

Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Elde Edilen Yüzey Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerini Geliştiren Çoklu Mekanizmalar

Gökçe Mehmet Genç¹

ÖZ

Sürtünme karıştırma prosesi (SKP), sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi esaslı olup, metalik malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için geliştirilmiş bir katı hal yöntemidir. Yöntem ile sert ikincil faz partiküllerin matris yapısına dağıtılarak eklenebilme (yerleştirilebilme) imkanı, yöntemin sonradan yüzey metal matrisli kompozit (YMMK) üretiminde de yaygın şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Basit, çevreci ve düşük maliyetli bir katı hal yöntemi olması, yüzey kompoziti üretiminde kullanılan birçok sıvı ve gaz hal yöntemlerine göre daha ön plana çıkmasını sağlamıştır. Sürtünme karıştırma prosesiyle yüzey metal matrisli kompozit elde ederken malzemenin mikro yapısının ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde birçok farklı mekanizma birlikte rol oynamaktadır. Matris yapısında elde edilen bu mukavemet artırıcı mekanizmalar, yöntemin işlem gören malzemeye kazandırdığı kendine has özellikler ile kullanılan sert ikincil faz partiküllerin matris yapısına dağılmasıyla gelişen özelliklerin melezlenmesi ile sağlanmaktadır. Çalışmada SKP ile elde edilen YMMK'lerin mekanik özelliklerindeki gelişmede sert ikincil faz partiküllerin, dinamik rekristalizasyonun, Zener sabitlemenin (iğneleme) ve Orowan mekanizmasının etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma prosesi, dinamik rekristalizasyon, zener sabitleme, orowan mekanizması

Multiple Mechanisms Improving The Mechanical Properties Of Surface Metal Matrix Composites Obtained By Friction Stir Processing

ABSTRACT

Friction stir processing (FSP), a technique based on the principles of friction stir welding (FSW), is a solid-state method that was developed to enhance the properties of metallic materials. The possibility of the addition of hard second phase particles to matrix structure by distributing, subsequently caused that this method has also been used commonly in surface metal matrix composite (SMMC) manufacturing. By means of the advantages of being a simple, environmentally friendly, and cost-effective solid-state method, FSP has come into prominence more than various liquid and gas-phase methods that are used to manufacture SMMCs. In the FSP method, multiple mechanisms take part together in enhancing the microstructure and mechanical properties of the material during processing. These strengthening mechanisms in matrix structure obtained by hybridizing the specific properties gained to processed material by the FSP method and the enhanced properties by distributing the hard second phase particles in the matrix material. In this study, the effects of hard second phase particles, dynamic recrystallization (DRX), Zener pinning, and Orowan mechanism in the enhancement of mechanical properties of the SMMCs manufactured by FSP were investigated.

Keywords: Friction stir processing, dynamic recrystallization, zener pinning, orowan mechanism

Geliş/Received : 30.04.2021

Kabul/Accepted : 01.07.2021

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, mehmet.gencer@deu.edu.tr
ORCID: 0000-0003-1084-7240

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Conventional materials used in the industry cannot often provide the requirements of modern technology. In order to supply these requirements and obtain materials beyond the conventional alloys, metal matrix composites (MMC) are used commonly in almost every sector of industry [1, 2]. The ability to combine several materials (metal, nonmetal, ceramic) with their specific properties in a single structure, gives a great opportunity for variety. Especially in automotive (fiber reinforced pistons, particle reinforced brake discs) and aviation (fan exit guide vanes of gas turbine engine [4]) industry, the carried-out investigations to decrease the weight are driving force for the optimization of the designs in which the usage of lightweight materials is essential [5-8]. While determining the manufacturing method for MMC parts/machine elements; the geometry of designed parts, the expected properties from parts, the matrix material, and the type, shape, and size of reinforcements are considered. The homogenous distribution of reinforcements in MMC structure is an important and difficult situation [6, 12]. MMC production by using liquid phase methods may result in some problems in matrix such as interface reactions between matrix and reinforcements, formation of some detrimental phases, clustering of reinforcements, casting defects that especially affects the tensile properties, heterogeneous and unfavorable microstructure formation, inclusions and porosity [9, 13-18]. In this study, the principles of multiple mechanisms that affect enhancing the microstructural and mechanical properties of the particle reinforced surface metal matrix composites obtained via friction stir processing are stated.

The Importance of Manufacturing Surface Metal Matrix Composites (SMMC) Through Friction Stir Processing (FSP)

MMCs generally have also some disadvantages besides their advantages, such as decrease in ductility with regard to the matrix material, high expenses and the complexity of manufacturing in most cases. Especially the relation between the cost and strength of MMCs is the most important issue to optimize in MMC manufacturing [23]. The sizes and types of used reinforcements, matrix materials, the particle/matrix ratio in MMC, the difficulty in machinability and the used method to produce MMC cause the cost of MMC to change in wide ranges [23, 24]. Furthermore, to prevent unfavorable effects of discontinuities that might be formed in the composite structure due to liquid phase methods, in most applications only the SMMC can be selected for service besides manufacturing the material completely composite. The most important advantage of the SMMC is being manufactured by hybridizing the toughness of the matrix and good properties of the surface. With these properties, SMMCs are superior to the alloys manufactured completely as MMC [9]. Various liquid phase methods may result in obtaining SMMC with similar disadvantages as in MMC manufacturing. If the SMMC production with lesser defects (discontinuities) and low cost is done below the melting point of the matrix material, the mentioned problems and the results of these in the composite structure will be prevented on a vast scale. Thus, the service life of the manufactured composite materials will be increased [6, 26-29].

Friction Stir Processing (FSP)

Recently, the liquid phase methods (laser melt treatment, plasma spray, and centrifugal casting, etc.) used to obtain surface MMC have been losing their utilization gradually in industry. Friction stir processing (FSP) has been using as a novel surface modification technique to obtain surface MMC with its superior properties such as being solid-state method, environmentally friendly, energy-efficient, economic, simple, clean, and versatile [9, 13, 30].

In friction stir processing, a non-consumable rotating tool that has a specific pin and shoulder



is immersed in material to ensure the required surface modification like in friction stir welding (FSW). The friction between the tool and material supplies needed frictional heat to soften the material. By rotating and simultaneously traveling of the immersed tool, the material is exposed to severe plastic deformation (SPD), the thermal effect, and complex material flow called “stirring” [9, 30]. FSP is a local thermo-mechanic method that refines the microstructure and increases the homogeneity and density of the material solely in the applied local area [35]. Although FSP was basically developed for grain refinement, it subsequently became a commonly used application with the advantages of the solid-state methods in surface composite manufacturing [6, 26-29, 31-34].

Enhancing The Mechanical Properties of Surface Composites by FSP

Various hard second phase particles (SiC, TiC, BC, BN, Al₂O₃, TiN, etc.) are used in SMMCs obtained through FSP. Material surface is treated with the FSP tool and thus hard second phase particles are added to the surface of the matrix material and distributed in the processed zone. These hard ceramic reinforcements increase the surface hardness remarkably. Besides this, high heat input formed by friction and occurred severe plastic deformation result in to form of dynamic recrystallization (DRX) in the stir zone (SZ). DRX increases the grain boundary energy in SZ, and consequently, it ensures the formation of fine grains by increasing the grain boundary amount. Thus, the equiaxed and fine-grained microstructure is obtained in SZ [47]. This situation is one of the multiple strengthening mechanisms of FSP that is carried out in SZ depending on the Hall-Petch relation. Also, the hard second phase particles in SMMCs affect the dynamic recrystallization with FSP. These reinforcements cause inhomogeneous local deformations and thus grains are fragmented and the effectiveness of DRX increases [40]. Grain boundaries migrate during DRX and grain growth. During this migration, it is expected that the grain boundaries move through the hard particles. But hard second phase particles do not allow this migration by applying Zener pinning force to grain boundaries. These reinforcements that are distributed to structure below melting point by FSP and the reaction possibility with the matrix is reduced are very effective in the application of Zener pinning force in SMMCs. Another strengthening mechanism in SMMC manufacturing through FSP is blocking the dislocation movement in crystal by hard second phase particles depending on the Orowan mechanism.

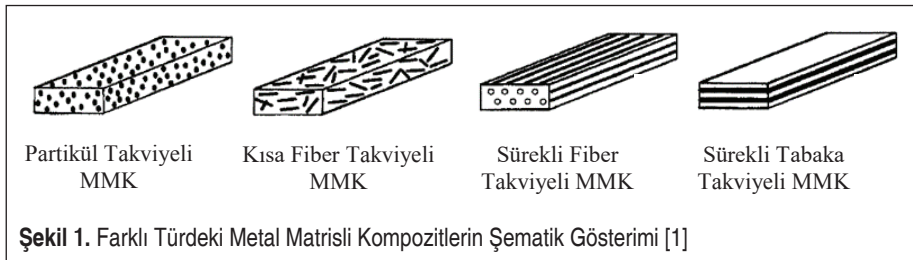
Conclusion

In this study, the mechanisms that enhance the microstructure and mechanical properties of SMMCs manufactured by FSP and their effects on the matrix structure were investigated. During FSP; it was observed that fine-grained structure obtained due to DRX, hard second phase particles and the positive effects (Zener pinning and Orowan mechanism) of these reinforcements improve the surface properties all together in a single process.

1. GİRİŞ

Endüstride kullanılan geleneksel alaşımların çoğu; yüksek dayanım/yoğunluk oranı, iyi derecede tokluk, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme vb. gibi birçok özelliği bir arada bulunduramamakta ve günümüz teknolojisinin gereksinimlerini çoğu zaman tek başlarına sağlayamamaktadırlar. Bu gereksinimleri karşılamak ve geleneksel alaşımların sınırlarının üzerinde malzemeler elde edebilmek için metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler günümüzde endüstrinin neredeyse her alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozitler, tasarlanan mühendislik malzemesinden kullanım aşamasında beklenen özellikleri karşılamak amacıyla biri metal (saf ya da alaşım durumunda) olmak üzere en az iki farklı malzemenin (metal, ametal, seramik vb.) belirli yöntemler dahilinde birleşimi ile elde edilen malzemelerdir. Metal matrisli kompozitleri oluşturan malzemeler fiziksel ve kimyasal olarak birbirlerinden farklı özellikler gösterirler [1]. Bileşen malzemelerin herhangi birinden tek başına elde edilemeyen özelliği sağlamak amacıyla üretilen MMK'de ana malzeme metal matris iken diğer malzeme/ler ise takviye görevi gören mikro ya da nano boyutlarda partiküller, kısa fiberler, sürekli fiberler ya da sürekli tabakalar olabilmektedir (Şekil 1). Matris malzemesi takviye elemanlarını bir arada tutar ve malzemenin şekilsel bütünlüğünü korur. Takviyeler ise matrise belirli oranda ve boyutlarda eklenerek kompozit yapıdan beklenen özellikleri sağlarlar [2, 3].



Çeşitli malzemeleri (metal-seramik-ametal) sahip oldukları özellikleri ile birlikte tek bir yapıda birleştirebilme, büyük bir çeşitlilik imkanı sağlamaktadır. Bu çeşitlilik içinde ticari olarak kullanılan MMK'lerin başında alüminyum, magnezyum, bakır, titanyum, nikel esaslı alaşımlar gelmektedir. Ancak MMK'ler denince akla çoğunlukla hafif metal matrisli kompozitler gelmektedir. Özellikle otomotiv (fiber takviyeli pistonlar, partikül takviyeli fren diskleri) ve havacılık endüstrisi (gaz türbini motorunda fan çıkış kılavuz kanatları [4]) başta olmak üzere ağırlık azaltmak için yapılan çalışmalar, düşük ağırlığa sahip malzemelerin kullanıldığı tasarımların optimizasyonu için çok büyük itici güç olmaktadır [5-8]. Bu kapsamda, alüminyum alaşımları yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi yorulma dayanımı ve aşınma direnci, yüksek düktiliteye



sahip matrisleri, kolay işlenebilme özellikleri ve uygun maliyetleri ile MMK üretiminde matris malzemesi olarak en yaygın kullanılan metal haline gelmiştir [9-11]. Birçok farklı yöntem ile imal edilebilen MMK parçalarının/makine elemanlarının üretimi için kullanılacak yöntem belirlenirken; parçaların geometrileri, parçadan beklenen özellikler, kullanılacak matris malzemesi ve takviye elemanının cinsi, şekli ve boyutu dikkate alınır. MMK'lerdeki takviye malzemelerinin yapı içinde homojen dağılımları önemli ve zor bir durumdur [6, 12].

Ergitme esaslı yöntemler ile MMK üretmek; matris ve takviyeler arasındaki arayüz reaksiyonları, kompozit yapı içinde bazı zararlı fazların oluşumları, takviyelerin belirli bölgelerde kümelenmesi, özellikle çekme dayanımını etkileyen döküm yöntemi hataları, heterojen ve uygun olmayan içyapı oluşumu, inklüzyonlar ve porozite gibi bazı tipik problemleri de yanında getirmektedir [9, 13-18]. Y.Z. Li ve ark. B4C/AA6061 alüminyum kompozitlerinde takviye ve matris malzemesi arasında gerçekleşen arayüz reaksiyonları sonucu $MgAl_2O_4$, MgB_7 ve $Mg_0,78Al_{10,75}B_{14}$ bileşiklerinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu bileşiklerin oluşumu nedeniyle matriste Mg'nin ciddi şekilde azaldığını ve bunun sonucu olarak da üretilen kompozitin yaşlanma ile sertleşebilirliğinin bozulduğunu belirtmişlerdir [19]. Rajan ve ark. karbon destekli alüminyum MMK'da karbon fiberin ergimiş alüminyumla 900K'in üzerinde şiddetli şekilde reaksiyona girdiğini ve fiberlerin parçalanmasıyla alüminyum karbür ($Al_4C_3(5)$) oluşturarak yapının mukavemeti azalttığını belirtmişlerdir [20]. Davidson çalışmasında ürettiği %15 SiCp takviyeli AA2014 MMK'da takviyelerin kümelenmediği bölgelerde çatlak başlangıcının gerçekleştiği tespit etmiştir [21]. Oluşan bu gibi mikro/makro süresizlikler yapı içinde buldukları veya kümelendikleri yerlerde düşük mukavemetli bölgeler oluşturup Al MMK'nın kullanım sırasında iş göremez hale gelmesine ya da beklenen özellikleri gösterememesine sebep olmaktadır [9, 22]. Bunun yanında, kullanılan üretim yöntemlerindeki kontrolü zor olan bazı parametreler de (döküm işleminde soğuma sıcaklığı gibi) MMK'nın kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir [12]. Çalışmada, katı hal yöntemi olan sürtünme karıştırma prosesi ile elde edilen sert partikül destekli yüzey metal matrisli kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde etkili olan çoklu mekanizmalar hakkında bilgiler özetlenmiştir.

2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ (SKP) İLE YÜZEY METAL MATRİSLİ KOMPOZİTİ ÜRETİMİNİN ÖNEMİ

MMK'ler genel olarak sağladığı avantajların yanında bazı dezavantajlara da sahiptirler. Bunlar; matris malzemesine göre süneklikte azalma, imalatın maliyetli ve çoğu zaman karmaşık oluşudur. Özellikle MMK'lerin dayanımları ve maliyetleri arasındaki ilişki MMK imalatında en çok optimize edilmeye çalışılan durumdur [23]. Örneğin izotropik ve düşük tokluk özelliğine sahip partikül takviyeli MMK'lerin maliyeti, ani-

zotropik ve yüksek mukavemetli sürekli fiber takviyeli MMK'lere göre relatif olarak oldukça düşüktür. MMK'lerden beklenen çeşitli özellikleri sağlamak için kullanılan takviyeler ve boyutları, matris malzemeleri, MMK'deki matris ve takviye malzemesi oranı, üretim sonrası işlenebilirliklerindeki zorluk ve MMK'yı üretmek için kullanılan yöntem MMK maliyetinin çok geniş sınır değerler arasında değişmesine sebep olmaktadır [23, 24]. Bunlara ilaveten, özellikle sıvı hal yöntemleriyle ortaya çıkma ihtimali olan çoğu süreksizliğin MMK parçalarının performanslarını ve kullanım ömürlerini azaltmaması için de tüm kütlenin kompozit halde üretilmesi yerine çoğu uygulamada sadece yüzey metal matrisli kompozitlerin (YMMK) kullanımları tercih edilebilir (özellikle aşınma ve yorulma dirençlerinin öncelikli olduğu durumlarda). Bu nedenle, imalat endüstrisindeki son gelişmelerle birlikte, MMK'den istenilen dayanım ve özellikleri sağlamak, üretim maliyetinin daha dar aralıkta değişken olmasını sağlamak ve iç yapısı geliştirilmiş daha az hatalı MMK elde etmek için son yıllarda MMK'leri kütle halinde üretmek yerine sadece yüzey kompoziti (yüzey metal matrisli kompozit) olarak üretme yollarına başvurulmuş ve bu doğrultuda iyi sonuçlar alınmıştır [25]. Yüzey kompozitlerinin en önemli avantajı matrisin sahip olduğu tokluğun ve yüzeyin iyi mekanik özelliklerinin melezlenmesiyle elde edilmesidir. Bu özellikleriyle yüzey kompozitleri alaşımlardan veya tamamıyla kompozit olarak üretilmiş malzemelerden daha iyidir [9].

YMMK üretirken de yine MMK'larda olduğu gibi çeşitli sıvı hal yöntemleri kullanılabilir ve bu yöntemler MMK üretimindeki benzer dezavantajlarla YMMK elde edilmesine sebep olabilmektedir. Uygun maliyetli ve daha az hatalı (süreksizlikli) YMMK elde etme prosesi eğer matris ergime noktasının altında gerçekleştirilirse bahsi geçen problemler ve bunların yapı içindeki sonuçları büyük oranda engellenebilir ve böylece üretilen malzemelerin kullanım ömürlerinin artışı sağlanır [6, 26-29].

3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ (SKP)

Son dönemde YMMK üretiminde sıvı hal yöntemleri olarak kullanılan lazer ergitme yöntemi, plazma püskürtme ve savurma döküm gibi yöntemler yerini çevreci, enerji tasarruflu, ekonomik, basit, temiz ve çok yönlü bir yüzey modifikasyon tekniği olan sürtünme karıştırma prosesine bırakmaktadır [9, 13, 30]. K. Venkatesvara reddy ve ark. çalışmalarında SKP ile hazırladıkları grafit takviyeli AA6061 yüzey kompozitini başarılı bir şekilde üretmişler ve elde ettikleri kompozitin sıcaklık ve frekansa bağlı sönümleme özelliğinin geliştiğini belirtmişlerdir [31]. N Naghshehkish ve ekibi SKP yöntemi ile ince taneli ve mekanik özellikleri geliştirilmiş grafen oksit destekli AA5083 matrisli yüzey kompoziti üretmişlerdir. Grafen oksitin ana metale göre sertliği %49 arttırdığını ve mukavemetini geliştirdiğini belirtmişlerdir [32]. E.B. Moustafa ve ark. SKP yöntemi ile ürettikleri AA7075/SiC-BN hibrit yüzey nanokompozitinde belirgin tane küçülmesi ve takviyelerle birlikte sertlik ve aşınma direncinde artış göz-



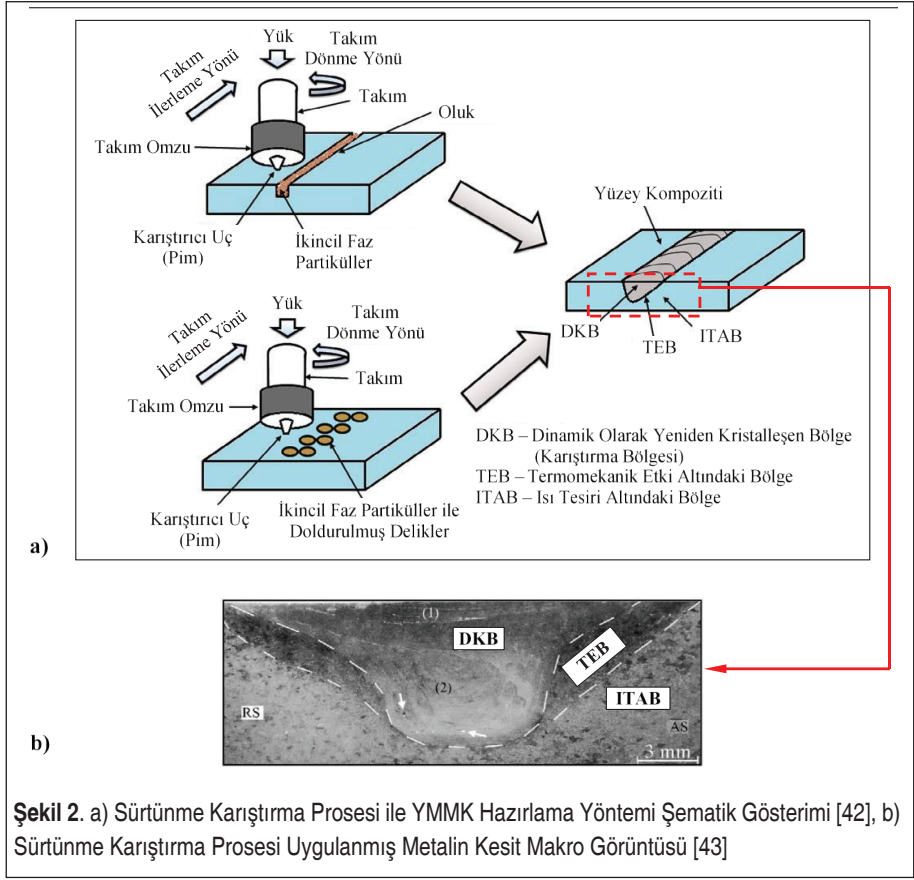
lemlemişlerdir [33]. Barati ve ekibi çalışmalarında SKP ile SiO₂ partikül destekli AA6061 üretirken ana malzemeye uygulanan titreşimin etkilerini araştırmış ve uygulanan titreşimin ana malzemenin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini iyileştirmede sadece SKP ile üretilen YMMK'ye göre daha faydalı olduğunu belirtmişlerdir [34].

SKP'de, sürtünme karıştırma kaynağında (SKK) olduğu gibi, karıştırıcı uç (batıcı uç) ve omuz kısmı bulunan dönen bir silindirik takım, gerekli yüzey modifikasyonunu sağlamak amacıyla levhaya daldırılır (Şekil 2(a)). Takım ve levha arasındaki sürtünme malzemenin yumuşaması için gerekli sürtünme ısısının oluşmasını sağlar. Malzemeye daldırılan takımın dönmesi ve aynı zamanda ilerlemesiyle, malzeme "karıştırma" olarak bilinen kompleks malzeme akışına, aşırı plastik deformasyona (eş zamanlı olarak sürtünme, ekstrüzyon ve dövme) ve termal etkiye maruz kalır [9, 30]. Bu haliyle, SKP malzemenin tüm kütesinin özelliklerini etkilemeden sadece uygulandığı lokal bölgede malzemenin sahip olduğu tane yapısı incelten ve malzeme yoğunluğunu ve homojenliğini arttıran lokal termomekanik metal işleme prosesidir [35]. SKP'nin katı hal yöntemi olmasının getirilerinin yanında, takım tasarımını, işlem parametrelerini ve soğutma/ısıtma durumunu optimize ederek malzemenin mekanik özelliklerini ayarlama ve işlenen bölgenin derinliğini isteğe göre belirleyebilme gibi de avantajları bulunmaktadır [36-38]. SKP sonrasında malzemede oluşan bazı karakteristik bölgeler; dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) ya da karıştırma bölgesi (KB), termo-mekanik etki altındaki bölge (TEB) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak isimlendirilmiştir (Şekil 2(b)).

SKP, SKK'nin temel prensipleri üzerine kurulmuş ve başlangıçta metalik malzemelerin özellikle mikroyapısal modifikasyonunu gerçekleştirmek ve malzemeye lokal olarak spesifik özellik kazandırmak için ortaya çıkmıştır [9, 30]. SKP her ne kadar temelde tane küçültme yöntemi olarak geliştirilse de daha sonraları katı hal yönteminin yüzey kompozit imalatındaki avantajları ile yaygın halde kullanılan bir uygulama haline gelmiştir [6, 26-29, 31-34].

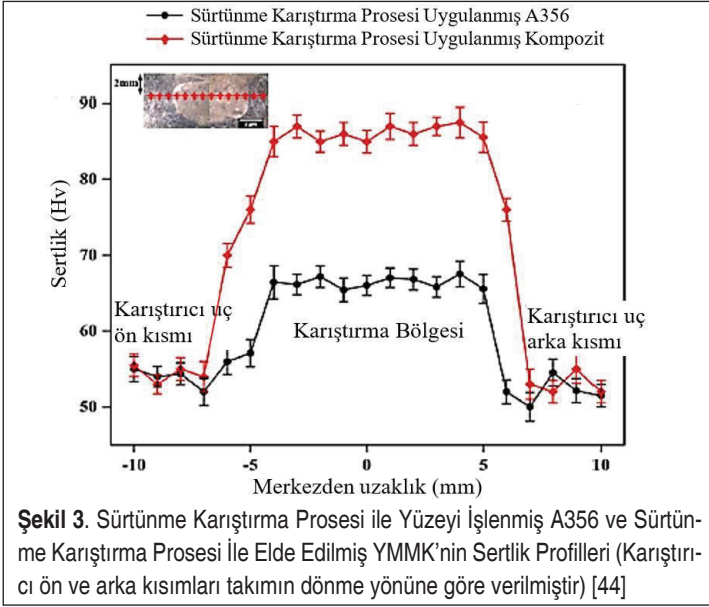
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ İLE YÜZEY KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Yöntem ile elde edilen YMMK'lerde çeşitli ikincil faz görevi gören sert partiküller (SiC, TiC, BC, BN, Al₂O₃, TiN vb.) kullanılmaktadır. Bu partiküller SKP ile yüzeye karıştırılmadan önce, ana malzeme yüzeyinde belirli derinlik ve genişliklerde oluk ya da delikler açılır. Sert seramik partiküller, uygun oranlarda oluklara/deliklere doldurularak üzerleri karıştırıcı ucu olmayan takım kullanılarak SKP ile kapatılır. Daha sonra, karıştırıcı ucu olan takım kullanılarak yüzey SKP ile işlenir ve sert seramik partiküller ikincil faz olacak şekilde matris malzemesi yüzeyine karıştırılır. Bu seramik partiküller sert yapıları ile yüzeyde önemli ölçüde sertlik artışına sebep olmaktadır (Şekil

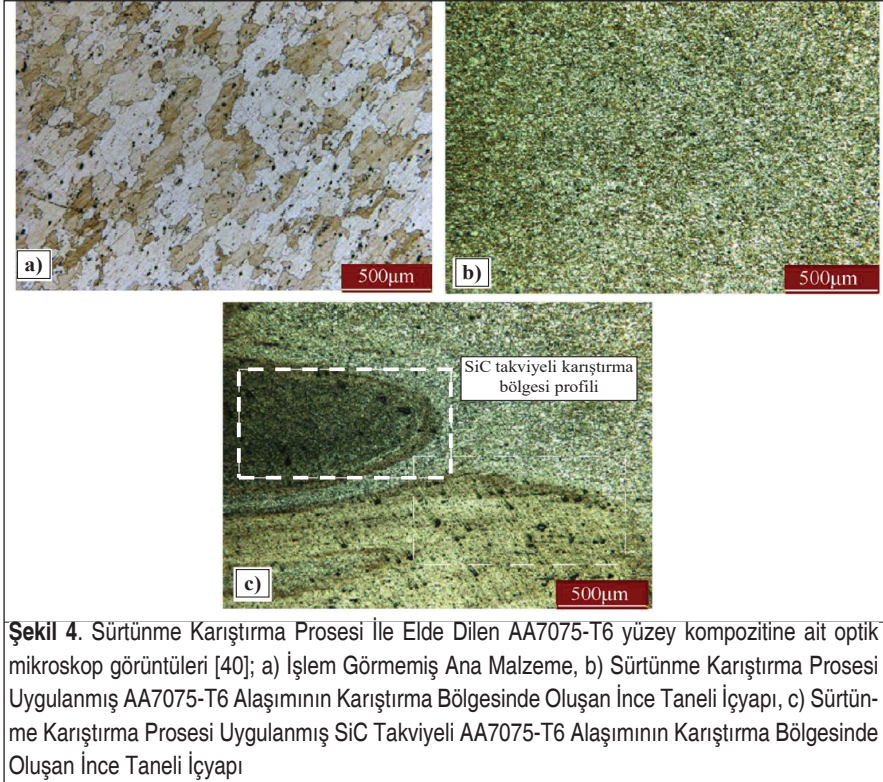


3). Bunun yanında, SKP süresince sert partiküllerin bir kısmı parçalanarak yapıya daha homojen dağılabilmektedir [39, 40]. Bu durum, yöntemle elde edilen partikül destekli YMMK'lerde mukavemet artışı açısından çok büyük avantaj sağlar. Sert partiküllerin yüzeye daha homojen dağılabilmesi için birden fazla paso atılması gerekir [41].

SKP ile YMMK'lerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesindeki tek etken ikincil faz partiküllerinin sahip oldukları yüksek sertlik değildir. Yöntem aynı zamanda kendisine has özellikleriyle de matris malzemesinin mekanik özelliklerini geliştirmektedir [45, 46]. Yöntemde sürtünme sebebiyle oluşan yüksek ısı ve aşırı plastik deformasyon, karıştırma bölgesinde (KB) dinamik rekristalizasyonun oluşmasına neden olur. Dinamik rekristalizasyon bu bölgede tane yüzey enerjisi miktarının artmasına, dolayısıyla tane sınırlarının artmasına sebep olarak yeni tane oluşumunu sağlar. Böylece karıştırma bölgesinde eş eksenli ve ince taneli mikroyapı oluşur [47]. İnce taneli içyapıda dislokasyonlar, hareketlerine doğal engel olan tane sınırlarına iri taneli yapıdaki



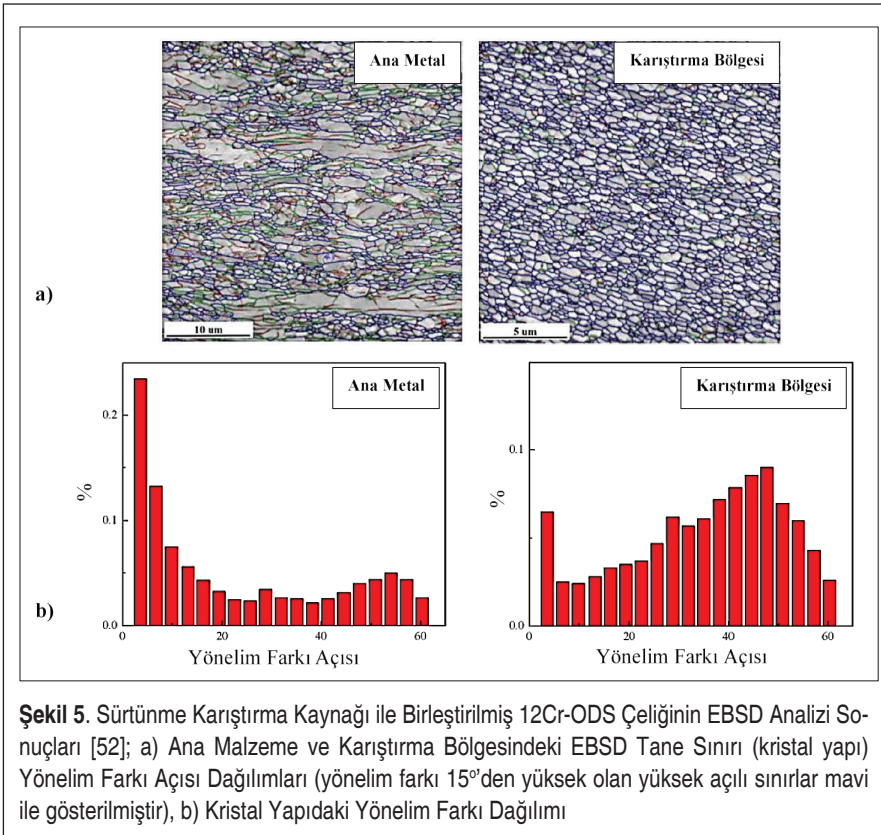
Şekil 3. Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Yüzeysel İşlenmiş A356 ve Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Elde Edilmiş YMMK'nin Sertlik Profilleri (Karıştırıcı ön ve arka kısımları takımın dönme yönüne göre verilmiştir) [44]

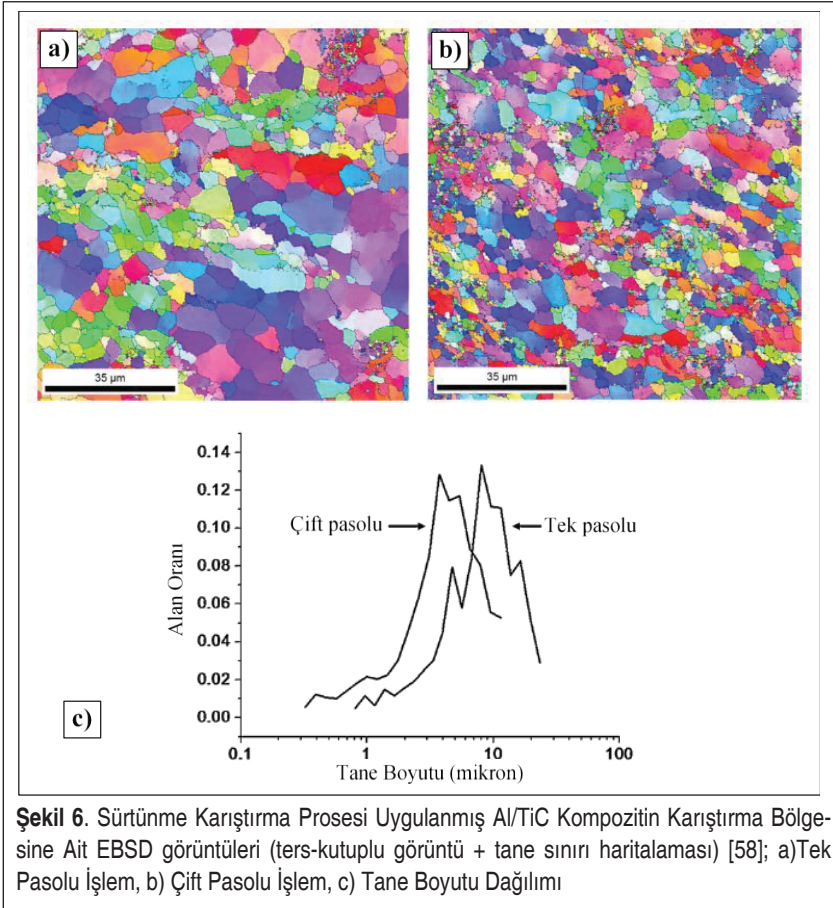


Şekil 4. Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Elde Edilen AA7075-T6 yüzey kompozitine ait optik mikroskop görüntüleri [40]; a) İşlem Görmemiş Ana Malzeme, b) Sürtünme Karıştırma Prosesi Uygulanmış AA7075-T6 Alaşımının Karıştırma Bölgesinde Oluşan İnce Taneli İyçyapı, c) Sürtünme Karıştırma Prosesi Uygulanmış SiC Takviyeli AA7075-T6 Alaşımının Karıştırma Bölgesinde Oluşan İnce Taneli İyçyapı

hareketlerine göre daha çabuk ulaşırlar ve burada yığılmaya başlarlar. Bu bölgede aynı zamanda SKP etkisiyle gerçekleşen yüksek-açılı tane sınırlarının sayısındaki artışın da kaymanın bir taneden komşu taneye geçmesini, tane sınırları ile birlikte, ekstra zorlaştırarak malzemenin sertliğinin ve akma gerilmesinin artmasını sağlar [40, 48]. Bu durum, SKP'nin karıştırma bölgesinde Hall-Petch ilişkisine bağlı olarak gerçekleştirdiği çoklu mukavemet artış mekanizmalarındandır.

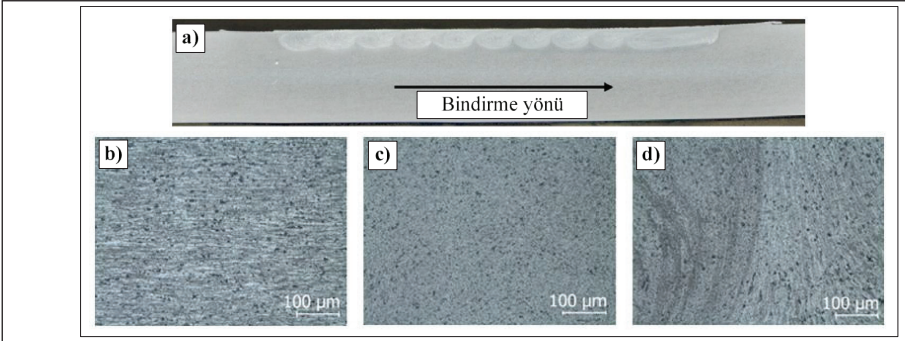
SKP süresince dinamik rekristalizasyona etki eden; termo-mekanik işlem parametreleri (proses parametreleri, karıştırıcı ucun dişli ya da çokgen profile sahip oluşu), malzeme alaşım durumu, malzemenin başlangıç tane boyutu gibi çeşitli faktörler bu bölgede gerçekleşen yeniden tane oluşumuna ve boyutuna doğrudan etki eder [37, 49]. YMMK yapıda bulunan sert ikincil faz partiküller de SKP ile dinamik rekristalizasyona etki eder. SKP sırasında yapıda bulunan sert partiküller homojen olmayan lokal deformasyonlara sebep olarak, tanelerin parçalanmasına ve böylelikle dinamik rekristalizasyon etkinliğinin artmasına sebep olur [40]. Bunun yanında, işlem süresince takım geçişinden sonra gerçekleştirilen ekstra soğutma işlemi de bu bölgeden ısı-



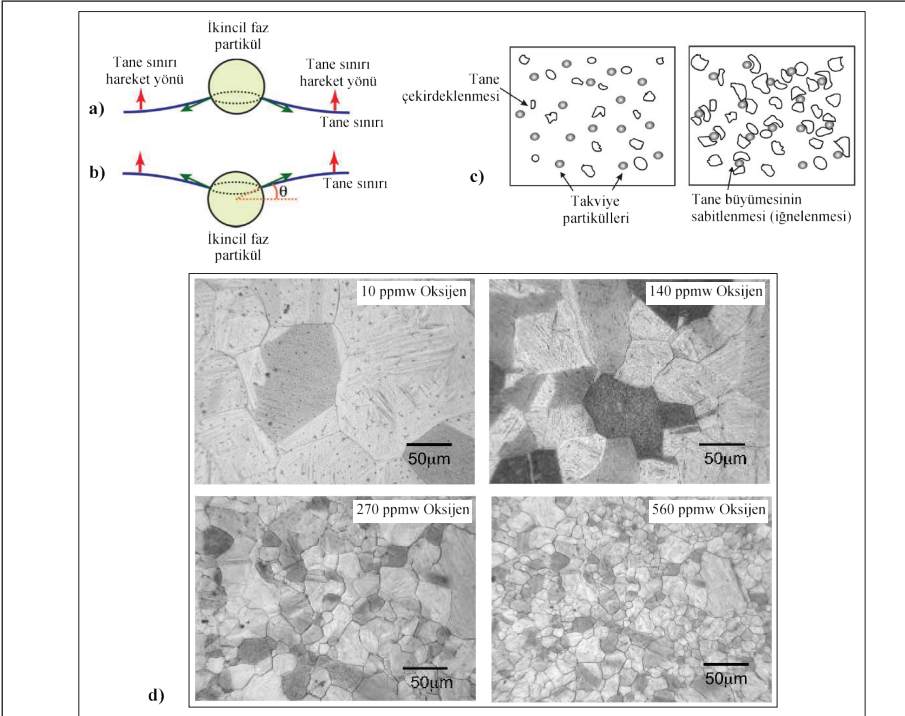


nın hızla uzaklaşmasını sağlamakta ve tane büyümesini engelleyerek daha ince taneli yapının elde edilmesine yardımcı olmaktadır [50].

Şekil 4'te H.A. Deore ve ark. [40] SKP ile yüzey kompoziti haline getirdiği AA7075-T6 levhanın ana malzeme ve karıştırma bölgesine ait içyapı görüntüleri verilmiştir. Karıştırma bölgesinde oluşan dinamik rekristalizasyon, tane yüzey enerjisi miktarının artmasına ve bu da tane sınırlarının artmasına sebep olmuştur. Aynı çalışmada, SKP sonrası karıştırma bölgesindeki yüksek-açılı tane sayısının arttığı da tespit edilmiştir [40, 48]. Karıştırma bölgesinde yüksek mekanik kuvvet ve aşırı plastik deformasyon sebebiyle oluşan dislokasyonların alt tane sınırları tarafından absorbe edildiği düşünülmektedir. Bu durum, sürekli-dinamik rekristalizasyonun etkin hale gelmesiyle düşük-açılı tane sınırlarındaki yönelim bozukluğunu (yönelim farkını) artırarak yüksek-açılı tane sınırlarının oluşumunu tetiklemektedir (Şekil 5) [40, 51-53]. Bunun yanında, SKP ile elde edilen ince taneli bölgede malzemenin süperplastik özelliği de



Şekil 7. %50 Bindirme Oranıyla Sürtünme Karıştırma Prosesi Uygulanan AA5083-H111 Plakasının Kesatine Ait Optik Mikroskop Görüntüleri [54]; a) Kesit Makro Görüntüsü, b) Ana Malzeme, c) Homojen Yapı Elde Edilmiş Karıştırma Bölgesi, d) Termo-Mekanik Etki Altındaki Bölge



Şekil 8. Tane Sınırı-Zener Sabitlemesi (iğneleme) İlişkisi Şematik Gösterimleri ve Mikroyapı Görüntüsü; a) Hareket Eden Tane Sınırının İkincil Faz Partikül İle Teması (arayüzeydeki gerilim tane sınırını partiküle doğru çekmektedir) [59], b) Tane Sınırı Hareketine Devam Etmeye Çalışırken Arayüzeydeki Kılcalık Etkisi Tane Sınırını Geriye Çekmektedir [59], c) Takviye Partiküllerinin Tane Büyümesini Sabitlemesinin Şematik Gösterimi [41], d) 1200 °C'ye Isıtılmış Östenitik Çeliğin Yapısında Bulunan Farklı Oranlardaki İnce Oksit Partiküllerinin Östenit Tanelerinin İrileşmelerine Zener Sabitleme (iğneleme) ile Etkileri [60] (ppmw: Kütlece milyonda bir)

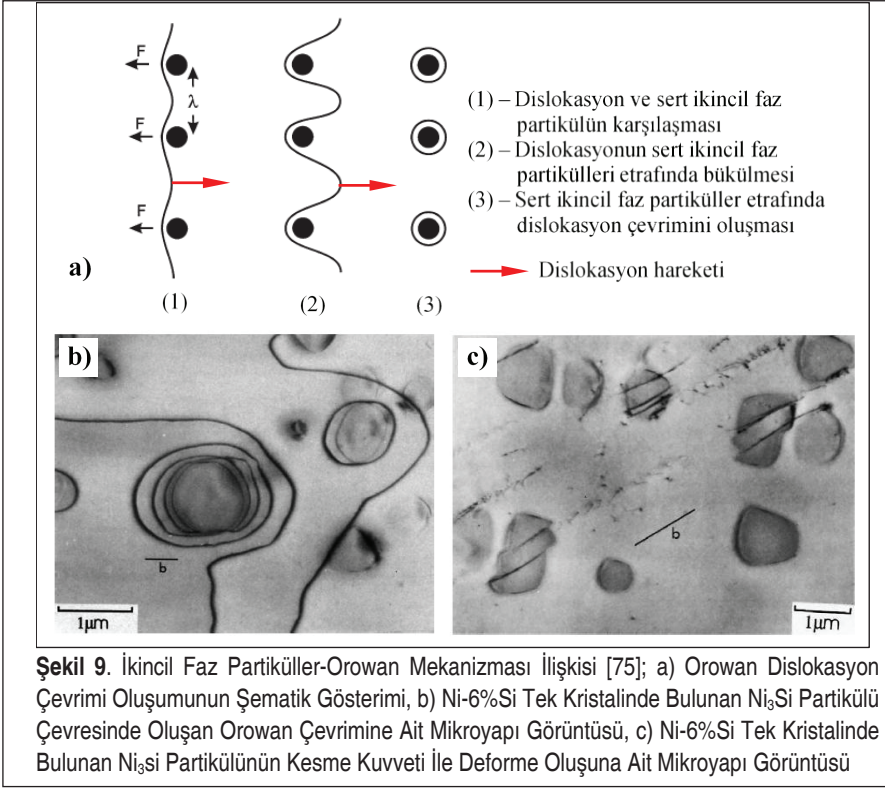


gelişmektedir [46, 54-57]. Bu özelliği geliştirmek ve daha ince taneli iç yapı elde edebilmek için SKP ile çoklu paso (Şekil 6) ya da belirli bir yüzde ile bindirilmiş pasolar (Şekil 7) da uygulanmaktadır [58].

Çok kristalli malzemelerde ince taneli iç yapı elde edilebiliyor olması, malzemelerin sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özelliklerin geliştirilmesi ya da ayarlanabilmesi açısından çok büyük öneme sahiptir [61-63]. SKP ile ana malzemenin yüzeyinde lokal olarak tane inceltme işleminin (yöntem parametrelerinin ayarlanması ile) yapılabilir olması, yöntemi diğer YMMK elde etme yöntemlerinin önüne geçmesini sağlamaktadır. İnce taneli malzemenin elde edilebilmesi kadar kullanım sırasında sahip olduğu yapıyı koruması da aynı derecede öneme sahiptir. Sert ikincil faz partiküllerin matris malzemesine yüksek sertlik kazandırması için kullanımının yanında, malzemenin sıcaklık etkisiyle tanelerinin irileşmesini yavaşlatmak veya durdurmak (Zener sabitleme/iğneleme) için de matris içinde kullanılması en efektif yollardan biridir [64].

Rekristalizasyon ve tane büyümesi sırasında tane sınırları hareket eder. Hareket eden tane sınırları ilerledikleri yönde bulunan ve matris malzemesi ile uyumlu olmayan sert ikincil faz partikülleri geçmek için normal ilerleme hareketlerine göre daha çok serbest enerji harcayacaklardır. Tane sınırları ilerleme hareketleri sırasında normalde sert partikülün içinde olması gerekirken, partiküllerin uyguladıkları sabitleme (iğneleme) kuvveti ile sert partikülleri geçemezler (Şekil 8). SKP ile ergime sıcaklığı altında yapıya dağıtılmış ve matris ile arasında reaksiyon olasılığı minimuma indirgenmiş sert ikincil faz partiküller YMMK'lerde bu sabitleme (iğneleme) kuvvetinin uygulanmasında çok etkilidir. İlerleme hareketinin devam edebilmesi için (sert partiküllerin geçilmesi için) yeni tane sınırları oluşmak zorundadır [41, 64-67]. Bu durum enerjik olarak elverişli değildir. Çünkü tane sınırlarının sert partikülleri geçmesi için gerekli ekstra serbest enerji, tane büyümesi için gerekli serbest enerji değişimine eşit ya da ondan büyük ise tane büyümesi gerçekleşmez [67]. Böylelikle matris malzemesi ile uyumsuz sert ikincil faz partiküller tane sınırlarına sabitleme (iğneleme) kuvveti (Zener sabitleme) uygulayarak hareketlerine engel olarak davranır ve tanelerin büyümesini yavaşlatır ya da büyümesine engel olur. Bu şekilde tane büyümesi engellendiğinde özel kritik tane boyutu da elde edilebilmektedir [68-72]. SKP ile sert ikincil faz partiküllerin yüzeyde (özellikle bindirilmiş pasolar ile) homojen dağıtılması ve belirli miktarda parçalanması, yöntem sırasında oluşan ısı nedeniyle tane irileşmesine engel olmaktadır. Böylelikle yöntem, elde edilen YMMK malzemeye Zener sabitleme (iğneleme) yoluyla da ekstra mukavemet artışı sağlamaktadır.

SKP ile YMMK'deki bir diğer mukavemet artırıcı etki de karıştırıcı uç ile matris yapısına dağıtılmış sert ikincil faz partiküllerinin kristal içinde dislokasyon hareketlerine Orowan mekanizmasına göre direnç göstermesiyle gerçekleşir (Şekil 9 (a)-(b)). Matris içindeki sert ikincil faz partiküllerin dislokasyon hareketine etkileri; sertliklerine, matristeki dağılımlarına, şekillerine ve boyutlarına bağlıdır. Eğer takviyeler uygun



boyuta ve yeterli dayanıma sahip değilirse, hareket eden dislokasyon tarafından kesme kuvvetine maruz kaldıklarında kayma düzlemine paralel şekilde parçalanırlar (kesilirler) (Şekil 9 (c)). Ancak hareket halindeki dislokasyonlar matrisle uyumsuz sert ikincil faz partiküller ile karşılaştıklarında, partiküllerin kesilmesinin daha kompleks olmasının da etkisiyle birlikte, kristal içindeki kayma yavaşlayacak ya da duracaktır. Bu şekilde malzemede plastik deformasyon homojen olarak gerçekleşmeyecektir. Dislokasyonların hareketinin takviyelerin etraflarında bükülerek ilerleyebilmesi için daha yüksek kayma gerilmelerine ihtiyaç olacaktır. Böylece SKP ile matris malzemesi yüzeyine karıştırılmış sert ikincil faz partiküller ile birlikte yapıda Orowan mukavemet artışı da sağlanmış olur [73, 74].

5. SONUÇLAR

Çalışmada sürtünme karıştırma prosesi ile üretilen yüzey metal matrisli kompozitlerdeki içyapı ve mekanik özellikleri geliştiren mekanizmalar ve bunların etkileri incelenmiştir. Yöntemde takımın dönme ve ilerleme hareketiyle karıştırma bölgesinde gerçekleştirdiği aşırı plastik deformasyon ve oluşan ısı dinamik rekristalizasyonun



oluşmasını sağlar. Böylelikle bu bölgede ince taneli yapı ve dolayısıyla Hall-Petch ilişkisine bağlı olarak iyi mekanik özellikler elde edilir. SKP ile YMMK imalinde yüzeye eklenen sert ikincil faz partiküller matris yapısında yüzey sertliği, aşınma ve yorulma dirençleri gibi mekanik özellikleri geliştirmektedir. Bu takviye elemanlarının aynı zamanda takımın hareketi ve yöntemde kullanılan paso sayısına bağlı olarak matris yapısına parçalanarak dağıldığı ve böylece YMMK’da Zener sabitlemeye (iğneleme) göre tane büyümesini ve Orowan mekanizmasına uygun olarak da dislokasyon hareketlerine engel olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA

1. **Chawla, N., Chawla, K. K.** 2006. *Metal Matrix Composites*, ISBN-13: 9780387233062, Springer Science & Business Media, United States of America.
2. **Kalemtaş, A.** 2014. “Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış,” *Putech&Composites*, Ekim-Kasım-Aralık sayısı, s.18-30.
3. **Gürbüz, M., Mutuk, T.** 2019. “Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler ve Grafen Üzerine Yeni Eğilimler,” *Mühendis ve Makina*, vol. 60, no. 695, p. 101-118.
4. **Nturanabo, F., Masu, L., Kirabira, J.B.** 2020. “Novel Applications of Aluminium Metal Matrix Composites,” - *Aluminium Alloys and Composites*, ed. Cooke, K., ISBN: 978-1-78984-514-3, IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.81519
5. **Kainer, K.U.** 2006. *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, ISBN-13: 978-3-527-31360-0, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
6. **Sharifitabar, M., Sarani, A., Khorshahian, S., Afarani, M. S.** 2011. “Fabrication of 5052Al/Al₂O₃ Nanoceramic Particle Reinforced Composite via Friction Stir Processing Route,” *Materials and Design*, vol. 32, no. 8-9, p. 4164–4172. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.048>
7. **Cavaliere, P.** 2005. “Mechanical Properties of Friction Stir Processed 2618/Al₂O₃/20p Metal Matrix Composite,” *Composites: Part A*, vol. 36, no. 12, p. 1657–1665. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.016>
8. **Gülcan, O., Tekkanat, K., Çetinkaya, B.** 2019. “Fiber Metal Laminatlar ve Uçak Sanyiiinde Kullanımı Üzerine Bir İnceleme,” *Mühendis ve Makina*, vol. 60, no. 697, p. 262-288.
9. **Gangil, N., Maheshwari, S., Siddiquee, A.N., Abidi, M.H., El-Meligy, M.A., Mohammed, J.A.** 2019. “Investigation on Friction Stir Welding of Hybrid Composites Fabricated on Al–Zn–Mg–Cu Alloy Through Friction Stir Processing,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, p. 3733-3740. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.033>

10. **Mavhungu, S.T., Akinlabi, E.T., Onitiri, M.A., Varachia, F.M.** 2017. "Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends," *Procedia Manufacturing*, vol. 7, p. 178-182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.045>
11. **Şenel, M. C., Gürbüz, M., Koç, E.** 2018. "Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen Al-Si₃N₄ Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," *Mühendis ve Makina*, vol. 59, no. 693, p. 33-46.
12. **Kraiklang, R., Onwong, J., Santhaweesuk, C.** 2020. "Multi-Performance Characteristics of AA5052 + 10% SiC Surface Composite by Friction Stir Processing," *Journal of Composites Science*, vol. 4, no. 2. <https://doi.org/10.3390/jcs4020036>
13. **Gangil, N., Siddiquee; A.N., Maheshwari, S.** 2017. "Aluminium Based In-Situ Composite Fabrication Through Friction Stir Processing: A Review," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 715, p. 91-104. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.309>
14. **Ye, H.Z., Liu, X.Y.** 2004. "Review of Recent Studies in Magnesium Matrix Composites," *Journal of Materials Science*, vol. 39, p. 6153-6171. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000043583.47148.31>
15. **Gutman, E.M., Unigovski, Y., Levkovitch, M., Koren, Z.** 1998. "Influence of Porosity and Casting Conditions on Creep of Die-Cast Mg Alloy," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 17, p.1787-1789. <https://doi.org/10.1023/A:1006601419020>
16. **Abbas, A., Rajagopal, V., Huang, S.-J.** 2021. "Magnesium Metal Matrix Composites and Their Applications," - *Magnesium Alloys*, ed. Tański, T.A. & Jarka, P., IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.96241
17. **Calin, R., Pul, M., Pehlivanli, Z.O.** 2012. "The Effect of Reinforcement Volume Ratio on Porosity and Thermal Conductivity in Al-MgO Composites," *Materials Research*. vol.15, no. 6, p. 1057-1063. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000131>
18. **Iqbal, A. K. M. A., Arai, Y., Araki, W.** 2013. "Effect of Reinforcement Clustering on Crack Initiation Mechanism in a Cast Hybrid Metal Matrix Composite During Low Cycle Fatigue," *Open Journal of Composite Materials*, vol. 3, no. 4, p. 97-106. DOI: 10.4236/ojcm.2013.34010
19. **Li, Y.Z., Wang, Q.Z., Wang, W.G., Xiao, B.L., Ma, Z.Y.** 2015. "Interfacial Reaction Mechanism Between Matrix and Reinforcement in B₄C/6061Al Composites," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 154, p. 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.01.052>
20. **Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., Pai, B. C.** 1998. "Review Reinforcement Coatings and Interfaces in Aluminium Metal Matrix Composites," *Journal of Materials Science*, vol. 33, p. 3491-3503. <https://doi.org/10.1023/A:1004674822751>
21. **Davidson, D. L.** 1991. "The Effect of Particulate SiC on Fatigue Crack Growth in a Cast-Extruded Aluminum Alloy Composite," *Metallurgical Transactions A*, vol. 22, p. 97-112. <https://doi.org/10.1007/BF03350952>



22. **Garcia, R., Lopez, V. H., Kennedy, A. R., Arias G.** 2007. "Welding of Al-359/20%SiCp Metal Matrix Composites by The Novel MIG Process with Indirect Electric Arc (IEA)," *Journal of Materials Science*, vol. 42, p. 7794–7800. DOI:10.1007/s10853-007-1632-8
23. **Attia, A.N.** 2001. "Surface Metal Matrix Composites," *Materials and Design*, vol. 22, no. 6, p. 451-457. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(00\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(00)00081-9)
24. **Sunil, B. R.** 2015. "Developing Surface Metal Matrix Composites: A Comparative Survey," *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 4, no. 3, p. 9-16. DOI: 10.14810/ijamse.2015.4302
25. **Huang, Y., Wang, T., Guo, W., Wan, L., Lv, S.** 2014. "Microstructure and Surface Mechanical Property of AZ31 Mg/SiCp Surface Composite Fabricated by Direct Friction Stir Processing," *Materials and Design*, vol. 59, p. 274–278. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.067>
26. **Liu, H., Fujii, H., Maeda, M., Nogi, K.** 2003. "Tensile properties and fracture locations of friction-stir welded joints of 6061-T6 aluminum alloy," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 22, p. 1061–1063. <https://doi.org/10.1023/A:1024970421082>
27. **Oh-Ishi, K., McNelley, T. R.** 2004. "Microstructural Modification of As-Cast NiAl Bronze By Friction Stir Processing," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 35, p. 2951–2961. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0242-1>
28. **Su, J.-Q., Nelson, T. W., Sterling, C. J.** 2005. "Friction Stir Processing of Large-Area Bulk UFG Aluminum Alloys," *Scripta Materialia*, vol. 52, p. 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.09.014>
29. **Hofmann, D. C., Vecchio, K. S.** 2005. "Submerged Friction Stir Processing (SFSP): An Improved Method for Creating Ultra-Fine-Grained Bulk Materials," *Materials Science and Engineering A*, vol. 402, no. 1-2, p. 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.04.032>
30. **Mishra, R. S., Mahoney, M. W.** 2007. "Friction Stir Processing," - Friction Stir Welding and Processing, ed. Mishra, R.S. & Mahoney, M.W., ISBN-13: 978-0-87170-848-9, ASM International, United States of America.
31. **Reddy, K. V., Naik, R. B., Rao, G. R., Reddy, G. M., Kumar, R. A.** 2020. "Microstructure and Damping Capacity of AA6061/Graphite Surface Composites Produced Through Friction Stir Processing," *Composites Communications* vol. 20. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.04.018>
32. **Naghshehkeh, N., Mousavi, S. E., Karimzadeh, F., Ashrafi, A., Nosko, M., Trembošová, V., Sadeghi, B.** 2019. "Effect of Graphene Oxide and Friction Stir Processing on Microstructure and Mechanical Properties of Al5083 Matrix Composite," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 10. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3a6f>
33. **Moustafa, E. B., Melaibari, A., Basha, M.** 2020. "Wear and Microhardness Behaviors of AA7075/SiC-BN Hybrid Nanocomposite Surfaces Fabricated by Friction Stir Proces-

- sing,” *Ceramics International*, vol. 46, no. 10, p. 16938-16943. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.274>
34. **Barati, M., Abbasi, M., Abedini, M.** 2019. “The Effects of Friction Stir Processing and Friction Stir Vibration Processing on Mechanical, Wear and Corrosion Characteristics of Al6061/SiO₂ Surface Composite,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 45, p. 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.034>
 35. **El-Danaf, E. A., El-Rayes, M. M., Soliman, M. S.** 2011. “Low Temperature Enhanced Ductility of Friction Stir Processed 5083 Aluminum Alloy,” *Bulletin of Materials Science*, vol. 34, no. 7, p.1447–1453. <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0341-8>
 36. **Kurt, A., Uygur, I. Cete, E.** 2011. “Surface Modification of Aluminium by Friction Stir Processing,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, p. 313–317. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.020>
 37. **Ma, Z.Y.** 2008. “Friction Stir Processing Technology: A Review,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 39, p. 642–658. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9459-0>
 38. **Xue, P., Xiao, B. L., Wang, W. G., Zhang, Q., Wang, D., Wang, Q. Z., Ma, Z. Y.** 2013. “Achieving Ultrafine Dual-Phase Structure with Superior Mechanical Property in Friction Stir Processed Plain Low Carbon Steel,” *Materials Science & Engineering A*, vol. 575, p. 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.033>
 39. **Ghasemi-Kahrizangi, A., Kashani-Bozorg, S. F.** 2012. “Microstructure and Mechanical Properties of Steel/TiC Nano-Composite Surface Layer Produced by Friction Stir Processing,” *Surface & Coatings Technology*, vol. 209, p. 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.005>
 40. **Deore, H. A., Bhardwaj, A., Rao, A. G., Mishra, J., Hiwarkar, V. D.** 2020. “Consequence of Reinforced SiC Particles and Post Process Artificial Ageing on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Processed AA7075,” *Defence Technology*, vol. 16, no. 5, p. 1039-1050. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.12.001>
 41. **Sharma, V., Prakash, U., Kumar, B. V. M.** 2015. “Surface Composites by Friction Stir Processing: A review,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 224, p. 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.019>
 42. **Sunil, B. R., Reddy, G. P. K., Patle, H., Dumpala, R.** 2016. “Magnesium Based Surface Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing,” *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 4, no. 1, p. 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2016.02.001>
 43. **Zykova, A. P., Tarasov, S. Y., Chumaevskiy, A. V., Kolubaev, E. A.** 2020. “A Review of Friction Stir Processing of Structural Metallic Materials: Process, Properties, and Methods,” *Metals*, vol. 10, no. 6. <https://doi.org/10.3390/met10060772>
 44. **Kumar, H., Prasad, R., Kumar, P., Tewari, S.P., Singh, J. K.** 2020. “Mechanical and Tribological Characterization of Industrial Wastes Reinforced Aluminum Alloy Composites Fabricated via Friction Stir Processing,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 831. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154832>



45. **Dolatkhah, A., Golbabaei, P., Givi, M. K. B., Molaiekiya, F.** 2012. "Investigating Effects of Process Parameters on Microstructural and Mechanical Properties of Al5052/SiC Metal Matrix Composite Fabricated via Friction Stir Processing," *Materials and Design*, vol. 37, p. 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.035>
46. **Dhayan, R., Kalaiselvan, K., Sathiskumar, R.** 2014. "Characterization of AA6063/SiC-Gr Surface Composites Produced by FSP Technique," *Procedia Engineering*, vol. 97, p. 625 – 631. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.291>
47. **Mirshakari, B., Zarei-Hanzaki, A., Barabi, A., Abedi, H. R., Lee, S. J., Fujii, H.** 2021. "An Anomalous Effect of Grain Refinement on Yield Stress in Friction Stir Processed Lightweight Steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 799. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140057>
48. **Su, J.-Q., Nelson, T. W., Mishra, R., Mahoney, M.** 2003. "Microstructural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T651 Aluminium," *Acta Materialia*, vol. 51, no. 3, p. 713-729. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00449-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00449-4)
49. **Huang, K., Logé, R.E.** 2016. "A Review of Dynamic Recrystallization Phenomena in Metallic Materials," *Materials and Design*, vol. 111, p. 548–574. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.012>
50. **Su, J.-Q., Nelson, T. W., Sterling, C. J.** 2003. "A New Route to Bulk Nanocrystalline Materials" *Journal of Materials Research*, vol. 18, p.1757–1760. <https://doi.org/10.1557/JMR.2003.0243>
51. **Yadav, D., Bauri, R.** 2012. "Effect of Friction Stir Processing on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium," *Materials Science and Engineering A*, vol. 539, p. 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.055>
52. **Wu, Q., Li, M., Guo, Y., Shan, J., Wang, H., Chang, Y.** 2020. "Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 12Cr-ODS Steel," *Nuclear Materials and Energy*, vol. 25. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100804>
53. **Han, W., Liu, P., Yi, X., Zhan, Q., Wan, F., Yabuuchi, K., Serizawa, H., Kimura, A.** 2018. "Impact of Friction Stir Welding on Recrystallization of Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steel," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 34, p. 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.11.032>
54. **Gandra, J., Miranda, R. M., Vilaça, P.** 2011. "Effect of Overlapping Direction in Multipass Friction Stir Processing," *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, p. 5592–5599. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.105>
55. **Pradeep, S., Pancholi, V.** 2013. "Effect of Microstructural in Homogeneity on Superplastic Behaviour of Multipass Friction Stir Processed Aluminium Alloy," *Materials Science & Engineering A*, vol. 561, p. 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.10.050>
56. **Harwani, D., Badheka, V., Patel, V., Li, W., Andersson, J.** 2021. "Developing superplasticity in magnesium alloys with the help of friction stir processing and its variants – A

- review,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 12, p. 2055-2075. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.115>
57. **Sabbaghian, M., Mahmudi, R.** 2021. “Superplasticity of The Fine-Grained Friction Stir Processed Mg–3Gd–1Zn Sheets,” *Materials Characterization*, vol. 172. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110902>
 58. **Bauri, R., Yadav, D., Suhas, G.** 2011. “Effect of Friction Stir Processing (FSP) on Microstructure and Properties of Al–TiC in Situ Composite,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, p. 4732–4739. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.085>
 59. **Koju, R. K., Darling, K. A., Kecskes, L. J., Mishin, Y.** 2016. “Zener Pinning of Grain Boundaries and Structural Stability of Immiscible Alloys,” *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, vol. 68, no. 6, p. 1596–1604. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1899-9>
 60. **Terahsima, S., Bhadeshia, H. K. D. H.** 2005. “Grain Growth: Zener Pinning of Grain Boundaries by Oxide Particles,” <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/Zener/23/04/2021>.
 61. **Wu, Y.** 2015. “Effect of Second Phase Particles on Grain Growth for Nanocrystalline AZ31 Mg Alloy by Phase Field Methods,” *International Conference on Energy, Materials and Manufacturing Engineering (EMME 2015)*, 15-16 October 2015, Kuala Lumpur/Malaysia. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152502006>
 62. **Ali, Y., Qiu, D., Jiang, B., Pan, F., Zhang, M.-X.** 2015. “Current Research Progress in Grain Refinement of Cast Magnesium Alloys: A Review Article,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 619, p. 639–651. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.09.061>
 63. **Svyetlichnyy, D. S.** 2013. “Modeling of Grain Refinement by Cellular Automata,” *Computational Materials Science*, vol. 77, p. 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.04.065>
 64. **Chang, K., Feng, W., Chen, L.-Q.** 2009. “Effect of Second-Phase Particle Morphology on Grain Growth Kinetics,” *Acta Materialia*, vol. 57, p. 5229–5236. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.025>
 65. **Bhadeshia, H. K. D. H.** 2015. *Bainite in Steels*, ISBN: 978-1-909662-74-2, W. S. Maney & Son Ltd, UK.
 66. **Guo, L., Roelofs, H., Lembke, M. I., Bhadeshia, H. K. D. H.** 2016. “Effect of Manganese Sulphide Particle Shape on The Pinning of Grain Boundary,” *Materials Science and Technology*, vol. 33, no. 8, p. 1013-1018. <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1258157>
 67. **Rios, P. R., Fonseca, G. S.** 2010. “Grain Boundary Pinning by Particles,” *Materials Science Forum*, vol. 638-642, p. 3907-3912. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.3907>
 68. **Du, L., Yang, S., Zhang, P., Du, H.** 2018. “Pinning Effect of Different Shape Second-



Phase Particles on Grain Growth in Polycrystalline: Numerical and Analytical Investigations,” *Composite Interfaces*, vol. 25, no. 4, p. 357–368. <https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1439625>

69. **Liu, Q., Cui, X., Zhang, C., Huang, S.** 2016. “Experimental Investigation of Suspended Particles Transport Through Porous Media: Particle and Grain Size Effect,” *Environmental Technology*, vol. 37, no. 7, p. 854–864. DOI: 10.1080/09593330.2015.1088578
70. **Novikov, V. Y.** 2016. “Grain Growth Jointly Affected by Immobile and Mobile Particles,” *Materials Letters*, vol. 178, p. 276–279. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.05.017>
71. **Quested, T. E., Greer, A. L.** 2004. “The Effect of The Size Distribution of Inoculant Particles on As-Cast Grain Size in Aluminium Alloys,” *Acta Materialia*, vol. 52, p. 3859–3868. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.04.035>
72. **Fu, H. M., Zhang, M.-X., Qiu, D., Kelly, P. M., Taylor, J. A.** 2009. “Grain Refinement by AlN Particles in Mg–Al Based Alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 478, p. 809–812. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.12.029>
73. **Zhang, Z., Chen, D. L.** 2006. “Consideration of Orowan Strengthening Effect in Particulate-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites: A Model for Predicting Their Yield Strength,” *Scripta Materialia*, vol. 54, p. 1321–1326. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.12.017>
74. **Matsukawa, Y.** 2019. “Crystallography of Precipitates in Metals and Alloys: (2) Impact of Crystallography on Precipitation Hardening” - *Crystallography*, ed. Akitsu, T., ISBN: 978-1-83881-879-1, IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.78499
75. **Humphreys, F. J., Hatherly, M.** 2004. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, ISBN: 0 08 044164 5, Elsevier Ltd.