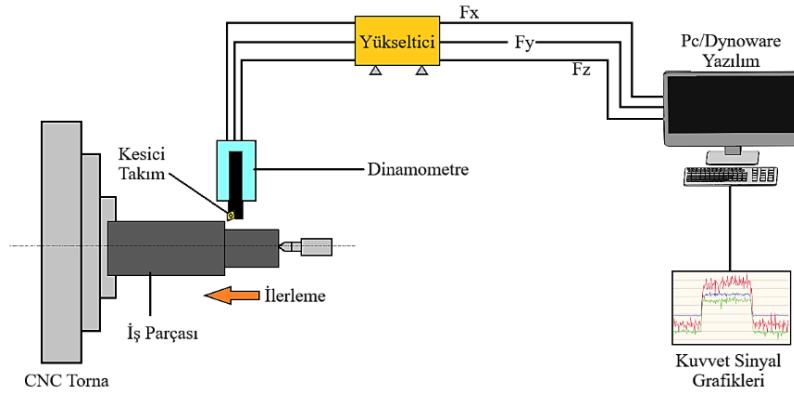
**Şekil 1.** Alaşımların üretiminde kullanılan ekipmanlar, a) İndüksiyonlu ergitme ocağı ve b) Alaşımların katılaştırılmasında kullanılan kalıp

Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri, indüktif olarak eşleşmiş plazma emisyon spektrometrisi-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) tekniği ile iç yapıları ise standart metalografik yöntemlerle hazırlanan numunelerin optik mikroskopta incelenmesi yoluyla belirlendi. İçyapı numuneleri,  $\text{Ø}20 \times 10$  mm boyutlarında talaşlı imalat ile alaşım külçelerinden elde edildi. Bu numunelerin incelenecek yüzeyleri, ilk aşamada sırasıyla 300, 600, 800, 1200 ve 2000 numaralı zımparalar ile zımparalandı. Zımparalama işleminden sonra ise söz konusu yüzeyler, sırasıyla 9 ve  $3 \mu\text{m}$ 'lik elmas ve  $0,05 \mu\text{m}$ 'lik  $\text{SiO}_2$  süspansiyonlar ile parlatıldı. Numunelerin parlatılmış yüzeyleri, dağlama işlemi uygulanmadan mikroskopik incelemeye tabi tutuldu ve fotoğraflandı. Üretilen alaşımların sertlik değerleri, Brinell sertlik ölçme yöntemiyle belirlendi. Bu ölçümler, teknik resmi Şekil 2a'da verilen numuneler üzerinde  $62,5 \text{ kg} \times \text{f}$  yük altında  $2,5 \text{ mm}$  çapında bilye uç kullanılarak gerçekleştirildi. Her bir alaşım örneği üzerinde en az on beş adet ölçüm gerçekleştirilerek elde edilen ölçülerin aritmetik ortalaması alınmak suretiyle alaşımların sertlik değerleri belirlendi. Çekme deneyleri,  $\text{Ø}8 \times 40$  mm'lik ölçü boyutlarına sahip silindirik iş parçaları üzerinde  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 'lik deformasyon hızı şartları altında gerçekleştirildi (Şekil 2b). Her bir alaşım için altı adet örnek üzerinde ölçüm gerçekleştirildi ve ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak alaşımın akma ve çekme mukavemeti ile kopma uzaması değerleri belirlendi.



**Şekil 2.** Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan numunelerin teknik resimleri, a) Sertlik ve b) Çekme deney numunesinin teknik resmi (Ölçüler mm'dir)

Üretilen alaşımların işlenmesi esnasında kesme kuvvetinin ölçülmesi için kullanılan deneysel düzenek Şekil 3'te verilmiştir. Bu düzende,  $F_x$ ,  $F_y$  ve  $F_z$  kuvvet sinyalleri Kistler dinamometre ile alınarak yükseltece ve Dynoware yazılımı ile grafiklere aktarılmaktadır. Her üç kuvvet bileşeninin bileşkesi alınarak kesme kuvveti tespit edilmektedir.



**Şekil 3.** Kesme kuvveti ölçümü için deneysel düzenek

İşleme deneylerinde Tablo 1'de teknik özellikleri verilen Sandvik marka DCMT 11T304-MM kodlu kesici uç kullanılmıştır. İşleme testleri için iş parçası ölçüleri  $\varnothing 58 \times 200$  mm olarak kullanılırken kesme şartları için kesici takım üretici firma değerleri dikkate alınarak Tablo 2'de verilen parametre ve seviyeler kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Kesici uç teknik özellikleri

Kaplama türü	Kaplama metodu	Kaplama sertliği (HV)	Kaplama kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Tane boyutu	Bağlayıcı
TiCN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN	CVD	1500	4,5	M	L

**Tablo 2.** Kesme parametreleri

Kesme hızı (m/dak)-V	İlerleme (mm/dev)-f	Kesme derinliği (mm)- $a_p$
200, 300, 400	0,05; 0,1; 0,15	1,5

İşlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü, ISO 4287 standardında belirtilen kriterlere göre ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değerleri ölçülerek tespit edilmiştir. Mahr Perthometer izleyici uçlu pürüzlülük cihazı kullanarak her bir yüzey için farklı noktalardan beş adet ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması ile  $R_a$  değerleri belirlenmiştir. Kesici uçlarda oluşan aşınmalar ise Dino-Lite marka ve AM4113ZT model dijital mikroskop ile tespit edilmiştir.

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

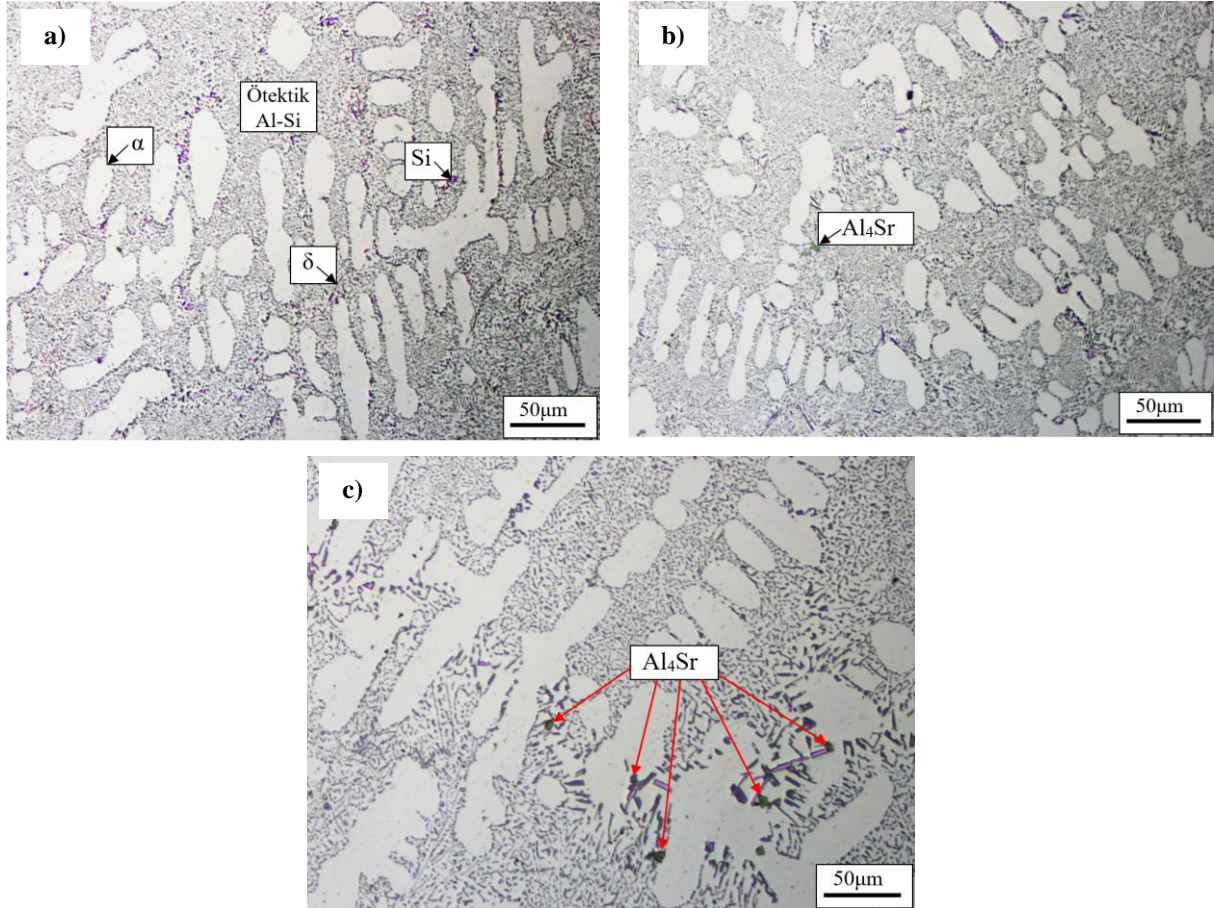
Al-12Si-0,02Sr, Al-12Si-0,1Sr ve Al-12Si-1Sr alaşımlarının kimyasal bileşimleri, Tablo 3'te, alaşımların içyapısını gösteren mikrograflar ise Şekil 4'te verilmektedir.



**Tablo 3.** Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri

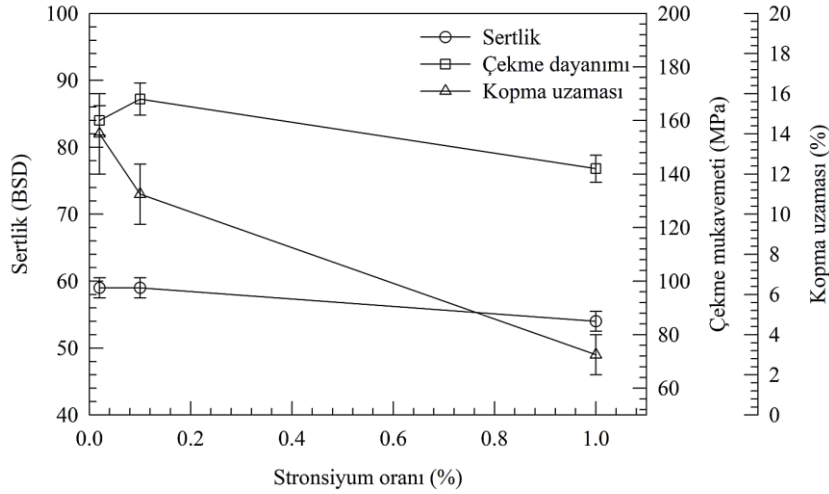
Alaşım	Alaşım Kodu	Kütlece element oranı (%)			
		Silisyum	Stronsiyum	Fe, P, V, Zn, vb. (safsızlık elementleri)	Alüminyum
Al-12Si-0,1Sr	A	12,4	0,02	0,30	Kalan
Al-12Si-0,02Sr	B	12,3	0,11	0,31	
Al-12Si-1Sr	C	12,1	1,02	0,35	

Şekil 4'teki mikrograflar, *B* alaşımının içyapısının alüminyumca zengin  $\alpha$  fazı, ötektik silisyum parçacıklarının ince küresel şekilli olduğu ötektik alüminyum-silisyum faz bölgesi ve intermetalik Al-Fe-Si ( $\delta$ ) fazı ile primer silisyum parçacıklarından oluştuğunu göstermektedir (Şekil 4a). *A* alaşımının içyapısında ise *B* alaşımında gözlenen fazlara ilave olarak Al-Sr-Si fazı ortaya çıkmıştır (Şekil 4b). Kütlece %1 oranında Sr içeren *C* alaşımında ise *A* alaşımından farklı olarak sadece Al-Sr-Si ( $Al_4Sr$ ) fazının büyüdüğü ve/veya bu faz parçacıklarının sayısının arttığı gözlenmiştir (Şekil 4c). Al-Si-Sr alaşımlarının içyapısında bu fazların oluşumu daha önceki çalışmalarda alaşımların soğuma davranışlarına dayandırılarak detaylı bir şekilde ortaya koyulmuştur [13-20]. Alaşımların içyapılarının incelenmesinden elde edilen bulguların bu konuda daha önceden yapılmış çalışmalar ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.



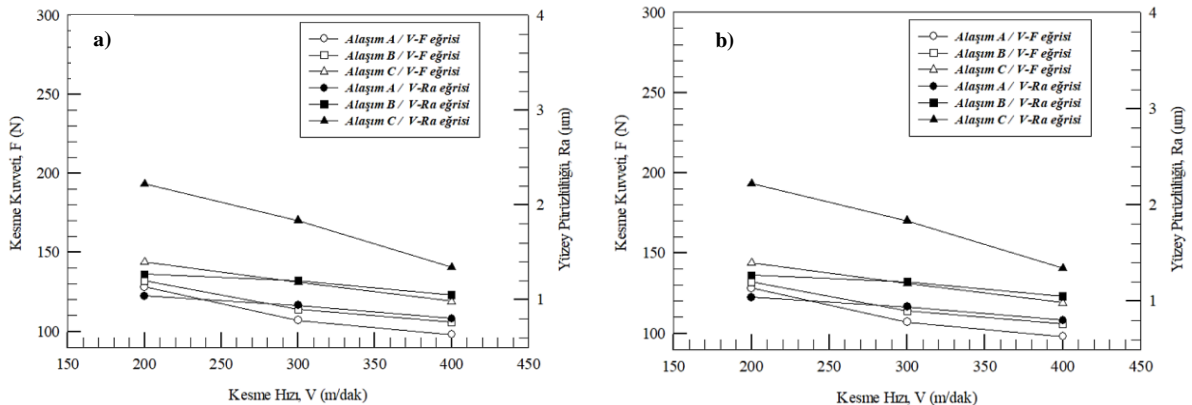
**Şekil 4.** Al-12Si-Sr alaşımlarının içyapısını gösteren mikrograflar, a) Al-12Si-0,02Sr (*B* alaşımı), b) Al-12Si-0,1Sr (*A* alaşımı) ve c) Al-12Si-1Sr (*C* alaşımı)

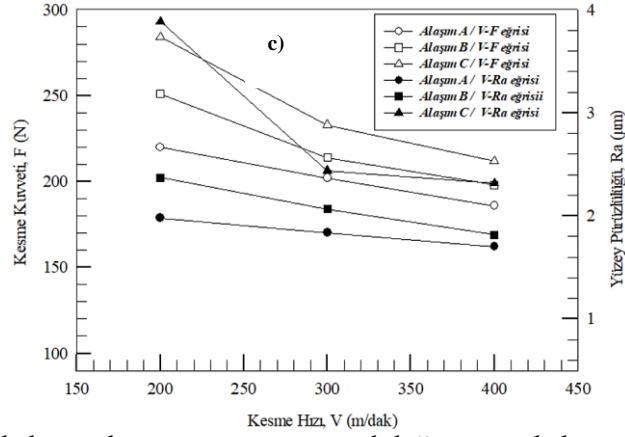
Üretilen alaşımların sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri ile bu değerlerin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler Şekil 5'te verilmektedir. A alaşımı, B alaşımından azda olsa sertlik bakımından yüksek bir değer sergilerken, C alaşımı bu iki alaşımdan daha düşük sertlik değeri sergilemiştir. Üretilen alaşımlar içerisinde en yüksek çekme mukavemeti değeri A alaşımından, en düşük çekme mukavemeti değeri ise C alaşımından elde edilmiştir. Al-12Si-Sr alaşımlarının kopma uzaması değerleri ise artan stronsiyum oranı ile sürekli azalmıştır (Şekil 5). Sertlik ölçme ve mekanik deneylerden elde edilen bulgular, daha önce bu konuda yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Al-12Si-Sr alaşımlarının sertlik, mukavemet ve kopma uzaması değerleri üzerinde stronsiyumun etkisini ifade eden daha önce yapılan çalışmalarda [13-20] detaylı olarak irdelenerek ortaya koyulmuştur. Literatürdeki bu çalışmalarda; söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemetinde stronsiyum katkılarının neden olduğu artış, ötektik silisyum parçacıklarının küçülüp küreselleşerek alaşımın içyapısında daha homojen bir şekilde dağılmasına, %0,1 Sr oranından sonra bu değerlerde gözlenen azalma ise  $\delta$  fazının morfoloji değiştirmesi ve/veya içyapıdaki intermetalik  $Al_4Sr$  fazının miktarının artmasına dayandırılarak açıklanmıştır. Literatürde [21-26], alaşımların kopma uzaması bir başka deyişle süneklik değerlerinde meydana gelen azalma da alüminyumca zengin dendritlerdeki morfoloji değişikliğine ve dendritler arası bölgelerde oluşan intermetalik  $Al_4Sr$  fazının etkisine dayandırılmıştır.



**Şekil 5.** Al-12Si-Sr alaşımlarının sertlik, çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerlerinin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler

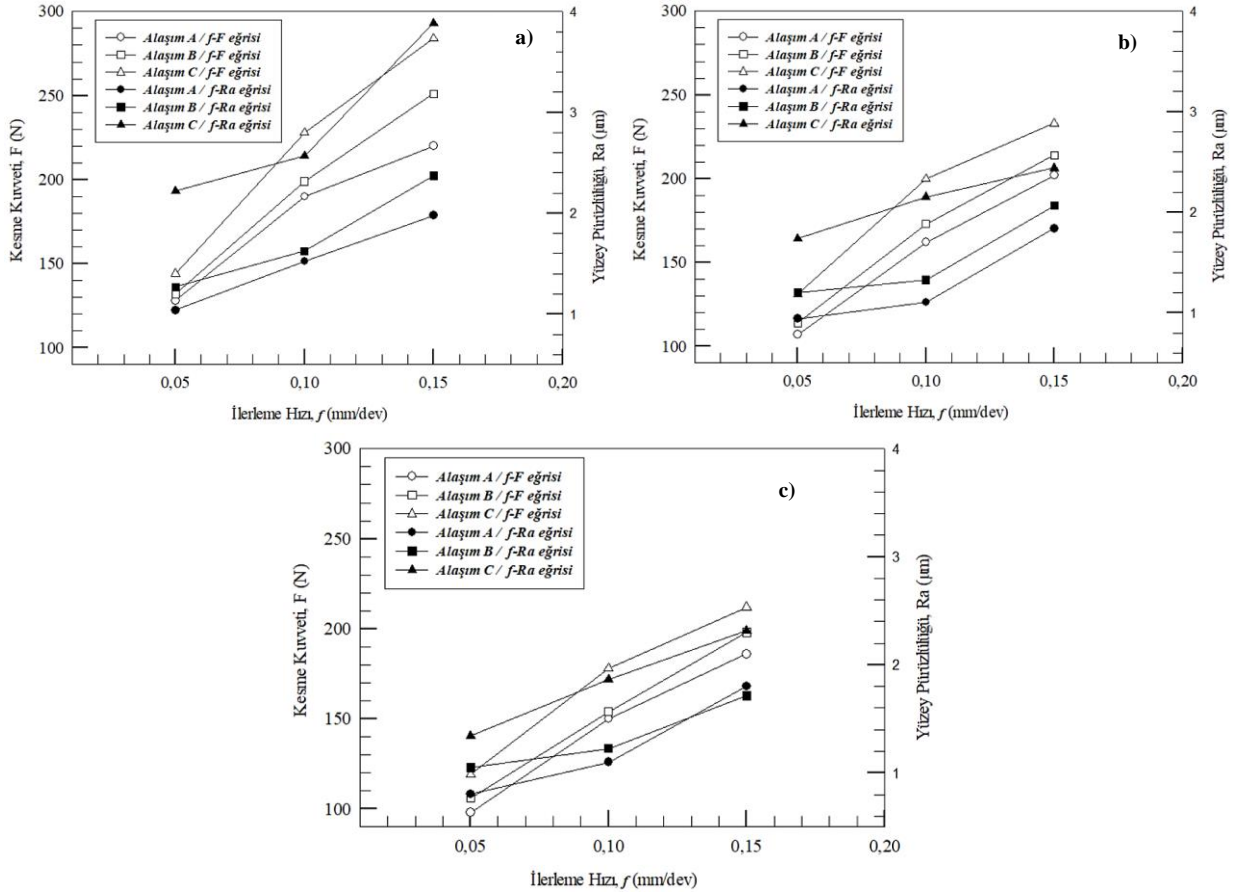
A, B ve C alaşımlarının işlenmesi esnasında sabit ilerlemede 200, 300 ve 400 m/dak kesme hızları için ölçülen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü grafikleri, Şekil 6'da verilmiştir. Bu grafiklere göre kesme hızının artması ile tüm alaşımlarda kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Kesme hızının artması, birincil ve ikincil deformasyon bölgesinde sıcaklık oluşumunu attırmaktadır. Bu durum, kesme bölgesinde malzemenin akma mukavemetini azaltarak kesme işlemini kolaylaştırmaktadır. Böylelikle, kesme kuvveti azalırken işlenmiş yüzey kalitesi de artmaktadır [16, 27, 28].





Şekil 6. Sabit ilerlemede kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızının etkisi, a)  $f: 0,05$  mm/dev, b)  $f: 0,1$  mm/dev ve c)  $f: 0,15$  mm/dev

Tüm alaşımların sabit kesme hızında 0,05; 0,1 ve 0,15 mm/dev ilerleme değerlerinde işlenmesi sonucunda ölçülen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü grafikleri, Şekil 7’de verilmiştir.

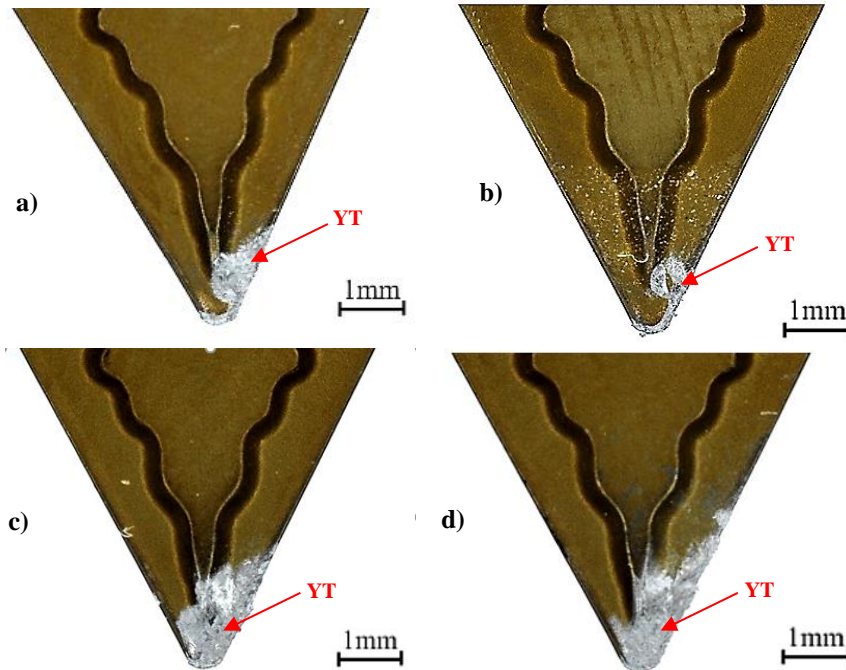


Şekil 7. Sabit kesme hızında kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerlemenin etkisi, a)  $V: 200$  m/dak, b)  $V: 300$  m/dak ve c)  $V: 400$  m/dak

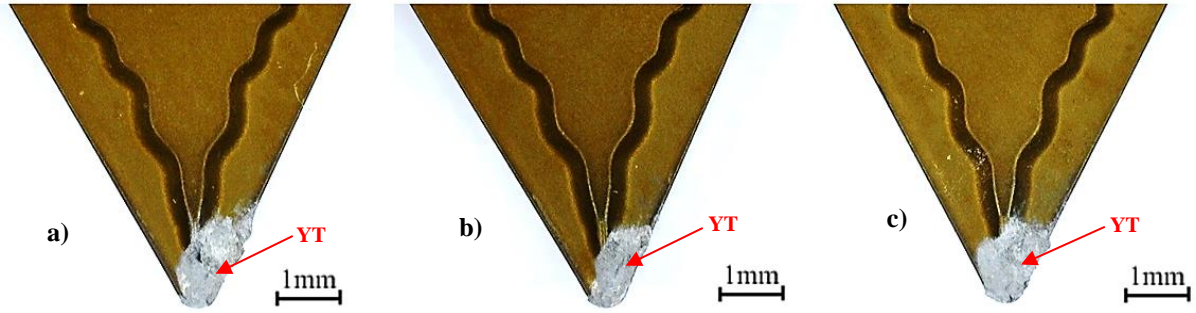
Şekil 7’teki grafiklerde sabit kesme hızı değerlerinde ilerleme oranının artmasına bağlı olarak kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün tüm alaşımlarda arttığı gözlenmiştir. Bu durumun, artan ilerleme ile birim zamanda kaldırılacak talaş hacminin ve kesici takım-talaş ara yüzey alanının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [7, 29-31]. Diğer bir ifade ile  $R_a = f^2 / 32r$  eşitliğine göre ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı olduğu ve ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün de artacağı görülmektedir. Bu eşitlikte,  $R_a$ : ortalama yüzey pürüzlülüğü,  $f$ : ilerleme hızı ve  $r$ : kesici uç yarıçapını ifade etmektedir [32].



Şekil 6 ve 7’de sabit kesme şartları altında, Al-12Si alaşımına %0,1 oranında Sr ilavesi (A alaşımı) ile %0,02 Sr ilaveli alaşıma (B alaşımı) göre kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlenmiştir. Bu durumun, A alaşımının kopma uzamasında meydana gelen azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, %0,02 Sr oranından sonra kopma uzamasındaki azalmanın dendritik yapıdaki değişime ve dendritik bölgelerde  $Al_4Sr$  fazının oluşmasına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, dendritik  $\alpha$  (Al) faz hacminin azalması ve interdendritik bölgelerde intermetalik bileşiklerin oluşmasından dolayı alüminyum esaslı alaşımlarda kopma uzamasının azaldığı bilinmektedir [23, 24, 33]. Al-12Si alaşımına %1 oranında Sr ilavesi (C alaşımı) ile A alaşımına göre kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. Bu durum, yapısal inceleme sonucunda Al-12Si-Sr alaşımlarında %0,1 oranında Sr ile çökelmeye başlayan  $Al_4Sr$  fazının %0,1Sr oranından sonra daha kaba bir yapıya dönüşmesinden kaynaklanmış olabilir [13]. İçyapıda kaba bir yapıya dönüşen  $Al_4Sr$  fazı, kesme işlemi esnasında plastik deformasyonu zorlaştırarak kesme kuvvetini arttırdığı ve işlenmiş yüzey kalitesini azalttığı düşünülmektedir. Alaşımların tornada işlenmesi esnasında kesici uçta yığıntı talaşın (YT) oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 8). YT oluşumu, kesme hızının artması ile azaldığı görülmüştür [34]. Bu durumun aşırı deforme olmuş yapının yeniden kristalleşmesi ve yumuşamasını sağlayan ısının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [35-37]. Diğer bir ifade ile kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın artması ile plastik deformasyon oluşumu ve kesme işlemi kolaylaşmaktadır. İlerlemenin artmasına bağlı olarak YT oluşumunun arttığı tespit edilmiştir (Şekil 8). Bu durumun artan talaş kesitine bağlı olarak takım-talaş ara yüzey alanının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [38-40]. Şekil 9’da sabit kesme şartları altında alaşımların işlenmesinde kesici uçta YT oluşumuna ait görüntüler verilmiştir. Bu görüntülerde en az YT oluşumunun A alaşımında (Şekil 9b) ve en fazla YT oluşumu ise B alaşımında gözlenmiştir (Şekil 9a). Bu durum, alaşımların süneklik özelliklerine veya kopma uzaması değerlerine dayandırılarak açıklanmaktadır (Şekil 5). Literatürdeki çalışmalarda, malzemelerin süneklik özelliğindeki artışın kesme esnasında kesici uçta oluşan kararsız yapıdaki YT eğilimini arttırdığı ve işlenmiş yüzey kalitesini azalttığı bilinmektedir [41, 43-47].



**Şekil 8.** Farklı kesme koşullarında A alaşımının işlenmesinde kesici uçta YT oluşumu, a)  $V:200$  m/dak ve  $f:0,05$  mm/dev, b)  $V:400$  m/dak ve  $f:0,05$  mm/dev, c)  $V:200$  m/dak ve  $f:0,15$  mm/dev ve d)  $V:400$  m/dak ve  $f:0,15$  mm/dev



**Şekil 9.** Sabit kesme koşullarında alaşımların işlenmesinde kesici uçta YT oluşumu ( $V:300$  m/dak ve  $f:0,1$  mm/dev), a) B alaşımı, b) A alaşımı ve c) C alaşımı

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Al-Si esaslı alaşımlar, otomotiv endüstrisinde motor bloğu, jant ve piston gibi bileşenlerde yaygınla kullanılmaktadır. Döküm yöntemi ile üretilen bu alaşımların mekanik sistemlerde nihai ürün olarak kullanılabilmesi için talaşlı imalat prosesleri uygulanmaktadır. Üretim verimliliği, ürün servis ömrü ve kalitesi bakımından bu alaşımların hassas bir şekilde işlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, A, B ve C alaşımlarının tornalanması esnasında farklı Sr ilaveleri ve kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- B alaşımının içyapısı alüminyumca zengin  $\alpha$ , ötektik silisyum parçacıklarının ince küresel şekilli olduğu ötektik alüminyum-silisyum ve intermetalik Al-Fe-Si ( $\delta$ ) fazları ile primer silisyum parçacıklarından oluşmaktadır.
- A alaşımı, B alaşımında gözlenen fazlara ilave olarak Al-Sr-Si ( $Al_4Sr$ ) fazını da içermektedir. C alaşımı da A alaşımı ile aynı fazlardan oluşmaktadır. Ancak, C alaşımının içyapısındaki Al-Sr-Si ( $Al_4Sr$ ) faz parçacıkları, A alaşımındakilere göre daha kaba şekilli ve fazlıdır.
- A, B ve C alaşımları içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemeti A alaşımı, en yüksek kopma uzaması değerini ise B alaşımı sergilemektedir.
- Kesme hızının artmasına bağlı olarak kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. İlerlemenin artması sonucunda artmıştır.
- Sabit kesme şartları altında en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri A alaşımının işlenmesinde ölçülürken, en yüksek değerler ise C alaşımında ölçülmüştür.
- Alaşımın işlenmesi esnasında kesici kenarda YT'nin oluştuğu, yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme kombinasyonu ile YT'nin azaldığı tespit edilmiştir.
- Kesme esnasında kesici uçta en az YT oluşumu A alaşımında gözlenirken, en fazla YT oluşumu ise B alaşımında gözlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FBA-2017-803 numaralı proje ile desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dos Santos GR, Da Costa DD, Amorim FL, Torres RD. Characterization of DLC Thin Film and Evaluation of Machining Forces Using Coated Inserts in Turning of Al-Si Alloys. Surface and Coatings Technology, 202 (1029-1033), (2007).
- [2] Konca E, Cheng, YT, Weiner AM, Dasch JM, Alpas AT. Elevated Temperature Tribological Behavior of Non-Hydrogenated Diamond-Like Carbon Coatings Against 319 Aluminum Alloy. Surface and Coatings Technology, 200 (3996-4005), (2006).

- [3] Miller WS, Zhuang L, Bottema J, Wittebrood A, De Smet P, Haszler A, Vieregge AJMS. Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280 (37-49), (2000).
- [4] Bhowmick S, Banerji A, Alpas AT. Tribological Behavior of Al-6.5%, -12%, -18.5% Si Alloys During Machining Using CVD Diamond and DLC Coated Tools. *Surface and Coatings Technology*, 284 (353-364), (2015).
- [5] Kuczmazewski J, Pieško P, Zawada-Michałowska M. Carbide Milling Cutter Blades Durability During Machining of Al-Si Casting Alloy. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 1(169-175), (2018).
- [6] Barooah RK, Arif AFM, Paiva JM, Oomen-Hurst S, Veldhuis SC. Wear of Form Taps in Threading of Al-Si Alloy Parts: Mechanisms And Measurements. *Wear*, 442 (203153), (2020).
- [7] Bayraktar Ş, Demir O. Processing of T6 Heat-treated Al-12Si-0.6 Mg Alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(354-362), (2020).
- [8] Bayraktar Ş, Afyon F. Machinability Properties of Al-7Si, Al-7Si-4Zn and Al-7Si-4Zn-3Cu Alloys. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(1-12), (2020).
- [9] Steininger A, Siller A, Bleicher F. Investigations Regarding Process Stability Aspects in Thread Tapping Al-Si Alloys. *Procedia Engineering*, 100 (1124-1132), (2015).
- [10] Wain N, Thomas NR, Hickman S, Wallbank J, Teer DG. Performance of Low-Friction Coatings in the Dry Drilling of Automotive Al-Si Alloys. *Surface and Coatings Technology*, 200(1885-1892), (2005).
- [11] Marani M, Zeinali M, Farahany S, Mechefske CK. Neuro-Fuzzy Based Predictive Model for Cutting Force in CNC Turning Process of Al-Si-Cu Cast Alloy Using Modifier Elements. *SN Applied Sciences*, 3(1-11), (2021).
- [12] Kumaran D, Paramasivam SSSS, Natarajan H. Optimization of High Speed Machining Cutting Parameters for End Milling of AlSi7Cu4 Using Taguchi Based Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution. *Materials Today: Proceedings*, 47 (6799-6804), (2021).
- [13] Hekimoğlu AP, Çalış M, Ayata G. Effect of Strontium and Magnesium Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-12Si Alloys. *Metals and Materials International*, 25(1488-1499), 2019.
- [14] Hekimoğlu AP, Ayata G. Effect of Strontium and Strontium-Magnesium Additions on The Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic Al-17Si Alloy. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(49-55), (2019).
- [15] Hekimoğlu AP, Çalış M, Ayata G. Stronsiyum ve Stronsiyum Magnezyum Katkılarının Al-9Si Alaşımının Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. 1st International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Antalya, Türkiye, (pp.422-426), (11- 13 Nisan 2018).
- [16] Bayraktar Ş, Hekimoğlu AP, Çalış M. Al-12Si-0,1Sr Alaşımının Sermet Kesiciler ile Tornalanmasında Kesme Hızı ve İlerlemenin Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. 4nd International Conference on Material Science and Technology in Kızılcabamam (IMSTEC'19), Ankara, Türkiye, (pp.539-544), (18- 20 Ekim 2019).
- [17] Hekimoğlu AP, Bayraktar Ş. Effect of Strontium Additives on Cutting Force and Surface Roughness in Machining of Al-12Si Alloy Using CVD-TiCN+TiN Coated Insert. 9th International Advanced Technologies Symposium, Turkey, (27-28 October 2021).
- [18] Jiang W, Xu X, Zhao Y, Wang Z, Wu C, Pan D, Meng Z. Effect of the Addition of Sr Modifier in Different Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of T6 Treated Al-Mg<sub>2</sub>Si in-Situ Composite. *Materials Science and Engineering: A*, 721(263-273), (2018).
- [19] Tahta M, Emany M, Cao X, Campbell J. In *Materials Science Research Trends*. Nova Science Publishers Inc: New York, (251), (2008).
- [20] Srirangam P, Chattopadhyay S, Bhattacharya A, S Nag, Kaduk J, Shankar S, Banerjee R, Shibata T. Probing the Local Atomic Structure of Sr-modified Al-Si alloys. *Acta Materialia*, 65 (185-193), (2014).
- [21] Haro-Rodríguez S, Goytia-Reyes RE, Dwivedi DK, Baltazar-Hernández VH, Flores-Zúñiga H, Pérez-López MJ. On Influence of Ti and Sr on Microstructure, Mechanical Properties and Quality Index of Cast Eutectic Al-Si-Mg Alloy. *Materials & Design*, 32(1865-1871), (2011).

- [22] Liao H, Sun Y, Sun G. Correlation Between Mechanical Properties and Amount of Dendritic A-Al Phase in As-Cast Near-Eutectic Al–11.6% Si Alloys Modified with Strontium, *Materials Science and Engineering: A*, 335(62–66), (2002).
- [23] Alipour M, Azarbarmas M, Heydari F, Houghoughi M, Alidoost M, Emamy M. The Effect of Al–8B Grain Refiner and Heat Treatment Conditions on the Microstructure, Mechanical Properties and Dry Sliding Wear Behavior of An Al–12Zn–3Mg–2.5Cu Aluminum Alloy. *Materials & Design*, 38(64–73), (2012).
- [24] Savaşkan T, Hekimoğlu AP. Microstructure and Mechanical Properties of Zn–15Al-Based Ternary and Quaternary Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 603, (52–57), (2014).
- [25] Shabestari SG. The Effect of Iron and Manganese on the Formation of Intermetallic Compounds in Aluminum–Silicon Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 383(289–298), (2004).
- [26] Abuhasel KA, Ibrahim MF, Elgallad EM, Samuel FH. On the Impact Toughness of Al–Si Cast Alloys. *Materials & Design*, 91(388–397), (2016).
- [27] Korkut I, Boy M, Karacan I, Seker U. Investigation of Chip-Back Temperature During Machining Depending on Cutting Parameters. *Materials & Design*, 28 (2329-2335), (2007).
- [28] Sharma VS, Dhiman S, Sehgal R, Sharma SK. Estimation of Cutting Forces and Surface Roughness for Hard Turning Using Neural Networks. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19 (473-483), (2008).
- [29] Korkut I, Donertas MA. The Influence of Feed Rate and Cutting Speed on The Cutting Forces, Surface Roughness and Tool–Chip Contact Length During Face Milling. *Materials & Design*, 28 (308-312), (2007).
- [30] Ali MH, Khidhir BA, Ansari MNM, Mohamed B. FEM To Predict the Effect of Feed Rate on Surface Roughness with Cutting Force During Face Milling of Titanium Alloy. *HBRC Journal*, 9 (263-269), (2013).
- [31] Bayraktar Ş, Çamkerten Ç, Salihoğlu N. Bakır ve Silisyum İlavelerinin Al-25Zn Alaşımının CVD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kaplamalı Takımlarla Tornalanmasında İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8 (79-93), (2020).
- [32] Özel T, Karpat Y. Predictive Modeling of Surface Roughness and Tool Wear in Hard Turning Using Regression and Neural Networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (467-479), (2005).
- [33] Liao H, Sun Y, Sun G. Correlation Between Mechanical Properties and Amount of Dendritic A-Al Phase in As-Cast Near-Eutectic Al–11.6%Si Alloys Modified with Strontium. *Materials Science and Engineering: A*, 335 (62–66), (2002).
- [34] Sekmen M, Günay M, Şeker U. Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı Ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş Ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 18 (141-148), (2015).
- [35] Gökçaya H, Nalbant M. Kesme Hızının Yığıntı Katmanı ve Yığıntı Talaş Oluşumu Üzerindeki Etkilerinin SEM ile İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (481-488), (2007).
- [36] Ciftci I, Turker M, Seker U. Evaluation of Tool Wear When Machining Sicp-Reinforced Al-2014 Alloy Matrix Composites. *Materials & Design*, 25(251-255), (2004).
- [37] Barnes S, Pashby IR, Mok DK. The Effect of Workpiece Temperature on The Machinability of An Aluminum/SiC MMC., 118 (422-427), (1996).
- [38] Atlati S, Haddag B, Nouari M, Moufki A. Effect of The Local Friction and Contact Nature on The Built-Up Edge Formation Process in Machining Ductile Metals. *Tribology International*, 90 (217-227), (2015).
- [39] Haddag B, Atlati S, Nouari M, Moufki A. Dry Machining Aeronautical Aluminum Alloy AA2024-T351: Analysis of Cutting Forces, Chip Segmentation and Built-Up Edge Formation. *Metals*, 6 (197), (2016).
- [40] Acir A, Turgut Y, Übeyli M, Günay M, Şeker U. A Study on The Cutting Force in Milling of Boron Carbide Particle Reinforced Aluminium Composite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 16 (187-196), (2009).
- [41] Ezugwu EO, Lim SK. The Performance of Cermet Cutting Tools When Machining an Ni-Cr-Mo (En 24) Steel. *Lubrication Engineering*, 51(139-145), (1995).
- [42] Boothroyd G, Knight WA. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. CRC Press-Taylor and Francis, (2006).



- [43] Demir H, Gündüz S. The Effects of Aging on Machinability of 6061 Aluminium Alloy. *Materials & Design*, 30 (1480-1483), (2009).
- [44] Yücel A, Yıldırım ÇV, Sarıkaya M, şirin ř, Kıvak T, Gupta MK, Tomaz ÍV. Influence of MoS<sub>2</sub> Based Nanofluid-MQL on Tribological and Machining Characteristics in Turning of AA 2024 T3 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 15 (1688-1704), (2021).
- [45] Yıldırım ÇV, Sarıkaya M, Kıvak T, şirin ř. The Effect of Addition of hBN Nanoparticles to Nanofluid-MQL on Tool Wear Patterns, Tool Life, Roughness and Temperature in Turning of Ni-Based Inconel 625. *Tribology International*, 134 (443-456), (2019).
- [46] Ekici E, Motorcu AR, Uzun G. An Investigation of the Effects of Cutting Parameters and Graphite Reinforcement on Quality Characteristics During the Drilling of Al/10B4C Composites. *Measurement*, 95 (395-404), (2017).
- [47] Okay F, Islak S, Turgut Y. Investigation of Machinability Properties of Aluminium Matrix Hybrid Composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 68 (85-94), (2021).