

39623

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

39623

**PARÇACIK TAKVİYELİ KARMA MALZEMELERDEKİ ARTIK
GERİLMELERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Ali CANSUN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Haziran 1994

Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Haziran 1994

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ahmet ARAN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Mehmet ÇAPA

Doç.Dr. Mehmet DEMİRKOL

**İ.T.Ü. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMAN YAYIN MERKEZİ
HAZİRAN 1994**

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Ahmet ARAN'a ve bütün eğitim hayatım boyunca gerek maddi gerek manevi desteklerini eksik etmeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. KARMA MALZEMELER	5
2.1. Karma Malzemelerin Sınıflandırması	5
2.1.1. Takviye Türlerine Göre Karma Malzemeler	5
2.1.2. Matris Türlerine Göre Karma Malzemeler	6
2.2. Metal Matrisli Karma Malzemeler ve Üretim Yöntemleri	7
2.2.1. Elyaf Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemeler	7
2.2.1.1. Elyaf Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemelerin Üretim Yöntemleri	8
2.2.2. Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemeler	12
2.3. Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemelerin Üretim Yöntemleri	12
2.3.1. Toz Metalurjisi Tekniği	15
2.3.2. Yüksek Hız - Yüksek Enerji İşlemleri	18
2.3.3. Döküm	19
2.3.4. Kompodöküm	20
2.3.5. Reodöküm	21
2.3.6. Sıvı Metal Enjeksiyonu	22
2.3.7. Osprey Çökeltmesi	23
2.4. Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemelerde Oluşan Artık Gerilmeler	24

BÖLÜM 3. PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KARMA MALZEMELERDEKİ ISI İL ARTIK GERİLMELER KONUSUNDA YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	25
BÖLÜM 4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZ.....	31
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	31
4.2. ANSYS Paket programı.....	36
4.2.1. Birincil işlem.....	36
4.2.2. Yüklerin Uygulanması ve Çözüm.....	38
4.2.3. Elde Edilen Sonuçların Değerlendirmesi.....	38
BÖLÜM 5. PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KARMA MALZEMELERDEKİ ARTIK GERİLMELERİN ANSYS'DE ANALİZİ.....	39
5.1. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması.....	40
5.2. Modelin Kurulması.....	44
5.3. Yükleme ve Çözüm.....	47
BÖLÜM 6. SONUÇLAR.....	48
6.1. Parçacık Geometrisinin Isıl Artık Gerilmeler Üzerindeki Etkisi.....	49
6.2. Hacim Oranının Isıl Artık Gerilmeler Üzerindeki Etkisi.....	53
6.3. Matris Malzemesinin Isıl Artık Gerilmeler Üzerindeki Etkisi.....	58
6.4. Soğuma Hızının Isıl Artık Gerilmeler Üzerindeki Etkisi.....	59
BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR.....	62
KAYNAKLAR.....	64
EK-A. KULLANILAN ANSYS YİĞİN DOSYALARININ BİR ÖRNEĞİ.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 2-1: Sıcak Presleme (s.8)
- Şekil 2-2: Vakumda Presleyerek Birleştirme Yönteminin Aşamaları (s.9)
- Şekil 2-3: Birlikte Ekstrüzyon (s.11)
- Şekil 2-4: Toz Metalurjisi Tekniğinin Aşamaları (s.16)
- Şekil 2-5: 2024 Al alaşımlı, %20 SiC_x takviyeli karma malzemede sıcaklık ve deformasyon hızının deformasyon verimine etkisi (s.17)
- Şekil 2-6: Yüksek Hız - Yüksek Enerji Yöntemi (s.18)
- Şekil 2-7: Kompodöküm Yöntemi (s.20)
- Şekil 2-8: Reodöküm (s.21)
- Şekil 2-9: Basınçlı dökümle sıvı metal enjeksiyonu yöntemi (s.22)
- Şekil 2-10: Osprey Çökeltmesi (s.23)
- Şekil 3-1: Arsenault'un hesaplarda kullandığı iki boyutlu Sonlu Elemanlar modeli (s.27)
- Şekil 3-2: Plastik şekil değişimi öncesi ve sonrası matristeki gerilme durumu (s.27)
- Şekil 3-3: Matristeki ortalama artık gerilmenin uygulanan plastik şekil verme ile değişimi (s.27)
- Şekil 4-1: Kanat üzerindeki sıcaklık dağılımı (s.32)
- Şekil 4-2: Düğüm noktaları ve $T(x)$ 'in tahmini değerleri (s.33)
- Şekil 4-3: Elemanlara ayırma (s.33)
- Şekil 4-4: Bir yüzeyin üç düğüm noktalı ve altı düğüm noktalı elemanlarla modellenmesi
- Şekil 5-1: Al alaşımlarına ait gerilme - birim şekil değişimi eğrisinin şematik gösterimi (s.41)
- Şekil 5-2: 6061 Al alaşımının sürünme eğrisinin basitleştirilmesi (s.43)
- Şekil 5-3: Karma malzemedeki parçacıkların dağılımı (s.44)

- Şekil 5-4: Silindirik birim hücre modeli (s.45)
- Şekil 5-5: Karma malzemenin altıgen prizmalara bölünmesi (s.45)
- Şekil 5-6: Modeli oluşturan alanlar (s.46)
- Şekil 5-7: Çözüme hazır model (s.46)
- Şekil 5-8: 10mm çapındaki Al çubuğun eksenindeki bir noktanın 400°C'den 20°C'ye soğuma diyagramı (durgun havada) (s.47)
- Şekil 6-1: %4 hacim oranlı silindirik ve küresel parçacık takviyeli karma malzemedeki efektif gerilme dağılımları (s.51)
- Şekil 6-2: Görünüm oranının efektif iç gerilmelere etkisi (s.52)
- Şekil 6-3: %4 hacim oranlı 1 ve 2 görünüm oranındaki parçacıklar için karma malzemedeki efektif gerilme dağılımları (s.52)
- Şekil 6-4: Silindirik ve küresel parçacıkla takviyeli karma malzemedeki matristeki ortalama gerilmelerin hacim oranı ile değişimi (1100 Al matrisli) (s.53)
- Şekil 6-5: %4 ve %24 hacim oranlı 1100 Al matrisli karma malzemedeki efektif iç gerilme ve birim plastik şekil değişimi dağılımları (s.55)
- Şekil 6-6: 6061 Al matrisli %24 hacim oranlı karma malzemedeki efektif gerilme, efektif genleme ve hidrostatik gerilme dağılımları (s.56)
- Şekil 6-7: %4 hacim oranlı karma malzemedeki hücre görünüm oranının efektif gerilme dağılımına etkisi (s.57)
- Şekil 6-8: İki farklı matris malzemesindeki ortalama boyutsuz iç gerilmeler ve bunların hacim oranı ile değişimi (s.58)
- Şekil 6-9: Sürünme özelliklerinin iç gerilme dağılımına etkisi (s.61)

TABLO LİSTESİ

- Tablo 2-1: Değişik firmaların ürettiği SiC parçacıkların kimyasal bileşimindeki diğer elementler (s.14)
- Tablo 2-2: Çeşitli Al alaşımlarına ait kimyasal bileşimler (s.14)
- Tablo 5-1: 1100 Al alaşımının değişik sıcaklıklardaki mekanik özellikleri (s.41)
- Tablo 5-2: 6061 Al alaşımının değişik sıcaklıklardaki mekanik özellikleri (s.42)
- Tablo 5-3: SiC parçacıkların değişik sıcaklıklardaki mekanik özellikleri (s.42)
- Tablo 6-1: 1100 Al matrisli silindirik ve küresel parçacık takviyeli karma malzeme için değişik hacim oranlarındaki ortalama efektif gerilmeler (s.51)
- Tablo 6-2: %16 SiC silindirik parçacık takviyeli 6061 Al matrisli karma malzemenin matrisindeki ortalama efektif gerilmelerin soğuma hızıyla değişimi (s.60)

ÖZET

Günümüzde iki veya daha fazla farklı malzemenin makro seviyede bir araya getirilmesiyle oluşturulan karma malzemeler, teknolojik olarak büyük öneme sahiptirler. Bu tip malzemelerin içinde oldukça yeni olan parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemeler halen geliştirilmekte olup, üzerinde birçok araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar, özellikle yeni üretim yöntemleri ve mekanik özellikler üzerinde yoğunlaşmıştır.

Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerde takviye olarak yüksek mukavemetli, rijit, gevrek ve ısı genleşme katsayısı düşük olan seramik parçacıklar (SiC , BC , Si_3N_4 , Al_2O_3 v.b) kullanılırken, matris malzemesi olarak ise genellikle düşük mukavemetli, sünek ve ısı genleşme katsayısı daha yüksek olan metal alaşımları tercih edilir. Böylece hem matrisin, hem takviyenin en iyi özelliklerini üzerinde toplayan üstün mekanik özelliklere sahip karma malzemeler elde edilir.

Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerin gerek üretimi, gerekse ısı işlemleri sonrası soğuma esnasında bileşenlerinin arasındaki ısı büzülme farklılıkları sebebiyle matriste ve takviye parçacıkta ısı artık gerilmeler oluşur. Yapılan araştırmalarda bu iç gerilmelerin, karma malzemenin gerek mikro yapısında gerekse mekanik özelliklerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılarak, parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerdeki ısı artık gerilmelerin seviyesi ve bu seviyelere etki eden faktörler araştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz ise "ANSYS 5.0" paket programı kullanılarak bilgisayarla yapılmıştır.

SUMMARY

THE FINITE ELEMENTS ANALYSIS OF THE THERMAL RESIDUAL STRESSES IN THE PARTICULATE REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITES

Modern design procedures continually strive to increase structural efficiencies through reductions in either absolute weight or increases in strength-to-weight ratio. Reductions in material density, or increases in elastic modulus, yield strength and / or ultimate tensile strength can be directly translated to reductions in structural weight. For example a 10 percent reduction in alloy density, that can be achieved by using Al-Li alloys instead of 2000 series aluminum alloys, will lead to a 10 percent reduction in structural weight. Alternatively, a 50 percent increase in elastic modulus, which can be achieved through substitution of discontinuous silicon carbide (particulate, whisker or short fiber) reinforced aluminum alloy for an unreinforced wrought aluminum alloy, will also result in a 10 percent reduction in structural weight.

System trade studies, such as outlined above, have been the primary motivating factor in the renewed interest shown in metal matrix composites. Initially, these investigations focused on continuous fiber reinforced materials emphasizing C, SiC, B, B₄C, or Al₂O₃ filaments or tows. Matrices of interest have included Al, Mg and most recently Ti. Fabrication of continuous fiber reinforced metal matrix composites has utilized plasma spraying, hot molding or superplastic diffusion bonding of foil-fiber laminates, and pressure infiltration of woven preforms. Widespread industrial application of these composites has however, been limited by the high costs of both reinforcement fiber (e.g. \$135/kgm for B) and metal matrix component fabrication process.

Most recent attention has therefore directed towards commercialization of discontinuously reinforced metal matrix composites, for example silicon carbide particulate and whisker (SiC_p, SiC_w) and alumina / alumina-silica (Al₂O₃-SiO₂) reinforced aluminum alloys. Discontinuously reinforced metal matrix composites benefit from substantially lower fiber costs, for example, \$ 0.9-1.35/kg for SiC_p. In addition discontinuously reinforced Al matrix composites can be fabricated using standard or near-

standard metal fabrication procedures, such as rolling, sheet forming, spinning, brazing, welding, investment casting. Finally, when careful attention is paid to processing detail, an extremely attractive combination of mechanical properties can be obtained; for example a 50 percent increase in stiffness can be achieved in SiC reinforced aluminum while maintaining adequate levels of strength, ductility, and fracture toughness.

Various methods for production of particulate reinforced metal matrix composites have been developed over the last few years. Some of these manufacturing processes, that are overviewed in this thesis, are;

- Powder Metallurgy Techniques
- High Energy - High Rate Processes
- Casting
- Compocasting
- Rheocasting
- Melt Infiltration
- Ospray Deposition

During the manufacturing or annealing processes of particulate reinforced metal matrix composites must be heated to high temperatures (e.g. 400-500°C for SiC reinforced aluminum). Because of the mismatch in thermal expansion coefficients of metal matrix and ceramic reinforcement (e.g. 10:1 for aluminum and silicon carbide), thermal residual stresses are formed in these composites during cooling from manufacturing or annealing temperature.

In this study, the thermal residual stresses in particulate reinforced metal matrix composites were analyzed by using Finite Elements Method. This finite elements analysis was done by means of a computer program "ANSYS 5.0" which is a general purpose FEA program. Different types of analysis can be done by using "ANSYS 5.0" such as;

- Structural Analysis
- Thermal Analysis
- Magnetic Analysis
- Harmonic Analysis
- Spectrum Analysis
- Coupled Field Analysis (e.g. thermal + structural)

In order to calculate the thermal residual stresses in MMC by FEM, the popular axial symmetric cylindrical unit cell models were used according to the uniform, periodic, aligned distribution of reinforcement particles in metal matrix alloy (Figure 5-8). Based on the symmetry and periodicity arguments, the lateral surface of the cylindrical cell must remain circular and the end faces of

the cell must also remain planar. Because of the axial symmetry the problem was solved as a two dimensional Finite Elements Analysis by using eight noded axial symmetric planar elements. These axial symmetric unit cells are subjected to a cooling from 400°C to the room temperature in 10 steps.

In this study, the parameters, that may possibly affect the thermal residual stresses, are analyzed. These parameters are;

- Reinforcement Geometry
- Volume Fraction
- Distribution Geometry
- Matrix Material
- Cooling Rate

The material properties are chosen as of 1100 Al, 6061 Al alloys and SiC. The properties of 1100 aluminum alloy and SiC are taken from ref.[25]. 6061 aluminum alloy properties are taken from ref.[21]. The stress - strain curves of aluminum alloys are thought to be composed of two linear parts as shown in Figure 5-1 (Bilinear Hardening) and SiC particulates are thought to be elastic. The temperature dependency of the elastic moduli, yield strengths, thermal expansion coefficients, tangent modulus, Poisson ratios of aluminum alloys and silicon carbide can be seen in Table S-1, Table S-2 and Table S-3.

Table S-1: The mechanical properties of 1100 Al alloy at different temperatures

T [°C]	E [MPa]x10 ⁴	v []	σ_1 [MPa]	E _t [MPa]	α_t [K ⁻¹] x10 ⁻³
0	6,750	0,35	28,6	720	2,2750
20	6,720	0,35	28,2	638	2,3000
50	6,650	0,35	27,4	525	2,3300
100	6,525	0,35	25,9	367	2,3769
150	6,325	0,35	23,8	264	2,4223
200	6,000	0,35	21,1	199	2,4675
250	5,438	0,35	17,4	158	2,5126
300	4,675	0,35	13,5	125	2,5577
350	3,900	0,35	10,1	100	2,6027
400	3,138	0,35	7,3	78	2,6484

Table S-2: The mechanical properties of 6061 Al alloy at different temperatures

T [°C]	E [MPa]x10 ⁴	v []	σ_1 [MPa]	E _t [MPa]	α_1 [K ⁻¹] x10 ⁻³
0	6,83	0,30	55,2	2080	2,34
50	6,83	0,30	55,2	2080	2,34
180	6,83	0,30	55,2	2080	2,34
250	5,66	0,30	40,3	1510	2,74
350	4,21	0,30	14,4	1130	3,02
450	2,76	0,30	11,6	800	3,37
550	1,10	0,30	5,5	400	3,74

Table S-3: The mechanical properties of SiC particles at different temperatures

T [°C]	E [MPa]x10 ³	v []	α_1 [K ⁻¹] x10 ⁻³
20	4,290	0,170	4,30
200	4,270	0,160	4,73
400	4,230	0,145	5,21

In order to determine the effect of reinforcement geometry on the thermal residual stress distributions, two basic reinforcement geometries -cylinder and sphere- were taken and for these geometries computations were done in different volume fractions.

Aspect ratios for cylindrical reinforcements (the height of the cylinder / the diameter of the cylinder) of 1, 2, 3 and 4 were used in the computations while keeping the fiber volume fraction constant at 4%.

The effect of volume fraction on thermal residual stress fields was identified using volume fractions of 4%, 8%, 12%, 16%, 24%, 30%, 40% for spherical and cylindrical (fiber aspect ratio was constant at 1) particulates.

The effect of the distribution geometry of particulates in the metal matrix was investigated by considering cell aspect ratios of 1,2,4 and 8 with a fiber volume fraction of 4% and with a fiber aspect ratio of 1.

At elevated temperatures can be expected in thermal residual stresses according to the creep properties of metal matrix alloy. Therefore during cooling process a part of thermal residual stress are relaxed by creep deformation of metal matrix alloy. The creep phenomenon is a function of time, stress and temperature. Therefore the relaxation in thermal residual stresses are strongly related to the cooling rate. In this study, the effect of cooling rate was investigated by making computations at three different cooling rates. These are;

- 1-) Air-cooling conditions (Figure 5-8)
- 2-) Furnace cooling with a rate of $0.03^{\circ}\text{C}/\text{sec}$
- 3-) Furnace cooling with a rate of $0.06^{\circ}\text{C}/\text{sec}$

After all these computations the results listed below, were observed:

1-) After cooling from manufacturing or annealing temperature to the room temperature, considerably nonuniform distributed thermal residual stress fields occurred in this type of composites. The character of these thermal residual stress fields is compressive in the particulate and tension in the matrix.

2-) The average thermal residual stresses in the matrix increase with the volume fraction and matrix yield strength.

3-) When different distribution geometries at the constant volume fraction were investigated, it was observed that thermal residual stress fields were strongly related to the minimum spacing between particulates.

4-) The level of thermal residual stresses will affect to subsequent deformation behavior of the composite. For soft matrix materials, nearly the whole matrix deforms plastically particularly at high volume fractions. Therefore average effective residual stress levels will be greater than the matrix yield strength. And the ratio of average residual stresses to matrix yield strength is lowered as the yield strength of the matrix increases.

5-) Thermal residual stresses are concentrated near the particulates and they have a peak at the corner of the

cylindrical particulates. The void nucleation at the whisker ends is an important deformation mechanism controlling both the fracture and high temperature deformation of the composite. Because of the high plastic deformation and hydrostatic stress, this corner is a critical place for void nucleation.

6-) According to the analysis where the creep properties of matrix alloy were also considered, a relaxation of 5% of the average effective stresses and 20% of the maximum effective stresses were observed.



BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılmakta olan malzemeler dört gruba ayrılabilir:

- Metal malzemeler
- Seramik malzemeler
- Organik malzemeler
- Karma malzemeler

Bunların arasında son zamanlarda giderek artan bir kullanım alanı bulan karma malzemeler, ilk üç gruba giren malzemelerden iki veya daha fazlasının makro seviyede biraraya getirilmesiyle elde edilen yeni malzemelerdir.

Karma malzemelerin avantajı, bileşenlerinin en iyi özelliklerini üzerinde toplamasıdır. Karma malzeme yapılırken aşağıdaki özelliklerden bir veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır:

- Dayanım
- Yorulma dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Kırılma tokluğu
- Yüksek sıcaklık özellikleri
- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenliği
- Akustik iletkenlik
- Rijitlik
- Ağırlık
- Fiyat
- Estetik görünüm v.b.

Yukarıda sayılan özelliklerin hepsine sahip bir malzeme bulmak imkansızdır. Zaten buna gerek de yoktur. Bilhassa

yapısal malzemelerde dayanım, tokluk, hafiflik ve ucuzluk istenen öncelikli özelliklerdir. Karma malzeme kullanarak bu dört özellikte optimum bir seviyeye ulaşılabilir. Ayrıca özel kullanım alanlarına yönelik (iletkenlik, yüksek sıcaklık özellikleri gibi) geliştirilmiş karma malzemeler de vardır.

İçinde bulunduğumuz yüzyılda büyük gelişme kaydeden ve kullanım alanları giderek yaygınlaşan karma malzemeler, aslında binlerce yıldır kullanılmaktadır. Buna en iyi örnek basit bir inşaat malzemesi olan kerpiçtir. Kerpiçte, çamurun içine katılan saman çöpleri malzemenin tokluğunu artırarak darbelere karşı kolay dağılmasına engeller. Ayrıca karma malzemelere doğada da değişik biçimlerde rastlanabilir (kemik, ağaç malzemeler v.b.)

Binlerce yıldır kullanılan bu malzemelerin karma malzeme olarak adlandırılması ve bilinçli karma malzeme kullanımı 1940'lı yıllarda başlamıştır. II. Dünya Savaşı sırasında gelişen askeri havacılık sanayi ile birlikte tasarımlarda ön plana çıkan hafiflik, dayanım, tokluk gibi ihtiyaçlar sebebiyle ilk olarak cam takviyeli plastikler kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzeme, özellikle elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri sebebiyle ilk olarak radar çanaklarında başarıyla kullanılmıştır. Daha sonra kullanımı giderek yaygınlaşarak, ilk CTP tekne 1942'de, ilk CTP boru, elyaf sarma yöntemiyle 1946'da üretilmeye başlanmıştır. 1950'lerde uçak endüstrisinde başlayan karma malzeme kullanımı bugün % 30'lara varan oranlara ulaşmıştır. Örneğin uçaklarda flap, yatay dengeleyici, motor parçaları, kanatçıklar, gibi hayati parçaların yanında su tankından, yolcu koltuklarına birçok konfor elemanında da karma malzemeler kullanılmaktadır.

Otomotiv sektöründe de geleceğin malzemesi karma malzemelerdir. Yarış otomobillerinde kaporta, motor elemanları, rüzgarlıklar, lastikler, iletim organları, süspansiyon-

lar v.b. hayati elemanların hemen hemen tümünde karma malzemeler kullanılmaktadır. Karma malzeme üretimi ucuzladıkça binek otomobillerde de kullanım oranı hızla artmaktadır (tamponlar, lastikler, camlar v.b.).

Gemi inşa sektöründe sürat tekneleri, savaş gemileri, balıkçı teknelerinin yapımında karma malzeme kullanımı çok yaygındır. Ayrıca spor malzemeleri (bisikletler, kayaklar, golf sopaları, raketler, ayakkabılar, hokey sopaları, balık oltaları v.b.), tıp gereçleri (tekerlekli sandalye, koltuk değnekleri, yapay organlar v.b.), inşaat malzemeleri (lavabo, küvet, su deposu v.b.), tekstil malzemeleri, müzik aletleri gibi sektörlerde karma malzemeler oldukça yaygın olarak kullanılır. Kısacası uzay mekiğinden silah yapımına, uydu antenlerinden evlerimizdeki sandalyelere kadar karma malzemeler günümüzün ve geleceğin en popüler malzemeleridir.

Karma malzemeler matris malzemesine göre genel olarak ikiye ayrılır:

- Plastik matrisli karma malzemeler
- Metal matrisli karma malzemeler

Metal matrisli karma malzemeler diğerine oranla daha yeni bir konu olup, bunlara ait yeni üretim yöntemleri, mekanik özellikler gibi konularda araştırmalar devam etmektedir.

Bu çalışmada parçacık takviyeli (SiC), metal matrisli (Al) karma malzemelerdeki ısıtılma artık gerilmeleri ve bunların malzemenin davranışına etkisi sonlu elemanlar yöntemiyle incelenecektir. Yapılan araştırmalar, bu tür malzemelerde gerek üretim, gerekse ısıtılma işlem sonrası soğuma esnasında, bileşenler arasındaki ısıtılma genleşme farkları yüzünden artık iç gerilmelerin oluştuğunu göstermiştir. Bu artık gerilmelerin şiddeti ve mekanik özelliklere etkisi gerek deneysel, gerek teorik, gerekse sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmektedir. Deneysel çalışma kesin sonuçlar vermesine rağmen, oldukça pahalı ve zahmetli bir yöntemdir. Teorik çalışmalarda ise çeşitli hesap yöntemleri kullanılarak artık

gerilmelerin seviyesi hesaplanmak istenmekte, fakat yapılan kabuller sebebiyle deneysel verilerden oldukça farklı sonuçlar bulunmaktadır. Sonlu elemanlarla analiz yöntemi, bilgisayar paket programlarının geliştirilmesiyle oldukça popüler bir yöntem olmuştur. Ayrıca bu yöntemle kullanım kolaylığının yanında, deneysel bulgulara daha yakın sonuçlar alınmaktadır.

Bu çalışmada değişik elyaf hacim ve en boy oranlarındaki, parçacık veya kılcal kristal (SiC) takviyeli, metal matrisli (Al) karma malzemeler ele alınmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle malzeme içinde üretim sonrası fazların farklı ısıl genleşme katsayıları nedeniyle oluşan ısıl artık gerilmelerin seviyesi ve matris malzemesindeki dağılımı hesaplanmaya çalışılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan bu analizde, "ANSYS 5.0" yazılım programı kullanılmıştır.

BÖLÜM 2.

2. KARMA MALZEMELER

2.1. Karma Malzemelerin Sınıflandırması

Karma malzemeler çeşitli yönlerden sınıflandırılabilir:

A-) Takviye türlerine göre;

- Elyaf takviyeli karma malzemeler
- Küçük parçacıklarla dayanımı artırılmış karma malzemeler
- İri parçacık takviyeli karma malzemeler

B-) Matris türlerine göre;

- Plastik matrisli karma malzemeler
- Metal matrisli karma malzemeler
- Yüksek sıcaklık matrisli karma malzemeler

2.1.1. Takviye Türlerine Göre Karma Malzemeler

Elyaf takviyeli karma malzemeler: Bu tür karma malzemelerde kuvveti tümüyle elyaf taşır. Matrisin görevleri kuvveti elyafa iletmek, tokluğu artırmak ve elyafı dış etkilerden korumaktır. Elyafın genellikle yönlendirilerek kullanıldığı bu malzemelerde mekanik özellikler elyaf doğrultusunda çok iyi, bu doğrultuya dik olan doğrultularda ise kötüdür. O yüzden bu tür karma malzemeler, genelde tek tabaka halinde kullanılmaz. Mekanik izotropiyi sağlamak için, çeşitli doğrultularda elyaf dizilişlerine sahip birçok tabakanın biraraya getirilmesiyle oluşmuş yapılar tercih edilir.

Küçük parçacıkla dayanımı artırılmış karma malzemeler:

Bu tür karma malzemelerde kuvvetleri esas olarak matris taşır. Boyutları 0,01 - 0,1 mikron arasında olan küçük parçacıklar ise metal matris içindeki dislokasyon hareketlerini engelleyerek malzemenin dayanımını artırırılar. Elde edilen malzemenin özellikleri izotropiktir. Bu gruba örnek olarak saçınım (dispersiyon) sertleştirmesi yapılmış metalleri verebiliriz.

İri parçacık takviyeli karma malzemeler: içindeki par-

çacık boyutu 0,1 mikrondan büyük olan karma malzemelerdir. Yükü matris ve takviye beraber taşırlar. Bu tür karma malzemelere örnek, sert metal uçlar ve betondur.

2.1.2. Matris Türlerine Göre Karma Malzemeler

Plastik matrisli karma malzemeler: Bu tür karma malzemelerde matris malzemesi olarak iki çeşit plastik kullanılır.

- Termoset plastikler
- Termoplastikler

Termoset plastikler tekrar eritilip, kullanılamazlar. Ancak gerek elyafı ıslatma kabiliyetlerinin yüksek olması, gerekse üretim yöntemlerinin basit olması sebebiyle termoplastiklerden daha fazla kullanılırlar. Ayrıca termoset plastiklerde kullanım sıcaklığı termoplastiklere nazaran daha yüksektir.

Metal matrisli karma malzemeler: Plastik matrisli karma malzemelerin kullanılamayacağı yüksek sıcaklıklarda ve daha yüksek tokluk gereksinimlerinin olduğu yerlerde tercih edilirler. Plastik matrislilere oranla çok daha pahalı ve üretimi zor malzemeler olmalarına rağmen metal matrisli karma malzemeler günümüzde büyük önem taşımaktadırlar.

Yüksek sıcaklık matrisli karma malzemeler: Seramik malzemelerin matris olarak kullanılması ile elde edilen

karma malzemenin kullanım sıcaklığı 1300°C 'ye kadar çıkarılabilir. En çok kullanılan seramik matris malzemeleri; SiC ve Si₃N₄ 'dür. Bunların dışında karbon matris içine gömülmüş karbon elyaftan oluşan karma malzemelerin 4000°C 'ye kadar dayandığı görülmüştür.

2.2. Metal Matrisli Karma Malzemeler ve Üretim Yöntemleri

Metal matrisli karma malzemeler takviye açısından iki gruba ayrılabilir;

- Elyaf takviyeli metal matrisli karma malzemeler
- Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemeler

2.2.1. Elyaf Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemeler

Sürekli elyafla takviyeli metal matrisli karma malzemeler parçacık takviyelilere nazaran daha pahalı ve özel üretim yöntemleri gerektiren malzemelerdir. [1]

Bu tür karma malzemelerde matris malzemesi olarak alüminyum, titanyum, magnezyum gibi ergime sıcaklığı nisbeten düşük olan hafif metaller kullanılır. Özellikle uçak sanayinde kullanılan bu metallerin elastiklik modülleri düşük olduğundan, takviye olarak yüksek modül ve dayanıma sahip malzemeler tercih edilir. Bu yüzden metal matrisli karma malzemelerin çoğu, bilinen saf metal alaşımlarından daha yüksek dayanım/ağırlık oranına sahiptirler. Ancak özellikle sürekli elyafla takviyeli karma malzemelerde elyafla takviyeyi biraraya getirmek plastiklerdeki kadar kolay değildir, özel üretim yöntemleri gerektirir. Ayrıca her elyaf her metalle biraraya getirilemez. Bunun başlıca iki sebebi vardır. Birincisi matrisle elyaf birleşme sıcaklığında reaksiyona girerek birbirini bozabilir. ikincisi ise metal matrisle elyaf arasındaki galvanik korozyon ihtimalidir. Galvanik korozyonu ve özellikleri olumsuz yönde etkileyecek kimyasal reaksiyonları önlemek için elyaf özel mal-

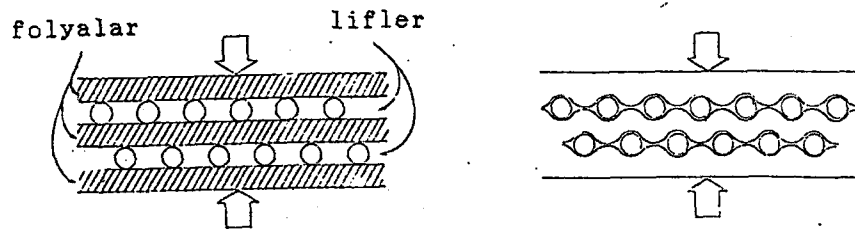
zemelerle kaplanır. Örneğin karbon elyafı alüminyum matris arasındaki galvanik korozyonu önlemek için karbon elyafın yüzeyi önce gümüş veya nikel ile kaplanır.

Metal matrisli karma malzemelerde en çok kullanılan sürekli elyaf malzemeleri SiC, bor ve borsic'tir (yüzeyi SiC kaplı bor). Matris malzemesi olarak alüminyum alaşımlarından 6061, 2024, 1100 (saf alüminyum) en çok kullanılanlardır. Bu tür malzemeler 300°C ye kadar oda sıcaklığındaki özelliklerini korurlar. Borsic veya SiC elyafı takviyeli titanyum alaşımlarında ise bu sınır 550°C ye kadar çıkmaktadır.

2.2.1.1. Elyaf Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemelerin Üretim Yöntemleri

1-) Sıcak Presleme:

Lifler, Şekil 2-1 'de görüldüğü gibi alüminyum, magnezyum, titanyum gibi metal folyalar arasına dizilerek üzerlerine presleme sırasında yanacak olan bir bağlayıcı püskürtülür. Böylece elyafın konumlarında sabitlenmesi sağlanır. Daha sonra sıcaklık ve basınç uygulanarak elyafı matris malzemesi birbirine kaynatılır.

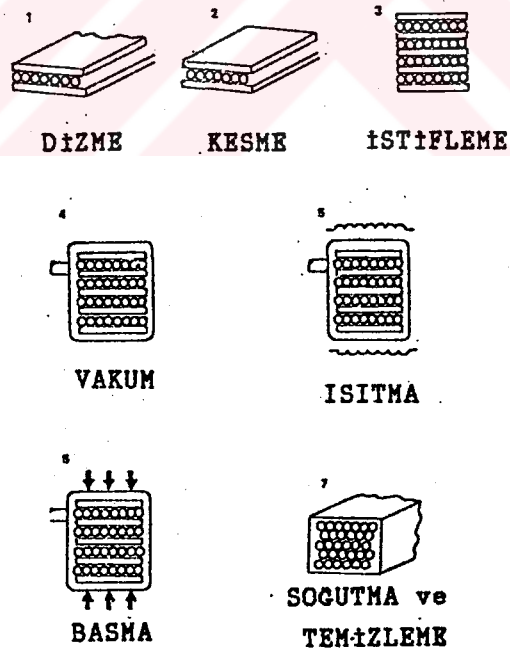


Şekil 2-1 : Sıcak presleme

2-) Vakumda Presleyerek Birleştirme:

Sıcak preslemeye benzer bir yöntemdir. Birleştirme yüksek sıcaklık ve basınç altında yayınma bağı ile gerçekteşir. Bu yöntemde paslanmaz çelik, bor, silisyum karbür, gibi elyaf, alüminyum, titanyum gibi metallerle birlikte kullanılır. Gerekli yüzey işlemleri yapılan elyaf sıcak preslemeye olduğı gibi metal folyalar arasına dizilip, sızdırmaz bir metal kapta vakuma alınır. Sonra tüm sistem ısıtılarak, basınç altında metal matris ile elyafın birleşmesi sağlanır.

Yöntemin diğeri bir kullanılışı da; haddelene, buhar çökeltme, plazma püskürtme gibi yöntemlerle bir ön biçim verilen karma malzemenin vakumda preslenip, son şekline getirilmesidir.



Şekil 2-2 : Vakumda presleyerek birleştirme yönteminin aşamaları

3-) Elektrolitik Yöntem:

Üzerine elyaf sarılı katod ve metal matris malzemesinden yapılmış anod bir elektroliz banyosuna daldırılarak, devreden akım geçirilir. Böylece anodtaki metalin, katodtaki elyaf üzerine çökmesi sağlanır. Bu yöntemle bor, silisyum karbür, volfram gibi elyaf nikel gibi ergime sıcaklığı nisbeten yüksek metallere birleştirilebilir. İşlemler düşük sıcaklıkta yapıldığı için elyafın özelliklerinin bozulması söz konusu değildir.

4-) Sıvı Metal Emdirilmesi:

Bu yöntemde bir kalıpta düzenlenen elyaf, gümüş, alüminyum, magnezyum, bakır gibi, düşük ergime sıcaklığına sahip sıvı haldeki bir metalle ıslatılır. En çok çubuk, profil gibi sürekli ürünler bu yöntemle, bir elyaf demetinin ergimiş metal banyosundan geçirilmesiyle elde edilir. Bu şekilde üretilen tek yönde takviyeli karma malzeme ek işlem gerektirmez. Ayrıca bu yöntemle yüksek elyaf/hacim oranlarına çıkılabilir. Ancak işlemler yüksek sıcaklıkta yapıldığı için kullanılabilecek elyaf-matris malzeme çiftleri sınırlıdır.

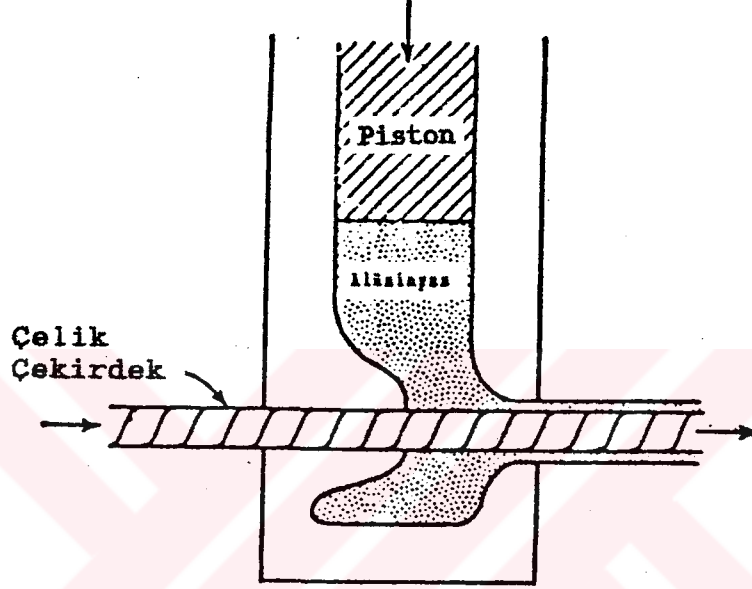
5-) Buhar Çökeltme:

Buhar fazına alınan metal matris malzemesi, elyaf takviyenin üzerine çökeltilir. İşlemin düşük sıcaklıkta yapılması elyafın özelliklerinin bozulmaması açısından önemli bir avantajdır. Alüminyum ve nikel gibi metal matris malzemeleri bu yöntem için uygundur. Ancak maliyetin yüksek olması bir dezavantajdır.

6-) Birlikte Ekstrüzyon:

Karma malzemedan tellerin üretiminde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Üretim karma malzemenin bileşenlerinin Şekil 2.3. de görüldüğü gibi aynı matristen geçirilmesiyle

sağlanır. Özellikle yüksek gerilim hatlarında kullanılan çelik çekirdekli alüminyum teller bu yöntemle üretilir. Bu tür yüksek gerilim hatlarında dış taraftaki alüminyum elektrik iletkenliğini, iç taraftaki çelik çekirdek ise yüksek dayanımı karma malzemeye kazandırır.



Şekil 2-3 : Birlikte Ekstrüzyon

7-) Haddeleme:

Bu yöntemde üst üste dizilmiş metal folyalarla elyaf takviyelerin, sürekli bantlar halinde hadde merdanelerinden geçirilerek sıcaklık ve basıncın etkisinde yayınma bağı ile birbirlerine bağlanmaları sağlanır.

8-) Plazma Püskürtme:

Plazma haline getirilmiş metal matris malzemesi, bir kalıpta düzenlenmiş elyafın üzerine püskürtülerek karma malzeme üretilir.

2.2.2. Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemeler

Modern tasarımlarda verimi artırmak için mümkün olduğu kadar hafif konstrüksiyonlar tercih edilmektedir. Bu amaçla malzeme seçerken dayanım / ağırlık oranı yüksek malzemelere öncelik verilmektedir. Örneğin normal Al alaşımı yerine yoğunluğu %10 daha düşük olan 2000 serisi Al/Li alaşımları kullanılarak toplam ağırlıktan % 10 tasarruf edilebilir. Aynı şekilde normal Al alaşımı yerine elastiklik modülü % 50 daha fazla olan SiC parçacık takviyeli Al matrisli bir karma malzeme kullanılırsa toplam ağırlıkta yine % 10'luk bir azalma elde edilebilir. [2]

Günümüzde dikkatler süreksiz takviyeli metal matrisli karma malzemeler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunların en popülerleri, SiC₁ (Whisker=kılcal kristal), SiC₂ (parçacık) ve Al₂O₃ / Al₂O₃-SiO₂ takviyeli Al; SiC₁, SiC₂, B₄C takviyeli Mg ve TiC takviyeli Ni alaşımlarıdır.

Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerin en önemli avantajı maliyetlerinin düşük olmasıdır. Bunun birinci sebebi düşük takviye maliyetidir. Örneğin SiC parçacıklarının kilogram başına maliyeti 1,5 - 2 \$ arasında değişirken sürekli bor elyafın kilogram maliyeti 600 \$'dır. İkinci sebebi ise bu tür karma malzemelerin ekstrüzyon, haddeleme, toz metalurjisi, döküm, kaynak, lehimleme gibi klasik yöntemlerle işlenebilmesidir. Diğer bir avantajı ise bu tür karma malzemelerde mekanik özellikler sürekli elyaf takviyelilerin tersine hemen hemen izotropik olmasıdır.

2.3. Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzeme üretiminde ilk adım uygun matris - takviye çiftinin seçimidir.

Takviye parçacık malzemesinin seçiminde çeşitli kriterler gözönünde bulundurulur. Bunlar;

- Elastiklik modülü
- Çekme dayanımı
- Yoğunluk
- Matrisle uyum
- Isıl kararlılık
- Isıl genleşme katsayısı
- Boyut ve şekil
- Maliyet

Çeşitli mekanik ve fiziksel gereksinimler matris ve takviye malzemesinin seçiminde rol oynar. Üretim sırasında yüksek sıcaklığın etkisiyle matris ile takviye reaksiyona girerek arayüzeyi oluştururlar. Karma malzemede bu matris-takviye arayüzeyleri mekanik özellikler bakımından en kritik bölgelerdir. Yapılan araştırmalarda, parçacık yüzeyine çeşitli yöntemlerle uygulanan kaplamalar sayesinde mükemmel dayanıma ve yüksek sıcaklık özelliklerine sahip arayüzeyler elde edilmiştir. Takviye ve metal matris malzemesi seçiminde önemli bir kriter de iki malzeme arasındaki ısı genleşme farkıdır. Eğer karma malzeme içten yanmalı motorlarda olduğu gibi tekrarlı ısıl çevrimlere maruzsa, matris ile takviye malzemelerinin arasındaki genleşme farkı minimum olmalıdır. Aksi takdirde bu genleşme farkı malzemede ısı gerilmelere ve dolayısıyla yorulmaya sebep olur.[3]

Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerde en popüler takviye malzemesi silisyum karbürdür. Bu malzeme piyasada çeşitli şekil (whisker, parçacık, kırpılmış elyaf) ve boyutlarda yaygın olarak bulunmaktadır. Tablo 2.1.'de görüldüğü gibi üretilen SiC parçacıkları hiçbir zaman % 100 saf olamaz. Takviye parçacığının özellikle yüzeyindeki mikro seviyedeki düzgünsüzlükler sebebiyle SiC'ün bileşiminde Ca ve Fe başta olmak üzere bazı yabancı maddeler bulunur.

Metal matris malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzeme ise alüminyum alaşımlarıdır. Tablo 2.2.'de metal matrisli karma malzeme üretiminde kullanılan değişik alüminyum alaşımlarına ait kimyasal bileşimler görülmektedir. Bunlardan en çok tercih edilenler; 6061, 2024, 1100 (saf Al) alüminyum alaşımlarıdır.

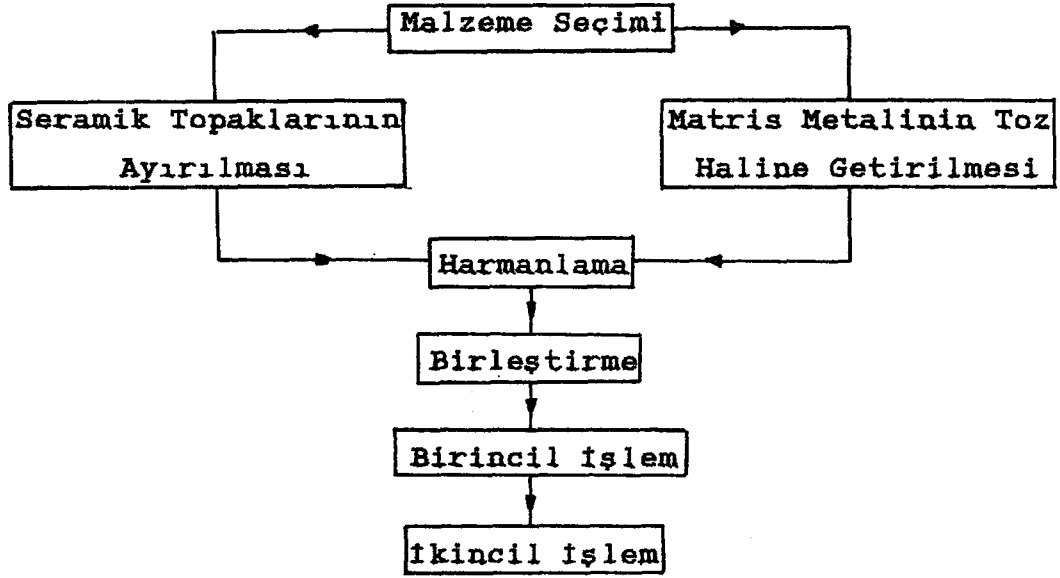
Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerin üretiminde gerek yarı mamül gerekse son ürünün elde edilmesi aşamalarında klasik üretim metodları kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemlerini şöyle sıralayabiliriz:

- Toz metalurjisi
- Yüksek enerji - yüksek hız işlemleri
- Döküm
- Kompodöküm
- Reodöküm
- Sıvı metal enjeksiyonu
- Osprey çökeltmesi

2.3.1. Toz Metalurjisi Tekniği ile Karma Malzeme Üretimi

Bu yöntem, en yaygın olarak kullanılan üretim tekniklerinden biri olup, işlemin aşamaları Şekil 2-4'de görülmektedir. Değişik alaşımların tozları ticari olarak piyasada bulunmaktadır veya öğütme, püskürtme v.b. yöntemlerle üretilebilirler. Üretimden çıkan seramik parçacıkları ise topaklar halindedir. Bu topaklar alkol banyosuna konup, ultrasonik ses dalgaları yardımıyla dağıtılırlar.

Matris ve takviye malzemelerinin temini veya üretimini harmanlama safhası takip eder. Bu safhada metal tozları ile takviye parçacıklar yaş veya kuru olarak birbirlerine karıştırılırlar. İşlem basit gibi görünse de eğer optimum seviyede yapılmazsa, sonraki aşamalarda whisker kümelenmeleri, erken çatlak başlangıçları ve üniform olmayan çökelmeler gibi çeşitli sorunlar çıkabilir.



Şekil 2-4 : Toz Metalurjisi Tekniğinin Aşamaları

Harmanlanan karışıma soğuk presleme ile bir ön biçim verilir. Bu işlem sırasında uygulanan baskı kuvveti önemlidir. Kuvveti fazla uygularsak yeterince gözenekli bir yapı elde edemeyiz ve bir sonraki gaz giderme işleminde açığa çıkan gazlar yapıyı terk edemez. Kuvveti az uygularsak bu sefer de yeterli dayanım sağlanamaz ve oluşturulan ön biçim dağılabilir.

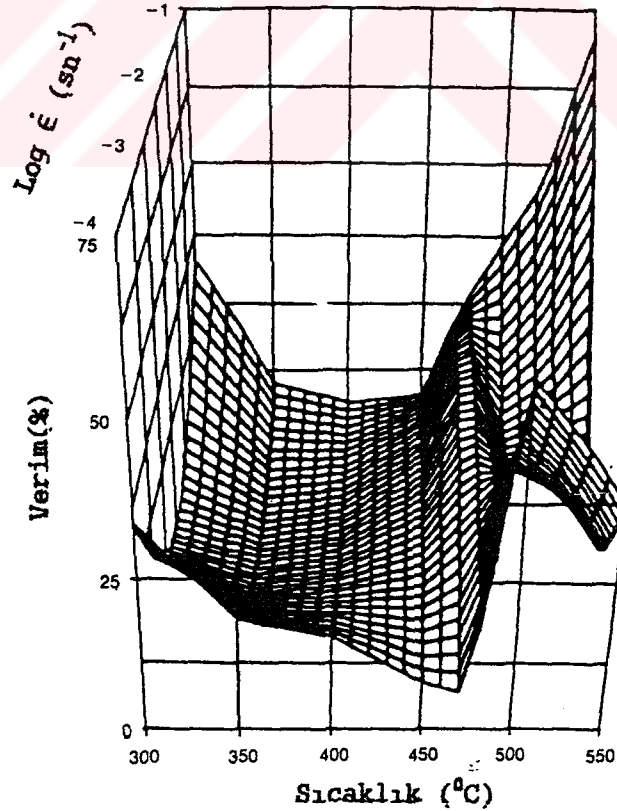
Soğuk preslemeyi gaz giderme işlemi takip eder. Bu işlem sırasında vakuma alınıp, ısıtılan malzemeye soygazla süpürme işlemi uygulanır. Böylece gerek takviyeye, gerekse matris malzemesine bağlı olarak bulunan su ve diğer uçucu maddeler yapıdan dışarı alınır.

Gaz giderme işleminden çıkan ön biçim verilmiş parçalar sıcak olarak preslenip, son şekil verilir. İşlem sırasındaki sıcaklık, tam birleşmeyi sağlayacak kuvveti en aza indirecek şekilde seçilir. Ancak son araştırmalar, katı halde birleştirilen (düşük sıcaklıkta) karma malzemenin, viskoz halde birleştirilene (yüksek sıcaklıkta) nazaran daha sünek davrandığını göstermektedir. Bu işlem sonunda elde edilen malzeme %98 teorik yoğunlukta olup, işlenip deği-

şık şekillere getirilmeye hazır haldedir.

Yukarıda anlatılan yöntemle elde edilen malzemeler ekstrüzyon, haddeme, dövme gibi standart plastik şekil verme yöntemleri kullanılarak, değişik şekillerde yarı mamul haline getirilirler. Bu işlemler sayesinde aynı zamanda karma malzeme içindeki parçacıkların homojen olarak dağılması da sağlanır. Yapılan plastik şekil verme işlemi sırasında gerekli deformasyon hızları, akış şartları ve sıcaklıklar her karma malzeme için farklıdır. Bu şartlar, deformasyon verimi maksimum olacak şekilde seçilir. Deformasyon verimi, deformasyona dönüşen enerjinin harcadığımız toplam enerjiye oranıdır.

Şekil 2-5'de 2024 Al alaşımlı, % 20 SiC, takviyeli karma malzemede sıcaklık ve birim şekil değişimi hızının deformasyon verimine etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi bu karma malzeme için en uygun plastik şekil verme koşulları; 485°C sıcaklık ve 10^{-4} s^{-1} deformasyon hızıdır.

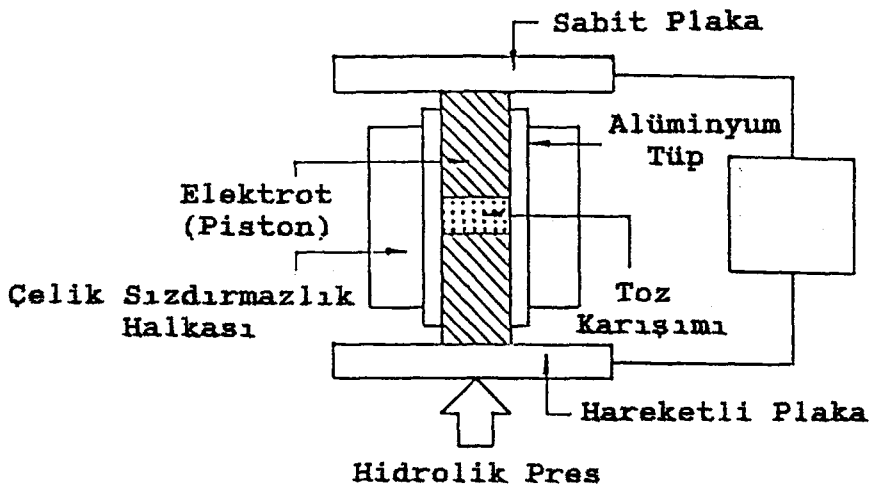


Şekil 2-5 : 2024 Al alaşımlı, % 20 SiC, takviyeli karma malzemede sıcaklık ve deformasyon hızının deformasyon verimine etkisi

Son olarak birincil işlemde çıkan çubuk, sac v.b. şekillerdeki yarımamullere süper plastik deformasyon, sıvama, kaynak, lehim gibi üretim yöntemleriyle son biçimi verilir. Yalnız bu tip karma malzemelerde kaynak yapılırken, verilen enerji dikkatle kontrol edilmelidir. Bunun sebebi özellikle ısı tesiri altında kalan bölgedeki yüksek sıcaklık sebebiyle matrisle takviye malzemesinin kimyasal reaksiyona girerek, istenmeyen bileşikler ortaya çıkarabilmesidir.

2.3.2. Yüksek Hız - Yüksek Enerji işlemleri

Toz metalurjisi tekniğine benzer bir yöntem olup, kullanılan teçhizatın şeması Şekil 2-6'da görülmektedir. İyi-ce harmanlanan seramik parçacık ve metal matris tozu karışımına hidrolik preste basınç uygulanır ve tek kutuplu bir jeneratörden elde edilen büyük miktarda elektrik enerjisi ani olarak (1 MJ/sn) karışım üzerinden geçirilir. Böylece ani olarak ısınma ve soğuma neticesinde karma malzeme elde edilmiş olur. Yöntemin avantajları: Ani ısınma ve soğuma sayesinde diğer yöntemlerde görülen faz transformasyonları görülmez ve daha düzgün ince taneli bir içyapı elde edilir. Böylece elde edilen karma malzemenin mekanik özellikleri daha iyi olur.[4]



Şekil 2-6 : Yüksek Hız - Yüksek Enerji Yöntemi

2.3.3. Döküm

Döküm yöntemi, karma malzemeden ürünlerin son biçime yakın olarak elde edildiği pratik bir yöntemdir. Bu yöntemde sıvı metale seramik parçacıklar çeşitli şekillerde katılabilir. Bunlar sırasıyla:

1-) Bir püskürtme tabancasından seramik parçacıklar, taşıyıcı bir soygaz yardımıyla sıvı metal içine püskürtülür.

2-) Sıvı metal, döküm kalıbını doldururken seramik parçacıkları eriyik akımına ilave edilir.

3-) Sıvı metal ve içine katılan parçacıklar mekanik olarak karıştırılır. Böylece homojen bir parçacık dağılımı sağlanmaya çalışılır.

4-) Mekanik olarak karıştırılan sıvı metale küçük briketçikler ilave edilir. Bu briketçikler, metal matris tozu ve seramik parçacıkların preslenmesiyle elde edilir.

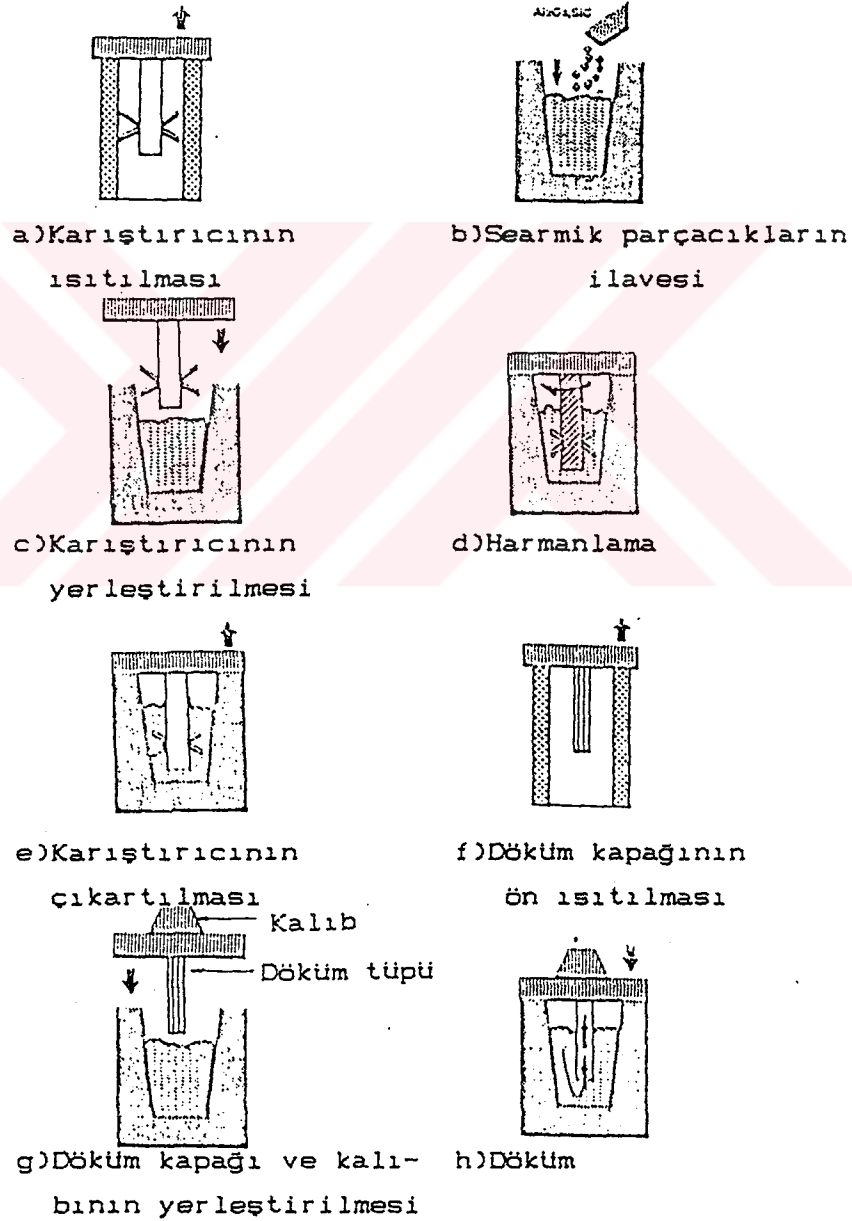
5-) Mekanik bir piston yardımıyla seramik parçacıklar sıvı metalin içine itilerek karma malzeme üretilir.

6-) Sıvı metal içine atılan seramik parçacıklar merkezkaç ivme yardımıyla dağıtılır.

Döküm yöntemi, oldukça pratik bir yöntem olmasına karşın bazı zayıf tarafları vardır. Örneğin sıvı metalin yüksek sıcaklığı sebebiyle takviye ile matris arasında büyük arayüzey reaksiyonları ve istenmeyen faz dönüşümleri görülebilir. Ayrıca sıvı metalin takviye parçacıkları tam olarak ıslatmasını sağlamak için eriyiğe bazı özel katkıları konulmalı veya seramik parçacıkların yüzeyi kaplanmalıdır. Bunun yanında takviye parçacıkların belirli yerlerde kümelenmeleri veya çökelmeleri, çeşitli faz segregasyonları ve karıştırma sırasında seramik parçacıkların kırılması gibi bazı sorunlar görülebilir.

2.3.4. Kompodöküm

Bu yöntemle elde edilen sıvı metal - takviye parçacık karışımı ingotlar halinde dökülerek, aynı toz metalurjisi tekniğinde olduğu gibi ekstrüzyon, haddeme, dövme gibi işlemlerden geçirilirler. Seramik parçacıklar, 1000°C 'de 24 saat kadar tavlanıp oksitlendirilerek, gerek istenmeyen reaksiyonlar ve karbür oluşumunu engellenir, gerekse sıvı metal tarafından daha iyi bir ıslatma sağlanır. Sıvı metal ise bir soygazla süpürülerek temizlenir ve üzerindeki oksit



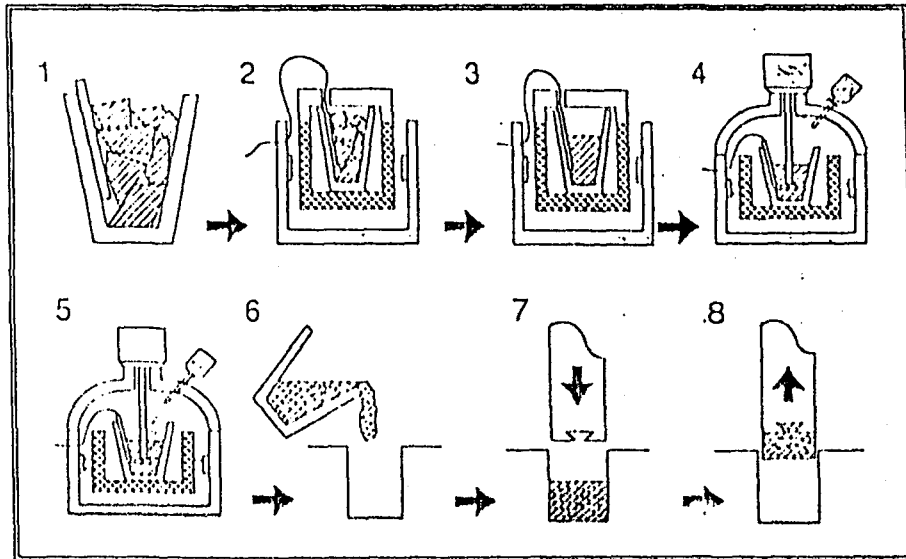
Şekil 2-7 : Kompodöküm Yöntemi

tabakası alınarak, takviye parçacıklar eklenir. Daha sonra karıştırıcı düzeneği sıvı metalin sıcaklığını düşürmemesi için ısıtılıp yerine yerleştirilir (Şekil 2-7). Sistem vakuma alınıp karıştırılır. Yeterli karışma sağlandığında uygun döküm tekniği kullanılarak, karma malzeme katılaşmaya bırakılır.

2.3.5. Reodöküm

Reodöküm yönteminde metal matris alaşımı soygaz atmosferinde dakikada 10°C 'lik bir hızla katı - sıvı faz aralığına kadar ısıtılır. Daha sonra kompodöküm yönteminde olduğu gibi oksitlendirilen seramik parçacıklar, katı-sıvı faz aralığındaki metale ilave edilir ve karışım 1000 d/dak gibi yüksek bir hızda karıştırılıp bulamaç haline getirilir. Sonra bu karışım kalıba dökülüp, basınç uygulanarak kalıbı tam olarak doldurması sağlanır (Şekil 2-8.).

Bu yöntemde karışımın bulamaç halinde olması ve çok hızlı karıştırılması sebebiyle diğer döküm yöntemlerinde görülen parçacık kümelenmeleri ve çökelmeler görülmez. Ayrıca katı - sıvı faz aralığında yapılan karıştırma neticesinde dendritik yapı kırılarak, yerini eşeksizli tanelerden oluşan daha düzgün bir içyapı alır.

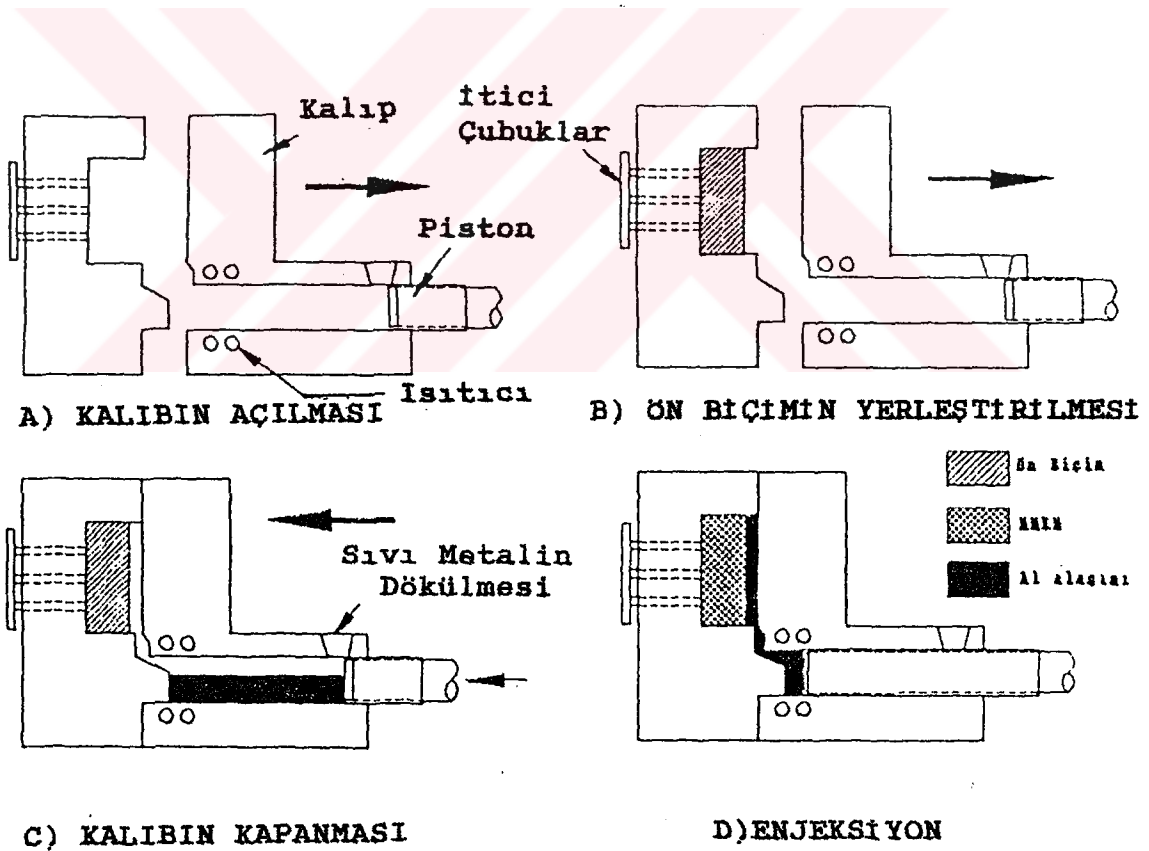


Şekil 2-8 : Reodöküm Yöntemi

2.3.6. Sıvı Metal Enjeksiyonu

Sıvı haldeki metal matris alaşımı, mekanik bir piston veya itici bir soygaz yardımıyla seramik takviyeden oluşturulmuş gözenekli bir ön biçimin içine enjekte edilir (Şekil 2.9.). İşlem sırasında uygulanması gereken basınç, sıvı metal alaşımının viskozitesine bağlıdır. Ayrıca sıvı metalin parçacıkları ısılatma kabiliyeti, alaşımın kimyasal bileşimine, seramik yüzey işlemine, yüzey geometrisine, sıcaklığa ve zamana bağlıdır.

Yöntemin dezavantajları; düzensiz ve kaba taneli içyapı, uygulanan basınç sırasında parçacıkların zarar görmesi ve parçacıkların birbirlerine temas etmeleridir.

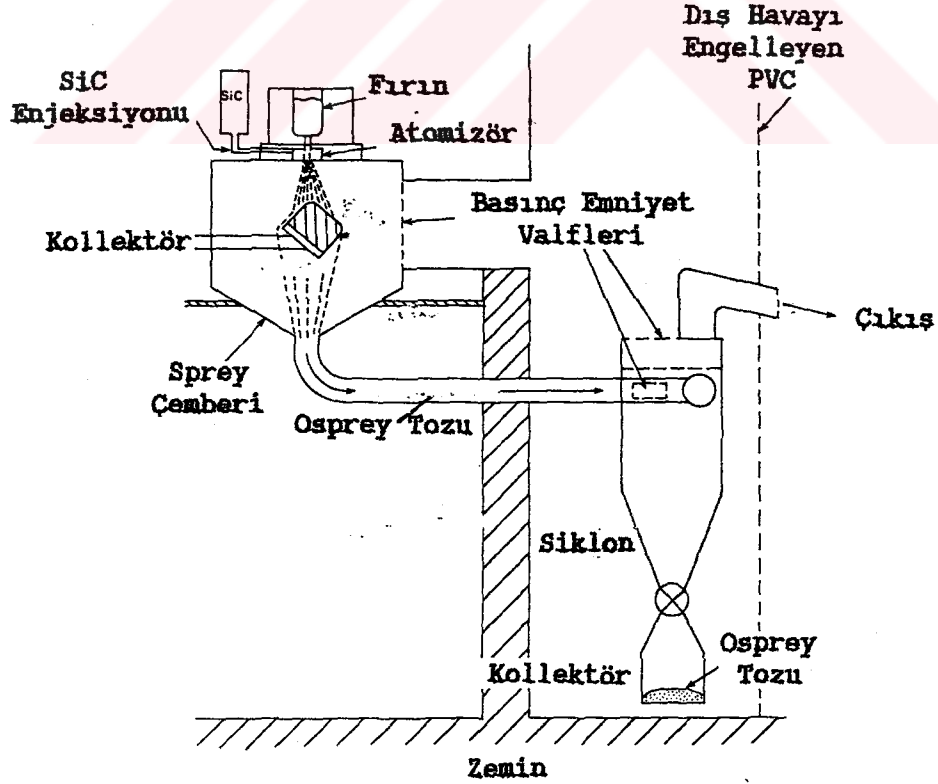


Şekil 2-9 : Basınçlı dökümle sıvı metal enjeksiyonu yöntemi

2.3.7. Osprey Çökeltmesi

Bu yöntemde soygaz jetiyle birlikte gönderilen seramik takviye parçacıklar, sıvı metal akımından geçirilirler. Atomize olan sıvı alaşım ile parçacıklar bir kollektörde toplanarak karma malzeme oluşturulur. Oldukça yeni olan bu yöntemde, toz metalurjisindeki harmanlama ve birleştirme safhaları biraraya getirilmiştir. Ayrıca toz metalurjisi ve döküm yöntemindeki dezavantajlar bu yöntemde görülmez. Ancak mamuldeki gözenekli yapı sebebiyle elde edilen karma malzemenin ekstrüzyon, haddeleme, dövme gibi bir plastik şekil verme işleminden geçirilmesi gerekir.

Şekil 2-10'da görülen Osprey çökeltmesi yönteminde işlem, önce matris alaşımının fırında eritilmesiyle başlar. Daha sonra bu metal eriyik basınçlı bir gazla küçük damlacıklara ayrılır. Atomize olmuş sıvı metale bir soygaz jeti vasıtasıyla seramik parçacıklar eklenir ve bu karışım döner bir zemin üzerinde toplanır. Böylece istenen karma malzeme ingotlar halinde elde edilir.



Şekil 2-10 : Osprey Çökeltmesi

2.4. Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Karma Malzemelerde Oluşan Isıl Artık Gerilmeler

Bölüm 2.3 'te görüldüğü gibi metal matrisli karma malzemelerin üretim yöntemlerinin birçoğunda yüksek sıcaklığa çıkılması mecburiyeti vardır. İşte bu üretim veya ısıtma işlemleri sonrası, soğuma sırasında matris alaşımı ile takviye malzemesi arasındaki ısı genleşme farkı, karma malzemede iç gerilmelerin oluşmasına sebep olur. Nitekim SiC parçacık takviyeli Al matrisli karma malzemede matris ile takviye malzemelerinin ısı genleşme katsayılarının oranı 10 : 1'dir.

Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemedeki iç gerilmelerin seviyesi özellikle parçacıklar ile matrisin arayüzeyinde artmakta ve bu bölgelerde matris malzemesi yerel olarak plastik şekil değiştirmektedir. Böylece matris içinde artan dislokasyon yoğunluğu, karma malzemenin akma davranışının değişmesine neden olmakta, ayrıca bu iç gerilmelerin, karma malzemede anizotrop akma davranışı ve değişken Bauschinger etkisi gibi sorunlara neden olduğu iddia edilmektedir.

İç gerilmelerin karma malzemenin mikroyapısında da oldukça etkili olduğu belirtilmektedir. Yapılan araştırmalarda bu tür karma malzemelerde yaşlandırma ısıtma işleminin normal matris alaşımına oranla daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür. Bu çalışmalarda ilk çökelti teşekkülünün, iç gerilme ve dislokasyon yoğunluğu çok fazla olan parçacıkların çevresinde başladığı ve hızla diğer bölgelere yayıldığı gözlemlenmiştir.

Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerdeki bu iç gerilmeler, malzemenin gerek iç yapısına, gerekse mekanik özelliklerine etkisi sebebiyle halen birçok araştırmaya konu olmaktadır.

BÖLÜM 3

3. PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KARMA MALZEMELERDEKİ ISIL ARTIK GERİLMELER KONUSUNDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Metal alaşımasının içine seramik parçacıkların katılmasıyla elde edilen karma malzemenin mekanik özellikleri, kullanılan matris alaşımına oranla oldukça gelişmiştir. Örneğin normal Al alaşımına oranla, SiC takviyeli Al matrisli karma malzemenin dayanımı, elastiklik modülü [5-11] ve sürünme özellikleri [12,13] oldukça yüksektir. Fakat bu tür karma malzemelerin en büyük dezavantajı, sünekliği ve kırılma tokluğunun düşük olmasıdır. [11,14-18]

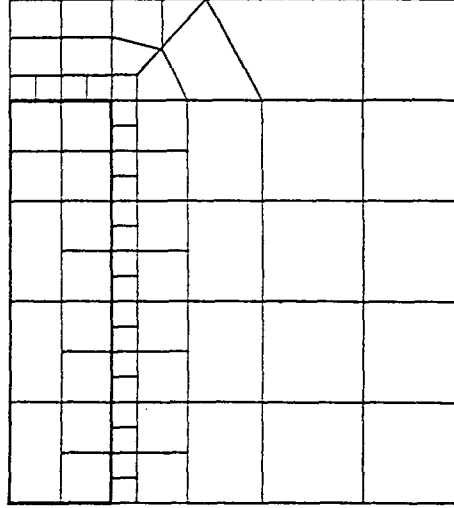
Günümüzde gerek maliyetinin düşük olması, gerekse klasik üretim yöntemleriyle şekillendirilebilmesi sebebiyle parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemeler, giderek daha yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi bu tür karma malzemelerde, üretim veya ısıtma işlem sonrası soğuma esnasında, ısıtma genleşme katsayısı daha yüksek olan metal matris alaşımasının takviye parçacıklardan çok daha fazla büzülmesi sonucu oldukça yüksek artık gerilmeler meydana gelir.

Vogelsang ve Arsenault 'un elektron mikroskopisi ile yaptıkları araştırmalar [19], parçacık takviyeli metal matrisli karma malzeme de oluşan bu ısıtma gerilmelerinin dislokasyon yoğunluğunun artmasına sebep olduğunu ve bu dislokasyonların, daha çok parçacıklar ile matrisin ara yüzeyinde yoğunlaştığını göstermiştir.

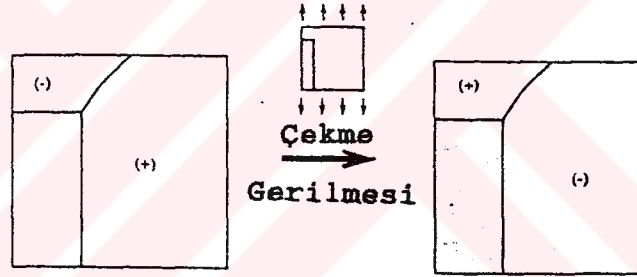
Christman ve Suresh 'in yaptığı çalışmalarda [20] bu tür karma malzemelerde yaşlandırma ısı işleminin normal Al alaşımına oranla daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür. Christman bu çalışmalarda çökelti teşekkülünün, artık gerilme ve dislokasyon yoğunluğunun çok fazla olduğu parçacıkların çevresinde başladığını ve buradan diğer bölgelere hızla yayıldığını gözlemlemiştir. Görüldüğü gibi ısı artık gerilmeler, karma malzemenin mikro yapısında da oldukça etkilidir. Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerde ısı artık gerilmelerin seviyesi ve mekanik özelliklere etkisi ise gerek deneysel, gerekse teorik birçok araştırmaya konu olmuştur. Bunlardan Arsenault ve Taya [21] % 5 ve %20 SiC takviyeli Al matrisli karma malzemeler üzerinde yaptıkları deneylerde, matris alaşımı izotrop bir akma davranışı göstermesine rağmen, karma malzemenin çekme doğrultusundaki akma dayanımının basma yönündekine nazaran % 20-30 daha düşük olduğunu görmüş ve bu sonuçta karma malzeme içindeki ısı artık gerilmelerin etkisinin büyük olduğunu iddia etmiştir.

Arsenault ve Shi bu iddiayı gerek teorik, gerekse sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplar yaparak, kanıtlamaya çalışmış, [22] bu çalışmada 6061 Al matrisli SiC whisker takviyeli karma malzemeyi ele almış ve iki boyutlu bir mikro-mekanik model yardımıyla sonlu elemanlar analizi yapmıştır. Arsenault önce Şekil 3-1'deki modeli 500°C 'den 20°C 'ye soğutmuş ve Şekil 3-2'deki gerilme dağılımını bulmuştur. Daha sonra iç gerilme oluşmuş bu modele whisker doğrultusunda çekme ve basma gerilmeleri uygulayarak, karma malzemenin çekme ve basma eğrilerinde deneylerle saptanan sonuçlara uygun bir fark olduğunu bulmuştur. Ayrıca bu çalışmada, oluşan iç gerilmelerin karma malzemedeki Bauschinger olayına etkisi incelenmiş ve önce basma, sonra çekmenin yapıldığı durumdaki Bauschinger olayının, önce çekme, sonra basmanın yapıldığı durumdakine nazaran daha fazla olduğu görülmüştür. Aynı çalışmada Arsenault, matristeki ortalama artık gerilmenin plastik şekil verme ile

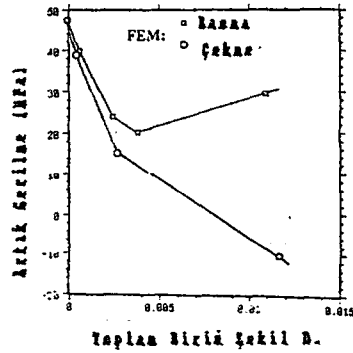
değişimini de incelemiş ve Şekil 3-3'deki grafiği elde etmiştir.



Şekil 3-1 : Arsenault'un hesaplarda kullandığı iki boyutlu Sonlu Elemanlar modeli [22]



Şekil 3-2 : Plastik şekil değişimi öncesi ve sonrası matristeki gerilme durumu [22]



Şekil 3-3 : Matristeki ortalama artık gerilmenin uygulanan plastik şekil verme ile değişimi [22]

Zahl ve Mc Meeking'in makalesinde [23] Taggard ve Bassani'nin yaptıkları çalışmalarda, Arsenault'dan daha farklı sonuçlar elde ettikleri belirtilmektedir. Taggard ve Bassani, yaptıkları çalışmalarda karma malzemenin çekme ve basma eğrileri arasında her zaman kesin bir fark görülmediği, görülen farklarda ise ısı artı gerilmelerin etkisinin çok az olduğunu iddia etmektedir. Taggard, zaman zaman deneylerde görülen çekme ve basma eğrileri arasındaki farkın esas sebebinin matris-takviye ara yüzeyindeki ayrılmalar ve matriste oluşan boşluklar olabileceğini söylemektedir.

Povirk ise ısı artı gerilmeler üzerinde yaptığı çalışmalarda, eksenel simetrik silindirik bir hücre model kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle hesap yapmayı tercih etmiştir [14]. Povirk bu çalışmalarda SiC whisker takviyeli, Al matrisli karma malzemede elyaf hacim oranının, whisker görünüm oranının ve whiskerler arası mesafenin artı gerilmeler üzerindeki etkisini incelemiş ve sonuç olarak gerek matris-takviye ara yüzeyindeki, gerekse matris içindeki artı gerilmeleri etkileyen en önemli parametrenin whiskerler arası mesafe olduğunu bulmuştur. Yapılan hesaplarda whiskerler arası mesafe azaldıkça belirtilen bölgelerde artı gerilme seviyelerinin hızla yükseldiği görülmüştür. Povirk, ısı artı gerilme seviyeleri çok yüksek olan whisker uçlarını boşluk oluşumu için en müsait yerler olarak göstermekte ve bu boşluk oluşumlarını karma malzemenin çekme doğrultusundaki sünekliğinin az olması, simetrik olmayan akma davranışı gibi özelliklerin nedeni olarak kabul etmektedir. Sonuç olarak Povirk artı gerilmelerin karma malzemenin mikro yapısına olan etkileri sebebiyle mekanik davranışını dolaylı olarak etkilediğini kabul etmiştir.

Zahl ve Mc Meeking'in yaptığı çalışmalarda düşük elyaf hacim oranlarında görülen çekme akma dayanımının basmadan daha küçük olma durumu, büyük elyaf hacim oranlarında görülmemiştir [23]. Hatta % 50 SiC whisker takviyeli Al

matrisli karma malzemede çekme akma dayanımının basmadakinin üzerine çıktığı saptanmıştır. Ayrıca yüksek elyaf hacim oranlarına çıkıldıkça karma malzemenin tokluğunun düştüğü görülmüştür.

Zahl bu olayın sebebini şu şekilde açıklamaktadır:

" Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemenin mekanik davranışını etkileyen iki önemli faktör vardır. Bunlardan birincisi olan artık gerilmeler, karma malzemenin çekme yönündeki akma dayanımını düşürmeye çalışırlar. ikincisi ise pekleşmedir ki bu da karma malzemenin çekme yönündeki akma dayanımının yükselmesini sağlar. Düşük elyaf hacim oranlarında matristeki plastik şekil değiştirmiş bölge küçük olduğundan, artık gerilmelerin etkisi ağır basarak, karma malzemenin çekme dayanımının basmadakinden daha düşük olmasını sağlar. Elyaf hacim oranı arttıkça matristeki plastik şekil değişimi ve bunun etkili olduğu bölge büyüyerek, pekleşme etkisini artırır. Böylece çekmedeki akma dayanımı basmadakine yaklaşır."

Ledbetter ve Austin [24], % 30 SiC parçacık takviyeli 6061 Al matrisli karma malzemede ısıtılarak artık gerilmeleri X - ışını difraksiyonu metodunu kullanarak ölçmeye çalışmıştır. Ledbetter, parçacıkların elastik ve küresel olduğunu, matrisin ise bu parçacıkları küresel bir kabuk şeklinde sardığını kabul etmiş, böylece karma malzeme içindeki ölçülen birim şekil değişimlerinden hareketle ortalama artık gerilme seviyelerini hesaplamıştır. Bu ölçümler sonucu matristeki ortalama artık gerilmenin, (+) yönde ve matris akma dayanımının % 75'i kadar olduğu, parçacıktaki artık gerilmenin ise (-) yönde ve matristekinden bir miktar daha fazla olduğu bulunmuştur.

X - ışını difraksiyon metodunun en büyük dezavantajı, bu yöntemle parçanın yalnız yüzeyindeki iç gerilmelerin ölçülebilmesidir. Bu yüzden serbest yüzeyde gerçekleşen gerilme gevşemesi sebebiyle, ölçümlerde bir miktar hata ya-

pılmaktadır. Ancak yapılan analizlerde bu hatanın mertebesinin % 2 civarında kaldığı ve böylece bu tür karma malzemelerde iç gerilme ölçümlerinin X - ışını difraksiyon metoduyla yapılabileceği görülmüştür [25].

Görüldüğü gibi değişik teorilere dayanmakla birlikte, artık gerilmelerin gerek mikro yapıya, gerekse mekanik özelliklere etkisi, konuyla ilgilenen bütün araştırmacılar tarafından kabul görmektedir.

BÖLÜM 4

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZ

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, fiziksel ve mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal bir çözüm yöntemidir. 1950'lerin ilk senelerinde uçak ve uzay sanayinde kullanılmaya başlanan bu yöntem, 1963 yılında varyasyonel yaklaşım ve Ritz metodunun sonlu elemanlarla kullanılmaya başlanmasıyla giderek yaygınlaşmıştır. Önceleri yalnızca statik yapısal analizlerde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, Laplace ve Poisson denklemlerine de uygulanabileceği ortaya çıktıktan sonra, Galerkin yaklaşımı yardımıyla akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle günümüzde yapılabilen analiz tipleri şunlardır:

- Statik yapısal analiz (Gerilme, şekil değiştirme v.b.)
- Akışkanlar mekaniği
- Isı transferi
- Harmonik analiz
- Yorulma
- Kırılma mekaniği
- Elektromanyetik analiz

Sonlu elemanlar yönteminin temeli, sıcaklık, basınç veya deplasman gibi bir büyüklüğü lineer, parabolik veya kübik bir fonksiyonla tanımlı olan küçük parçalara ayırıp, çözüme gitmeye dayanır. Böylece tek başına matematik olarak modellenemeyen bir çok büyüklüğü, parçalayarak yaklaşık olarak modellemiş oluruz.

Sonlu elemanlar yönteminin aşamalarını şu şekilde sıralayabiliriz:

1-) İncelenen bölgede belirli sayıda düğüm noktası (node) tanımlanır.

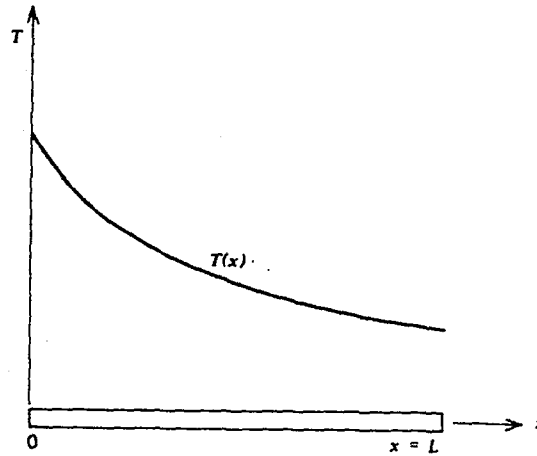
2-) Herbir düğüm noktasındaki sürekli büyüklüğün değeri belirlenir.

3-) İncelenen alan eleman adı verilen belirli sayıdaki küçük alt alanlara bölünür. Bu elemanlar, genelde düğüm noktalarıyla birbirlerine bağlanır.

4-) Sürekli büyüklüğün düğüm noktalarına denk gelen değerleri kullanılarak, herbir eleman üzerindeki değişimi bir polinomla yaklaşık olarak ifade edilir. Ancak bu belirlenen eleman fonksiyonları eleman boyunca sürekliliğini korumalıdır.

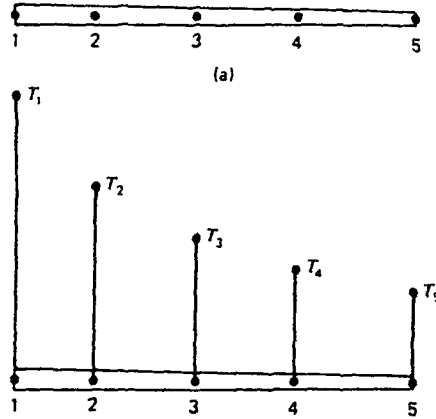
Temel kavramların daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4-1'deki kanat üzerindeki sıcaklık dağılımının sonlu elemanlar yöntemiyle analizini ele alalım.

Bu örnekte x -ekseni boyunca uzanan OL kanadıyla tanımlı alanda, $T(x)$ sürekli fonksiyonuyla tanımlı sıcaklık değişkenini ele alalım.



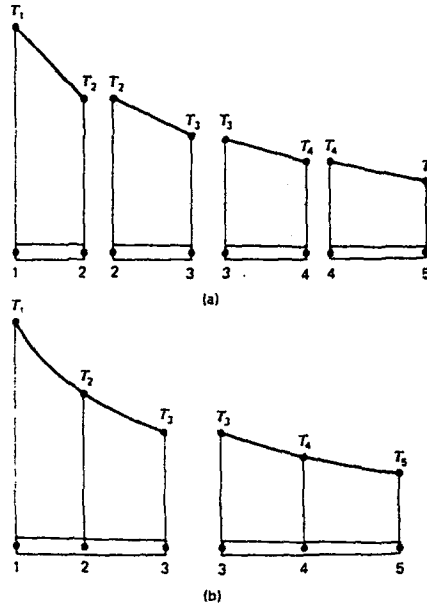
Şekil 4-1: Kanat üzerindeki sıcaklık dağılımı

Yöntemde önce OL kanadı üzerinde Şekil 4-2'de görüldüğü gibi 5 adet düğüm noktası belirlenir ve herbir düğüm noktasına denk gelen sıcaklık değerleri T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 şeklinde belirtilir. Bu işlem daha fazla düğüm noktası kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Ancak 5 düğüm noktası, temel kavramların anlaşılması açısından yeterlidir.



Şekil 4-2: Düğüm noktaları ve $T(x)$ 'in tahmini değerleri

Düğüm noktaları ve bu noktalardaki sıcaklık değerlerinin belirlenmesinden sonra OL kanadı elemanlara ayrılır. Bu işlem iki şekilde yapılabilir. Birincisinde Şekil 4-3 a'da görüldüğü gibi alan, herbiri iki düğüm noktasına sahip 4 elemana bölünebilir. İkincisinde ise herbiri üç düğüm noktasına sahip 2 elemana bölünebilir (Şekil 4-3b)

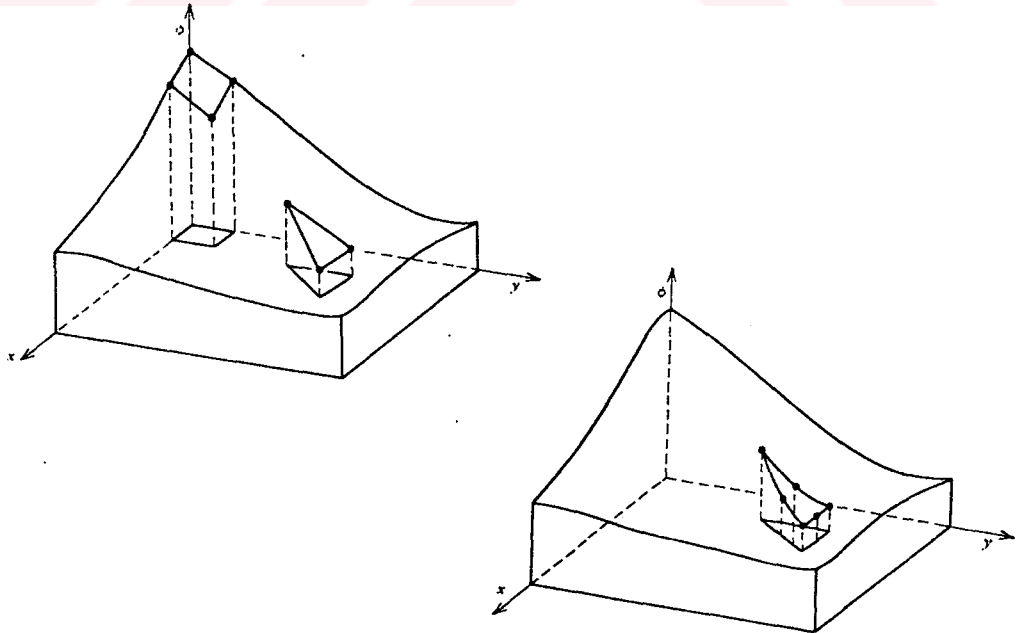


Şekil 4-3: Elemanlara ayırma

Eleman fonksiyonu, tanımlı olduğu düğüm noktalarındaki sıcaklık değerleri yardımıyla bulunur. Eğer bizim kanadımız iki düğüm noktalı dört elemana bölünmüşse eleman fonksiyonlarımız x 'e göre lineerdir (iki noktadan bir doğru geçer.). Dolayısıyla $T(x)$ fonksiyonu dört lineer parçalı sürekli bir fonksiyonmuş gibi yaklaşık olarak ifade edilebilir.

Kanadın üç düğüm noktalı iki elemana bölünmesi halinde ise eleman fonksiyonları ikinci dereceden (parabolik) olacaktır. Böylece $T(x)$ fonksiyonu x 'e göre parabolik olan iki fonksiyonun birleştirilmesi ile yaklaşık olarak ifade edilebilecektir. Bu işlemler sırasında dikkat edilecek husus, düğüm noktaları ve bunlara bunlara karşılık gelen sıcaklık değerleri $T(x)$ fonksiyonuna en iyi yaklaşımı sağlayacak şekilde seçilmelidir.

Burada verilen tek boyutlu modellemenin yanında sonlu elmanlar yöntemiyle iki boyutlu (yüzey) veya üç boyutlu (hacim) modelleme de yapılabilir. Ancak özellikle eğrisel şekillerin modellenmesinde yüksek dereceli elemanlarla daha iyi sonuçların elde edilmesi mümkündür (Şekil 4-4).



Şekil 4-4: Bir yüzeyin üç düğüm noktalı ve altı düğüm noktalı üçgen elemanlarla modellenmesi

Günümüzde kullanım alanı giderek yaygınlaşan sonlu elemanlar yönteminin avantajları şunlardır:

1-) Aynı model içindeki elemanların herbiri için farklı malzeme özellikleri tanımlanabilir. Bu olay, yöntemin birden fazla farklı malzemeden oluşmuş yapılarda ve özellikle karma malzemelerde kullanımını mümkün kılar.

2-) Karmaşık biçimli parçaları modellerken yüksek serbestlik dereceli elemanlar kullanılarak, gerçeğe daha yakın bir yaklaşımın yapılması mümkündür.

3-) Eleman boyutları değiştirilebilir. Bu özellik sayesinde gerektiği yerde sıkı, gerektiği yerde ise gevşek dokunmuş bir eleman şebekesi elde etmek mümkündür.

4-) Oluşturulan model üzerinde karmaşık yükleme durumları ve sınır koşulları kolayca gerçekleştirilebilir.

5-) Yöntem nümerik olduğu için bilgisayar kullanımına elverişlidir.

6-) Simetrik modellerde simetri koşullarından yararlanılarak, yapılan işlemlerden önemli ölçüde tasarruf edilebilir.

Sonlu elemanlar yönteminin en büyük dezavantajı ise, küçük problemlerde bile çok fazla hesap gerektirmesidir. Bu yüzden yöntem, bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Günümüzde birçok karmaşık analizi sonlu elemanlarla yapmayı mümkün kılan bilgisayar programları mevcuttur. Bunlardan bazıları: ANSYS, IDEAS, FLOTRAN, NASTRAN, ADAMS, LUCAS v.b.

Bu çalışmada parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerde üretim sonrası soğuma sırasında oluşan artık gerilmelerin incelenmesinde ANSYS paket programından yararlanılmıştır.

4.2. ANSYS Paket Programı

ANSYS paket programı, Swanson Analysis Systems Inc. şirketi tarafından yaklaşık olarak 20 yıl önce geliştirilmeye başlanan bir sonlu elemanlarla analiz programıdır. Bu programın ilk versiyonlarıyla yalnız yapısal analiz (gerilme, birim şekil değişimi v.b.) gerçekleştirilebilirken, zamanla bilgisayar imkanları ve sonlu elemanlar yöntemindeki gelişmelere paralel olarak, yeni versiyonlari geliştirilmiştir. Program, bugün yapısal analizin yanında, ısı transferi, akışkanlar mekaniği, elektromanyetizma, titreşim, yorulma, kırılma mekaniği, sürünme problemlerinin bir veya birkaçını beraber çözebilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar programı halini almıştır. Bu çalışmada kullanılan versiyon ANSYS 5.0' dir.

ANSYS 5.0 paket programı ile sonlu elmanlar analizi yaparken birbirini izleyen üç ana adım geçilir. Bu adımlar;

- 1-) Birincil işlem (Preprocessing)
- 2-) Yüklerin uygulanması ve çözüm (Solution)
- 3-) Sonuçların değerlendirilmesi (Postprocessing)

4.2.1. Birincil işlem

Bu adımda problemin modellenmesi gerçekleştirilir. Model kurulurken şu kademelerden geçilir:

Başlık verme: Gerekli ise konuyla ilgili başlık verilir.

Eleman tipinin belirlenmesi: Bu bölümde yapılan analize ve kullanılan modele en uygun eleman tipi seçilir. Bu eleman tipleri bir boyutlu (çubuk, kiriş), iki boyutlu (üçgen, dörtgen v.b.), üç boyutlu (katı), kabuk (shell) ve bağ ele-

manlar gibi ana başlıklar altında toplanabilir. Bunun dışında elemanlar, yapılacak analizin türüne göre de sınıflandırılabilir(yapısal, termal, elektromanyetik v.b.).

Malzeme özelliklerinin yüklenmesi: Bu bölümde yapılan analize uygun olarak, kurulan modelde kullanılacak malzeme özellikleri tanımlanır. Eğer yapısal analiz gerçekleştiriliyorsa malzeme özellikleri ikiye ayrılır:

- Lineer malzeme özellikleri (Elastiklik modülü, Poisson oranı, ısı genleşme katsayısı v.b.)
- Lineer olmayan malzeme özellikleri (Plastisite, sürünme, hiperelastisite v.b.)

Not: ANSYS paket programı, lineer olmayan analizi Newton-Raphson yöntemiyle küçük lineer parçalara ayırarak çözer.

Model geometrisinin oluşturulması: Model geometrisi iki şekilde oluşturulabilir:

Birincisi, program içinde bulunan hazır geometrik şekillerin (primitive) birbirine eklenmesi, çıkarılması veya kesiştirilmesi gibi işlemlerin yardımıyla katı model oluşturulur (Solid Modelling).

İkinci yolda ise önce katı modeli oluşturan noktalar belirlenir. Sonra bu noktaların birleştirilmesiyle çizgiler, çizgilerin birleştirilmesiyle alanlar, alanların birleştirilmesiyle de katı model elde edilir (Direct Generation).

Modelin elemanlara ayrılması: Oluşturulan katı model, daha evvelden yapılacak analize uygun olarak tipi belirlenmiş olan elemanlara bölünür. Elemanlara bölme işlemi sırasında eleman büyüklüğünün belirlenmesi çeşitli şekillerde yapılabilir:

- Modelin tümü tek bir eleman büyüklüğü verilerek, eşit elemanlara bölünür.
- Kritik bölgelerdeki noktaların çevresinde daha küçük elemanlar kullanılabilir.
- Modeli oluşturan çizgiler üzerinde çeşitli şekillerde bölümlendirmeler yapılarak çizgi boyunca eleman büyüklüğü be-

lirlenir.

Böylece gerektiği yerde sıkı, gerektiği yerde ise gevşek dokunmuş bir eleman şebekesi elde edilebilir.

4.2.2. Yüklerin Uygulanması ve Çözüm

Bu bölümde yapılacak işlemler sırasıyla şöyledir:

Analiz tipinin belirlenmesi: Bu bölümde yapılacak analizin tipi belirlenir. ANSYS paket programındaki mevcut analiz tipleri:

Statik

Harmonik

Isı transferi

Akışkanlar mekaniği (FLOTRAN yardımıyla)

Burkulma

Spektrum

Yükleme durumunun belirlenmesi:

a-) Sınır koşullarının girilmesi: Modeldeki serbestlik dereceleri sınırlandırılmış olan düğüm noktaları ile simetri eksenleri bu bölümde tanımlanır.

b-) Kuvvetler

c-) Yayıllı yükler

d-) Hacisel yükler

e-) Eylemsizlik yükleri

f-) Bileşik yükler

Problemin çözülmesi: Bu bölümde eğer lineer olmayan analiz yapılıyorsa gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek için yükleme adım adım yapılmalıdır. Adım büyüklüğü ne kadar ufak olursa, o kadar iyi sonuçlar elde edilecektir.

4.2.3. Elde Edilen Sonuçların Değerlendirmesi

Bu bölümde yapılan analizden elde edilip, veri tabanı dosyasında saklanan sonuçlar okutularak, listeler veya resimler halinde alınabilir. Ayrıca resimler halinde elde edilen bu sonuçlar bir dosya içinde saklanabilir.

BÖLÜM 5

5. PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KARMA MALZEMELERDEKİ ARTIK GERİLMELERİN ANSYS'DE ANALİZİ

Günümüzde giderek yaygınlaşan bir kullanım alanı bulan parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemeler, gerek rijitlik, gerekse mukavemet açısından takviyesiz alaşımlara oranla çok daha iyidir. Bu tür karma malzemelerin üretim veya ısıtıl işlem sonrası soğuma sırasında, bileşenlerinin arasındaki ısıtıl büzülme farkları sebebiyle, iç gerilmelerin oluştuğu görülmüştür. Yapılan araştırmalarda bu iç gerilmelerin, karma malzemenin mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla, Al matrisli, SiC parçacık takviyeli karma malzemelerdeki ısıtıl artık gerilmeler incelenmiş ve bu gerilmelerin ortalama seviyesiyle, dağılımını etkileyen faktörler üzerinde durulmuştur. Bu faktörler;

- Matris malzemesi
- Parçacık biçimi
- Hacim oranı
- Parçacık görünüm oranı
- Parçacıklar arası mesafe (Hücre görünüm oranı)
- Soğuma hızı (Matris malzemesindeki sürünme nedeniyle)

Isıtıl artık gerilmeleri etkileyen faktörlerden önce matris malzemesi ele alınmış ve bu amaçla iki ayrı alüminyum alaşımı (6061 ve 1100) matris malzemesi olarak kullanılmıştır.

Parçacık biçiminin (geometrisi) etkisinin belirlenmesi için biri silindirik diğeri küresel olmak üzere iki temel parçacık geometrisi üzerinde durulmuştur.

Hacim oranının etkisini belirlemek için, değişik hacim oranlarına (%4, %8, %12, %15, %24, %30, %40) sahip, silindirik ve küresel parçacık içeren modeller oluşturulmuştur.

Silindirik parçacıklarda, parçacığın görünüm oranının (yüksekliğinin çapına oranı) etkisini araştırmak için, %4 ve %8 hacim oranlarındaki 1,2,3,4 görünüm oranlarına sahip silindirik parçacıklı, modeller üzerinde hesaplamalar yapılmıştır.

Parçacıklar arası mesafenin iç gerilmelere etkisi araştırılırken, değişik hücre görünüm oranlarındaki (birim hücrenin yüksekliğinin çapına oranı) modeller üzerinde hesaplamalar yapılmıştır.

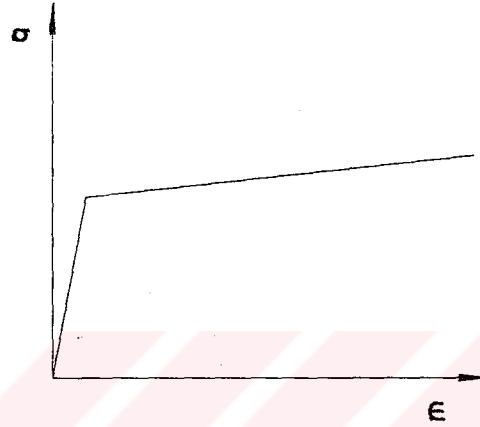
Yüksek sıcaklıktan soğuma sırasında matris malzemesinde görülen sürünme nedeniyle iç gerilmelerin seviyesinde bir düşme beklenebilir. Bu gerilme gevşemesi, özellikle iç gerilmelerin yükseldiği bölgelerde daha yoğun görülür. O yüzden soğuma hızının özellikle iç gerilme dağılımında etkili olması beklenebilir. Bu konunun araştırılması için 6061 Al alaşımına ait sürünme özellikleri de kullanılarak, değişik soğuma hızlarında hesaplamalar yapılmıştır.

5.1. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Bu çalışmada matris malzemesi olarak iki alüminyum alaşımı (6061 ve 1100), takviye malzemesi olarak ise SiC alınmıştır. Alüminyum alaşımlarına ait gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin, Şekil 5-1'de görüldüğü gibi iki lineer bölgeden oluştuğu kabul edilmiştir. Birinci lineer bölgenin eğimi elastiklik modülü, ikinci lineer bölgenin eğimi ise teğet modüldür (E_t).

Tablo 5-1'de 1100 Al alaşımına ait değişik sıcaklıklardaki elastiklik modülü, Poisson oranı, akma dayanımı, teğet modülü ve ısı genleşme katsayıları verilmiş-

tir [25]. Tablo 5-2'de ise aynı değerler 6061 Al alaşımı için verilmiştir [21]. Yüksek dayanımlı SiC parçacıklarda ise zorlanma elastik bölgede kalacağından, bu malzemeye ait sadece elastik özelliklerin bilinmesi yeterlidir. SiC takviyelerin elastiklik modülü, Poisson oranı ve ısı genleşme katsayılarının sıcaklığa bağlı değerleri Tablo 5-3'de görülmektedir.



Şekil 5-1: Al alaşımlarına ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin şematik gösterimi

Tablo 5-1: 1100 Al alaşımının değişik sıcaklıklardaki mekanik özellikleri [25]

T [°C]	E [MPa]x10 ⁴	ν []	σ _i [MPa]	E _t [MPa]	α _i [K ⁻¹] x10 ⁻⁵
0	6,750	0,35	28,6	720	2,2750
20	6,720	0,35	28,2	638	2,3000
50	6,650	0,35	27,4	525	2,3300
100	6,525	0,35	25,9	367	2,3769
150	6,325	0,35	23,8	264	2,4223
200	6,000	0,35	21,1	199	2,4675
250	5,438	0,35	17,4	158	2,5126
300	4,675	0,35	13,5	125	2,5577
350	3,900	0,35	10,1	100	2,6027
400	3,138	0,35	7,3	78	2,6484

Tablo 5-2: 6061 Al alaşımasının değişik sıcaklıklardaki mekanik özellikler [21]

T [°C]	E [MPa]x10 ⁴	v []	σ_1 [MPa]	E ₁ [MPa]	α_1 [K ⁻¹] x10 ⁻⁴
0	6,83	0,30	55,2	2080	2,34
50	6,83	0,30	55,2	2080	2,34
180	6,83	0,30	55,2	2080	2,34
250	5,66	0,30	40,3	1510	2,74
350	4,21	0,30	14,4	1130	3,02
450	2,76	0,30	11,6	800	3,37
550	1,10	0,30	5,5	400	3,74

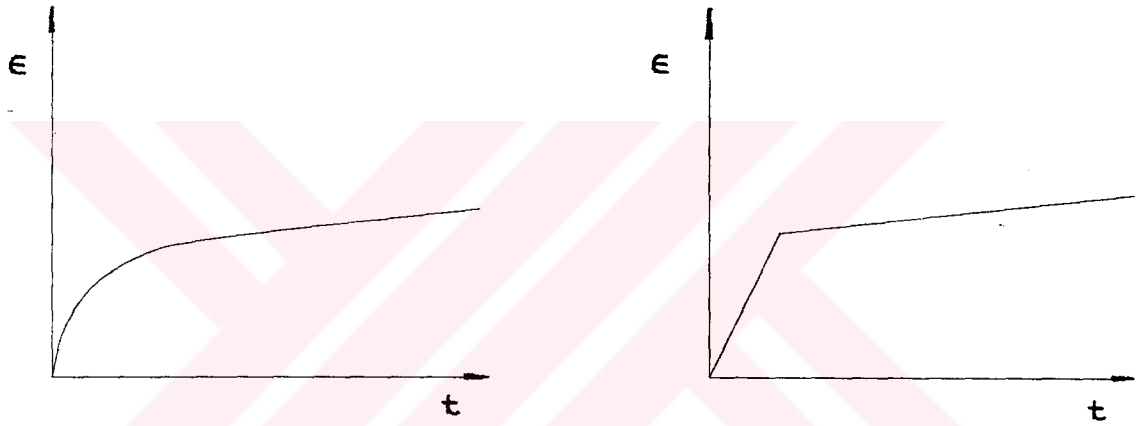
Tablo 5-3: SiC parçacıklarının değişik sıcaklıklardaki mekanik özellikleri [25]

T [°C]	E [MPa]x10 ³	v []	α_1 [K ⁻¹] x10 ⁻⁴
20	4,290	0,170	4,30
200	4,270	0,160	4,73
400	4,230	0,145	5,21

ANSYS paket programına elastiklik modülü, Poisson oranı ve ısı genleşme katsayıları gibi malzeme özelliklerini girerken, sıcaklığa bağlı değişimlerinin bir polinomla ifade edilmesi gerekmektedir. Tablolarda verilen bu değerlerin sıcaklığa bağlı değişimlerinin lineer olduğu görülmüş ve bu özellikler $E = C_0 + C_1.T$ şeklinde polinomlar olarak tanımlanmıştır. C_0 ve C_1 sabitleri tablolardaki değerler kullanılarak lineer regresyonla hesaplanmıştır.

Bu çalışmada ayrıca 6061 Al alaşımına ait sürünme özelliklerine bağlı olarak, yüksek sıcaklıklardaki gerilme gevşemesi de hesaplanmıştır. Matris malzemesinin soğuması-

nın gerçekleşeceği hızlarda, sürünme süresi çok kısa olduğundan, genellikle birincil sürünme verileri gerekmektedir. Literatürde 6061 Al alaşımına ait sürünme özellikleri araştırılırken, kararlı sürünme bölgesine ait değişik sıcaklık ve gerilmelerdeki minimum sürünme hızları kolaylıkla bulunabilmesine rağmen, aynı alaşımın birincil sürünme bölgesine ait bir veriye rastlanmamıştır. Bu yüzden Şekil 5-2'deki basitleştirme yapılarak, birincil sürünme bölgesinde de sürünme hızının sabit ve minimum sürünme hızının 5 katı olduğu varsayılmıştır. Bu katsayı, Dorn'un %99,999 saflıkta Al üzerinde yaptığı araştırmalardaki sürünme eğrileri incelenerek, saptanmıştır [26].



Şekil 5-2: 6061 Al alaşımının sürünme eğrisinin basitleştirilmesi

ANSYS 'te herhangi bir malzemeye ait sürünme özellikleri tanımlanırken,

$$\epsilon = C_1 \cdot \sigma^{C_2} \cdot t^{C_3} \cdot e^{-(C_4/T)} \quad (5.1)$$

formülündeki sabitlerin girilmesi yeterlidir. Bu formülde ;

$$C_2 = n$$

$$C_3 = 0 \quad (\text{zamana göre sabit sürünme hızı})$$

$$C_4 = Q_A/R$$

n : Norton kanunundaki gerilme üsteli

Q_A : Aktivasyon enerjisi

R : Evrensel gaz sabiti

Nieh'in yaptığı çalışmalarda $n \approx 3$, $Q_r = 140 \text{ KJ/mol}$ olarak bulunmuştur [27]. Bu çalışmalardan faydalanılarak;

$$C1 = 1233,68$$

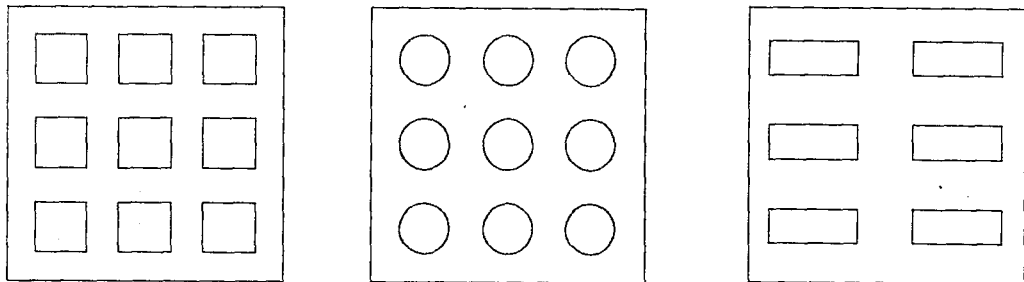
$$C2 = 3$$

$$C3 = 0$$

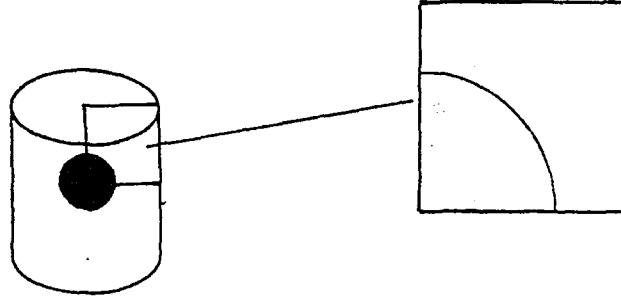
$$C4 = 16828,28 \text{ şeklinde bulunmuştur.}$$

5.2. Modelin Kurulması

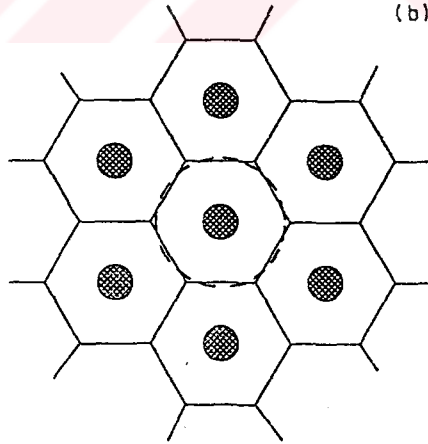
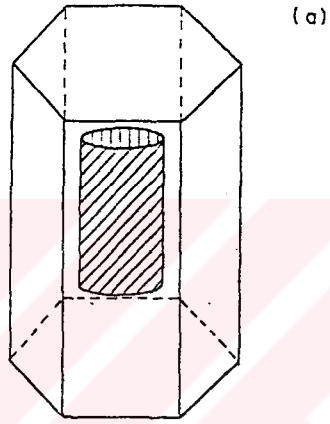
Model kurulurken, karma malzeme içindeki takviye parçacık dağılımının Şekil 5-3'deki gibi düzgün olduğu kabul edilmiştir. Böylece karma malzemenin Şekil 5-4'deki silindirik birim hücrelerden oluştuğu kabulüyle, iki boyutlu eksenel simetrik bir model oluşturulmuştur. Eksenel ve diğer simetri koşulları nedeniyle, takviyenin $1/4$ 'ü ve bunu çevreleyen matrisin incelenmesi yeterlidir. Ancak gerekli sınır koşullarının özenle tanımlanması gerekmektedir. Eğer karma malzemeyi Şekil 5-5'deki gibi altıgen prizmalardan oluştuğunu düşünürsek, kullandığımız silindirik birim hücre modelinin gerçeğe oldukça yakın olduğunu görürüz. Böylece modeli iki boyuta indirgeyip, hesap zamanından önemli ölçüde tasarruf edilir.



Şekil 5-3: Karma malzemedeki parçacıkların dağılımı



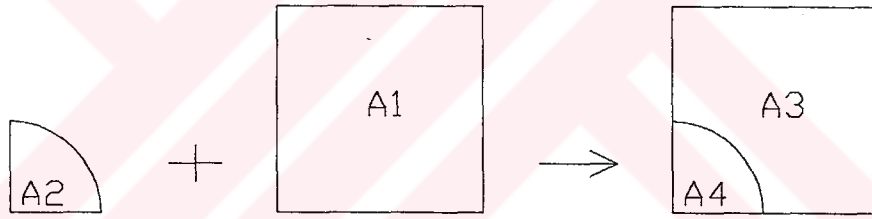
Şekil 5-4: Silindirik birim hücre modeli



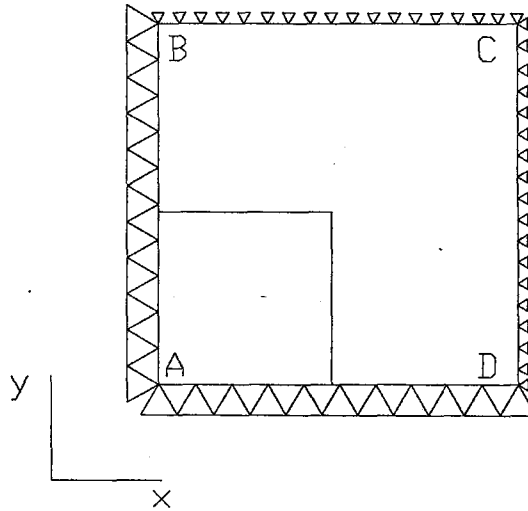
Şekil 5-5: Karma malzemenin altıgen prizmalara bölünmesi

iki boyutlu aksenel simetrik model oluşturulurken Şekil 5-4'de görüldüğü gibi, takviyenin 1/4'ü ve bunu çevreleyen matris esas alınır. ANSYS'te bu iş gerçekleştirilirken şu adımlar takip edilir:

- 1-) A1 ve A2 adlı iki alan oluşturulur (Şekil 5-6).
- 2-) Bu iki alan kesiştirilerek A3 ve A4 adlı birbirine bağlı iki yeni alan oluşturulur. (Overlap)
- 3-) A3 alanı matris alaşımını, A4 alanı takviyeyi temsil etmek üzere bu iki alan elemanlara bölünür.
- 4-) a-) Elemanlara ayrılmış olan A3 alanının BC ve CD kenarlarının komşu hücrelerle olan sürekliliğinin bozulmaması için şekil değişimi sonunda da doğrusal kalması gerekir. Bunu sağlamak için BC kenarı üzerindeki düğüm noktalarının y-ekseni doğrultusundaki, CD kenarı üzerindeki düğüm noktalarının ise x-ekseni doğrultusundaki hareketlerinin bağdaşık olması gereklidir (Coupling). (Şekil 5-7)



Şekil 5-6: Modeli oluşturan alanlar



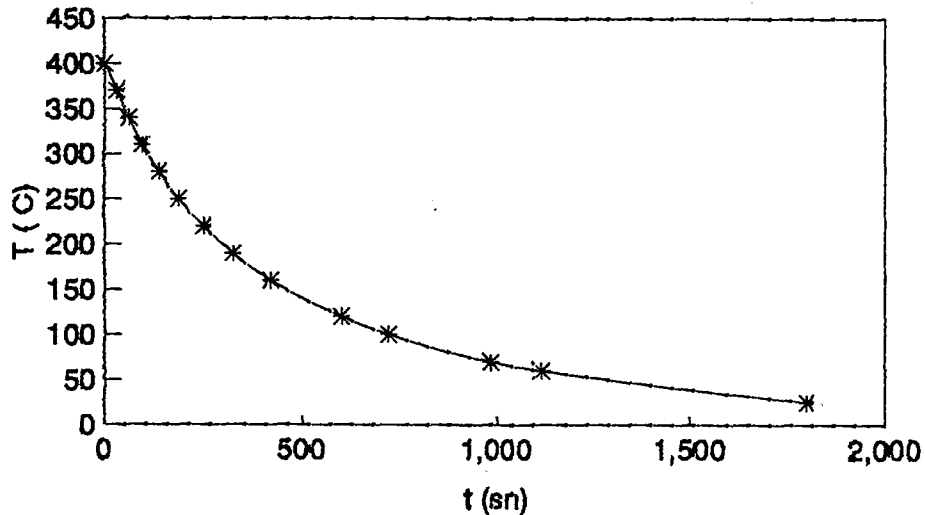
Şekil 5-7: Çözüme hazır model

b-) Son olarak AD ve AB kenarlarına göre simetrik olan modelin simetri eksenleri tanımlanarak, çözüme hazır hale getirilir. Dönel simetri eksenini olan y-ekseni, eleman tipinin belirlenmesi sırasında seçilir. Bu çalışmada 8 düğüm noktalı aksenal simetrik düzlemsel eleman (PLANE82) kullanılmıştır.

5.3. Yükleme ve Çözüm

Karma malzemenin üretimden veya ısıtılardan 400°C 'ta çıktığı varsayılarak, modelin tüm düğüm noktalarına $T_0=400^{\circ}\text{C}$ lik bir başlangıç sıcaklığı verilmiş ve model bu sıcaklıktan oda sıcaklığına (20°C) 10 adımda soğutulmuştur.

Sürünmeye bağlı soğuma hızı etkisinin araştırıldığı hesaplamalarda, her bir sıcaklık adımına, bu adımdaki soğumanın gerçekleştiği süre de ilave edilmiş ve böylece sürünmeye bağlı iç gerilmedeki azalmalar hesaplatılmıştır. Soğuma hızı olarak 3 değişik hız alınmıştır. Bunlardan birincisi durgun havada, diğer ikisi fırında yavaş soğumayı ($0,03^{\circ}\text{C/sn}$ ve $0,06^{\circ}\text{C/sn}$) karakterize etmektedir. Durgun havada soğuma eğrisi Şekil 5-8'de görülmektedir. Bu eğri, 10mm çapında Al bir çubuğun 400°C 'den oda sıcaklığına durgun havada soğuması sırasında orta kısmına yerleştirilen bir termokupul yardımıyla saptanmıştır.



Şekil 5-8: 10mm çapındaki Al çubuğun eksenindeki bir noktanın 400°C 'den, 20°C 'ye soğuma diyagramı (durgun hava)

BÖLÜM 6

6. SONUÇLAR

Günümüzde oldukça yeni malzemeler olan parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerin, gerek mekanik özellikleri, gerekse mikro yapıları halen deneysel, teorik veya sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılmaktadır. Bu tür karma malzemelerde üretim veya ısıtma işlem sonrası soğuma sırasında bileşenleri arasındaki ısıtma genleşme farkları sebebiyle iç gerilmeler meydana gelir. Yapılan araştırmalarda bu iç gerilmelerin karma malzemenin gerek mekanik davranışı, gerekse iç yapısı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerin mekanik davranışı üzerinde önemli etkileri bulunan ısıtma artık gerilmelerin ortalama seviyesi ve iç yapıdaki dağılımı üzerinde durulmuştur. Ayrıca bu ortalama iç gerilme seviyeleri ve dağılımı üzerinde etkili olan faktörler de incelenmiştir. Bu faktörler:

- Parçacık geometrisi
- Hacim oranı
- Matris malzemesi
- Soğuma hızı (Sürünmeye bağlı)

Şekil değişimi ve dayanım açısından matris malzemesi, takviye parçacığına nazaran çok daha kritik bir bölgede zorlandığı için sonuçların değerlendirilmesinde genellikle matristeki iç gerilmeler üzerinde durulmuştur.

Üç boyutlu gerilme ve birim şekil değişimi hallerini tek bir değer ile ifade etmek ve değişik gerilme hallerinin

birbirine eşdeğer durumlarını karşılaştırmak yararlı ve gereklidir. Bu şekilde çekme deneyi ile belirlediğimiz tek eksenli malzeme özelliklerini bu bulduğumuz gerilme değerleriyle karşılaştırıp, sonuçlara varmak mümkün olur. Bu amaçla distorsiyon işi (Von Mises) kriterinden yararlanılarak, çok eksenli gerilme durumları için efektif gerilme ve efektif birim şekil değişimi kavramları tanımlanmıştır.

$$\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{2/2 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}^{1/2} \quad (6.1)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \sqrt{2/3 [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]}^{1/2} \quad (6.2)$$

Matristeki gerilme durumu verilirken, genellikle plastik şekil değişimine sebep olan ve karma malzemede hasar oluşumunda önemli yer tutan efektif gerilmeler üzerinde durulmuştur. Ayrıca efektif gerilmelerin yanında plastik şekil değişimine sebep olmayan hidrostatik gerilmeler de (σ_H) verilmiştir.

$$\sigma_H = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (6.3)$$

Sonuçlar değerlendirilirken, bahsi geçen bu gerilmelerin gerek ortalaması gerekse dağılımı tablolar ve şekiller halinde verilmiştir. Ayrıca fikir verme açısından ortalama gerilmeler verilirken eksenel (y-ekseni doğrultusundaki) ve radyal (x-ekseni doğrultusundaki) gerilmeler de tablolara dahil edilmiştir.

6.1. Parçacık Geometrisinin Isıl Artık Gerilmeler Üzerindeki Etkisi

Parçacık geometrisinin ısı artı gerilmeler üzerindeki etkisinin belirlenmesi için, iki temel parçacık biçimi, silindir ve küre alınmıştır. Silindirik ve küresel parçacıkla takviyeli alüminyum matrisli karma malzemeler için değişik hacim oranlarında yapılan çözümlerde şu hususlar gözlenmektedir:

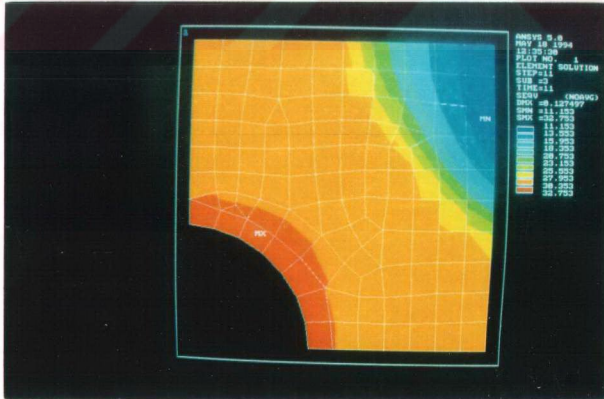
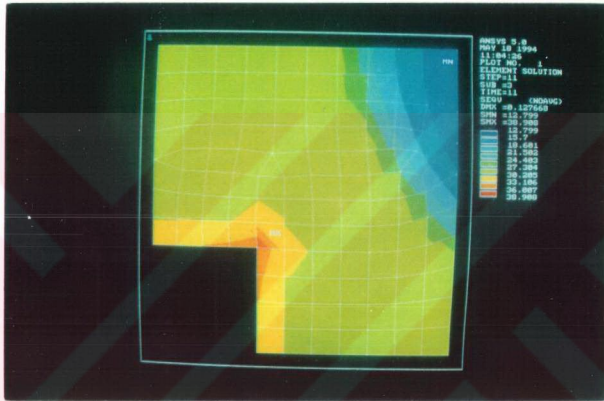
a-) Yapılan hesaplamalarda parçacık geometrisinin matristeki ortalama gerilmeye etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Değişik hacim oranları için yapılan incelemelerde silindirik parçacıkla takviyeli karma malzemede matristeki ortalama gerilmenin küresel parçacıkla takviyeli olandan biraz daha fazla olduğu görülmüştür. Tablo 6-1'de değişik hacim oranlarında küresel ve silindirik parçacıklar için matristeki ortalama efektif gerilme değerleri görülmektedir

b-) Parçacık geometrisinin matristeki gerilme dağılımına etkisi ise oldukça fazladır. Şekil 6-1 'de de görüldüğü gibi silindirik parçacıkla takviyeli karma malzemede özellikle efektif gerilmenin maksimum değerleri küresel parçacıkla takviyelidekinden daha yüksektir. Ayrıca silindirik parçacığın ucuna yakın matris alaşımında iç gerilme yığılmaları görülmektedir. Bunun yanında plastik şekil değişimi dağılımına bakılacak olursa, silindirik parçacığın bu uç kısmında belli bir artış olduğu görülür. (Şekil 6-5 c, d) Bu olay özellikle whisker takviyeli metal matrisli karma malzemelerin hasar mekanizması olan whisker ucunda boşluk oluşumunun muhtemel nedenidir. Zira elektron mikroskobu ile yapılan araştırmalarda whisker takviyeli metal matrisli karma malzemelerde matris malzemesinin hasara, çekme hidrostatik ve efektif iç gerilmenin yoğunlaştığı bu noktalardan başladığı görülmüştür [16].

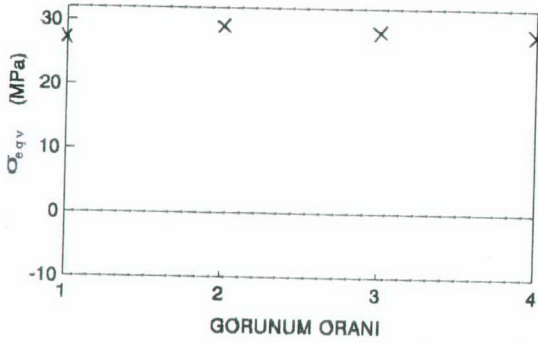
Silindirik parçacıklar için görünüm oranının (parçacığın yüksekliğinin çapına oranı) iç gerilmelere etkisinin incelenmesinde parçacık görünüm oranı 1, 2, 3, 4 olan %4 hacim oranlı karma malzemeler ele alınmış ve yapılan hesaplarda parçacık görünüm oranının ortalama iç gerilmelere belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. (Şekil 6-2) Diğer yandan parçacık görünüm oranı büyüdükçe maksimum gerilme seviyelerinde belirgin bir artış olmakla birlikte, silindirik parçacığın uç kısmındaki bu gerilmeler parçacıktan uzaklaştıkça hızla düştüğünden ortalama gerilmeye etkisi pek fazla olmamaktadır (Şekil 6-3)

Tablo 6-1: 1100 Al matrisli silindirik ve küresel parçacık takviyeli karma malzeme için değişik hacim oranlarındaki ortalama efektif gerilmeler [MPa]

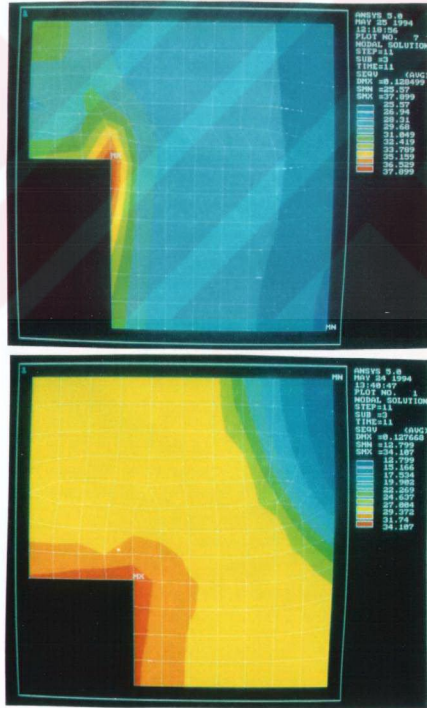
	%4	%8	%24	%30
Silindirik	27,236	29,110	30,450	30,730
Küresel	27,110	28,860	30,350	30,701



Şekil 6-1: %4 hacim oranlı silindirik ve küresel parçacık takviyeli karma malzemedeki efektif gerilme dağılımları



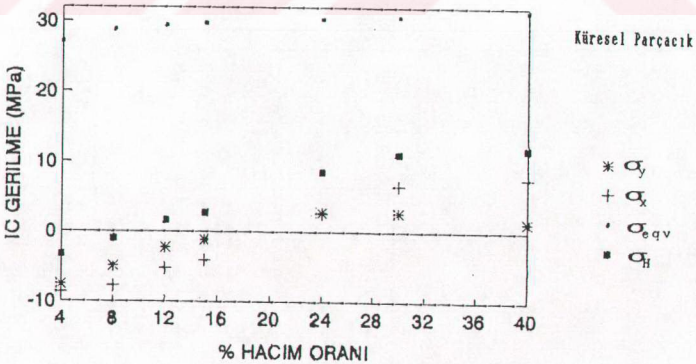
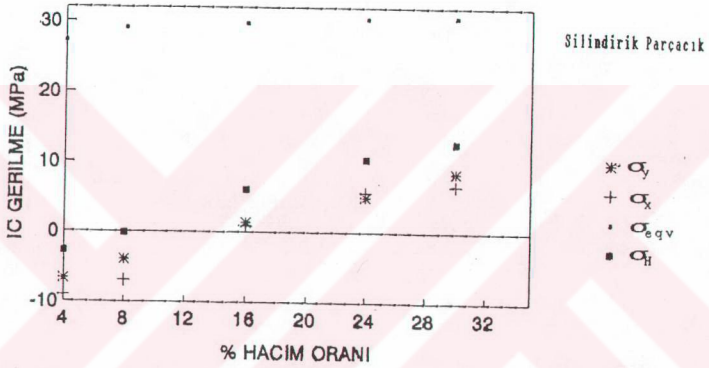
Şekil 6-2: Görünüm oranının efektif iç gerilmelere etkisi



Şekil 6-3: %4 hacim oranlı 1 ve 2 görünüm oranındaki parçacıklar için karma malzemedeki efektif gerilme dağılımları [MPa]

6.2. Hacim Oranının Isıl Artık Gerilmeler Üzerindeki Etkisi

Değişik hacim oranları (%4, %8, %12, %16, %24, %30, %40) için yapılan hesaplamalar sonucu, hacim oranının ısı artı gerilmeler üzerinde aşırı olmamakla beraber artırıcı bir etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Şekil 6-4' de de görüldüğü gibi, matristeki ortalama gerilme seviyeleri hacim oranı arttıkça belirli bir hızda yükselmektedir.

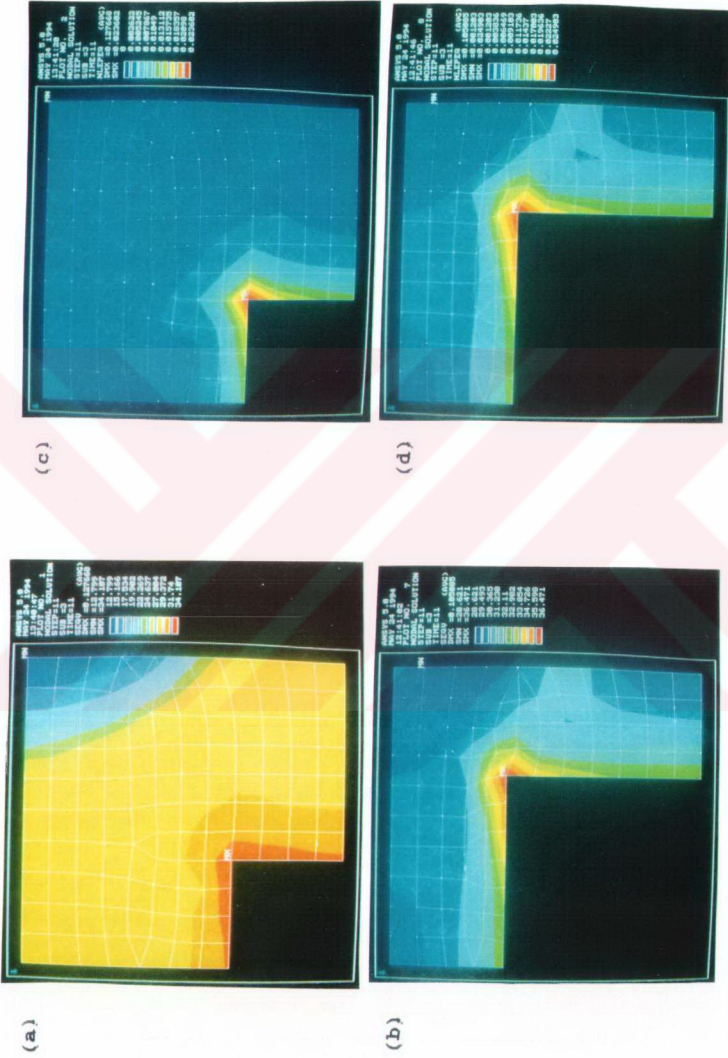


Şekil 6-4: Silindirik ve küresel parçacıkla takviyeli karma malzemede matristeki ortalama gerilmelerin hacim oranı ile değişimi (1100Al matrisli)

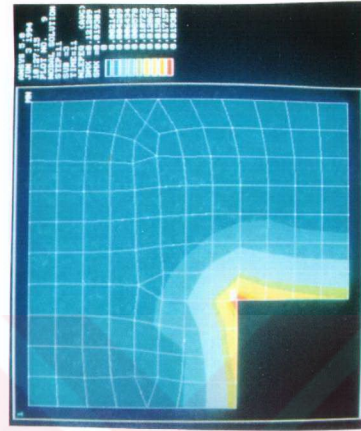
Şekil 6-5'de %4, %24, hacim oranlarında silindirik parçacık takviyeli 1100 Al matrisli karma malzemeye ait efektif gerilme ve plastik şekil değişimi dağılımları görülmektedir. 1100 Al alaşımı gerek düşük akma dayanımı gerekse düşük pekleşme üsteli sebebiyle, küçük hacim oranlarında dahi iç gerilmelerin etkisiyle büyük miktarda plastik şekil değişimine uğramaktadır ve hacim oranı arttıkça matrisin tamamı plastik olarak şekil değiştirmektedir. Akma dayanımı ve pekleşme üsteli daha yüksek olan 6061 Al alaşımında plastik şekil değişimi bölgesi daha küçük olmaktadır(Şekil 6-6 b). Şekil 6-5'e dikkat edilecek olursa maksimum efektif gerilme seviyelerinde bir çok fazla değişiklik görülmemesine rağmen, hacim oranı arttıkça parçacıklar arası mesafe azaldığı için matris malzemesi yüksek seviyedeki gerilmelerin daha fazla etkisinde kalmakta ve böylece matristeki ortalama gerilmeler bu dağılımın etkisiyle hacim oranı arttıkça yükselmektedir.

Parçacıklar arası mesafenin gerilme durumuna etkisini araştırmak için 1, 2, 4, 8 gibi çeşitli hücre görünüm oranlarında (silindirik hücrenin yüksekliğinin çapına oranı) hesaplar yapılmıştır. Şekil 6-7'de görüldüğü gibi hücre görünüm oranı arttıkça maksimum efektif gerilme seviyeleri pek değişmemekle birlikte gerilme dağılımı önemli ölçüde değişmektedir. Görüldüğü gibi iç gerilmeler parçacık çevresinde yoğunlaşmakta ve parçacıklardan uzaklaştıkça seviyeleri önemli ölçüde düşmektedir. Dolayısıyla parçacıklar arası mesafe azaldıkça arada kalan matris malzemesi daha fazla iç gerilmeye maruz kalacaktır. Bu, hacim oranı arttıkça matristeki ortalama iç gerilmelerin artışını izah etmektedir.

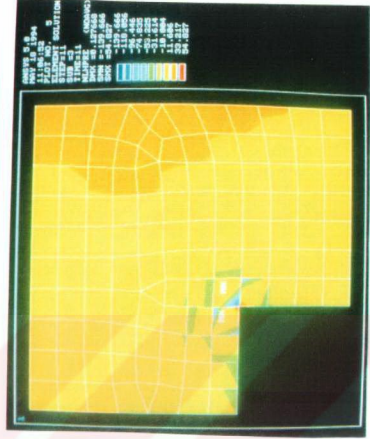
Parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerin üretimi sırasında parçacıkların mümkün olduğu kadar homojen dağılması tercih edilir. Çünkü bu tür karma malzemelerde matristeki hasar, parçacık kümelenmelerinin olduğu yerlerden başlar ki, bu bölgelerde parçacıklar arası mesafe az olduğundan iç gerilmelerin etkisi oldukça fazladır.



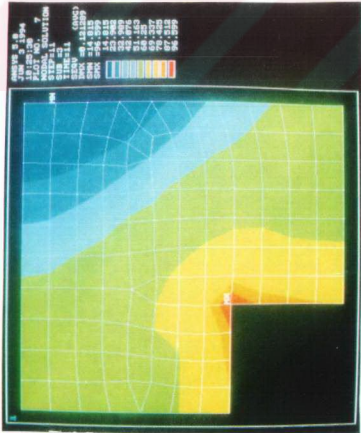
Sekil 6-5: %4 ve %24 hacim oranlı 1100 Al matrisli karma malzemede efektif iç gerilme [MPa] birim plastik şekil değişimi dağılımları



(५)



(၁)

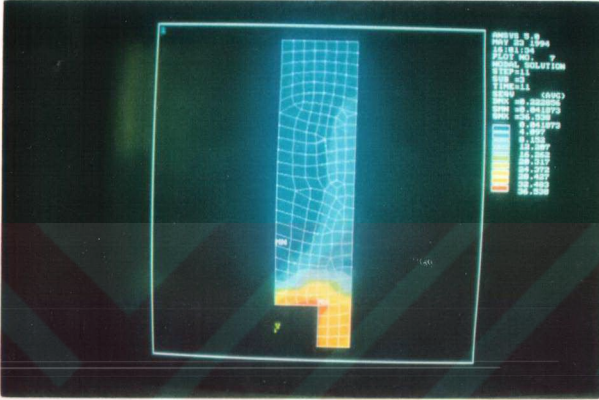


Şekil 6-6: 6061 Al matrisli %24 hacim oranlı karma malzemede efektif gerilme, efektif plastik genleme ve hidrostatik gerilme dağılımları

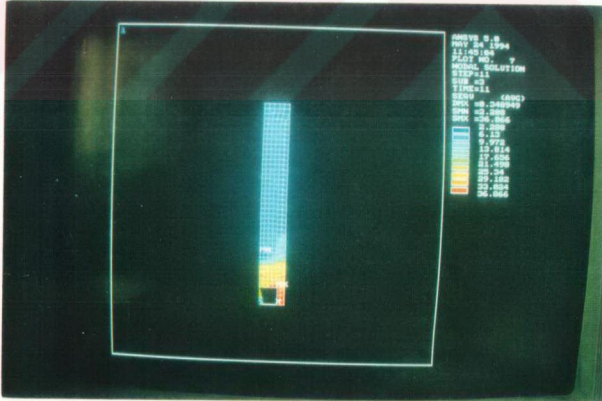
- a-) Efektif gerilme [MPa]
- b-) Efektif plastik genleme
- c-) Hidrostatik gerilme [MPa]

- a-) Efektif gerilme [MPa]
b-) Efektif plastik genleme
c-) Hidrostatik gerilme [MPa]

(a)



(b)



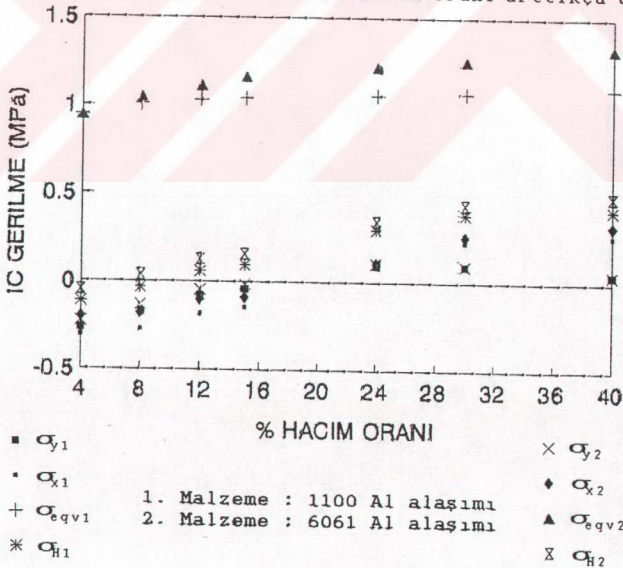
Şekil 6-7: %4 hacim oranlı karma malzemede hücre görünüm oranınıninefektif gerilme dağılımına etkisi

- a-) Hücre görünüm oranı 3
b-) Hücre görünüm oranı 4

6.3. Matris Malzemesinin Isıl Artık Gerilmeler Üzerindeki Etkisi

Bu çalışmada matris alaşımının iç gerilmeler üzerindeki etkisini araştırmak amacı ile 6061 ve 1100 Al alaşımları matris malzemesi olarak alınmış ve değişik hacim oranları için yapılan hesaplamalarda akma dayanımı daha yüksek olan 6061 Al matriste beklendiği gibi diğerinden daha büyük iç gerilmeler bulunmuştur. Fakat bu iç gerilmeleri matris malzemesinin akma dayanımına bölüp, boyutsuz hale getirdiğimizde, bu boyutsuz iç gerilmelerin birbirine çok yakın çıktığı görülmektedir.

Sekil 6-8'de iki farklı matris malzemesine ait boyutsuz ortalama iç gerilmelerin hacim oranına bağlı değişimleri görülmektedir. Burada görülen husus, düşük hacim oranlarında her iki matris malzemesinde de boyutsuz ortalama gerilmeler hemen hemen eşitken hacim oranı arttıkça 6061 Al



Sekil 6-8: İki farklı matris malzemesindeki ortalama boyutsuz iç gerilmeler ve bunların hacim oranıyla değişimi

matristeki boyutsuz ortalama iç gerilmeler diğerinden bir miktar daha fazla çıkmaktadır. Bunun sebebi, hacim oranı arttıkça artan gerilme seviyeleri sebebiyle plastik şekil değişimi miktarlarının büyümesi ve dolayısıyla iç gerilmeler üzerinde matris malzemesine ait pekleşme üstelinin etkisinin artmasıdır. Böylece pekleşme üsteli daha büyük olan 6061 Al alaşımında boyutsuz ortalama iç gerilme daha fazla olmaktadır.

6.4. Soğuma Hızının Isıl Artık Gerilmeler Üzerindeki Etkisi

Matris malzemesinin sürünme özelliklerine bağlı olarak özellikle yüksek sıcaklıklarda iç gerilmelerde belirli bir gevşeme beklenebilir. Sürünme, zamana bağlı bir olay olduğundan bu gerilme gevşemelerinin seviyesi soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızı azaldıkça sürünmeyle gerçekleşen gerilme gevşemesi miktarı artmaktadır. Bu olayı incelemek için 6061 Al matris alaşımına ait sürünme özellikleri de hesaba katılarak, 3 değişik soğuma hızında iç gerilmeler hesaplanmıştır.

İlk olarak 400°C'den oda sıcaklığına durgun havada soğuma koşulları dikkate alınarak hesap yapılmış. (Şekil 5-8) Daha sonra aynı sıcaklıktan oda sıcaklığına 0,06°C/sn ve 0,03°C/sn gibi fırında yavaş soğumayı karakterize eden iki farklı hızda da hesap yapılmıştır. Tablo 6-2'de yapılan bu hesaplar sonucu matriste oluşan efektif iç gerilmelerin ortalamasının ve maksimum değerlerinin soğuma hızı ile değişimi görülmektedir.

Şekil 6-9'da görüldüğü gibi sürünmeye bağlı soğuma hızı etkisi iç gerilmelerin yükseldiği bölgelerde daha etkin olmakta ve buralarda daha fazla gerilme gevşemesi meydana gelmektedir. Bu yapılan analize göre iç gerilmeleri minimuma indirmek için fırında yavaş soğutma bir çözüm gibi görünse de bunun gerçekleşmesini engelleyebilecek iki önemli faktör vardır:

1-) Matris malzemesindeki sürünme hızı zamana bağlı olarak, giderek azalır ve kararlı sürünme bölgesine girildiğinde minimum bir değere ulaşır. Ayrıca iç gerilmelerin büyük bir kısmı sürünme mekanizmalarının etkin olmadığı düşük sıcaklıklarda oluşmaktadır. Bu yüzden iç gerilmelerdeki gevşeme miktarı da soğuma hızı yavaşladıkça beklenen düzeyde olmayabilir.

2-) Karma malzeme yüksek sıcaklıkta ne kadar uzun süre kalırsa, arayüzey reaksiyonlarına ve istenmeyen karbür oluşumuna o kadar fazla zaman tanınmış olur. Fakat bu duruma seramik parçacıklara uygulanabilecek yüzey kaplamalarla kısmen engel olunabilir.

Tablo 6-2: %16 SiC silindirik parçacık takviyeli 6061 Al matrisli karma malzemenin matrisindeki ortalama gerilmelerin sürünmeye bağlı soğuma hızıyla değişimi

	Ort. [MPa]	Max. [MPa]
Sürünmesiz	64,467	104,663
Durgun Hava	61,677	92,938
0,06°C/sn	60,438	83,143
0,03°C/sn	60,069	81,93

BÖLÜM 7

7. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada yapılan inceleme ve hesaplamalarla elde edilen sonuçların başlıcaları şu şekilde özetlenebilir:

1-) Yüksek sıcaklıktan soğuma sırasında parçacık takviyeli metal matrisli karma malzemelerde oldukça heterojen dağılım gösteren ısıtılma artık gerilmeleri oluşmakta ve bu iç gerilmeler matriste çekme (+), parçacıkta basma (-) karakterli olmaktadır.

2-) Matristeki ortalama artık gerilme, hacim oranı ve matris akma dayanımı ile birlikte artmakta, takviye geometrisinin ise belirgin bir etkisi olmamaktadır.

3-) Aynı hacim oranlarındaki farklı dağılım geometri-leri incelendiğinde ısıtılma artık gerilmeleri belirleyici parametrenin parçacıklar arası minimum mesafe olduğu görülmüştür.

4-) Isıtılma artık gerilmelerin seviyesi malzemenin daha sonra uygulanacak zorlamalar altında deformasyon davranışını etkileyecektir. Bu açıdan yapılacak incelemelerde daha çok efektif gerilmeler üzerinde durulmalıdır. Yumuşak matrislerde özellikle yüksek hacim oranlarında hemen hemen tüm yapı plastik şekil değişimine uğradığından matristeki ortalama eşdeğer (efektif) gerilme seviyeleri akma dayanımının biraz üzerinde çıkmakta matris akma dayanımı arttığında ise ortalama artık gerilmelerin akma dayanımına oranı 1'in altına düşmektedir.

5-) Isıtılma artık gerilmeler parçacıklar çevresinde yoğunlaşmakta ve bu bölgelerdeki yığılmalar özellikle sivri

köşeli paçacıklarda yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Ele alınan silindirik paçacıktaki köşe noktada oluşan hem yüksek plastik şekil değişimi, hem de yüksek çekme hidrostatik gerilmesi bu bölgenin hasar açısından kritik bir yer olduğunu göstermektedir.

6-) Malzemedeki bu ısı artışı gerilmeleri matristeki sürünme yoluyla gevşemesinin de dikkate alındığı analizlerde ortalama iç gerilmede sadece %5'lik bir düşüş görülürken, gerilmelerin yüksek olduğu paçacık çevresindeki gevşemeler %20'lere ulaşmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] ARAN, A., Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler, İ.T.U. 1990
- [2] RACK, H.J., Advanced Materials & Manufacturing Processes, 3 (3), p 327 (1988).
- [3] LEE, S.M., International Encyclopedia of Composites V.4 377
- [4] İBRAHİM, İ.A., MOHAMED, R.A., LAVERNIA, E.J., Journal of Materials Science 26, p 1137 (1991)
- [5] SHI, N., WILNER, B., ARSENAULT, R.J., Acta Metall. Mater. 40, p 2841 (1992)
- [6] ARSENAULT, R.J., FISHER, R.M., Scripta Metall. 17, p 67 (1983)
- [7] TAYA, M., MORI, T., Acta Metall. Mater. 35, p155 (1987)
- [8] MILLER, W.S., HUMPHREYS, F.J., Scripta Metall. Mater. 25, p 33 (1991)
- [9] DICHECHA, A.P., FISHMAN, S.G., KARMAKAR, S.D., Journal of Metals 33, p 12 (1981)
- [10] ARADHYA, K.S.S., SURAPPA, M.K., Scripta Metall. Mater. 25, p 817 (1991)
- [11] CHRISTMAN, T., NEEDLEMAN, A., SURESH, S., Acta Metall. Mater. 37, p 3029 (1989)
- [12] NIEH, T.G., Metallurgical Transactions 15A, p 139 (1984)
- [13] PANDEY, A.B., MISHRA, R.S., MAHAJAN, Y.R., Journal of Materials Science 28, p 2943 (1993)
- [14] POVIRK, G.I., NEEDLEMAN, A., NUTT, S.R., Material Science & Engineering 125A, p 129 (1990)
- [15] NAIR, S.V., TIEN, T.T., BATES, R.J., Int. Metall. Rev. 30, p 275 (1985)
- [16] NUTT, S.R., NEEDLEMAN, A., Scripta Metall. Mater. 21, p 705 (1987)
- [17] TVERGAARD, V., Acta Metall. Mater. 38, p 185 (1990)
- [18] NUTT, S.R., DUVA, J.M., Scripta Metall. Mater. 20, p 1055 (1986)

- [19] VOGELSANG, M., ARSENAULT, R.J., FISHER R.M., Metall. Transactions 17A, p 379 (1986)
- [20] CHRISTMAN, T., SURESH, S., Acta Metall. Mater. 38, p 185 (1988)
- [21] ARSENAULT, R.J., TAYA, M., Acta Metall. Mater. 35, p 651 (1987)
- [22] SHI, N., ARSENAULT, R.J., JSME Int. Journal 34, p 143 (1991)
- [23] ZAHL, D.B., MC MEEKING, R.M., Acta Metall. Mater. 39, p 1117 (1991)
- [24] LEDBETTER, H.M., AUSTIN, M.W., Material Science & Eng. 89, p 53 (1987)
- [25] WEISSENBEK, J.E., BÖHM, H.J., RAMMERSTORFER, H.J., ICCM-9 ispanya 1993
- [26] DORN, J.E., Mechanical Behaviour of Materials At Elevated Temperature Mc Graw - Hill Book Company Inc. (1961)
- [27] SEGERLIND, L.J., Applied Finite Elements Analysis John Wiley & Sons Inc. (1976)
- [28] ANSYS 5.0. Manual Book V. I-II-III-IV

EK-A

KULLANILAN ANSYS YIĞIN DOSYALARININ BİR ÖRNEĞİ

Aşağıda bu çalışmada kullanılan ANSYS yığın dosyalarının tipik bir örneği olan %16 hacim oranlı silindirik parçacıkla takviyeli karma malzeme için sürünme özelliklerinin de dikkate alınarak (durgun havada soğuma koşullarında) hesabın gerçekleştirildiği yığın dosyası verilmiştir.

```
/BATCH
/COM,ANSYS REVISION 5.0          09:05:15    07/15/1993
/TITLE,%16 Hacim oranı silindirik par. (D.Hava Creep'li)
/PREP7
ET,1,82,,,1
MPTEMP,1,180,250,350,450,550
MP,EX,1,96175.68,-154.86
MP,EX,2,42.96e4,-15.87
MP,ALPX,1,1.65e-5,3.78e-8
MP,ALPX,2,4.252e-6,2.395e-9
MP,NUXY,1,.3
MP,NUXY,2,0.172,-6.596e-5
TB,BKIN,1,5
TBTEMP,180
TBDATA,1,55.2,2080
TBTEMP,250
TBDATA,1,40.3,1510
TBTEMP,350
TBDATA,1,14.4,1130
TBTEMP,450
TBDATA,1,11.6,800
TBTEMP,550
TBDATA,1,5.5,400
TBLIST,BKIN,1
/XRANGE,0,0.01
TBPLOT,BKIN,1
TB,CREEP,1
TBDATA,1,1233.68,3,0,16828.28,0,0
TBDATA,55,0
MP,EX,3,6.83e4
MP,ALPX,3,0.234e-4
MP,NUXY,3,0.3
TB,BKIN,3
TBDATA,1,55.2,2080
TBPLOT,BKIN,3
TB,CREEP,3
TBDATA,1,1233.68,3,0,16828.28,0,0
```

```

TBDATA,55,0
RECTNG,,10,,10
/PNUM,DEFAULT
/PNUM,AREA,1
/PNUM,KPOI,0
/PNUM,LINE,0
/PBC,ALL,,0
/WIN,ALL,ON
APLOT
RECTNG,,5.43,,5.43
AOVLAP,P50X

```

2

```

2
1
ESIZE,1
MAT,1
TYPE,1
AMESH,3
MAT,2
TYPE,1
AMESH,4
/PNUM,DEFAUL
/PNUM,NODE,0
/PBC,ALL,,0
/WIN,ALL,ON
CPNGEN,1,UY,56,75,1
CP,1,UY,36
CPNGEN,2,UX,36,55,1
CP,2,UX,26
FINISH
/SOLU
ANTYPE,STAT
DL,P50X,,SYMM
10
3
DL,P50X,,SYMM
9
3
DL,P50X,,SYMM
11
4
DL,P50X,,SYMM
12
4
TREF,400
CNVTOL,F,,,1.0e-6
BF,ALL,TEMP,370
TOFFST,273
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,30
LSWRITE
LSREAD
BF,ALL,TEMP,330
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,60

```

LSWRITE
LSREAD
BF,ALL,TEMP,300
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,100
LSWRITE
LSREAD
BF,ALL,TEMP,270
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,142
LSWRITE
LSREAD
BF,ALL,TEMP,240
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,195
LSWRITE
LSREAD
BF,ALL,TEMP,200
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,320
LSWRITE
ESEL,,,1,94,1
MPCHG,3,ALL
ESEL,,,1,130,1
LSREAD
BF,ALL,TEMP,150
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,480
LSWRITE
LSREAD
BF,ALL,TEMP,100
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,720
LSWRITE
LSREAD
BF,ALL,TEMP,50
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,1300
LSWRITE
LSREAD
BF,ALL,TEMP,20
NSUBST,100
AUTOTS,ON
TIME,1800
LSWRITE
LSSOLVE,1,10
FINISH

ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında İstanbul'da doğan Ali Cansun, 1987'de F.M.V. Özel Işık Lisesi'ni bitirdikten sonra aynı yıl İTÜ Makina Fakültesine girdi. Bu fakülteden 1991 yılında mezun oldu. Halen İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans öğrencisi olan Ali Cansun aynı zamanda İTÜ Makina Fakültesi Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.