

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİLİĞİ ANA BİLİM DALI



TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN $\text{Cu}_{10}\text{Sn}/\text{B}_4\text{C}$
KOMPOZİTLERİN DİFÜZYON KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

SERKAN ÖZSOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

OCAK - 2023
KASTAMONU

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Serkan ÖZSOY

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Cu10Sn/B₄C KOMPOZİTLERİN DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

SERKAN ÖZSOY

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle üretilen bronz (Cu10Sn) matrisli seramik (B₄C) takviyeli kompozit malzemelere difüzyon kaynak işlemleri uygulanmış ve birleştirmelerin kaynaklanabilirliği araştırılarak, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, deney düzeneği Taguchi metodu yardımıyla oluşturularak, ortalama kesme kuvvetleri için optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada başlangıç malzemeleri olarak Cu10Sn ve % 4, % 8, %12 oranlarında B₄C tozları kullanılmıştır. Hazırlanan toz karışımlar döner karıştırıcıda 400 rpm hız ve 2 saat süre ile karıştırılmış, daha sonra 10 mm çapındaki çelik bir kalıp içerisinde 400 MPa basınç altında tek eksenli soğuk presleme yöntemiyle sıkıştırılmıştır. Üretilen kompozit malzemeler daha sonra Taguchi metoduyla belirlenen deney parametrelerine uygun olarak Argon atmosferi altında difüzyon kaynağına tabii tutulmuş ve kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kaynaklı birleştirmelerin mikroyapısal karakterizasyonunu belirlemek için optik mikroskop, SEM, XRD ve EDS incelemeleri, mekanik özelliklerin tespit edilmesi için de mikrosertlik ve kesme (kayma) testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyon işlemi sonucunda % 100 Cu10Sn - % 0 B₄C malzeme, 820 °C sıcaklık, 20 kg ve 40 dakika süre parametreler optimum parametre olarak belirlenmiş ve gerçekleştirilen kontrol deneyleri sonucunda, tahminsel ve doğrulama değerleri birbiriyle mukayese edilmiştir. Kontrol deneyleri sonucunda; kesme kuvveti için başlangıç parametre değerlerine göre % 11,24 iyileşme olduğu, tahminsel hatanın ise % 1,26 değer ile ihmal edilebilecek bir düzeyde olduğu görülmüştür. Tüm sonuçlar birbiri içerisinde değerlendirildiğinde ise; B₄C takviyeli Cu10Sn matrisli kompozit malzemelerin difüzyon kaynağı uygulamalarında parametrelerin belirlenmesi ve optimizasyonu aşamasında Taguchi metodunun verimli bir şekilde kullanılabileceği çalışmada tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Kompozit Malzeme, Toz Metalurjisi, Difüzyon Kaynağı, Bronz, Bor Karbür

Ocak 2023, 139 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION OF THE COMBINABILITY OF Cu₁₀Sn/B₄C COMPOSITES PRODUCED BY POWDER METALLURGY METHOD WITH DIFFUSION WELDING

SERKAN ÖZSOY

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. HAKAN ADA**

In this study, diffusion welding processes were applied to bronze (Cu₁₀Sn) matrix ceramic (B₄C) reinforced composite materials produced by powder metallurgy method and the weldability of the joints was investigated, and the effects of welding process on microstructure and mechanical properties were investigated. In the experimental studies, the experimental setup was created with the help of the Taguchi method and the optimization process was carried out for the average cutting forces. In the study, Cu₁₀Sn and 4%, 8% and 12% B₄C powders were used as starting materials. The prepared powder mixtures were mixed in a rotary mixer at 400 rpm for 2 hours, then compressed by uniaxial cold pressing method under 400 MPa pressure in a 10 mm diameter steel mold. The produced composite materials were then subjected to diffusion welding under Argon atmosphere in accordance with the experimental parameters determined by the Taguchi method and the welding process was performed. Optical microscope, SEM, XRD and EDS examinations were carried out to determine the microstructural characterization of the produced welded joints, and microhardness and shear (shear) tests were carried out to determine the mechanical properties. As a result of the optimization process, 100% Cu₁₀Sn - 0% B₄C material, 820 °C temperature, 20 kg and 40 minutes time parameters were determined as optimum parameters and as a result of the control experiments, the predictive and validation values were compared with each other. As a result of control experiments; It was seen that there was an improvement of 11.24% for the cutting force compared to the initial parameter values, and the estimation error was at a negligible level with a value of 1.26%. When all the results are evaluated within each other; It has been determined in the study that the Taguchi method can be used efficiently in the determination and optimization of parameters in diffusion welding applications of B₄C reinforced Cu₁₀Sn matrix composite materials.

KEYWORDS: Composite Material, Powder Metallurgy, Diffusion Welding, Bronze, Boron Carbide

January 2023, 139 Page

TEŞEKKÜR

Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Programı'nda 2018 güz yarıyılından bugüne kadar sürdürmüş olduğum yüksek lisans eğitimimde, şahsıma göstermiş olduğu her türlü ilgi ve destekten dolayı değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Tez çalışmalarım süresince kendisine sürekli danıştığım ve yönlendirmelerinden her zaman büyük istifade ettiğim değerli hocam Sayın Doç. Dr. Arif UZUN ve Doç. Dr. Elif AŞIKUZUN TOKEŞER hocalarıma ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Her zaman desteğini hissettiğim arkadaşım Emre İNCE'ye de teşekkür ederim. Ayrıca KÜ-HIZDES/2019-14 numara ile kayıtlı Hızlı Destek Projesi kapsamında sağlanan destekler için Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkürü bir borç bilirim. Bugünlere ulaşmamda maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta sevgili eşime, oğluma ve ailemin değerli fertlerine tez çalışmalarım süresince göstermiş oldukları sabır ve gayretlerinden dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim.

SERKAN ÖZSOY

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ.....	3
2.1 Tozların Karakterizasyonları	4
2.1.1 Parçacık Boyut Faktörü	5
2.1.2 Paketleme Yoğunluğu ve Parçacıklar Arası Sürtünme	6
2.2 TM Yönteminin Avantajları ve Sınırları	8
2.3 TM Yönteminin İlerlemesi ve Kullanım Yerleri	10
2.4 Metalik Tozların Üretilmesi	11
2.4.1 Elektrolitik Ayrıştırma Yöntemi	12
2.4.2 Kimyasal Yöntemler	12
2.4.3 Atomizasyon Yöntemi	13
2.4.4 Mekanik Yöntemler	14
2.4.4.1 Talaşlı üretim tekniği	14
2.4.4.2 Öğütme tekniği	14
2.4.4.3 Mekanik yöntemle alaşımlama tekniği	15
2.5 Mekanik Alaşımlama (MA) Tekniği	15
2.5.1 Öğütücü Türleri.....	17
2.5.1.1 SPEX tipi öğütücüler	17
2.5.1.2 Planetary tipi öğütücü	17
2.5.1.3 Atritör tipi öğütücüler	18
2.5.2 MA İşlem Parametreleri.....	19
2.5.2.1 Öğütme tipi	20
2.5.2.2 Öğütücü kap	20
2.5.2.3 Öğütme hızı	20
2.5.2.4 Öğütme zamanı	20
2.5.2.5 Bilye/toz ağırlık oranı	21
2.5.2.6 Kabın doluluk oranı.....	21
2.5.2.7 Öğütme atmosferi.....	21
2.5.2.8 İşlem kontrol katkıları	21
2.5.2.9 İşlem kontrol katkılarının yapısı	22
2.5.2.10 Öğütme sıcaklığı	22
2.6 Mekanik Alaşımlama (MA) Mekanizması.....	22
2.6.1 Bilye - Toz - Bilye Çarpışmaları.....	22
2.6.2 Mekanik Alaşımlama (MA) Aşamaları	23
2.6.2.1 Sürecin ilk aşaması.....	24

2.6.2.2	Sürecin ikinci aşaması.....	24
2.6.2.3	Sürecin son aşaması	25
2.6.3	Öğütme Sistemleri	25
2.6.3.1	Sünek - sünek sistem.....	26
2.6.3.2	Sünek - gevrek sistem	27
2.6.3.3	Gevrek-gevrek sistem.....	28
2.7	Toz Biçimlendirme İşlemleri.....	28
2.8	TM Yöntemi ile Üretilen Parçaların Kaynağı	30
3.	DİFÜZYON VE DİFÜZYON KAYNAĞI	31
3.1	Difüzyon.....	31
3.1.1	Difüzyon Katsayısı	32
3.1.2	Difüzyon Mekanizmaları	32
3.1.2.1	Arayer difüzyon mekanizması	33
3.1.2.2	Boşluk difüzyon mekanizması	33
3.1.2.3	Halka difüzyon mekanizması.....	34
3.1.2.4	Karşılıklı yer değiştirme mekanizması	35
3.2	Difüzyon Kaynağı	35
3.3	Difüzyon Kaynak Yöntemleri	37
3.4	Difüzyon Kaynak Çeşitleri.....	37
3.4.1	Katı Hal Difüzyon Kaynağı.....	37
3.4.2	Sıvı Hal Difüzyon Kaynağı ve Difüzyon Lehimleme	38
3.4.3	Süperplastik Şekil Verme ve Difüzyon Kaynağı Kombinasyonu	38
3.5	Difüzyon Kaynağına Etki Eden Faktörler	38
3.5.1	Kaynak Sıcaklığı.....	38
3.5.2	Yüzey Şartları	39
3.5.3	Kaynak Basıncı	41
3.5.4	Kaynak Süresi	42
3.5.5	Kaynak Ortamı.....	42
3.6	Difüzyon Kaynak Yöntemlerinin Endüstrideki Kullanım Alanları.....	42
3.7	Difüzyon Kaynağı Uygulanan Malzemeler.....	44
3.8	Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Yöntemleriyle Karşılaştırılması	44
3.9	Difüzyon Kaynağında Kullanılan Özel Ekipmanlar.....	45
4.	TAGUCHİ METODU VE OPTİMİZASYONU.....	47
4.1	Taguchi Metodu	47
4.1.1	Taguchi yönteminin gelişimi	48
4.1.2	Taguchi'nin kayıp fonksiyonu	48
4.1.3	Çevrim içi kalite kontrol	50
4.1.4	Çevrim dışı kalite kontrol	50
4.1.5	Taguchi'nin sinyal/gürültü (S/N) oranları	53
4.1.6	Taguchi deney tasarımı aşamaları.....	54
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	62
5.1	Materyal.....	65
5.2	Metot	66
5.2.1	B ₄ C Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi	66
5.2.1.1	Tozların karıştırılması	66
5.2.1.2	Presleme işlemi	67
5.2.1.3	Difüzyon kaynak işlemi	68
5.2.1.4	Mikroyapı incelemeleri (optik mikroskop, sem, eds, xrd)	69
5.2.1.5	XRD incelemeleri.....	70

5.2.1.6	Mikrosertlik testi	71
5.2.1.7	Kesme (kayma) testi.....	72
6.	DENEY SONUÇLARININ TARTIŞILMASI	73
6.1	Mikroyapı (Optik mikroskop ve SEM) İncelemeleri	74
6.1.1	Optik Mikroskop İncelemeleri.....	74
6.1.2	SEM İncelemeleri	91
6.1.2.1	SEM görüntülerinin genel olarak değerlendirilmesi.....	107
6.2	EDS İncelemeleri	108
6.3	XRD Analizleri.....	118
6.4	Mikrosertlik Sonuçları.....	120
6.5	Kesme (Makaslama) Deneyi Sonuçları	124
7.	OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI	127
7.1	Deney Düzenegi	127
8.	DENEY SONUÇLARININ OPTİMİZASYONU	129
8.1	Sonuçların Taguchi Metodu ile Analiz Edilmesi ve Değerlendirilmesi....	129
8.2	Doğrulama Deneyleri ve Sonuçları	130
9.	SONUÇ VE ÖNERİLER	132
KAYNAKLAR		135
ÖZGEÇMİŞ		139

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 TM yöntemiyle üretim şekli	3
Şekil 2.2 Çeşitli toz partiküllerin boyutsal ölçütleri.....	6
Şekil 2.3 Toz parçacıklarının yığılma açısı ve toz parçacıkları arasındaki sürtünme ölçüleri.....	7
Şekil 2.4 Akış ölçer araçlarının kesitsel görünüşleri	8
Şekil 2.5 TM yönteminin endüstriyel kullanım alanları	10
Şekil 2.6 TM yönteminin Venn diyagramı üzerinde uygulama alanları.....	11
Şekil 2.7 Elektrolitik ayrıştırma yöntemiyle toz üretimi.....	12
Şekil 2.8 Demir tozlarının üretim aşamaları şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.9 Düşey konumlu gaz atomizasyon sistemi	13
Şekil 2.10 Bilye Darbeli Öğütme Tekniği.....	14
Şekil 2.11 Mekanik yöntemle alaşımlama sistemi	15
Şekil 2.12 SPEX tipi öğütücü (a) SPEX tipi bilyeli değirmen, (b) SPEX 8000 tipi öğütücünün; kap, kapak, conta ve bilye sistemi	17
Şekil 2.13 Planetary tipi öğütücü	18
Şekil 2.14 Dikey şekilli Atritör bilyeli değirmen sistemi	18
Şekil 2.15 Tozların deformasyon özellikleri	23
Şekil 2.16 Süreç içinde bilye-toz-bilye teması ve oluşan toz yapıları	24
Şekil 2.17 (a) ve (b) Toz parçacıklarının yapısı	25
Şekil 2.18 Sürecin son aşaması: mikroyapının kararlı gelmesi.....	25
Şekil 2.19 MA yönteminde sünek - sünek sistemlerde aşamaların ilerlemesi	26
Şekil 2.20 AA7075 karışım tozlarının 0; 1 ve 8 saat öğütmelerdeki içyapıları	27
Şekil 2.21 Sünek - gevrek yapının MA aşamasında ilerleme süreci.....	27
Şekil 2.22 Farklı malzemelerin sıkıştırma basıncı ve yoğunluk arasındaki ilişkisi	28
Şekil 2.23 Sıkıştırılan tozlar	29
Şekil 2.24 Presle toz karışımlarının tek yönlü sıkıştırılması.....	29
Şekil 2.25 Presle toz karışımlarının çift yönlü sıkıştırılması	30
Şekil 3.1 Serbest enerji ve durum değişimi arasındaki ilişki	31
Şekil 3.2 Konsantrasyon gradyanı	32
Şekil 3.3 Arayer difüzyon mekanizmasının resmi ve serbest enerji değişimi	33
Şekil 3.4 Boşluk difüzyon mekanizmasının gösterimi.....	34
Şekil 3.5 Halka difüzyon mekanizmasında atomların geçişi	35
Şekil 3.6 Karşılıklı yer değiştirme mekanizması	35
Şekil 3.7 Difüzyon kaynak sistemleri	36
Şekil 3.8 Difüzyon kaynağında seçilen basıncı, sıcaklık ve sürenin kopma mukavemetine etkisi.....	39
Şekil 3.9 Kaynak sıcaklığının birleşen alan üstündeki etkisi	39
Şekil 3.10 Yüzey Unsurları	40
Şekil 3.11 Yüzey pürüzlülüğü ve deformasyonun sıcaklığa göre değişimi	40
Şekil 3.12 Üst yüzey tabakaları.....	41
Şekil 3.13 Difüzyon kaynağının uygulama şekilleri	43
Şekil 3.14 Uçak imalatında difüzyon kaynağı yapılan parçalar.....	43

Şekil 3.15 Difüzyon kaynak uygulamasının ısı, deformasyon ve süre açısından değerlendirilmesi	45
Şekil 3.16 Difüzyon kaynak makinası ve donanımlarının şematik resmi	45
Şekil 4.1 Etkileşim grafik gösterimi	55
Şekil 5.1 Deneyler öncesi gerçekleştirilen testlere ait makro görüntüler.....	64
Şekil 5.2 Deneysel çalışmalarda izlenen işlem basamakları	65
Şekil 5.3 Malzeme üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri, a) Cu-10Sn, b) B ₄ C.....	66
Şekil 5.4 Gezegen hareketli bilyeli öğütücü	67
Şekil 5.5 a) Kalıp. b) Specac GS15011 hidrolik pellet presi	67
Şekil 5.6 Kaynak işlemleri gerçekleştirilen numunelerin görüntüsü	68
Şekil 5.7 Atmosfer kontrollü difüzyon kaynak makinesi.....	69
Şekil 5.8 Optik mikroskop	70
Şekil 5.9 FEI QUANTA 250 FEG SEM analiz cihazı.....	70
Şekil 5.10 Bruker D8 Advance XRD analiz cihazı.....	71
Şekil 5.11 SHIMADZU HVM-G21 model mikrosertlik ölçüm cihazı.....	71
Şekil 5.12 Numunelere uygulanan sertlik işlemlerinin şematik gösterimi	71
Şekil 5.13 Universal Mekanik Test Cihazı	72
Şekil 5.14 Kesme kuvvetinin ölçülmesinde kullanılan kesme aparatı	72
Şekil 6.1 Difüzyon kaynak numunelerinin birleştirilmiş görüntüsü	73
Şekil 6.2 1 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 100 büyütme, b) 200 büyütme, c) 500 büyütme, d) 1000 büyütme	74
Şekil 6.3 2 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	75
Şekil 6.4 3 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	76
Şekil 6.5 4 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	77
Şekil 6.6 5 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	78
Şekil 6.7 6 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	79
Şekil 6.8 7 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	80
Şekil 6.9 8 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	81
Şekil 6.10 9 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	82
Şekil 6.11 10 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	83
Şekil 6.12 11 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	84
Şekil 6.13 12 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	85
Şekil 6.14 13 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	86
Şekil 6.15 14 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	87

Şekil 6.16 15 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	88
Şekil 6.17 16 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme	89
Şekil 6.18 1 numaralı deney numunesinin a) 56x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	92
Şekil 6.19 2 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	93
Şekil 6.20 3 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	94
Şekil 6.21 4 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	95
Şekil 6.22 5 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	96
Şekil 6.23 6 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	97
Şekil 6.24 7 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	98
Şekil 6.25 8 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	99
Şekil 6.26 9 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	100
Şekil 6.27 10 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	101
Şekil 6.28 11 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	102
Şekil 6.29 12 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	103
Şekil 6.30 13 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	104
Şekil 6.31 14 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	105
Şekil 6.32 15 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	106
Şekil 6.33 16 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.....	107
Şekil 6.34 1 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	108
Şekil 6.35 2 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	109
Şekil 6.36 3 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	109
Şekil 6.37 4 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	110
Şekil 6.38 5 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	111
Şekil 6.39 6 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	111
Şekil 6.40 7 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	112
Şekil 6.41 8 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	112
Şekil 6.42 9 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	113
Şekil 6.43 10 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	114
Şekil 6.44 11 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	114
Şekil 6.45 12 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	115
Şekil 6.46 13 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	116

Şekil 6.47 14 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	116
Şekil 6.48 15 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	117
Şekil 6.49 16 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.....	117
Şekil 6.50 %100 Cu ₁₀ Sn, %0 B ₄ C içerikli numunelerin XRD analizleri	119
Şekil 6.51 %96 Cu ₁₀ Sn, %4 B ₄ C içerikli numunelerin XRD analizleri	119
Şekil 6.52 %92 Cu ₁₀ Sn, %8 B ₄ C içerikli numunelerin XRD analizleri	120
Şekil 6.53 %88 Cu ₁₀ Sn, %12 B ₄ C içerikli numunelerin XRD analizleri	120
Şekil 6.54 Mikrosertlik ölçümlerinin gerçekleştirildiği noktalar.....	121
Şekil 6.55 %100 Cu ₁₀ Sn - %0 B ₄ C içerikli numunelerin mikrosertlik sonuçları ...	121
Şekil 6.56 %96 Cu ₁₀ Sn - %4 B ₄ C içerikli numunelerin mikrosertlik sonuçları	122
Şekil 6.57 %92 Cu ₁₀ Sn - %8 B ₄ C içerikli numunelerin mikrosertlik sonuçları	122
Şekil 6.58 %88 Cu ₁₀ Sn - %12 B ₄ C içerikli numunelerin mikrosertlik sonuçları ...	122
Şekil 8.1 Kesme kuvveti için S/N oranları ana etki grafiği.....	130



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 5.1 Difüzyon kaynağı parametreleri	62
Tablo 5.2 Uygulama deneyleri ve seçilen parametreler	63
Tablo 5.3 Tozlar ve Özellikleri	66
Tablo 6.1 Kesme deney sonuçları	125
Tablo 7.1 Deney faktörleri ve seviyeleri	128
Tablo 7.2 Deneysel çalışmalardaki girdilere bağlı olarak kesme kuvveti için elde edilen çıktılar ve sinyal/gürültü (S/N) oranları	128
Tablo 8.1 Kesme kuvveti için doğrulama test sonuçları	131

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

B₄C	: Bor Karbür
SiC	: Silisyum Karbür
T_m	: Ergime Derecesi
Cu	: Bakır
Sn	: Kalay
µm	: Mikrometre
°C	: Derece
HNO₃	: Nitrik Asit
HF	: Hidroflorik Asit
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
N	: Newton

Kısaltmalar

TM	: Toz Metalurjisi
MA	: Mekanik Alaşımlama
SEM	: Yüksek Çözünürlüklü Elektron Mikroskop
MMK	: Metal Matrisli Kompozitler
XRD	: X-ışını Difraksiyonu
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
ITAB	: Isının Tesiri Altında Kalan Bölge
S/N	: Sinyal/Gürültü
mm	: Milimetre
cm	: santimetre
dk	: dakika

1. GİRİŞ

Toz metalurjisi, malzeme üretim yöntemleri arasında düşük maliyetli ve güvenilir bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu üretim yöntemi, özellikle metal matrisli kompozit malzemelerin imalatı için yaygın olarak kullanılmaktadır (Abdizadeh vd., 2011; Almamane vd., 2016; Şahin, 2007). Havacılık ve denizcilik gibi gelişmiş endüstriler elektriksel ısı iletkenlik, manyetik özellik, korozyon direnci ve yüksek mukavemet gibi özellikleri bünyesinde barındıran malzemelere ihtiyaç duymaktadır (Gül, 2015; Radhakrishna Bhat vd., 2002; Selva Kumara vd., 2012; Yang vd., 2004).

Bu amaçlar için birçok kompozit malzeme üretilmiştir. Çünkü bu malzemeler yüksek sertlik, yüksek sıcaklık mukavemeti gibi arzu edilebilir ve kontrol edilebilir özelliklerin bir koleksiyonuna sahiptirler (Moustafa vd., 2002; Yeoh vd., 1997; Liu vd., 1998; Devincent vd., 1993; Kaku vd., 2018; Li vd., 2017; Pan vd., 2019; Abdizadeh vd., 2011; Sahin, 2007).

Bronz, yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci ve yüksek termal ve elektriksel iletkenlik gibi arzu edilen özelliklere sahip önemli bir endüstriyel alaşımdır (Bhuyan vd., 2017; Chen vd., 2008; Cui vd., 2013; Laws vd., 2015; Li vd., 2018; Moussa vd., 2018; Unlu ve Atik, 2010).

Toz metalurjisi bronz için en çok kullanılan endüstriyel imalat yöntemlerinden biridir. Ancak gözeneklilikler bronzun mekanik özelliklerini düşüren en önemli unsurlardan biridir (Susilowati ve Sumardiyanto, 2017).

Bu olumsuzlukları gidermeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Örneğin ikinci faz parçacıklarının eklenmesidir. Bunun yanı sıra mekanik özellikleri arttırmaya yönelik bazı araştırmalara da rastlanılmaktadır.

B₄C, yüksek sertlik, yüksek elastiklik modülü, yüksek termal kararlılık ve mükemmel kimyasal kararlılık gibi fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklere sahip seramik bir malzemedir. Bu özellikler bor karbürü çok çeşitli mühendislik uygulamaları için tercih edilen malzeme haline getirmiştir. Örneğin yüksek aşınma

direnci nedeniyle aşındırıcı tozlar ve kaplamalar olarak kullanılır. Yüksek sertliği ve düşük yoğunluğu nedeniyle balistik performansta üstünlük sağladığı gibi nükleer uygulamalarda yaygın olarak nötron radyasyon emicisi olarak kullanılır (Domnich vd., 2011; Murray, 2013).

Alümina ve silisyum karbür ile karşılaştırıldığında B₄C üstün özelliklere sahip olsa da Al₂O₃ ve SiC, metal matrisli kompozitlerinde en çok kullanılan takviye malzemesidir. Bunun nedeni, B₄C parçacıklarının yüksek maliyetli olmasındandır. Buna karşın yüksek elastik modülü ve daha yüksek spesifik sertlik değeri B₄C ilavesiyle sağlanabilmektedir (Murray, 2013).

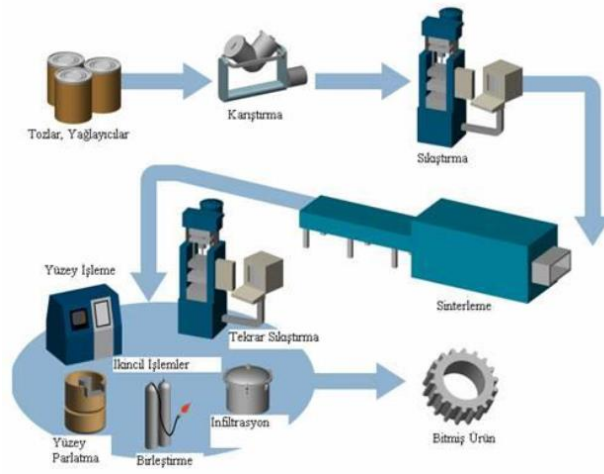
Literatür incelendiğinde bronz-bor-karbür kompozitler üzerine yeterli sayıda araştırmaya rastlanmamıştır. Araştırmaların çoğu, diğer alaşım elementleri de dâhil olmak üzere yapay bronzlarla ilgilidir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Cu₁₀Sn bronz üzerine çok az sayıda çalışma yayınlanmıştır. Ayrıca, bronz-matrisli kompozitlerin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği üzerine yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır.

Bu çalışmada yukarıda belirtilen eksiklikleri gidermeye yönelik olarak toz metalurjisi yöntemi ile Cu₁₀Sn / B₄C kompozit malzeme üretimi hedeflenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin difüzyon kaynağı ile birleştirmeleri için en uygun metodlardan biri olarak kabul edilen Taguchi metoduyla deney düzenekleri belirlenmiş ve en uygun parametrelerde optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Taguchi metoduyla belirlenen deney düzeneği ile elde edilen tüm birleştirmeler mekanik testlerden kayma (kesme) ve mikrosertlik testlerine tabi tutulmuştur. Taguchi metoduyla belirlenen tüm deneyler için ayrıca mikroyapı incelemeleri (optik mikroskop, SEM) ile XRD ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. TOZ METALURJİSİ

Malzemelerin ebatlarına uygun şekilde metalik tozları presleyerek, 0,75 - 0,86 ergime (T_m) sıcaklıklarında koruyucu gaz atmosferinde sinterlenerek üretilmesi işlemine toz metalurjisi (TM) denir (Talaş, 2010).

TM yöntemi metal, seramik tozların imalatı ve bu tozların mekanik ve termik etkilerle birleştirilerek ürün elde edilmesi yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemle üretilen ürünler gözenek yapılı ve kompakt olarak elde edilmektedir. İşlemin son kısmında malzemede %10 ila %30 arasında gözenekler varsa, bu duruma gözenekli, %1 ila %3 arasında gözenekli yapı var ise bu duruma da kompakt malzeme denir (Talaş, 2010). Sıkıştırılan toz parçacıkları arasında bulunan kimyasal bağ, birleşme, mekanik kilitleme gibi hemen hemen aynı cinsten düşük bağlar olmakta iken kristal yapı içindeki bağ dayanım değerine kıyasla düşük olmaktadır. Sıkıştırılan toz partikülleri birbirleri ile yakın halde olsalar da birbirlerinden bağımsız olmaktadır. Sinterleme sıcaklığı etkisiyle tozlar arasında oluşan temas alanları artmakta, iyon ve atomların arasında bir bağ oluşmaktadır. Tek yapılı mekanizmalarda sinterleme tamamıyla katı halde gerçekleşmektedir. Çok yapılı mekanizmalarda sinterleme uygulaması sıkıştırılan malzemenin katı durumdaki yapısını koruyarak katı ya da sıvı fazda gerçekleşmesini sağlamaktadır (Talaş, 2010).



Şekil 2.1 TM yöntemiyle üretim şekli (Nazik, 2013)

TM, toz halinde bulunan karbon, saf metaller, seramik ve plastik malzemelerin belirli oranlarda karıştırılması sürecine dayanmaktadır. Oluşturulan karışım daha sonra belirlenen basınç altında prese maruz bırakılır. Partiküllerin temas yüzeyleri arasında ki bağı kuvvetlendirmek ve istenilen özellikleri sağlamak amacıyla da, “sinterleme” adıyla bilinen ısıtma işlemine tabi tutulur. Bu ısıtma işlemi kullanılan metal tozlarının ergime noktasının altındaki bir sıcaklık değerinde yapılır. Karışım halindeki tozlar için, karışımın yüksek düzeyde ergitme derecesine sahip olan tozların ergime sıcaklığı baz alınarak işleme tabi tutulur (Taşlıyan, 2020).

2.1 Tozların Karakterizasyonları

TM yöntemi; tane boyutları 0,1 ile 200 µm arasında farklı mühendislik yapılarını içeren plastik, seramik ve metal tozlarından son şekle yakın ürün imalatı elde etme yöntemi olup, bu karışımlar, çok sayıda mühendislik alanlarında istenilen özellikler elde etmek için kullanılan tozların, faz yapılarının sayısı, boyutları ve konumları seçilerek hazırlanmış karışımlardır. Örnek olarak piston kolundaki toz karışımları bakır, çinko, demir ve grafit gibi yapılardan oluşmaktadır. Çoğu TM yapıları kompozittir ve üretimlerinde kullanılan tozlar çoklukla farklı tanelerin karışımlarıdır. Malzeme üretim esnasında, toz parçacıkları birbirlerine bağlanıp bir katı oluşturarak başlangıçtaki özelliklerini kaybederler. Bu durumda farklı kristal bölgelerine tane adı verilir (Talaş, 2010).

Görünür yoğunluk tozların preslenmesinde kullanılacak uygun kalıp tasarlamak ve optimum yoğunluk değerine sahip olmak için uygulanan presleme değerinin bulunmasında kullanılır. Toz tanelerin preslenmesi ile elde edilen değere ham yoğunluk, sinterleme işleminden sonra elde edilen değere sinterlenmiş yoğunluk denilmektedir (Talaş, 2010).

Görünür yoğunluk (Gy), ham yoğunluk (Hy) ve sinterlenmiş yoğunluk ise (Sy) aşağıdaki formüllerle elde edilir (Talaş, 2010).

Görünür Yoğunluk (Gy)

$$Gy = \text{Toz Ağırlığı (g)} \cdot \text{Serbest Düşüş Hacmi (cm}^3\text{)} \quad (2.1)$$

Ham Yoğunluk (H_y)

$$H_y = \text{Toz Ağırlığı (g)} \cdot \text{Sıkıştırılmış Hacim (cm}^3\text{)} \quad (2.2)$$

Sinterlenmiş Yoğunluk (S_y)

$$S_y = \text{Toz Ağırlığı (g)} \cdot \text{Sinterlenmiş hacim (cm}^3\text{)} \quad (2.3)$$

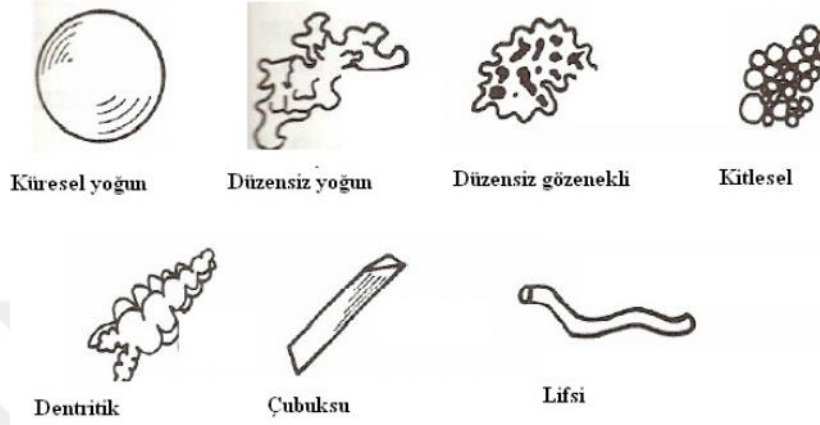
2.1.1 Parçacık Boyut Faktörü

TM yöntemi parçacık tozların bir araya gelmesiyle ilgilenir. Parçacık, tozların bölünmeyen en küçük birimine denir. Toz büyüklüğü 0,01 - 1 μm 'dir. Elde edilen tozlar genellikle mikron (25 ila 200 μm arasında) ölçülerindedir. Taramalı elektron mikroskopları tozların özelliklerinin belirlenmesinde sık kullanılan bir yöntemdir. Tozlar, yoğunlaştırma işlemi sırasında farklı tepki verir. Yoğunlaştırma işlemleri sırasında aşağıdaki sorunlar çıkmaktadır (Talaş, 2010).

- Tane boyut ve dağılımları,
- Parçacıkların toplanması,
- Kaynak yüzeyi alanı,
- Partiküller arası sürtünme,
- Akış ve paketleme,
- Dış yapı,
- Bileşim, homojenlik ve kirlilik (Talaş, 2010).

Tozların özellikleri üretimi esnasında yapılan seçimlerle ilgilidir. Toz boyutları TM'nin en önemli faktörlerinden biridir. Partikül boyutlarının ölçümü, toz parçacıklarının boyutunun saptanması ile gerçekleşir. Bu ölçümler, ölçülen özgül değişkenler ve toz parçacık şekliyle ilişkilidir. Toz parçacık boyut analizleri farklı yöntemlerle yapılabilir. Fakat ölçülen değişkenlerdeki farklı özellikler sebebiyle,

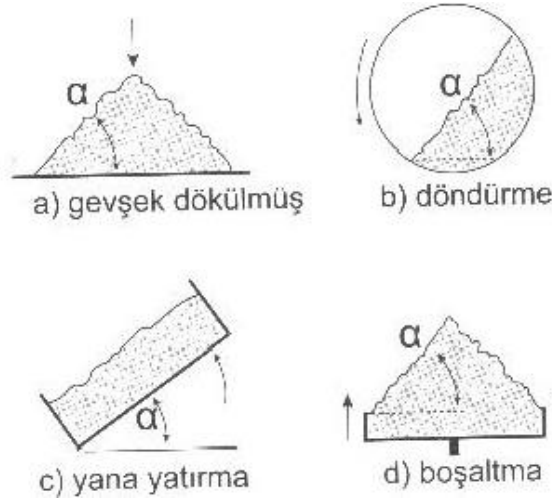
farklı toz parçacık boyut analizlerinde çoğunlukla aynı sonuçları alamadığımız bilinmektedir. Partiküllerin en büyük uzunluğu, en küçük kesit alanı, yüzey alanı ve iz düşüm yüzeyi analizlerde çoğunlukla tercih edilen değişkenlerdir. Şekil 2.2’de çeşitli toz boyutsal değişkenler verilmiştir (Talaş, 2010).



Şekil 2.2 Çeşitli toz partiküllerin boyutsal ölçütleri (Talaş, 2010).

2.1.2 Paketleme Yoğunluğu ve Parçacıklar Arası Sürtünme

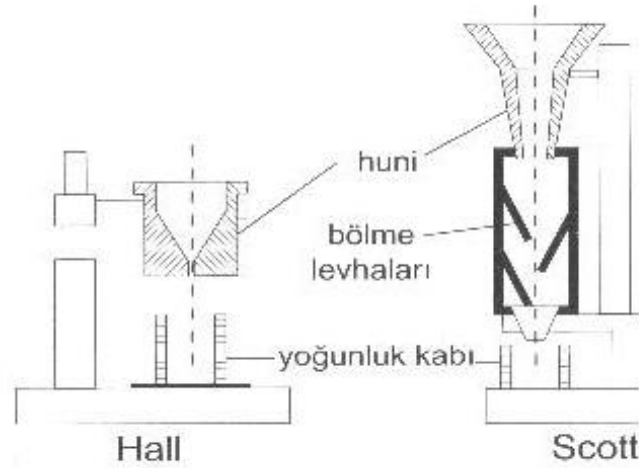
Toz parçacıkları arasında sürtünme ve kaymayı engellediğimizde iyi paketlenme olmaz. Toz partiküllerinin arasında gerçekleşen sürtünme, birbirleri aralarında kayarak hareket eden toz partiküllerinin göstermiş olduğu mukavemeti temsil eder. Bu sürtünmeler, büyük ölçüde yüzey bileşimi, yüzey alan ve yüzey pürüzlülüğü ile belirlenir (Şekil 2.3). Yüzey alanı arttıkça birim kütledeki yüzey alanı da artarak buna paralel olarak tozların sürtünme miktarı da artar. Sonuçta toz parçacıkları daha az verimde olacak şekilde bir akış ve paketlenme gösterir. Bu problemler; karıştırma, paketleme, taşıma, harmanlama, şekil verme ve sıkıştırma işlemlerinde de önemlidir. Tozun akışına mukavemet, toz parçacıkları arasında sürtünmenin başlıca özelliğidir. Paketleme yoğunluğu işlemleri yer çekimi altında toz parçacıklarının kaymasını yansıttığından, tozlar parçacıklar arasındaki sürtünme sebebi ile parçacık paketleme özellikleri de azalır (Talaş, 2010).



Şekil 2.3 Toz parçacıklarının yığılma açısı ve toz parçacıkları arasındaki sürtünme ölçüleri

Bir tozun sıkıştırılmamış yoğunluğu görünür veya yığılma yoğunluğudur. Vurgu yoğunluğu, dışardan gerilim uygulanmadan, tozu titreştirerek ulaşılan en yüksek yoğunluktur. Tozların genelde kirlilik seviyeleri yok edildiğinde, gözeneksiz yoğunluk değerine göre az daha düşüktür (Talaş, 2010).

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi serbest yığılma açısı toz parçacıklarının bir kütleye aktarılmasıyla meydana gelen alfa açısının değeri, yüksekliğin serbest toz kütesinin yarıçapına bölünmesiyle elde edilmektedir. Serbest yığılma açısı, toz partiküllerinin hareket ettiği yöne çevrilmesi ile gözlemlenir. Toz parçacıklarının akış zamanı, yer çekimi etkisinde tozun küçük boşluklardan hangi hızlarda geçeceğinin bir ölçütüdür. Küçük toz parçacıkları, tozların arasındaki yüksek sürtünme sebebi ile çoklukla akmazlar. Bu tozlara serbestçe akmayan tozlar da denir. Bu tozlara şekil verilmesi de oldukça zordur. Görünür yoğunluk türlü cihazlarla ölçülür. Bunlar Arnold, Scott ve Hall akış ölçerleridir ve aşağıda resmi verilmiştir (Talaş, 2010).



Şekil 2.4 Akış ölçer araçlarının kesitsel görünüşleri (Talaş, 2010)

2.2 TM Yönteminin Avantajları ve Sınırları

TM yöntemiyle parça üretiminin avantaj ve sınırlarının bilinmesi için, en önemli altı etkenin bilinmesi gerekmektedir. Bunlar özetle mekanik ve fiziksel özellikleri, toz parçacık şekil boyutları, şekil karmaşıklıkları, toleransları, malzeme sistemleri, kalite ve maliyet olarak sınıflandırılabilir. Bu özellikler ele alındığında, TM yönteminin döküm uygulamaları ve dövme işlemleri gibi üretim yöntemlerine göre çok sayıda avantajı olmasının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar, aşağıdaki sıralanmıştır (Talaş, 2010).

TM yönteminin mekanik özellikleri ve ekonomik avantajları

- Döküm ve dövme işlemlerine göre kaliteli ve maliyeti düşük bir yöntemdir. Ham haldeki malzemelerinin nerdeyse tamamının kullanımı ile ergime israflarının olmaması,
- Arzu edilen gözenekli yapının oluşturulması için kendinden yağlamalı yatakların üretilmesi ve gözenekli kemik yapısına uygun implant malzemelerinin yapılabilmesi,
- Talaşlı üretim yöntemlerine ihtiyaç duymadan malzeme tasarrufu sağlaması,

- Küçük şekilli ve kompleks parçaların diğer yöntemlere göre verimli bir şekilde seri üretilebilmesi,
- Çoğunlukla diğer yöntemlerle üretilmesi imkânsız parçaların, ergime sıcaklığı yüksek molibden, tungsten, tantalyum gibi refrakter metallerin üretiminde maliyeti düşük en önemli yöntemdir,
- Isıl dayanım, yüksek dayanım, sünek yapı gibi istenen mikro kristal ve amorf yapılar sadece bu yöntemle üretilebilir,
- İstenilen nitelikli yüzey ve az boyutsal toleransların,
- Arzu edilen mekanik ve fiziksel özelliklere göre kontrollü olarak gözenekli yapının oluşturulması ve gözeneklerin infiltrasyonu,
- İstenilen kompozit malzeme üretimi (Talaş, 2010).

Ancak TM yönteminin bazı dezavantajlı durumları da mevcuttur. Bunlar aşağıda sıralanmıştır (Talaş, 2010).

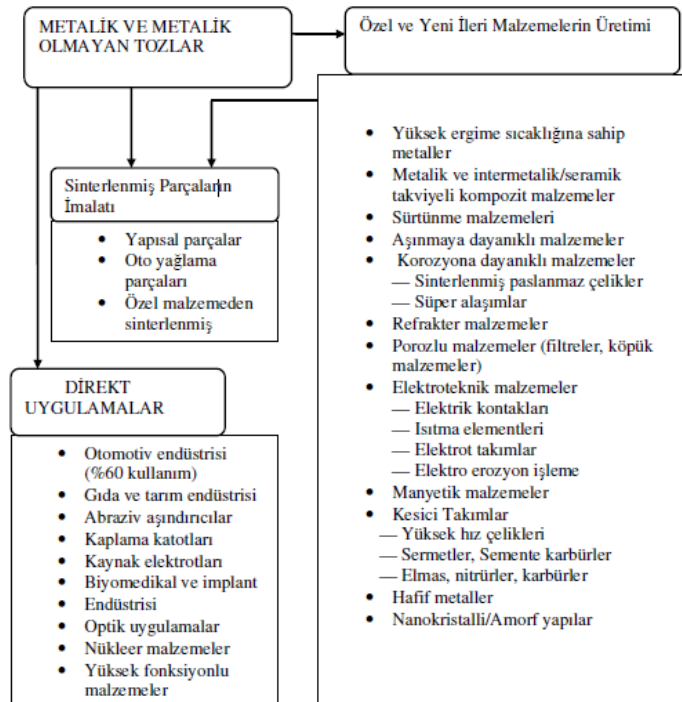
- Seri üretim olmaz ise, yatırım maliyetlerinin yüksek olması,
- Metal tozların maliyetinin yüksek olması,
- Dayanım gerektiren ürünlerde gözenek doldurma ve infiltrasyon gibi işlemler uygulanmazsa, diğer yöntemlere göre düşük mekanik özellik ve değişken yoğunluk değerleri elde edilmesi,
- Gözenekli yapılardan oluşan kötü korozyon dayanımı ve düşük plastisite özellikleri,
- Büyük hacimlerde ürün üretiminin yapılamaması, tasarım zorlukları veya fazla maliyetli yeni TM yöntemlerinin kullanılması (Talaş, 2010).

2.3 TM Yönteminin İlerlemesi ve Kullanım Yerleri

M.Ö. 3000 yıllarında Mısırlılar demir - sünger gibi el takımları ve araçları üretmişlerdir. Amerika'da 1800'lü yıllarda, karbon (C), zirkonyum (Zr), vanadyum (V), tantalum (Ta) ve tungsten (W) gibi malzemeden flaman imal edilmiştir. 1826 yılında ise Rusya'da üretilen platin para TM yönteminin ilk endüstriyel uygulamasıdır. Ortaya çıkan bu çalışmalar Ti, Ta, W, V, Nb, Mo gibi refrakter malzemelerin, TM yöntemi ile üretilebildiğini göstermektedir. Ayrıca elektrot, kontak malzemeleri ve karbürlü kesici takımlar TM yöntemi ile üretilebilmektedir (Talaş, 2010).

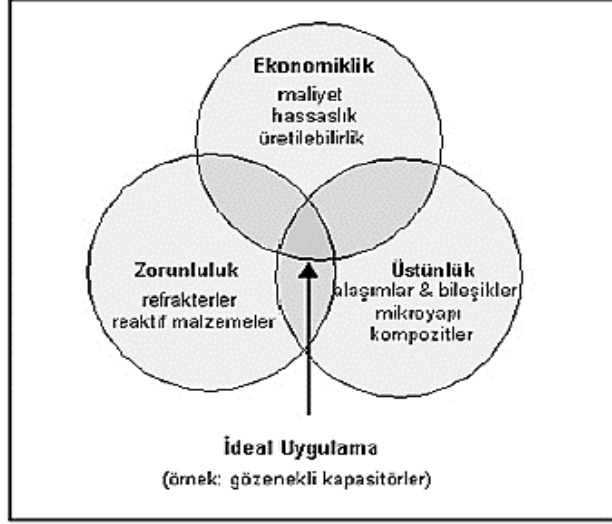
Günümüzde TM yönteminin önemli olan bir özelliği de klasik üretim yöntemler ile alایشım durumuna gelemeyen çoğu mühendislik malzeme yada parçalara uygulanabilmektedir.

Tüm bu gelişmeler ile TM yöntemi otomotiv donanımlarının üretiminde, uzay alanında, silah endüstrisi, biyomalzeme ve kesici takımlarda çokça ilerleme göstermektedir. TM yöntemlerinin ilk uygulama ve ilerleme süreci ile endüstriyel kullanım alanları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 2.5 TM yönteminin endüstriyel kullanım alanları (Talaş, 2010)

TM yöntemine maliyet, mekanik özellikler ve reaktivite özellikleri etkilemektedir. TM karmaşık geometrili parçaların en az maliyetle üretimi ile otomotiv motor donanımlarının çoğu parçasının imalatında tercih edilmektedir. Şekil 2.6'da TM yönteminin Venn diyagramı üzerinde uygulama alanları görülmektedir (Talaş, 2010).



Şekil 2.6 TM yönteminin Venn diyagramı üzerinde uygulama alanları (Talaş, 2010)

2.4 Metalik Tozların Üretilmesi

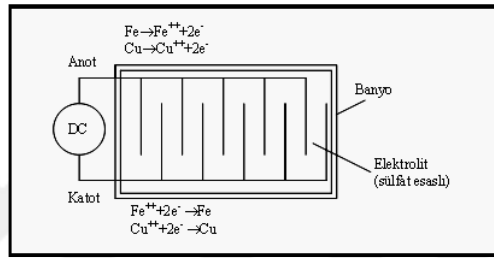
Tozların üretiminde kullanılan teknikler, tozların çoğu özelliğini belirlemektedir. Toz parçacıklarının geometrik yapısı ve toz tanelerinin yüzey yapısı üretim yöntemine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Çok sayıda toz karışımlarının ortaya çıkmasında kullanılan teknikler içinden ekonomik faaliyet olarak aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır;

- Elektrolitik ayrıştırma yöntemleri,
- Kimyasal yöntemler,
- Atomizasyon yöntemleri,
- Mekanik yöntemler,
- Talaş kaldırma,

- Değirmende öğütme,
- Mekanik alaşımlama (MA) (Talaş, 2010).

2.4.1 Elektrolitik Ayrıştırma Yöntemi

Elektroliz yöntemiyle çoğunlukla bakır tozları üretilir. Bu yöntemle oksitli toz parçacıkları katoda bağlanarak elektrolitik havuz içinde çökertilip, katot da toplanır (Şekil 2.7). Banyo havuzu kurşun malzeme ile kuşatılmıştır (Nazik, 2013).



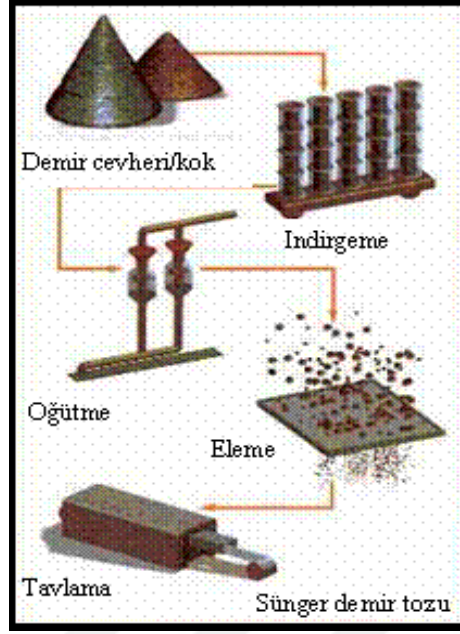
Şekil 2.7 Elektrolitik ayrıştırma yöntemiyle toz üretimi (Nazik, 2013)

2.4.2 Kimyasal Yöntemler

Toz parçacıklarının bu yöntemle üretilmesi metal oksitlerin karbondioksit veya hidrojen gazlarla uzaklaştırılmasıyla gerçekleşir (Nazik, 2013).

Sünger demir tozları üretimi kimyasal yöntemlerle yapılan değerli bir uygulamadır. Bu işlem demir oksit cevherinin uygun bir şekilde süngere benzer bir yapıya çevrilmesiyle gerçekleşir. Magnetit, kok ve kireç taşı karıştırılıp kaplara dökülüp 1260°C sıcaklıktaki 68 saat fırınlanarak üretilir (Nazik, 2013).

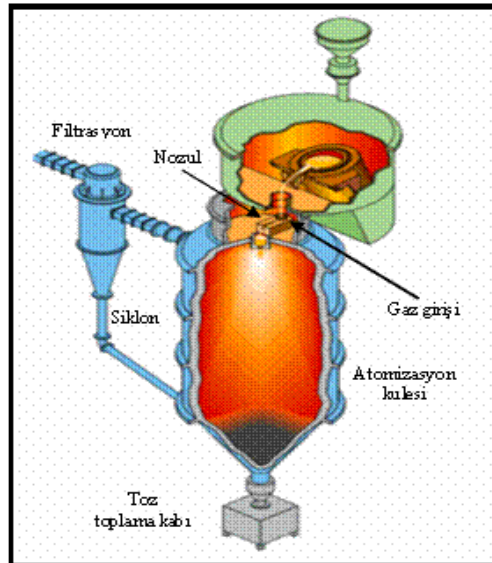
Aşağıda Şekil 2.8’de bu yöntemle demir tozu üretimi şematik olarak gösterilmiştir. Daha sonra kaynaklanmış sünger demir tozları öğütülüp arzu edilen tane büyüklüğü elde edilir. Elde edilen demir tozları arıtılır ve elek yardımı ile elenir (Nazik, 2013).



Şekil 2.8 Demir tozlarının üretim aşamaları şematik gösterimi (Nazik, 2013)

2.4.3 Atomizasyon Yöntemi

Bu yöntemle, tozun ortalama boyut, tane boyutu dağılımları, tozun şekli gibi kimyasal yapısı ve mikro yapısı denetlenebilir. Mevcut sıvı demetinin farklı ebatlarda fazla miktarda malzemeyi parçacıklara bölmesine denir. Sıvı haldeki metali gaz jeti ile parçalamaya, gaz atomizasyonu denirken, su jeti kullanılarak yapılan parçalama işlemine su atomizasyonu denir. Merkezkaç kuvvetleri kullanarak yapılan işleme santrifüj atomizasyonla toz üretimi denir (Nazik, 2013).



Şekil 2.9 Düşey konumlu gaz atomizasyon sistemi (Nazik, 2013)

2.4.4 Mekanik Yöntemler

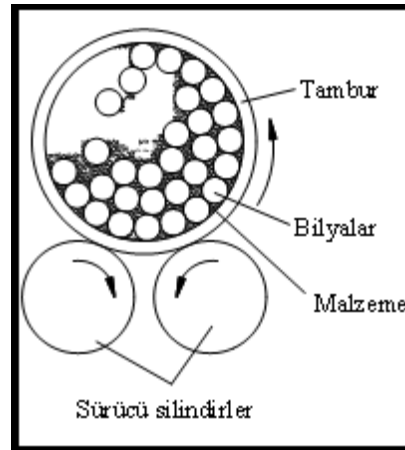
Bu teknik ise talaşlı, öğütme ve mekanik alaşımlama teknikleri olmak üzere üçe ayrılır (Nazik, 2013).

2.4.4.1 Talaşlı üretim tekniği

Bu aşamada torna, freze ve taşlama gibi yöntemlerle iri ve karmaşık yapılı toz parçacıkları imal edilebilir. Ortaya çıkan tozlar, öğütme işlemi ile ince toz durumuna gelir ve bu tozların oksitlenme, yağlanma, kirlenme ve hurda malzemeler ile karışarak istenmeyen zorluklarla karşılaşılabilir. Bu teknikle yüksek karbonlu çelik tozlarının üretimi yapılabilir (Nazik, 2013).

2.4.4.2 Öğütme tekniği

Bu yöntem toz üretim olarak kullanmanın yanında tozların bilye yardımı ile kırılarak istenilen özellikleri sağlamada kullanılan bir yöntemdir. Çalışma sistemi kırılğan yapıdaki tozların parçalanacak malzeme ile sert bir cisim arasında gerçekleşmektedir (Nazik, 2013).



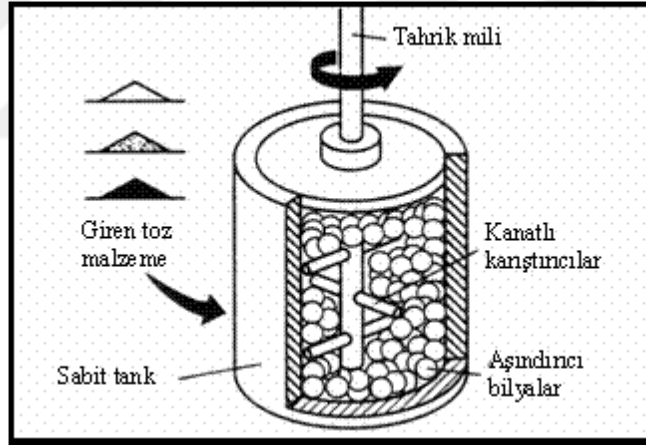
Şekil 2.10 Bilye Darbeli Öğütme Tekniği (Nazik, 2013)

Öğütülecek tozlar, bilyelerin bulunduğu kap içine koyularak bu bilyeler ile dönerek veya titreşerek darbe kuvveti ile daha küçük yapılı tozların oluşması sağlanır (Nazik, 2013).

Fakat öğütülen tozlar gevrek olursa bilyelerin darbeleriyle daha küçük tozlara dönüşür. Öğütülen tozlar sünek ise bilye darbesi sonucunda şekil değişimine uğrayarak yassılaşırlar. Öğütülen tozların homojen karışması için kap içindeki bilye hacimleri ve öğütülecek toz malzeme miktarı oldukça önem taşımaktadır (Nazik, 2013).

2.4.4.3 Mekanik yöntemle alaşımlama tekniği

Bu teknik kuru ve katı durumda bulunan toz malzemelerin birbirlerine kaynaklanmasını daha sonra bu kaynakların kırılmasını sağlayıp çok ince ve homojen mikro yapılara dönüşüp dayanımının artarak kompozit malzemelerin imalatında kullanılır. Bu teknik ile kapalı kaba yerleştirilen tozlar döndürülür (Şekil 2.11). Bu yöntemle kap içindeki tozların deformasyona uğrayarak kırılması ve soğuk kaynaklaşmaların oluşması sağlanır (Nazik, 2013).



Şekil 2.11 Mekanik yöntemle alaşımlama sistemi (Nazik, 2013)

2.5 Mekanik Alaşımlama (MA) Tekniği

Burada toz malzemeler yüksek enerjiyle ufalanır ve ufalanan tozlar tekrardan kaynaklanır. Elde edilen sonuncu toz mikro özellikleri, çoğunlukla atomizasyon işlemi ile elde edilen diğer toz parçacıklarından çok ince olmaktadır. Hızlı soğutma yöntemleri ile mikroyapıda benzer tane boyutu seviyelerine sahip olunmaktadır. Ayrıca toz parçacıkları bilyelerin arasında kalarak toz tanelerinin mikroyapısının uzamasına neden olarak toz tanelerinin mekanik özelliğini artırır.

Bu yöntem metal matrisli kompozit malzeme imalatına çok uygundur. Bu yöntem bu nedenle diğer yöntemlere göre daha iyi özelliklerin elde edilmesine olanak sağlar. Toz parçacıklarının yığılmasından kaçınılıp toz parçacıklarının homojen dağılması sağlanır. Ayrıca sürekli çarpmayla takviye elemanı içinde ki hataları yok edip kompozit malzemenin ani kırılımını geciktirir. Burada sadece hammadde ve diğer yöntemlerin neden olduğu sorunlar elemine edilir. Böylece daha iyi toz malzemelerin elde edilmesine olanak sağlar (Nazik, 2013).

Avantajlar:

- Homojen bir toz yapısı elde edilir. Segregasyon sorunu ortadan kalkar.
- Termodinamik alaşımlamada diğer tekniklere göre sınırlama yoktur. Böylelikle çok geniş ve sıra dışı alaşımlamalar yapılabilir.
- Tek bir deneme ile fazla sayıda toz üretilip böyle alaşımlama yapılabilir. Fabrikasyon üretimi kolaydır.
- Termomekanik işlem aşamasında toz tane yapısının kontrolü ile farklı özellikler oluşturulabilir. (Nazik, 2013).

Dezavantajları:

Toz malzemelerin kirlenmesi engellemek ya da azaltmak için yararlı olan uygulamalar aşağıda verilmiştir (Nazik, 2013).

- Yüksek saflık oranına sahip toz malzemelerin kullanılması,
- Yüksek saflık oranına sahip atmosfer kullanılması,
- Öğütülen tozların malzemesine yakın bilyelerin ve kapların kullanılması,
- Kap içinde kullanılan bilyelerin öğütülen toz malzemesiyle kaplanması,
- Uygun olan en kısa sürede öğütme işlemi yapılması,

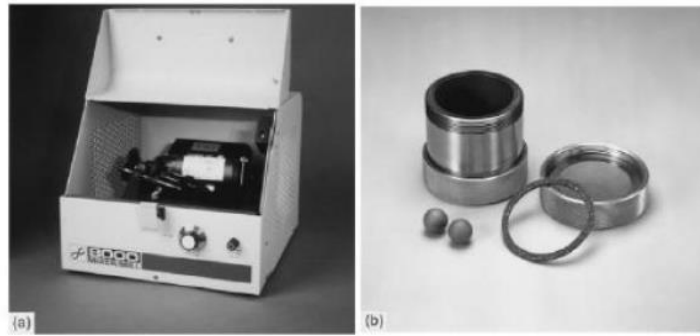
- Mekanik yöntemle alaşımlamada bulunan işlem sayısının çok fazla olması (Nazik, 2013).

2.5.1 Öğütücü Türleri

Bu teknikte çok önemli bir aşama olan öğütme işlemi; toz parçacıklarının tane boyutunu küçültülmesi, harmanlanma ve alaşımlandırılması gibi kısımlardan oluşur. Buralarda istenilen amaca uygun öğütücüler kullanılır. Öğütücü türleri öğütme verimliliği, soğutma ve ısıtma gibi ek olan ünitelerle farklılık gösterirler (Nazik, 2013).

2.5.1.1 SPEX tipi öğütücüler

Bu tip öğütücüler tek seferde ortalama 10 ila 20 gr arasında toz malzeme öğütme amacı ile kullanılmaktadırlar. Mevcut bulunan haznede bulunan toz ve öğütme bilyeleri anlık kısa sürelerde çok sayıda ileri, geri, sağa ve sola hareket eder. Bu hareketlerle bilye ve toz karışımı çarpışarak tozun öğütülmesini sağlar. Yeni model SPEX tipi öğütücülerde işlem zamanını uzatan basınçlı soğutma sistemleri mevcuttur. Şekil 2.12’de SPEX tipi öğütücünün kısımları görülmektedir (Nazik, 2013).



Şekil 2.12 SPEX tipi öğütücü (a) SPEX tipi bilyeli değirmen, (b) SPEX 8000 tipi öğütücünün; kap, kapak, conta ve bilye sistemi (Nazik, 2013)

2.5.1.2 Planetary tipi öğütücü

Mekanik alaşımla yöntemlerinden biri de planetary tipi öğütücüdür (Şekil 2.13). Bu öğütücüde 100 gram toz tek seferde öğütülebilir. Hazne gezegen yörüngesi gibi

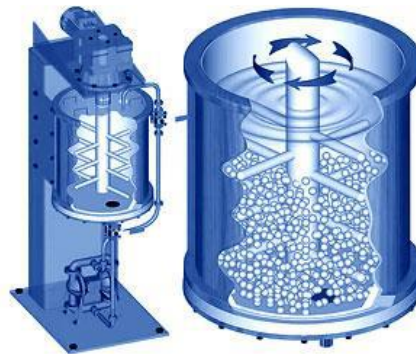
hareket ederek bu ismi almıştır. Dönen bir destek diski üzerinde kendi eksenini etrafında hareketini özel bir mekanizma sayesinde yapar (Nazik, 2013).



Şekil 2.13 Planetary tipi öğütücü (Nazik, 2013)

2.5.1.3 Atritör tipi öğütücüler

Bu tip öğütücülerde, içerisinde seri karıştırıcılar bulunan dikey bir silindir yapı mevcuttur. Karıştırıcılar birbirine dik konumda, kazan içinde bulunan bilyelere enerji verir. Kap içinde bulunan bilyeler kap duvarına, birbirlerine ve karıştırıcı mil arasında çarpışmalarıyla toz tanelerinin şeklinin küçülmesine sebep olur. Karıştırıcıyı sistemde bulunan güçlü bir motor çevirir ve sabit silindir içinde bulunan bilyeler ve tozlar hareket ederler. Bu tip öğütücülerde tek seferde fazla miktarda toz (0,1- 40 kg arasında) öğütülebilir (Şekil 2.14). Ayrıca bu yöntemde farklı atmosferlerde çalışmak mümkündür. Ayrıca dış kazan etrafında gezinen soğutma sıvısı ile sıcaklığın kontrol edilmesi kolaydır (Nazik, 2013).



Şekil 2.14 Dikey şekilli Atritör bilyeli değirmen sistemi (Nazik, 2013)

2.5.2 MA İşlem Parametreleri

MA yönteminde arzu edilen faz yapısını ve mikroyapıyı elde etmek için fazla olasılık bulunan karışık bir işlem mevcuttur. Bu yöntemle öğütülen toz malzemelerde, faz yapısı belirlenecektir. Öğütülmüş toz malzemenin içeriğinin son haline gelmesinde, aşağıdaki verilen özellikler etkilidir (Nazik, 2013).

- Kullanılan öğütme tipi
- Kullanılan öğütücü kabı
- Seçilen öğütme enerjisi/hızı
- Öğütmeye ayrılan işlem zamanı
- Kullanılan aşındırıcının şekli
- Seçilen bilye ve toz miktarı
- Kap içindeki karışım seviyesi
- Koruyucu gaz
- İşlem kontrol katkısı (İKK)
- Belirlenecek öğütme ısı değeri

Sıralanan bu özellikler birbirlerine bağlıdır. Örneğin seçilecek öğütme süresi, öğütücünün tipi, aşındırıcının boyutlarına, öğütücünün sıcaklık değerine ve belirlenecek bilye ve toz miktarı gibi faktörlere bağlı ve ayrıca öğütülen toz parçacıklarına, bilye ve toz miktarı oransal olarak arttırarak ya da fazla sürelerde öğütme işlemi yapılarak, fazla enerji uygulanabilir. Ayrıca bu örneklerle benzer olarak diğer faktörler de birbirine bağlıdır (Nazik, 2013).

2.5.2.1 Öğütme tipi

MA yöntemi için değişik öğütücü sistem tipleri mevcuttur. Bu sistemler toz tipi, toz miktarı ve arzu edilen karışıma uygun olarak tercih edilir (Nazik, 2013).

2.5.2.2 Öğütücü kap

Toz malzemelerin öğütme kabı duvarlarını aşındırması durumunda kirlilik meydana gelir. Çözüm için öğütücü kap malzemesi önem arz etmektedir. Örnek olarak bakır kap içinde Cu-In-Ga-Se tozlarının öğütülmesiyle üretilen tozun içinde bakır oranı, ilk etaptaki orandan daha yüksektir (Nazik, 2013).

2.5.2.3 Öğütme hızı

Öğütme hızı MA için önemli bir faktördür. Oluşan bilye darbeleri ve toz parçacıklarının etkisinde olduğu aşırı plastik deformasyon toz parçacıklarının birbirine soğuk olarak kaynak olmasına ve kırılmasına neden olmaktadır. Bu durum uygun olan bir değerde öğütme hızı ile sağlanabilir. Öğütücü dönme hızı arttıkça toz karışımına yansıyan enerji de artar.

Yüksek öğütme hızı haznenin sıcaklığının yüksek değerlere ulaşmasını sağlar. Bu durumdaki yüksek sıcaklık ile toz kirlenebilir. Diğer türlü öğütücülerde erişilen maksimum sıcaklıklar birbirinden farklıdır. Oluşan sıcaklıkların olumsuz yanlarından korunmak için soğutma sıvısı olarak gaz veya sıvı kullanılabilir (Nazik, 2013).

2.5.2.4 Öğütme zamanı

Toz parçacıkları arasında parçalanma ve soğuk birleşmenin oluşması için öğütme zamanı önemli bir etkidir. Öğütme süresi sistemin öğütücü tipine, şiddetine, bilye-toz oranı gibi durumlara bağlıdır. Optimum süre bu parametreler göz önüne alınarak yapılır. Eğer süre alışımlamada fazla tutulursa kirlilik düzeyi artar ve istenmeyen fazlar artış gösterir. Bu yüzden istenilen süre içerisinde tozlar öğütülmelidir. Bu nedenle yüksek enerjili öğütmelerde kararlı hal şartlarını sağlamak için süre kısa tutulurken, düşük enerjili öğütmelerde süre uzun tutulur. Eğer karışımda bilye/toz

oranı daha yüksek ise zaman kısa ayarlanırken, bilye/toz oranı düşük olduğunda zaman uzun tutulur (Nazik, 2013).

2.5.2.5 Bilye/toz ağırlık oranı

Bilyelerin ağırlığının toz ağırlığına oranına doluluk oranı da denmektedir. Genelde, 10:1 oranı bilye/toz ağırlık oranı SPEX tipi öğütücülerde çok kullanılan bir orandır. Yüksek kapasiteli, atritör tipi öğütücülerde bilye-toz oranı 50:1 ya da 100:1 oranda kullanılabilir. Bu oranların artması alaşımlama zamanını azaltırken, tozların kirlenmesini hızlandırabilir. Bilye/toz oranı ne kadar yüksek ise süre o kadar kısa olur (Nazik, 2013).

2.5.2.6 Kabın doluluk oranı

Toz parçacıkları arasındaki çarpma enerjisinden dolayı, tozların arasında alaşımlama meydana gelir. Kap içerisinde gerekli boşluk ve toz karışımlarının iyi karışımı için bilyelerin kabın içerisinde rahatça hareket etmeleri gerekir. Bu yüzden kap içindeki boşluk, toz ve bilyeler için önemlidir. Kap içinde bilye ve toz oranları azaldıkça üretim sayısı da düşer. Yani toz ve bilye oranları miktarı büyüdükçe, bilyelerin hareketi için yeterli alan olmayacak ve çarpma enerjisi de düşük olacaktır. Bu nedenle alaşımlama oluşmaz, oluşursa da uzun sürer. Bu nedenle kabı fazla doldurmak sakıncalı olacaktır. Sadece kabın yarısı veya yarısından biraz fazlası boş olmalıdır (Nazik, 2013).

2.5.2.7 Öğütme atmosferi

Öğütülecek toz karışımlarının kirlenmesini önlemek ve oksitlenmeyi sağlamak için vakumlu atmosferler ya da soy gaz ortamları kullanılır (Nazik, 2013).

2.5.2.8 İşlem kontrol katkıları

Öğütücü içerisinde toz parçacıkları arasında soğuk kaynak oluşur. Eğer bu toz parçacıkları sünek ise yüksek plastik deformasyon nedeniyle fazla soğuk kaynak oluşur. İşlem kontrol katkısı aşırı soğuk kaynak etkisini azaltmak için katı, sıvı veya

gaz olarak toz karışımına eklenir. İşlem kontrol katkıları toz parçacıkları tarafından emilerek toz parçacıkları arasındaki soğuk kaynağı en aza indirger ve sonuç olarak topaklanmaları önler (Nazik, 2013).

2.5.2.9 İşlem kontrol katkılarının yapısı

İşlem kontrol katkıları çoğu araştırmalarda toplam toz ağırlığı ortalamasının %1 ile %5 oranlarında kullanılmışlardır. Bunlar stearik asit, hekzan, metanol ve etanoldür. Diğer araştırmalarda kullanılan işlem kontrol katkıları ve miktarları aşağıda ki şekilde verilmiştir. Bu katkılar düşük ergime ve buharlaşma sıcaklığına sahiplerdir. Bu nedenle öğütme işlemi esnasında sıcaklık yükseldikçe ergiyip buharlaşırlar. Bu katkıların ergime ve buharlaşma değerleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

2.5.2.10 Öğütme sıcaklığı

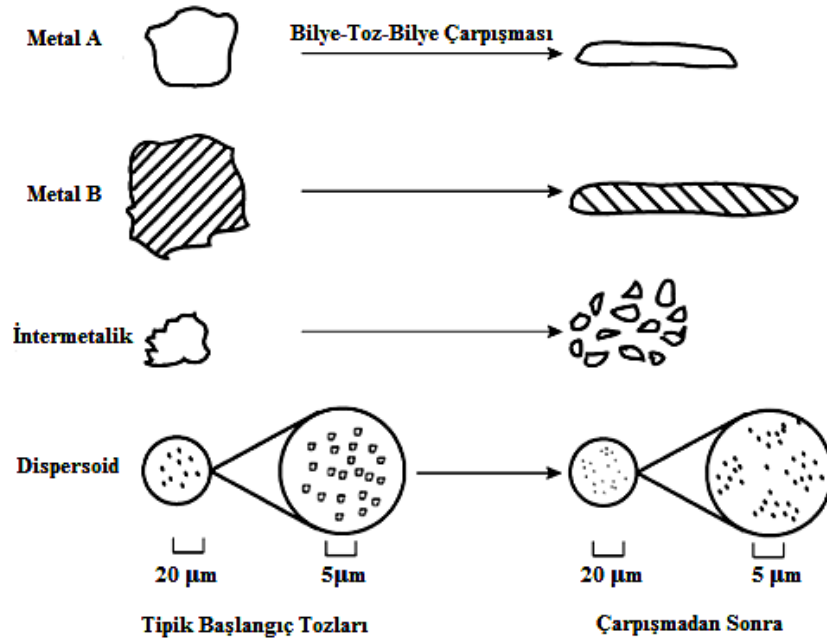
Bu sıcaklık, öğütülecek toz karışımının içeriğinin belirlenmesinde önemli olan bir aşamadır. Çoğunlukla MA seçilen malzeme türüne göre oda sıcaklığında yapılır. Sıcaklık sabit tutularak kazan çevresinde soğutucu olarak kullanılan gaz veya sıvıların dolaşımı sağlanır. Aksi durumda sıcaklığın artması ile aşınmalar artar ve toz karışımının kirlenmesi kolaylaşır (Nazik, 2013).

2.6 Mekanik Alaşımlama (MA) Mekanizması

Farklı içerikli alaşım türleri MA yöntemi ile karıştıdırılabilir. Bu alaşım; faz yapıları, katı çözeltiler, orta fazlar ve amorf alaşımları içermektedir (Nazik, 2013).

2.6.1 Bilye - Toz - Bilye Çarpışmaları

MA yönteminde toz karışımları veya ön alaşımlı tozlar, aşındırıcıyla kap içine yerleştirilerek ağır deformasyon işlemine tabi tutulurlar. Böylece toz parçacıkları döngü halinde düzleşip, soğuk kaynakla kırılıp ve tekrardan kaynarlar (Nazik, 2013).

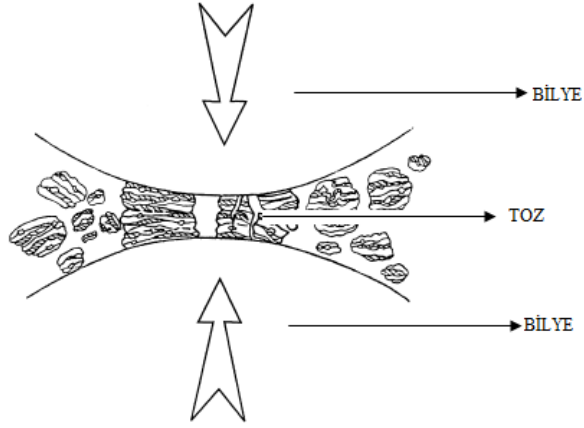


Şekil 2.15 Tozların deformasyon özellikleri

Sünek yapılı Metal A ve Metal B tozlar yassı hal alır. Gevrek yapılı tozlar daha küçük halde eşit oranda dağılır (Nazik, 2013).

2.6.2 Mekanik Alaşımlama (MA) Aşamaları

Aşındırıcı bilyeler birbirleriyle temas ettiğinde, bilyeler arasında az da olsa toz kalır (Şekil 2.16). Böylece süreç içinde toz yüzeyleri iki yöntemle değişir. Başlangıçta sünek yapıdaki tozlar yassılaştırmış duruma gelir ve soğuk kaynama oluşur. Bu durumda karışımın farklı yollarını içeren tabakalı kompozit toz parçacıklarının oluşmasına neden olur. Fazla oranlarda gevrek yapı sünek yapının oluşmasına engel olur ve kompozit yapı içinde sıkıştırlar (Nazik, 2013).



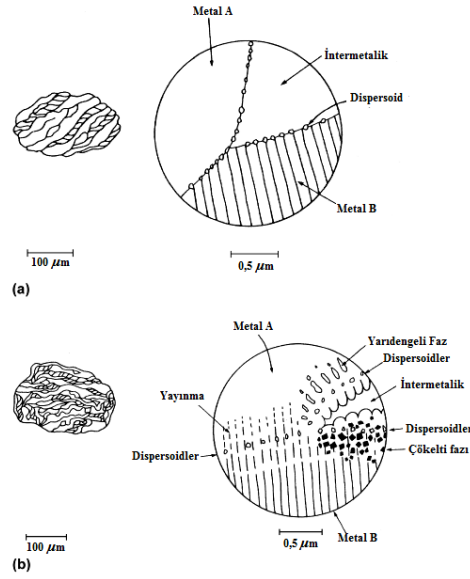
Şekil 2.16 Süreç içinde bilye-toz-bilye teması ve oluşan toz yapıları (Nazik, 2013)

2.6.2.1 Sürecin ilk aşaması

İlk aşamada sünek toz taneleri yassılaştır. (Şekil 2.17 (a)). Bu duruma katmanlı yapılar denir. Böylece kompozit toz parçacıkları boyutsal olarak değişir (Nazik, 2013).

2.6.2.2 Sürecin ikinci aşaması

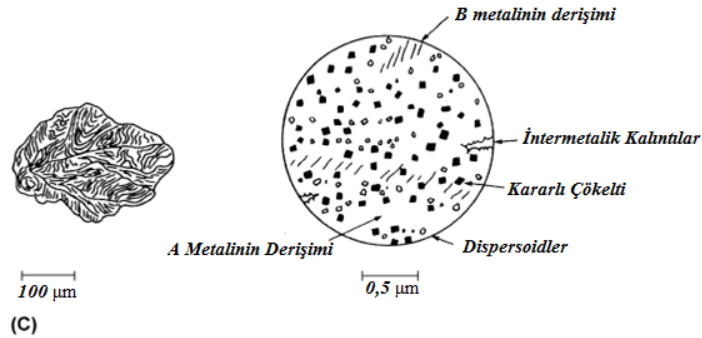
Toz karışımlarını öğütme işlemi devam ederken parçacıklar arası soğuk kaynama ve kırılma durumları da devam ederek mikroyapının iyileşmesine neden olur. Bu aşamada parçacıklar sarmal lameller halinde görülür (Şekil 2.17 (b)). Soğuk deformasyon oluştukça da partikül hataları, boşluk, tane sınırları oranları artar. Tüm bu durum kısa döngülü difüzyon yöntemiyle olur. Tüm bu çarpışmaların etkisiyle toz karışımının sıcaklığı artar ve difüzyon gerçekleşir. Sonuç olarak oluşan bu etkilerle alaşım oluşur. Toz tanelerinde mikroyapı iyileşerek devam eder ve oksit dağılımı daha üniform bir durum oluşturur (Nazik, 2013).



Şekil 2.17 (a) ve (b) Toz parçacıklarının yapısı (Nazik, 2013)

2.6.2.3 Sürecin son aşaması

Son aşamada lamelli yapılar daha ince ve daha karmaşık duruma gelir (Şekil 2.18). Toz partiküllerinin miktarı başlangıç tozunun miktarı ile aynı gibidir. Lameller arası mesafe ve dağılım mesafeleri $1\mu\text{m}$ 'dan az ve partiküllerin mikro sertliği doymuş hale gelir (Nazik, 2013).



Şekil 2.18 Sürecin son aşaması: mikroyapının kararlı gelmesi (Nazik, 2013)

2.6.3 Öğütme Sistemleri

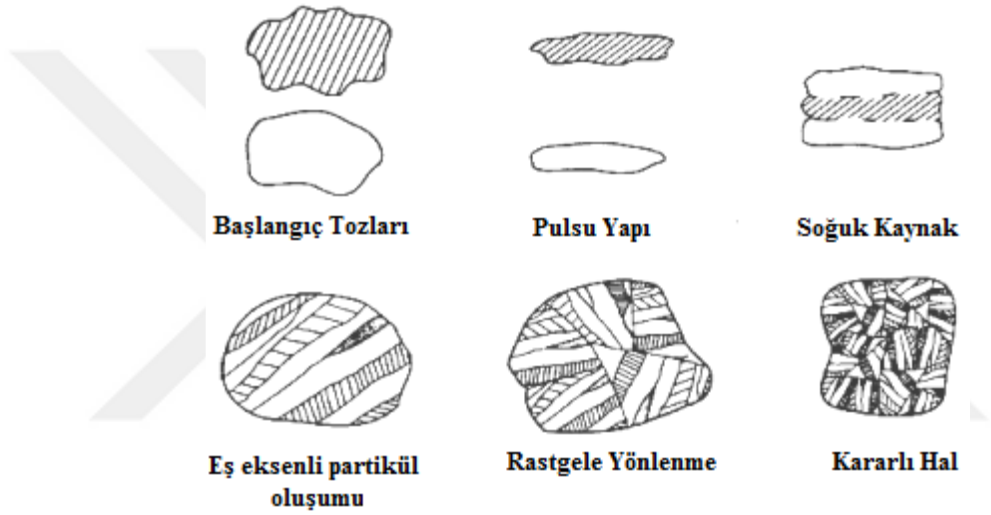
MA yönteminde üç yapı vardır. Bunlar;

- Sünek - sünek yapı,

- Sünek – gevrek yapı,
- Gevrek - gevrek yapı (Nazik, 2013).

2.6.3.1 Sünek - sünek sistem

MA yönteminde tozlardan biri alaşımlama durumunu iyileştirmek için sünek yapıda olmalıdır. Mekanik yöntemlerle alaşımlanan tozların yapısal değişimleri Şekil 2.19’da verilmiştir (Nazik, 2013).



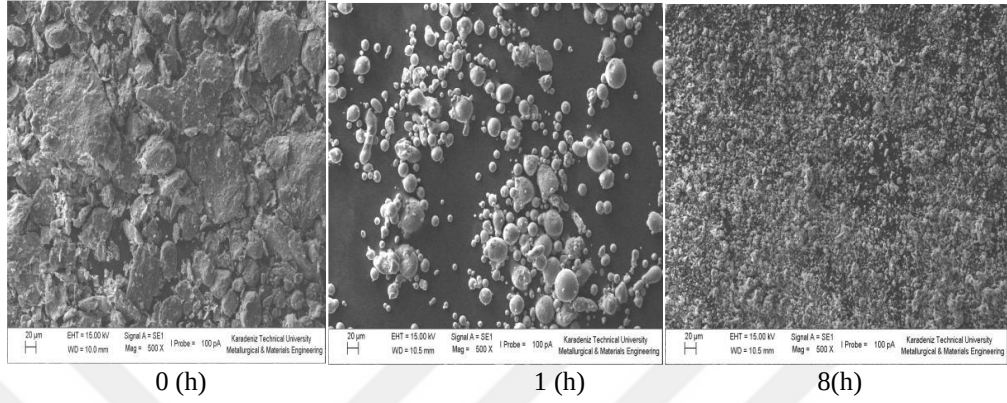
Şekil 2.19 MA yönteminde sünek - sünek sistemlerde aşamaların ilerlemesi (Nazik, 2013)

MA yöntemi ile bilyelerin aralarında çarpışması sonucunda arada sıkışan tozlar, oluşan darbelerin etkisiyle plastik deformasyona uğrarlar. Sonuçta toz parçacıklarında ezilme ve yassılaşma olur (Şekil 2.19). Oluşan darbe enerjisi ile tozlar levhalaşır, kaynaklanarak kırılır ve daha sonra tekrar kaynaklanır. Bu darbeli temaslarla toz taneleri deformasyona uğrayarak sertleşip kırılırlar.

Oluşan deformasyonla, yorulma mekanizması oluşarak sertleşme devam eder. Devam eden karıştırma işlemi ile toz partikülleri kararlı ve başlangıca göre daha homojen bir hal alır. Ancak parçacık boyutu değişmez.

Sürecin devamı ile homojen mikroyapıda difüzyon uzaklıkları azalır. Böylece öğütme işlemi ile az olan sıcaklık artışıyla difüzyon oluşur ve alaşımlama işlemi gerçekleşir. Aşağıda verilen Şekil 2.20’de AA7075 karışımının değişik sürelerde

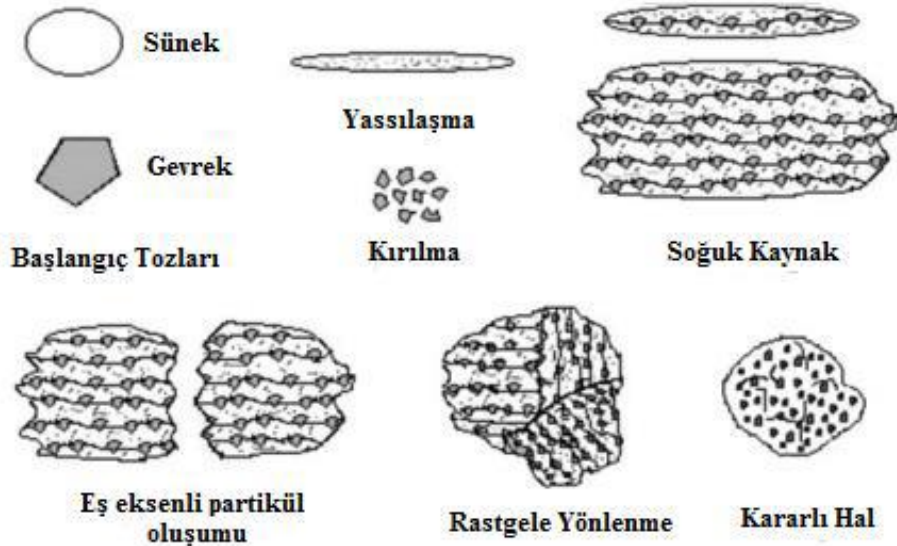
öğütülmesi sonucu oluşan toz içyapı görüntüleri verilmiştir. Aşağıdaki görüntülerde bir saat sonunda oluşan yassılaştırmış bir içyapı oluşurken, sekiz saatin sonunda işe eş eksenli bir içyapı oluştuğu görülmektedir (Nazik, 2013).



Şekil 2.20 AA7075 karışım tozlarının 0; 1 ve 8 saat öğütmelerdeki içyapıları (Nazik, 2013)

2.6.3.2 Sünek - gevrek sistem

Bu sistemde önce sünek yapıdaki tozlar bilye darbeleri ile yassılaşıp, gevrek olan tozlar ise kırılır. Bu gevrek tozlar sünek yapı içine girerler. Gevrek olan yapılar katmanlar arası boşluklara girerler. Devam eden süreç ile gevrek tozlar sünek yapı içerisine dağılırlar (Nazik, 2013).



Şekil 2.21 Sünek - gevrek yapının MA aşamasında ilerleme süreci (Nazik, 2013)

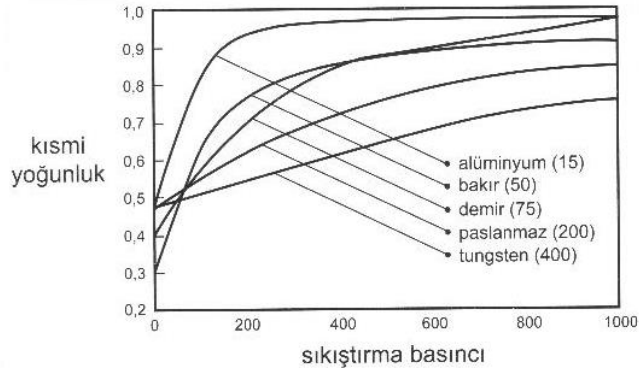
2.6.3.3 Gevrek-gevrek sistem

Gevrek yapılı toz karışımlarında alaşımlama yapılamayabilir. Bunun nedeni sünek yapının olmamasıdır. Yani sünek yapının olmaması birleşmeyi engeller ve alaşımlama gerçekleşmez. Ancak Si - Ge ve Mn - Bi vb. gevrek yapılarda alaşımlamanın gerçekleştiği de bilinmektedir (Nazik, 2013).

2.7 Toz Biçimlendirme İşlemleri

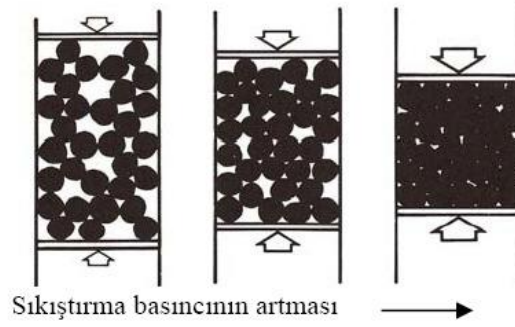
Toz karışımları yüksek veya düşük basınçta preslenerek biçimlendirilip yoğunlaştırılırlar. Tozlar kalıp içinde alt ve üst zımbalarla sıkıştırılıp basınç uygulanır. Daha sonra kalıptan çıkan numune mukavemet kazanmış olur ancak asıl mukavemeti sinterleme sonrası kazanırlar. Kullanılan kalıpların tasarımı tozun, presin ve istenilen parçanın sekline bağlıdır (Talaş, 2010).

Uygulanan basınç ile toz partikülleri birbirleri üzerinde kayarak yüksek basınçlarda şekil değişimiyle yoğunlaşırlar. Şekil 2.22’de basınç ve yoğunluk arasındaki ilişki grafiklendirilmiştir.



Şekil 2.22 Farklı malzemelerin sıkıştırma basıncı ve yoğunluk arasındaki ilişkisi

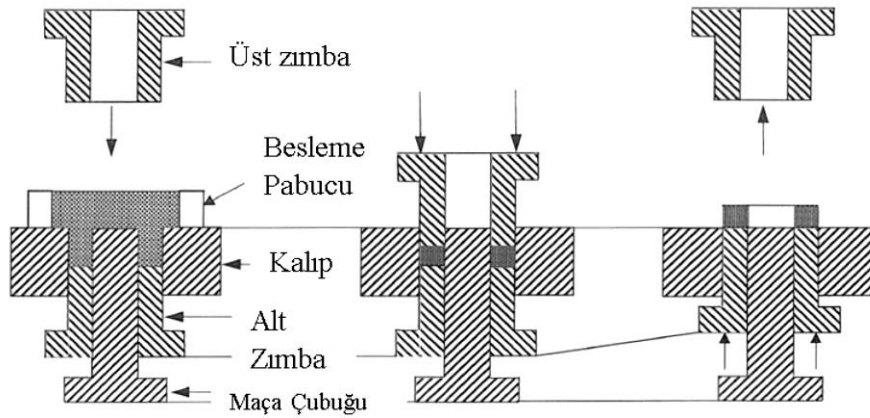
Oluşan basınçla toz partikülleri kayarak yerleşip, şekillenerek kendi aralarında bağ oluşturur. Kalıp içerisinde sıkıştırılan tozların resmi Şekil 2.23’de verilmiştir.



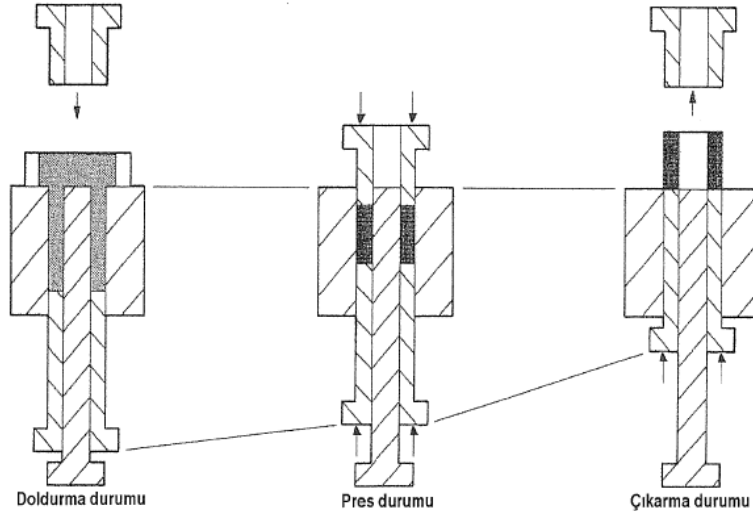
Şekil 2.23 Sıkıştırılan tozlar (Talaş, 2010)

Kullanılan toz ve kalıp malzemesine göre maksimum sıkıştırma basıncı 1000 MPa değerlerine kadar çıkabilir (Talaş, 2010).

- Presleme işlemi ile toz taneleri hareket eder ve yerleşir. Plastik şekil değişimi yoktur, ancak bazı toz tanelerinde kırılma meydana gelebilir.
- İkinci aşamada plastik deformasyon gerçekleşir. Presleme kuvveti etkisiyle toz taneleri arasında bağlar oluşur.
- Presleme sonucunda boşluklar iyice azalarak soğuk kaynaklanma olur ve tozlar yoğunluk kazanmış olur (Talaş, 2010).



Şekil 2.24 Presle toz karışımlarının tek yönlü sıkıştırılması (Taşlıyan, 2020)



Şekil 2.25 Presle toz karışımlarının çift yönlü sıkıştırılması (Taşlıyan, 2020)

Sıkıştırma işleminde toz ve kalıp yüzeyi arasında sürtünme kaynaklı sorunlar oluşur. Kalıp malzemesi çeşitli faktörlerle kimyasal reaksiyona girebilir. Toz tanelerinin sıkıştırılabilirliği tozun şekli, toz tanelerinin büyüklüğü, kullanılan yağlayıcı ve sıkıştırma oranına bağlıdır (Talaş, 2010).

2.8 TM Yöntemi ile Üretilen Parçaların Kaynağı

Difüzyon kaynağında farklı yapıdaki malzemelerin kaynak işlemlerinde çeşitli zorluklar çıkmaktadır. Bu yöntemle elde edilen parçalarda iyi birleşme işlemi elde etmek için malzeme bileşimi ve sinterleme süresinin mükemmel seçilmesi gerekir (Talaş, 2010).

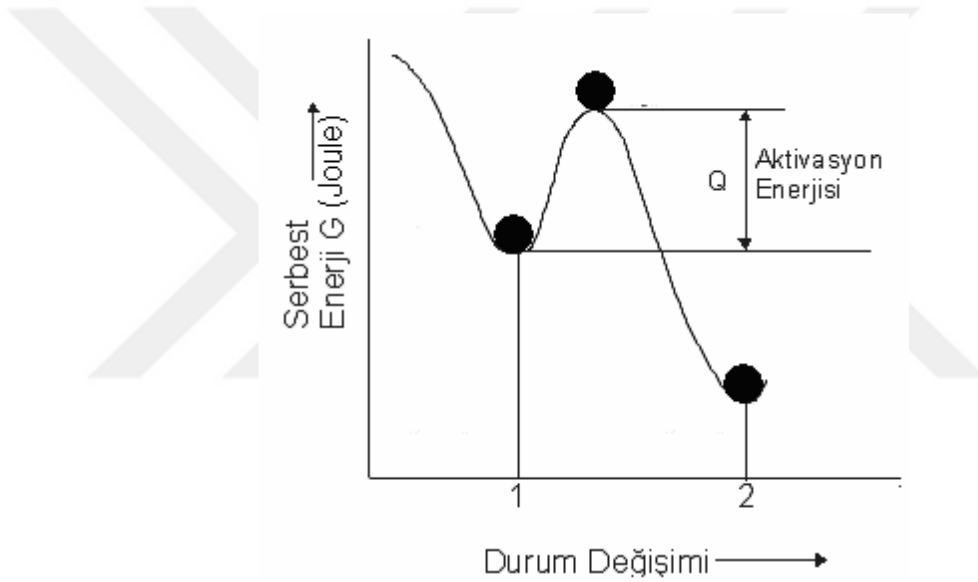
TM yöntemi haddeleme, döküm gibi geleneksel üretim yöntemlerine göre daha avantajlıdır. TM; üretimi zor ve karmaşık parçaların arzu edilen yoğunluk ve en az maliyetle imalatı için imkânlar sunar.

Sonuç olarak bu yöntemle imal edilen parçaları difüzyon kaynağı ile birleştirmek, TM'nin ve imal edilen parçaların özelliklerinin korunması ve hem de yapılan difüzyon kaynak işleminin anlaşılması önem arz etmektedir (Talaş, 2010).

3. DİFÜZYON VE DİFÜZYON KAYNAĞI

3.1 Difüzyon

Difüzyon işlemi rastgele hareket eden madde hareketidir. Yine difüzyon işleminde, atomlar yüksek konsantrasyonlu bölgelerden düşük konsantrasyonlu bölgelere doğru hareket ederler. Difüzyon işlemi, sıvı ve katılarda daha yavaş olurken gazlarda daha hızlı oluşur. Sıcaklık arttıkça moleküller arası hareket artarak difüzyon için gerekli değişim hızı artar (Özdemir, 2007).



Şekil 3.1 Serbest enerji ve durum değişimi arasındaki ilişki (Özdemir, 2007)

Serbest enerji en alt seviyeye ulaştığında kararlı denge durumuna ulaşır (2. Durum). Şekil 3.1'de 1 numara ile yarı kararlı durum gösterilmiştir. Birinci durumdan ikinci duruma geçiş için Q aktivasyon enerjisi verilir. Malzeme içindeki atomların difüzyon hızı, birim zamanda birim düzlem alanı boyunca geçen atom sayısına denir. Akı "J" harfi ile ölçülebilir (Özdemir, 2007).

$$J = -D \cdot dc/dx \text{ (Birinci Fick kanunu)} \quad (3.1)$$

$$J = \text{Atom akısı [atomlar (m}^2\text{s}^{-1}\text{)]} \quad (3.2)$$

$$D = \text{Difüzyon katsayısı [m}^2\text{s}^{-1}\text{]} \quad (3.3)$$

$$dc/dx = \text{Konsantrasyon gradyanı [atomlar (m}^3\text{m)}\text{s}^{-1}] \quad (3.4)$$

3.1.1 Difüzyon Katsayısı

Birim yüzey arasından akan malzeme miktarı, bu yüzeye dikey yoğunlaşma gradyanı oranına difüzyon katsayısı denir (Özdemir, 2007). Malzemenin sıcaklığı arttıkça; süre, difüzyon katsayısı ve atom hareketi de artar. Difüzyon katsayısı aşağıda verilen bağlantı ile bulunur (Özdemir, 2007).

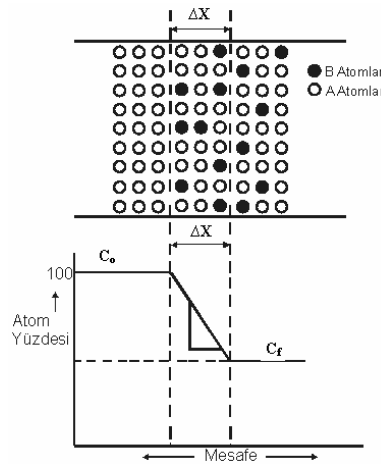
$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT} \quad (3.5)$$

Q = Aktivasyon enerjisi, birimi (J mol⁻¹)

R = Gaz sabiti, birimi (8.314 J.mol⁻¹ K⁻¹)

T = Mutlak sıcaklık (K), ve D_0 belirli difüzyon sistemi için bir sabittir

Konsantrasyon farkı dc , dx uzaklığı şeklinde Şekil 3.2’de anlatılmıştır (Özdemir, 2007).



Şekil 3.2 Konsantrasyon gradyanı (Özdemir, 2007)

3.1.2 Difüzyon Mekanizmaları

Atomlar ısıtıldıklarında denge konumunda atomların titreştikleri bilinmektedir. Oluşan şiddetli titreşimler ile atomlar yer değiştirir. Katı hallerde atomların bir

yerden başka bir yere geçmelerine difüzyon olayı denir. Difüzyon mekanizmaları 4'e ayrılır (Fidan, 2006).

a) Arayer difüzyon mekanizması

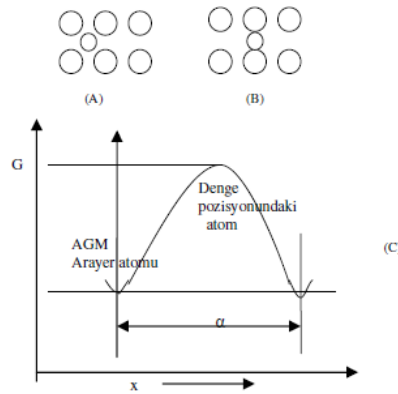
b) Boşluk difüzyon mekanizması

c) Halka difüzyon mekanizması

d) Karşılıklı yer değiştirme difüzyon mekanizması (Fidan, 2006).

3.1.2.1 Arayer difüzyon mekanizması

Arayer atomlarının yoğunluğu, genelde oldukça düşüktür. Dolayısıyla mevcut arayer noktalarının az bir kısmını işgal ederler. Arayer atomları boşluk noktalarıyla çevrelenmiş olup ısı enerjisinin, deformasyon enerjisini aştığı oranda başka bir konuma atlar. Bu şekilde arayer atomlarının kafes yapısında başka bir arayer noktasına geçişi ile gerçekleşen difüzyona arayer difüzyonu denilmektedir. Şekil 3.3'te arayer difüzyon mekanizmasının şematik resim ve serbest enerji değişimi verilmiştir (Fidan, 2006).

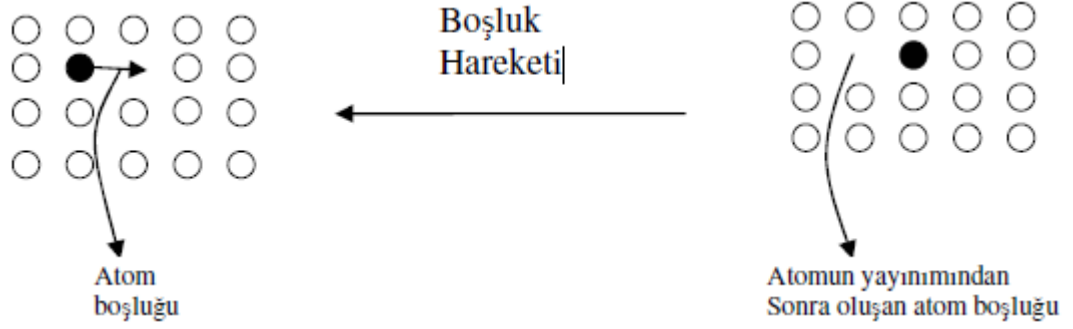


Şekil 3.3 Arayer difüzyon mekanizmasının resmi ve serbest enerji değişimi (Fidan, 2006)

3.1.2.2 Boşluk difüzyon mekanizması

Kristal kafes içinde bir atom boşluğu var ise komşu atomlardan biri yerini terk ederek bu boşluğun yerine geçer. Böylece hareket eden atomun yeri ise boş kalır.

Kristal kafes içinde atomların yapmış olduğu bu hareketlere boşluk difüzyon mekanizması denir. Boşluk difüzyon mekanizmasının gösterimi Şekil 3.4’de verilmiştir (Fidan, 2006).



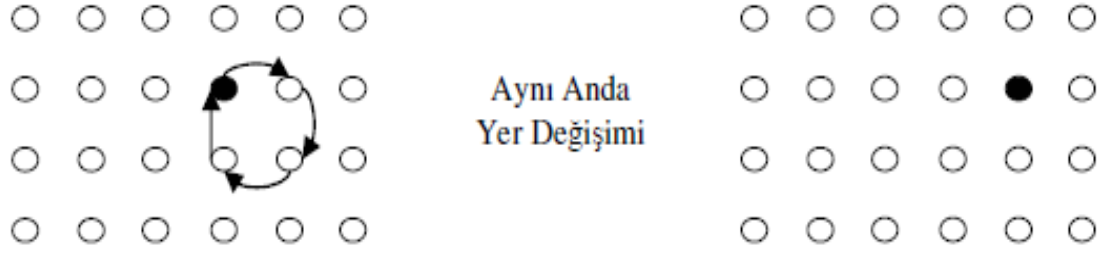
Şekil 3.4 Boşluk difüzyon mekanizmasının gösterimi (Fidan, 2006)

Boşluk difüzyonunun mekanizmasının gerçekleşebilmesi için aşağıda yazılan maddelerin olması gerekir:

- Atomların çap farkı %15’ten düşük olmalı,
- Aynı kristal yapıya sahip malzemeler olmalı,
- Elektronegatiflik farkının küçük olması,
- Valans elektronların eşit olması gerekir (Fidan, 2006).

3.1.2.3 Halka difüzyon mekanizması

Metallerde nadir de olsa bir diğerk difüzyon mekanizması ise, halka difüzyonudur. Kristal kafes içerisinde temasta bulunan atomların, aynı zamanda ve yönde hareket etmeleriyle birbirlerinin yerine ve yeni konumlarına geçişleri olarak tanımlanabilir. Şekil 3.5’de halka difüzyon mekanizmasında atomların geçişi gösterilmiştir (Fidan, 2006).



Şekil 3.5 Halka difüzyon mekanizmasında atomların geçişi (Fidan, 2006)

3.1.2.4 Karşılıklı yer değiştirme mekanizması

İki atomun karşılıklı olarak doğrudan yer değiştirme olasılığı enerji nedeniyle düşüktür (Şekil 3.6). Metallerin içyapısında bulunan hataların yüksek olduğundan gerekli de değildir. Bu durumun nedeni her bir atomun iki atom çapı kadar ilerleyebilmesidir (Fidan, 2006).



Şekil 3.6 Karşılıklı yer değiştirme mekanizması (Fidan, 2006)

3.2 Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağı, aynı ya da farklı iki malzemenin ergitilmeden katı yüzeyleri arasında gerçekleşen bir birleştirme yöntemidir (Özdemir, 2007).

Difüzyon kaynağı, malzemelerin ergime noktalarının altındaki sıcaklıklarda plastik akma oluşmadan basınç altında yapılan, metalurjik bir bağ oluşuncaya kadar malzeme özelliklerini bozmadan uygulanan bir kaynak yöntemidir. İki malzeme arasındaki ara yüzeyde uygulanan ergiyen bir ara tabaka kullanıldığında buna da sıvı faz difüzyon kaynağı denilmektedir (Özdemir, 2007).

Difüzyon kaynağının ilk aşaması, birleştirilen parçaların koruyucu atmosfer altında ısıtılması ve basma kuvvetine tabi tutulmasıdır. İkinci aşamada kaynak bölgesinde atomların bir yüzeyden diğerine yayınması ve bir bağın oluşmasıdır. Difüzyon

kaynağında bağ oluşumu için yüzeylerin birbiri ile teması gereklidir (Özdemir, 2007).

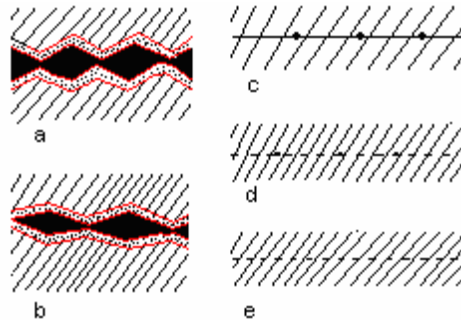
Difüzyon kaynak işlemi 4 aşamada gerçekleşir. Bunlar:

- Pürüzlü yüzeydeki noktaların teması,
- Deformasyon oluşumu ve sınır tabaka oluşumu,
- Tane sınırlarının hareket etmesi,
- Yüzeydeki boşlukların yok oluşu (Özdemir, 2007).

Difüzyon kaynak yöntemi aşağıdaki gibi gerçekleşir.

- Basınç altında plastik deformasyon,
- Sürünme deformasyonu,
- Difüzyon işlemi,
- Yeniden kristalleşme ile tane sınırlarının kayması (Özdemir, 2007).

Farklı metal veya alaşımların difüzyon kaynağında ara tabaka kullanılır. Kullanılan ara tabakaların görevi kaynak bölgesinde homojenliği sağlayarak kaynak işlemini kolaylaştırmaktır. İnce folyo, püskürtme veya elektrolitik kaplama şeklinde ara tabakalar mevcuttur (Özdemir, 2007).



Şekil 3.7 Difüzyon kaynak sistemleri (Özdemir, 2007)

3.3 Difüzyon Kaynak Yöntemleri

Günümüzde difüzyon kaynağı, genellikle bilimsel çalışmalar ve bir parçayı üretmek için yapılmaktadır. Difüzyon kaynağı ara tabakada ilave malzeme kullanılıp kullanılmamasına göre de aşağıdaki gibi sınıflandırılır (Atasoy, 2007).

1. Difüzyon lehimleme (Ara tabaka kullanılan),

a- Tek ara tabaka kullanılarak,

b- Birden çok ara tabaka kullanılarak,

2. Ani sıvı faz difüzyon kaynağı

3. Direkt difüzyon kaynağı.

Difüzyonla lehimleme yönteminde ergime sıcaklığı ana malzemelerinkinden daha düşük olan ilave malzemeler kullanılır. Ani sıvı faz kaynağı ise malzemenin hızlı bir şekilde ısıtılmasıyla, yüzeylerin bir ya da ikisinin basınç altında, çok kısa bir süre için ergitilip hızla soğutulduğu bir yöntemdir (Atasoy, 2007).

Difüzyon kaynak işlemi koruyucu gaz atmosferi altında ve vakum altında olmak üzere ikiye ayrılır (Atasoy, 2007).

Difüzyon kaynak işlemi kısaca hava, soy gaz ve vakumlu kaynak atmosferinde, basınç olarak mekanik, hidrolik, sabit yüklemeli ya da diferansiyel termal genleşme şeklinde uygulanabilmektedir. Isıtma sistemi olarak dirençle ya da endüksiyonla ısıtma şeklinde yapılabilmektedir (Atasoy, 2007).

3.4 Difüzyon Kaynak Çeşitleri

3.4.1 Katı Hal Difüzyon Kaynağı

Bu yöntemde kaynak işlemi vakum ya da soy gazlar (argon, helyum) gibi koruyucu bir atmosfer ortamında yapılır. Kaynak işlemi için gereken ısı radyasyon, rezistans ya

da indüksiyon akımı ile sağlanır. Kaynak yapılacak paçalara kuvvet, tek eksenli ya da izostatik şekilde uygulanır. Kaynak işlemi zor olan malzemelerde örneğin metal ve seramik malzemelerin kaynağında bir veya birkaç ara tabaka kullanılabilir (Atasoy, 2007).

3.4.2 Sıvı Hal Difüzyon Kaynağı ve Difüzyon Lehimleme

Bu yöntemler sadece farklı malzemelerin birleştirilmesinde ya da farklı malzemelerin ara tabaka olarak kullanılarak yapılan birleştirmelerinde uygulanabilir. Kaynak işleminde sıcaklık değeri, oluşacak fazı sıvı hale getirecek şekilde seçilir. Böylece sıvılaştıran ara tabaka daha iyi bir difüzyon sağlar veya yüzeyde mikro deformasyon oluşturur (Atasoy, 2007).

3.4.3 Süperplastik Şekil Verme ve Difüzyon Kaynağı Kombinasyonu

Bu kaynak yöntemi; belirli bir basınçta, yüksek sıcaklıklarda ve süperplastik özellik gösteren Ti ve alaşımlarında piyasada yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan titanyumun difüzyon kaynağındaki uygulama kolaylığından yararlanarak süperplastik şekil verme ve difüzyon kaynağı yönteminin birleşmesi ile hafif petek panellerin üretiminde kullanılmaktadır (Atasoy, 2007).

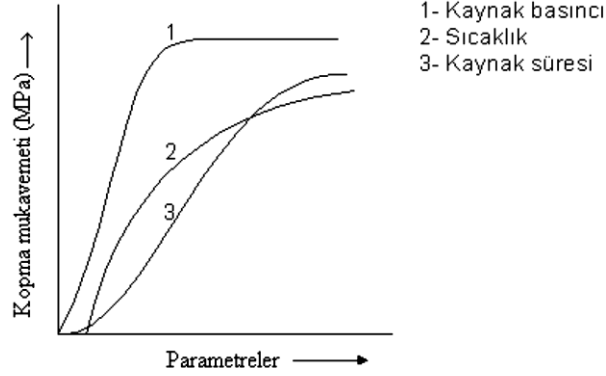
3.5 Difüzyon Kaynağına Etki Eden Faktörler

- 1- Kaynak işlemi sırasında oluşan ısı, süre, basınç, yüzey pürüzlülüğü ve uygun atmosfer ortamı,
- 2- Kaynak işlemi yapılacak malzemelerin fiziksel ve kimyasal yapıları,
- 3- Kaynak işlemi yapılacak malzemelerin metalurjik durumları (Özdemir, 2007).

3.5.1 Kaynak Sıcaklığı

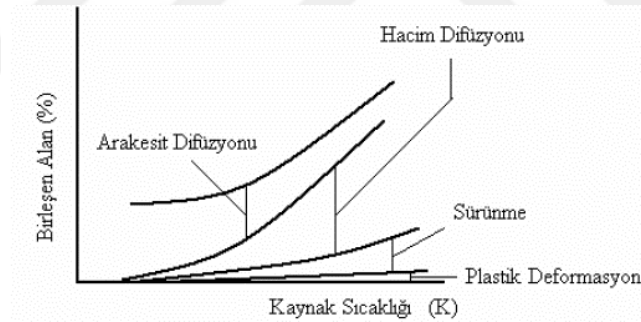
Kaynak işleminde seçilen sıcaklık değeri, kısaca difüzyon işleminin gerçekleşmesini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Kaynak sıcaklığı arttıkça ana

malzemede akma gerilmeleri azalır, plastik deformasyon ve yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır. Böylece nüfuziyet için gerekli süre kısalmır (Özdemir, 2007).



Şekil 3.8 Difüzyon kaynağında seçilen basıncı, sıcaklık ve sürenin kopma mukavemetine etkisi (Özdemir, 2007)

Difüzyon kaynağında seçilen sıcaklık değeri malzemenin ergime sıcaklığından daha küçüktür. Burada sıcaklık değerinin yüksek, sabit ve dengeli olarak uygulanması gerekir (Özdemir, 2007).



Şekil 3.9 Kaynak sıcaklığının birleşen alan üstündeki etkisi (Özdemir, 2007)

3.5.2 Yüzey Şartları

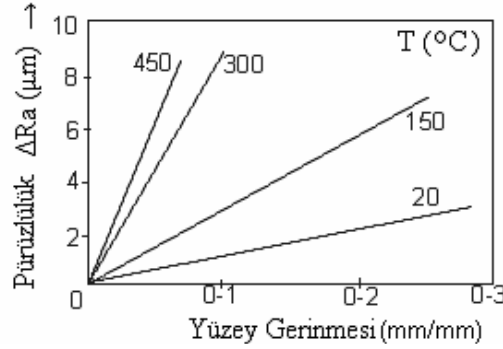
Mükemmel bir difüzyon kaynağı için gerekli yüzey ortamı aşağıda sıralanmıştır.

1. Yüzey pürüzlülüğü,
2. Yüzey filmleri,
3. Yüzey artıkları (Özdemir, 2007).

Difüzyon kaynağında yüzey pürüzlülüğü, iyi bir kaynak işlemi için gereklidir (Özdemir, 2007). Oluşan yüzey pürüzleri ilk aşama sonundaki kalıntı gözeneklerin nedenidir. Sıcaklık ve deformasyon miktarı arttıkça yüzey pürüzlülük oranı da artar. Aşağıda verilen Şekil 3.10 ve 3.11’de yüzey unsurları ve yüzey pürüzlülüğünün sıcaklıkla bağlantısı gösterilmektedir (Özdemir, 2007).



Şekil 3.10 Yüzey Unsurları (Özdemir, 2007)

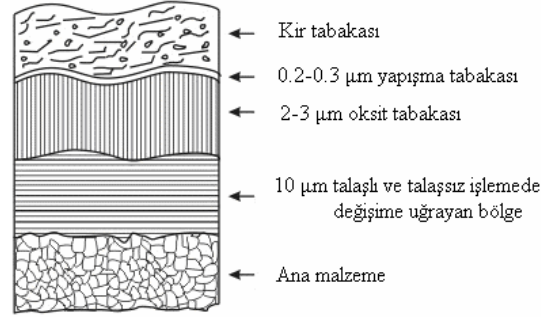


Şekil 3.11 Yüzey pürüzlülüğü ve deformasyonun sıcaklığa göre değişimi (Özdemir, 2007)

Kaynak yapılacak yüzeylerin öncelikle kir ve oksit artıklarından temizlenmesi gerekir. Bu yüzden kaynak işleminin vakum ya da soy gaz atmosferinde yapılması önemlidir.

Difüzyon kaynak işlemini olumsuz etkileyen unsurlar iki grupta aşağıda verilmiştir (Özdemir, 2007).

- 1- Yüzeydeki oksit tabakası,
- 2- Yüzeyde veya malzeme içinde bulunan yağ, kir, toz gibi organik- inorganik tabakalar.



Şekil 3.12 Üst yüzey tabakaları (Özdemir, 2007)

3.5.3 Kaynak Basıncı

Difüzyon kaynağında belirlenen basınç değeri, kaynak olacak yüzeyler arasında difüzyon işlemini gerçekleştiren önemli bir parametredir. Uygulanan basıncın difüzyon kaynak işlemine etkileri aşağıda sıralanmıştır (Özdemir, 2007).

1. Yüzey pürüzlülüğü ile plastik deformasyona yardımcı olur.
2. Yüzeydeki oksitlerin parçalanmasını sağlar.
3. Atomlar arası mesafeyi yakınlaştırarak birleşmeyi kolaylaştırır.
4. Difüzyon oluşması için kimyasal bağlantı sağlar (Özdemir, 2007).

Difüzyon kaynak işleminde uygulanan basınç seçiminde dikkat edilecek hususlar da aşağıda sıralanmıştır.

1. Optimum basınç değeri seçilmelidir. Kaynak işleminin gerçekleşmesi için gerekli plastik deformasyonu oluşturacak kadar büyük, fakat makroskopik deformasyona ulaşmayacak şekilde olmalıdır.
2. Seçilen basınç plastik deformasyonu minimumda, akma gerilmesini düşük şekilde tutmalıdır (Özdemir, 2007).

3.5.4 Kaynak Süresi

Difüzyon kaynağında gerekli olan süre; seçilen sıcaklık, basınç ve birleşme şekli ile bağlantılıdır. Sıcaklık ve basınç arttığında süre kısalır. Bir kaynak işleminde basıncı ve sıcaklığı sabit tutup kaynak süresini uzatarak kaynak mukavemetinin bir yere kadar arttığı görülmüştür.

Normal şartlarda süre uzadıkça süper plastik şekillenme performansı, kaynak mukavemeti gibi parametreler olumsuz etkilenmektedir. Ancak kaynak işlemi süresini kısa tutmak endüstriyel çalışmalarda ekonomik olması açısından tercih edilmektedir (Özdemir, 2007).

3.5.5 Kaynak Ortamı

Difüzyon kaynak işleminde iyi sonuçlar almak için kaynak ortamına koruyucu bir atmosfer ya da vakum ilave etmek gerekir. Koruyucu gaz olarak argon, helyum veya azot gibi soy gazlar tercih edilebilir. Oksijen miktarını kaynak ortamında azaltmak için hidrojen gazı da kullanılabilir, ancak hidrojen titanyum, zirkonyum, niyobyum ve tantal gibi elementlerle bileşik oluşturabilir. Kararlı oksitlere karşı sahip malzemelerde vakum sistemi tercih edilebilir (Özdemir, 2007).

3.6 Difüzyon Kaynak Yöntemlerinin Endüstrideki Kullanım Alanları

Difüzyon kaynak yöntemi düz yüzeyli parçalara bindirme ve konik birleştirme, alın ve bindirme konumunda, silindirik şekilli parçalara konik birleştirme yöntemi ile yapılabilir. Silindir şekilli yüzeylere bindirme konumunda kaynak işlemi yapılabilir. Bu durum Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Ayrıca özel ya da karışık şekilli parçalara da Şekil 3.14'te görüldüğü gibi kaynak işlemi yapılabilir (Özdemir, 2007).

Difüzyon kaynağının endüstrideki uygulama alanlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

1. Nükleer enerji endüstrisinde,
2. Havacılık ve uzay endüstrisinde,

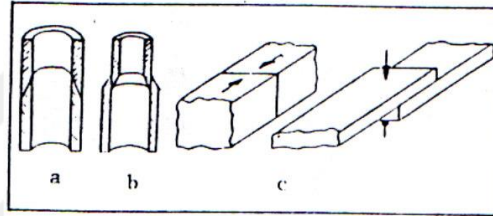
3. Savunma ve silah endüstrisinde,

4. Mühendislik uygulamalarında,

5. Elektrik-elektronik endüstrisinde

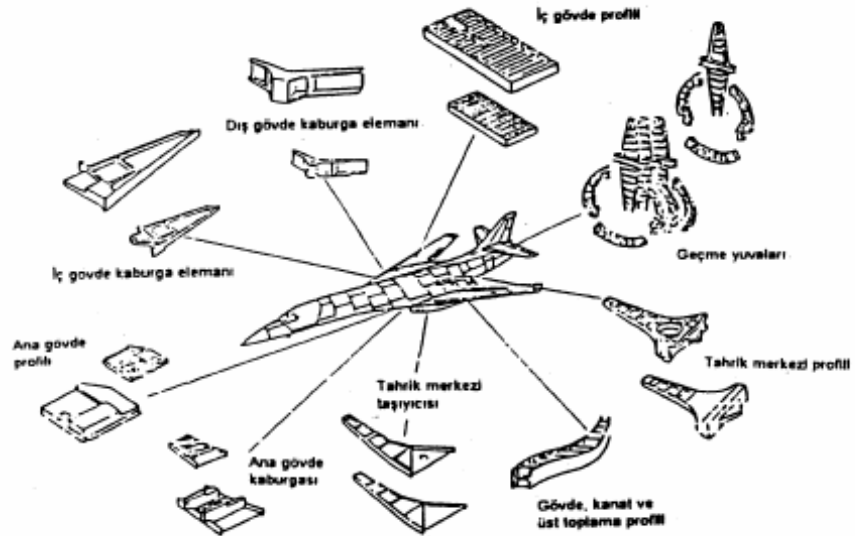
6. Kompozit malzeme uygulama alanlarında (Özdemir, 2007).

Ayrıca difüzyon kaynak yöntemi yüzeylerin kaplanmasında, karmaşık yapılı ve içi boş parça üretiminde, döküm ve dövme endüstrisinde avantajlı bir şekilde tercih edilmektedir (Özdemir, 2007).



A: Konik şekilli B: Silindirik şekilli C: Düz şekilli

Şekil 3.13 Difüzyon kaynağının uygulama şekilleri (Atasoy, 2007)



Şekil 3.14 Uçak imalatında difüzyon kaynağı yapılan parçalar (Atasoy, 2007)

3.7 Difüzyon Kaynağı Uygulanan Malzemeler

Aynı veya farklı malzemeler bu yöntem ile kaynak edilebilmektedir. Bu yöntem özellikle, metal matrisli kompozit malzemelerin kaynağında yoğunlukla kullanılmaktadır (Atasoy, 2007).

3.8 Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Yöntemleriyle Karşılaştırılması

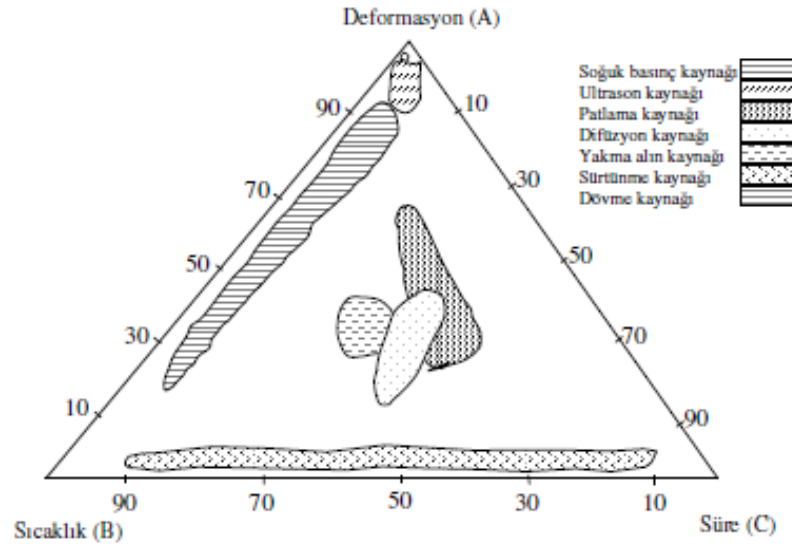
Difüzyon kaynak yönteminin bazı avantajları şunlardır:

1. Bu yöntemde deformasyon, ön tavlama, son tavlama gibi durumlar görülmez.
2. Bu yöntemle, metal olan olmayan malzemelerin kaynağı yapılabilir.
3. Kolaylıkla geniş alanlı ve karmaşık şekilli parçalar kaynak yapılabilir.
4. Uzay ortamında kaynak yapılabilir.
5. Kaynak işleminde istenmeyen metalurjik özellikler görünmez.
6. Kompozit ve seramik malzemelerin kaynağında ve bilimsel çalışmalarda günümüzde yoğunlukla uygulanan bir yöntemdir (Özdemir, 2007).

Difüzyon kaynak yönteminin bazı dezavantajları şunlardır:

1. Kaynak uygulamaları için özel şartlar ve parçalar gerektirir.
2. Pahalı bir yöntemdir (Özdemir, 2007).

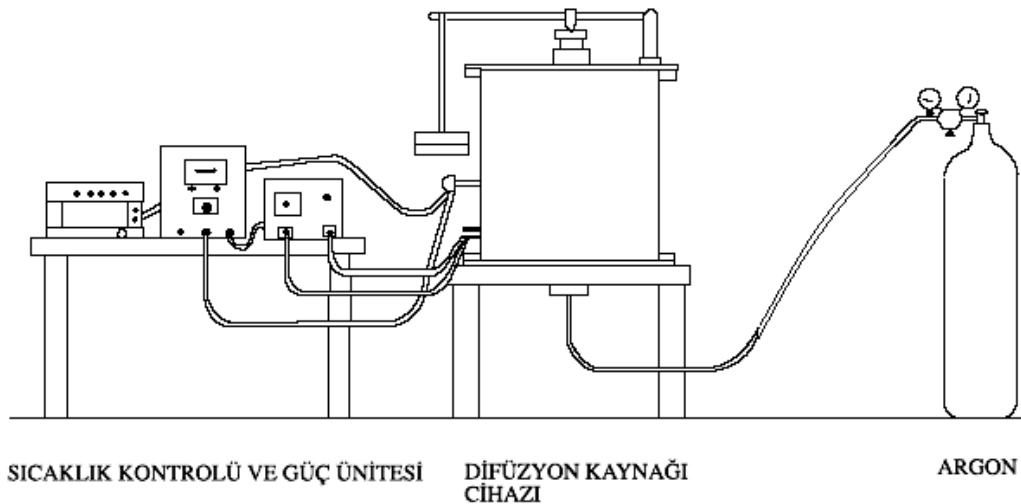
Difüzyon kaynak yönteminde çok yüksek değerlerde kaynak birleşmesi sağlanabilir. Kaynak verimliliğinin bağlı olduğu sıcaklık, basınç ve süre açısından değerlendirilmesi Şekil 3.15'de gösterilmiştir (Atasoy, 2007).



Şekil 3.15 Difüzyon kaynak uygulamasının ısı, deformasyon ve süre açısından değerlendirilmesi (Atasoy, 2007).

3.9 Difüzyon Kaynağında Kullanılan Özel Ekipmanlar

Difüzyon kaynağında ısı ve basınç uygulamasını gerektirdiğinden, parçanın sekline ölçülerine ve istenen atmosfer tipiyle sıcaklığına bağlı olarak bir takım özel ekipmanlar gerektirir. Difüzyon kaynağı diğer yöntemlerle kıyaslandığında cihaz ve donanım olarak farklılık göstermektedir. Kaynak işlemi yapılacak malzeme türlerine ve parça boyutlarına göre farklı sıcaklık, basınç ve kaynak atmosferleri kullanılabilir. Aşağıda Şekil 3.16’da difüzyon kaynak makinası ve donanımları gösterilmiştir (Atasoy, 2007).



Şekil 3.16 Difüzyon kaynak makinası ve donanımlarının şematik resmi (Fidan, 2006)

Kaynak; vakumda, koruyucu gaz atmosferinde veya son zamanlarda tuz banyosunda yapılmaktadır. Koruyucu hücre, sabit bir fırın veya genellikle az karbonlu çelik ya da 304 tipi paslanmaz çelik gibi uygun bir alaşımdan yapılmış pota olabilir. Temas yüzeylerine uygulanan yük; gaz basıncı, hidrolik pres, hadde ruloları veya özel düzenlenmiş mekanik sıkma araçları vasıtası ile sağlanabilir. Kaynak işlemi için sıcaklık fırın içinde yüksek frekanslı indüksiyon yöntemi ya da direnç ısıtma yöntemiyle gerçekleştirilir (Atasoy, 2007).



4. TAGUCHİ METODU VE OPTİMİZASYONU

4.1 Taguchi Metodu

Kaynak parametrelerinin daha verimli bir şekilde seçilmesini sağlamak, harcanan zamanı ve malzemeyi azaltmak için Taguchi metodu alternatif bir yaklaşım olarak devreye girmektedir.

Temel olarak Taguchi metodu, yüksek kalite sistemleri için güçlü bir yöntemdir. Maliyet, kalite ve performans tasarımlarını optimize etmek için basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Taguchi son yıllarda çok geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Taguchi metodu, bir ürün ya da prosesin mühendislik optimizasyonunu; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı gibi üç adımlık bir yaklaşım içerisinde çözebilmeyi amaçlamaktadır (Ada, 2017).

Klasik deney tasarım yöntemlerinin kullanımı endüstriyel şartlar altında verimli olamamaktadır. Sistemi etkileyen faktörlerin sayısı arttıkça gerekli olan deney sayısı da hızlı bir şekilde artmakta, maliyetler yükselmekte, uygulamalar zorlaşmaktadır. Böyle durumlarda kesirli faktöriyel tasarım olan Taguchi Metodu (TM) uygulanması daha verimli ve kolay olacaktır. Karar vermeyi gerektiren birçok durumda da TM başarı ile uygulanabilmektedir (Şeker, 2013).

Taguchi yönteminin esas amacı; hedef değer etrafındaki değişkenliğin azaltılmasıdır. Temeli deney tasarımına dayanmaktadır. Bu yöntem, kesirli faktöriyel deney tasarımı yöntemine, robust tasarım ve ortogonal diziler gibi kavramları eklemektedir. Taguchi Deney Tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. S/N oranı değeri küçük olan değer iyi, büyük olan değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerlerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir (Şeker, 2013).

Diğer önemli bir nokta ise deney tasarımının dengeli olmasıdır, yani faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirebilmesini sağlaması ve bunun içinde tasarımda faktörlerin farklı seviyeleri için her test edilen şart altında eşit sayıda

örnekleme yapılmasıdır. Taguchi'nin standart tasarımları bu sistem üzerine kurulmuştur (Ross, 1996).

4.1.1 Taguchi yönteminin gelişimi

Dr. Taguchi, Ronald Fisher'in geliştirdiği deney tasarımı yöntemine kattığı yeniliklerle, ikinci dünya savaşı sonrasında Japonya'daki en önemli projelerden birisi olan Japon telefon sisteminin geliştirilmesi projesinde yaptığı çalışmalarda başarıyla adını dünyaya duyurmuştur. Projenin amacı ABD'deki AT&T Bell telefon şirketinin laboratuvarlarında kullanılan iletişim sisteminin aynısını Japonya'ya kurmaktır. Ancak Nippon telefon ve telgraf araştırma merkezinin büyüklüğü AT&T'nin % 2'si kadar olduğundan projenin bitirilmesinin yaklaşık 20 yıl süreceği tahmin ediliyordu. Dr. Taguchi robust tasarım ve kesirli faktöriyel tasarım yöntemlerinin kullanılmasını önererek projenin sadece 4 yılda bitirilmesini sağlamıştır. Robust tasarımı geliştiren ve birçok ürünün geliştirilmesinde kullanan Taguchi 1962'de kalite alanında en önemli ödüllerden biri olarak kabul edilen Deming ödülüne layık görülmüştür (Ada, 2017).

4.1.2 Taguchi'nin kayıp fonksiyonu

Taguchi'nin kalite felsefesinin dayandığı temel nokta kayıp fonksiyonudur. Kayıp fonksiyonu, ürünlerdeki kalitesizlikten dolayı meydana gelen tüketici memnuniyetsizliğinin derecesini belirleyen sürekli bir fonksiyondur (Bayrak, 1996).

Performans karakteristiği Y olan bir ürünün herhangi bir tüketiciye vermiş olduğu kayıpların parasal değeri $L(Y)$ ile gösterilir ve Y 'nin kayıp fonksiyonu olarak adlandırılır (Peace, 1992).

$$L = k(Y - m)^2 \quad (4.1)$$

Burada k , hedeften sapan bir birim ürünü tekrar hedef değerine getirebilmek için üreticinin alacağı önlemlerin birim maliyetini gösterir. Hedeflerin her iki yönde olacak uzaklaşmalarının aynı anlamı taşıdığı dikkate alındığında eşitlik 4.2 yazılabilir (Şeker, 2013).

$$L m + \Delta = k m - \Delta - m^2 \quad A = k. \Delta^2 \quad (4.2)$$

Buradan,

$$k = \frac{A}{\Delta^2} \quad (4.3)$$

Kayıp fonksiyonunun biçimi, performans karakteristiği (Y)'nin özelliğine göre belirlenir. Y'nin özelliğine göre kullanılan kayıp fonksiyonları bazı durumlarda simetrik, bazı durumlarda simetrik olmayan bir yapı gösterir. Taguchi'nin geliştirdiği farklı amaca uygun üç fonksiyon vardır. Bunlar;

Performans karakteristiği adı verilen sonucun en düşük en iyi olduğu durumda:

$$S_N = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \quad (4.4)$$

En büyük en iyi olduğu durumda:

$$S_N = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (4.5)$$

Nominal en iyi olduğu durumda;

$$S_N = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{s^2} \quad (4.6)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i \quad (4.7)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n y_i^2 - \bar{y}^2 \quad (4.8)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.9)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.10)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n y_i^2 - \bar{y}^2 \quad (4.11)$$

Burada y_i = Performans karakteristiğini i : gözlem değeri, n = 1 denemede test sayısı = gözlem değerlerinin ortalaması S^2 = Gözlem değerlerinin varyansı olup S/N oranı büyüdükçe hedef etrafında ürün varyansı küçülür (Şeker, 2013).

4.1.3 Çevrim içi kalite kontrol

Üretimine başlanan ürünün, muayene yöntemleri ile kalitesinin sağlanmaya çalışılması aşamasıdır. Bu kontrol çalışmaları sırasında istenilen spesifikasyon değerleri dışında kalan ürünlerin ayıklanarak, ıskartaya ayrılması veya düzeltme işlemlerine tabii tutulması aşamasıdır. Aynı zamanda müşteriye iletdikten sonra kusurlu olarak geri gelen ürünün servis ve bakım aşamasıdır (Şanyılmaz, 2006).

Ürünün imalatına geçilmesinden sonra çevrim içi kalite kontrol başlar. Çevrim içi kalite kontrol, Ürünün imalatı sırasındaki ve imalatı sonrasındaki kalite geliştirme faaliyetleridir. İstatistiksel proses kontrol ve çeşitli muayeneler bu kalite kontrol faaliyetleri içerisinde (Şirvancı, 1997).

4.1.4 Çevrim dışı kalite kontrol

Yeni geliştirilen bir ürün için pazar araştırması ile ürün veya üretim prosesinin geliştirilmesi, var olan bir kalite probleminin çözümü için ise problemin tespiti ve problemin ortadan kaldırılması sırasında gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içermektedir. Bu faaliyetler ürüne doğrudan müdahaleler yerine, üretim başlamadan önce gerçekleştirilen tasarım faaliyetleridir (Şirvancı, 1997).

Sistem tasarımı aşaması Taguchi Metodunun ilk adımını oluşturmaktadır. Sistem tasarımıdaki temel amaç, müşteri ihtiyaçları ve işletmenin yeteneklerini kullanarak üretim sürecindeki spesifikasyonlar ve toleranslar temelinde en küçük maliyetle gerçekleştirilecek mamul üretimini tasarlamaktır. Bu aşamada tasarımcı tarafından üründen beklenen fonksiyonların elde edilebilmesi için gerekli olan üretim teknolojileri tasarlanır ve ürün için en uygun olanı seçilir. Fakat bu işlemler tam

müşteri tatminini sağlayacak olan hedef değerden minimum sapma ile yapılmalıdır. Üretilmesi düşünülen ürünle ilgili olarak öncelikle mevcut pazarın tanımlanması, yeniliklerin değerlendirilmesi, bilimsel ve mühendislik bilgilerinin toplanması, malzeme ve ekipmanla ilgili gerekli tercihlerin yapılması bu aşamanın konusunu oluşturur. Ayrıca bu aşamada ürün ağacındaki parçaların, malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesinde gerekli olan karakteristiklere ilişkin bir takım kararlar verilir. Bu adımda iyileştirme yapılacak süreç çok iyi kavranmalı ve ihtiyaçlar net olarak ortaya konmalıdır (Çakıroğlu, 2011).

Taguchi Metodunun ikinci adımı olan parametre tasarımı hem ürün hem de süreç tasarımı için ürün kalitesini iyileştirmede en belirleyici çalışmaların yapıldığı aşamadır (Çakıroğlu, 2011).

Ürün parametre tasarımı, ürün parametreleri, malzeme formülasyon değerleri, çeşitli boyutlar, yüzey örnekleri gibi kriterlerin optimal değerlerinin belirlenmesi anlamına gelmektedir. Ürün parametre tasarımı ve süreç parametre tasarımında amaç, üründe ve süreçte, varyasyon (hedef değerden farklılık yani kalitesizlik) yaratan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin değerlerini optimal seçerek, ürün ve süreçteki varyasyonu en aza indirmektir. Taguchi bu amaçla gerçekleştirilen ürün ve süreç tasarımına sağlam (robust) tasarım demektedir. Burada belirtilen sağlam tasarım, kontrol edilemeyen nem, toz, ısı, gibi çevre koşullarına, müşteri kullanımındaki farklı uygulamalara ve malzemedeki farklılıklara karşı duyarsız ürün ve süreç tasarımı anlamında kullanılmaktadır. Sağlam tasarımda, kalitesizlik yaratan ve kontrol edilemeyen bir faktörün etkisi, kontrol edilebilen başka faktörlerin ayarlanması sonucu azaltılmaktadır. Deney tasarımı bu amaçla kullanıldığı zaman, maliyeti arttırmadan kaliteyi geliştirmek mümkün olmaktadır (Şirvancı, 1997).

Ürün ve süreç parametre tasarım aşamalarında, optimal değerlerinin belirlenmesi gereken birbiriyle ilişkili çok sayıda kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktör vardır. Bu faktörlerin, ürün ve ürünün performansına olan etkilerinin belirlenebilmesi için en etkin yöntem istatistiksel deney tasarımı yöntemidir. Deney tasarımı aracılığıyla bir çok faktörün ürün üzerindeki etkisini ekonomik olarak belirlemek ve

varyasyon yaratan faktörlere karşı önlemleri tasarım aşamasında almak mümkün olmaktadır (Şirvancı, 1997).

Tolerans tasarımında parametre belirleme çalışmaları, sonucu istenilen hedefe ulaşamadığı durumda yapılan ilave çalışmalardan ibarettir. Bu aşamada gözlenen değerlerden faydalanılarak ürünün hedef değerden sapma göstermesinin getirdiği kayıplar bulunur ve bu sapmalar azaltılır (Şeker, 2013).

Üretim sürecindeki değişimler olabildiğince azaltılsa bile amaç hala hedef değere ulaşmaktır. Ne yazık ki bazı durumlarda değişkenlik çok büyük olmakta ve değişkenliği düşürmek için toleransların küçültülmesi gerekmektedir. Tipik olarak her bir kontrol parametresinin yaklaşık olarak katkısını belirleyebilmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmakta böylece tolerans daraltmada, gelişmiş malzeme kullanma durumunda veya diğer yüksek maliyetle kaliteyi geliştirmeye degecek faktörler tanımlanmış olmaktadır. Üretici daha düşük malzeme özellikleri kullanarak bir üründen daha fazla kar elde etmek amacıyla ürün karakteristiklerinin tolerans limitlerinin uç noktalarına yaklaşılmasına izin vermemelidir. Tasarım parametreleri seçilirken toplam ürün maliyeti ile müşteri maliyetinin toplamı göz önüne alınmalıdır. Tolerans değerleri, ürün karakteristiklerinin hedef değerden olan sapmalarının oluşturduğu toplumsal kayıpla, ürün karakteristiklerinin tolerans dışına çıktığında üreticinin bunu düzeltmek amacıyla yaptığı harcamaları dengeleyecek bir biçimde seçilir. Toleransların uygun seçilmesi önemli bir ekonomik konu olması kadar önemli bir kalite konusudur (Koç, 2003).

Tolerans tasarımında üç tür kalite değişkeni vardır;

-En büyük en iyi: Bu tip tolerans çalışmalarında kalite değişkeninin bir üst sınırı yoktur ve dolayısıyla hedef değer de yoktur. Ölçü büyüdükçe verimlilik de artacaktır.

-En küçük en iyi: Bu tip toleranslar üretim sürecindeki hurda yüzdesi gibi amaç değerinin sıfır olduğu toleranslardır. Tolerans azaldıkça sistemin verimliliği artacaktır.

-Hedef değer en iyi: Sapmaların iki yönde de oluşabildiği tolerans tipidir.

Tolerans tasarımı kalite geliştirme sürecinin bir adımı olmasının yanında aynı zamanda bir kalite değerlendirme faaliyetidir (Çakıroğlu, 2011).

4.1.5 Taguchi'nin sinyal/gürültü (S/N) oranları

Taguchi, varyasyonu azaltmak amacıyla deney tasarımında performans kriteri olarak kullanılmak üzere, sinyal/gürültü oranı olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir. Taguchi, uygulamadaki problemleri hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir S/N oranı tanımlamıştır (Çakıroğlu, 2011).

En Küçük - En İyi

Bu tür problemlerde, kalite değişkeni y 'nin hedef değeri sıfırdır. Bu durumda sinyal/gürültü oranı şöyle tanımlanabilir.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t^2 \right) \quad (4.12)$$

En Büyük - En İyi

Bu durumda y 'nin hedef değeri sonsuzdur ve sinyal/gürültü oranı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{1}{y_t^2} \right) \quad (4.13)$$

Hedef Değer - En İyi

Bu tür problemlerde, y için belli bir hedef değer (örneğin, ürün boyutları gibi) verilmiştir. Bu durumda,

$$\frac{S}{N} = 10 \log(\mu^2 / \sigma^2) \quad (4.14)$$

Her üç tip problemde de, amaç S/N oranını maksimize etmektir. Taguchi'ye göre, S/N oranlarının maksimize edilmesi, bir yandan sinyali arttırırken, diğer yandan da değişkenliği azaltmaktadır (Çakıroğlu, 2011).

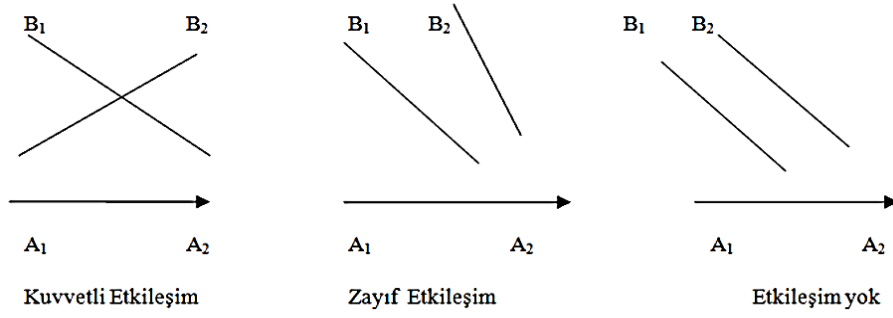
4.1.6 Taguchi deney tasarımı aşamaları

Taguchi'nin deneysel tasarım adımları; değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerin seçilmesi, faktör düzeylerinin seçilmesi, uygun ortogonal düzenin seçilmesi, faktör veya etkileşimlerin kolonlara atanması, testlerin yapılması, sonuçların analiz edilmesi, doğrulama deneylerinin yapılması (Anagün, 1997).

Var olan problemin çözümüne ilişkin amaç ortaya konduktan sonra, klasik tasarımda olduğu gibi, beyin fırtınası, süreç akış şeması ve sebep-sonuç diyagramı gibi yöntem ve teknikler kullanılarak değerlendirmeye alınacak faktör veya etkileşimler seçilmektedir (Şeker, 2013).

Faktör düzeylerinin seçilmesi işlemi performans karakteristiğini etkileyen faktörler belirlendikten sonra bu faktörlerin düzey sayısı belirlenmektedir. Faktörlerin seviyeleri iki, üç veya daha çok olabilmektedir. Faktör seviyeleri serbestlik dereceleriyle ilişkili bir fonksiyondur. Serbestlik derecesi, faktör seviyelerinden hareketle hesaplanmaktadır. Serbestlik derecesi, deneyin büyüklüğünü tespit etmek açısından önemlidir. Bir faktörün serbestlik seviyesi, o faktörün seviyesinin bir eksiğidir. Ayrıca, faktörlerin bireysel etkilerinin yanı sıra faktörler arası oluşan etkileşimler de belirlenir (Şeker, 2013).

İki faktörün etkileşimli olması, bir faktörün (örneğin A), kalite değişkenine olan etkisi, diğer faktörün (örneğin B) hangi değerde bulunduğuna bağlıdır. Bu durum AXB olarak gösterilir. Etkileşimli faktörlerin bulunduğu durumlarda, etkileşimlerde faktör gibi kabul edilerek diziye atanmaktadır (Ross, 1996).



Şekil 4.1 Etkileşim grafik gösterimi

Ortogonal dizinin kullanımı sadece Taguchi'ye mahsus değildir. Ancak Taguchi, kullanımları basitleştirmiştir. Ortogonal dizinin ilk kullanılması, 1910'lu yıllarda, İngiltere'de Fisher tarafından olmuştur. Ortogonal dizi, dengelenmiş dizi anlamında kullanılmaktadır (Çakıroğlu, 2011).

Taguchi, çok sayıda deneysel durumu açıklamak için ortogonal dizileri oluşturmuştur. Ortogonal dizinin en önemli özelliği, birçok faktörün en az sayıda test edilmesi ve faktör seviyelerini eş zamanlı olarak değiştirme yapmaya olanak sağlamasıdır. Ortogonal diziler problemin özelliğine göre, 2 kademeli, 3 kademeli, 2 ve 3 kademeli olarak belirlenmektedir. Ortogonal dizilere tasarım matrisi de denilmektedir. Genel gösterimi;

d: Toplam deney sayısı,

a: Faktörlerin düzey sayısı

k: Faktör sayısı

L: Ortogonal dizini olmak üzere,

$$L_d(a)^k \text{ ya da } L_d \quad (4.15)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Genel olarak kullanılan diziler 2 seviyeliler için L_4 , L_8 , L_{16} ve L_{32} ve 3 seviyeliler için L_9 , L_{18} ve L_{27} dizileri olmaktadır. Dizilerin seçimi düzey sayısı ve toplam serbestlik derecesine göre yapılmaktadır (Çakıroğlu, 2011).

Ortogonal Dizinler tam faktöriyel tasarım gereği (2k veya 3k) çok sayıda yapılması gereken denemeleri büyük oranda azaltmaktadır. Örneğin tam faktöriyel tasarıma göre $3^4=81$ adet deneme yapılması gerekirken, ortogonal dizinler sayesinde deneme

sayısı 9'a düşmektedir. Ortogonal dizinin seçiminde faktör gurubunun toplam serbestlik derecesine bakılır. Faktör gurubunun serbestlik derecesi, tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri toplamına eşittir. Toplam serbestlik derecesi dizilerden hangisine uygunsa o tercih edilir. Toplam serbestlik derecesine 1 eklendiğinde deneme sayısına eşitse uygunluk sağlanır. Toplam serbestlik derecesi deneme sayısından büyük veya eşitse bir üst dizi uygundur (Şeker, 2013).

Faktör ve/veya etkileşimlerin seçilen ortogonal düzene göre kolonlara atanmasında, Dr. Taguchi tarafından geliştirilen doğrusal grafikler ve üçgensel tablolar kullanılmaktadır. Doğrusal grafikler, faktörlerin atanacağı sütunları ve hangi sütunların bu faktörlerin etkileşimini kullanılacağını göstermektedir. Üçgensel tablolar ise faktörler arasında gerçekleşen tüm etkileşimleri içermektedir (Şeker, 2013).

İlgilenilen problemin çözümü için birden fazla performans karakteristiğinin özelliklerine uygun olarak performans istatistiği seçilmektedir. Verilerin analizi seçilen performans istatistiğine göre yapılmaktadır. Bu nedenle performans istatistiğinin doğru belirlenmesi çok önemli bir husustur. Taguchi tasarımlarında en çok kullanılan performans istatistiği S/N oranıdır ve bu oran sağlam tasarımın performansını ölçmek için kullanılır (Şeker, 2013).

Testler, problemin belirlediği ortogonal dizinin satırlarının öngördüğü denemelerden oluşur. Deney boyunca hatayı minimize edebilmek, gürültü faktörlerinin etkisini görebilmek, gözlem değerleri sayısının çokluğuna bağlıdır. Seçilen her bir deney tasarımı ne kadar çok sayıda test edilirse deneyin güvenilirliği o ölçüde artış göstermektedir (Şeker, 2013).

Ürün performansına etkisi olan faktörler ve uygun düzeyleri belirlendikten sonra, sadece kritik olan faktör ve/veya etkileşimler yer alacak şekilde bir model oluşturulur ve analizi yapılır. Elde edilen gözlem değerlerinin analizinde, varyans analizi, faktör etkilerinin grafiksel gösterimi metodu, hesap tablosu metodu gibi yöntemler kullanılmaktadır (Şeker, 2013).

Varyans analizi yapmanın amacı ürün veya proses değişimini kontrol etmek ve

performansı etkileyen faktörleri bulup problemin çözümüne ilişkin karar vermektir. Varyans analizinde (Analysis of Variance: ANOVA) test edilen parça gruplarının performansları arasındaki farklılığı göstermek için çizelge oluşturulur. Varyans analizine F testi de denmektedir (Şeker, 2013).

Varyans analizine ait formüller;

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AXB} + SS_C \quad \text{Genel Kareler Toplamı} \quad (4.16)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{T^2}{N} \quad \text{Genel Kareler Toplamı} \quad (4.17)$$

$$S_A = \sum_{i=1}^{k_A} \frac{A_i^2}{n_{A_i}} - \frac{T^2}{N} \quad \text{A Faktörünün Kareler Toplamı} \quad (4.18)$$

$$SS_{AXB} = \sum_{i=1}^c \frac{AxB_i^2}{n_{AXB_i}} - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \quad \text{A ve B etkileşiminin K.Toplamı} \quad (4.19)$$

$$SS_e = KT_T - KT_A - KT_B - KT_{AXB} \quad (4.20)$$

Burada;

SS_T = Genel kareler toplamı

SS_A = A faktörüne ait kareler toplamı

SS_B = B faktörüne ait kareler toplamı

SS_C = C faktörüne ait kareler toplamı

SS_{AXB} = A ve B faktörlerinin etkileşim faktörüne ait kareler toplamı

SS_E = Hatanın kareler toplamı

N = Gözlemlerin toplam sayısı

y_i = i. Gözlem değeri

T = Tüm gözlemlerin toplamı

k_A = A faktörünün seviye sayısı

A_i = A_i seviyesindeki gözlemlerin toplamı

n_{A_i} = A_i seviyesi altındaki gözlem sayısı

c = Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısı

$(A \times B)_i$ = A ve B faktörlerinin i. Koşulu altındaki verileri toplamı

Varyans analizini yapabilmek için serbestlik derecesine ihtiyaç duyulmaktadır (Şeker, 2013).

$$V_T = V_A + V_B + V_{A \times B} + V_e \quad (4.21)$$

Burada

V_T = Toplam serbestlik derecesi

V_A = A faktörünün serbestlik derecesi

$V_{A \times B}$ = AxB faktörünün serbestlik derecesi

V_e = Hata serbestlik derecesi

Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğidir (Şeker, 2013).

$$V_T = N - 1 \quad (4.22)$$

Bir faktör ya da sütunun serbestlik derecesi de seviye sayısının bir eksiğidir [85].

$$V_A = k_A - 1 \quad (4.23)$$

Etkileşimin serbestlik derecesi ise etkileşim faktörlerinin serbestlik derecelerine eşittir (Şeker, 2013).

$$V_{A \times B} = (V_A) \cdot (V_B) \quad (4.24)$$

Hata serbestlik derecesi ise toplam serbestlik derecesinden tüm faktör ve etkileşimlerinin serbestlik derecelerinden çıkartılması ile bulunur (Şeker, 2013).

$$V_e = V_T - V_A - V_B - V_{A \times B} \quad (4.25)$$

Denemelerin tekrarları söz konusu olduğunda ise serbestlik derecesi;

$$V_T = (\text{Deneme sayısı}) \cdot (\text{Tekrar sayısı}) - 1 \quad (4.26)$$

Varyans değerinin hesaplanması, varyans analizi tablolarıyla yapılmaktadır. Faktörlerin varyanslar; faktörlerin kareler toplamının serbestlik derecesine bölümüdür (Şeker, 2013).

$$V_A = \frac{SS_A}{v_A} \text{ A faktörünün varyansı} \quad (4.27)$$

Hata varyansı da hata kareler toplamının serbestlik derecesine bölümüdür. Hatayı kontrol edilemeyen faktörler ve ölçüm yanlışlıkları oluşturmaktadır (Şeker, 2013).

$$V_e = \frac{SS_e}{v_e} \quad (4.28)$$

Varyans analizi tablosu oluşturulduktan sonra, F testi hangi faktörlerin önemli olduğunu gösterir. F testi uygulanırken hesaplanan F değerleriyle, istenen güven düzeyindeki F tablo değerleri karşılaştırılır. F değeri tablodaki değerden büyükse $1-\alpha$ güvenle kabul edilir. Varyans analizi (ANOVA) tablosundan elde edilen F değeri, faktör ya da etkileşim varyansının hata varyansına oranıdır (Şeker, 2013).

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (4.29)$$

Burada; $F_{\text{tablo}} = \alpha, v_1, v_2$

α = Anlamlılık düzeyi

v_1 = Faktörün serbestlik derecesi

v_2 = Hata serbestlik derecesi

ANOVA tamamlandıktan sonra önemli faktörler ve etkileşimler belirlenir, sonuçlar yorumlanır. Ortalamanın tahmin edilmesi, tahmin edilen ortalamanın etrafında güven aralığının belirlenmesi kullanılan metotlardır (Şeker, 2013).

Ortalamanın tahmin edilmesi, kombinasyondaki faktör seviyelerinin ortalama değerleri,

$$\mu_{A_1B_2} = A_1 + B_1 - n - 1 T \quad (4.30)$$

Burada;

n = belirlenen faktör-seviye kombinasyondaki faktör sayısı

T =Seçilen faktör-seviye kombinasyonundaki faktörlerin tüm seviyelerinin ortalamasıdır

Tahmin edilen ortalama etrafında güven aralığı,

$$.A = \overline{F_{a,sd_t,sd_e} \cdot V_e \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r}} \quad (4.31)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1+c} \quad (4.32)$$

Burada;

c = μ bulunurken kullanılan tüm faktörlerin toplam serbestlik derecesi

r = Yapılan doğrulama deneyi sayısı

v_T = Ortalamaya ait serbestlik derecesi olup daima 1 dir.

v_e = Hata serbestlik derecesi

V_e = Hata varyansı

N = Deney sayısı

$$\alpha_\mu - G.A. \leq \text{performans karakteristiği değeri} \leq d_\mu + G.A. \quad (4.33)$$

Doğrulama deneylerinin yapılması deney analiz sonucunda seçilen en iyi şartlar altında tekrarlanmaktadır. En iyi şartları belirleyerek yapılan deney doğrulama deneyidir. Deney sonucunda bulunan faktör-seviye kombinasyonu en iyi performans

karakteristiği değerine ulaştırırsa istenen durum geręekleřmiř ve deney amacına ulaşmış olur (şeker, 2013).



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında TM yöntemi ile Bor Karbür (B_4C) takviyeli bronz ($Cu_{10}Sn$) matrisli ön alaşımlı tozlar kullanılarak kompozit malzeme üretilmiş, üretilen malzemelerin difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilirliği, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda öncelikle deney düzeneği belirlenmiştir. Parametrelerin doğruluğunu tespit etmek için tüm faktörler ele alındığında yüzlerce deney yapmak gerekebileceği için, deney düzeneği Taguchi metodu kullanılarak az sayıda ve etkin deneyler yapılmak için oluşturulmuştur. Taguchi metodunun uygulandığı Minitab19 yazılım programı üzerinde malzeme (matris – takviye oranı), sıcaklık, basınç ve süre olmak üzere 4 değişken ile uygun parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece Taguchi L_{16} (4×4) ortogonal dizini şeklinde bir düzenek ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Taguchi metoduyla belirlenen çalışma parametreleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Difüzyon kaynağı parametreleri

Deney No	Malzeme – Takviye Oranı	Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Yük (Kg)	Süre (dk)
1	%100 $Cu_{10}Sn$	700	10	20
2	%100 $Cu_{10}Sn$	740	15	40
3	%100 $Cu_{10}Sn$	780	20	60
4	%100 $Cu_{10}Sn$	820	25	80
5	$Cu_{10}Sn$ + % 4 B_4C	700	15	60
6	$Cu_{10}Sn$ + % 4 B_4C	740	10	80
7	$Cu_{10}Sn$ + % 4 B_4C	780	25	20
8	$Cu_{10}Sn$ + % 4 B_4C	820	20	40
9	$Cu_{10}Sn$ + % 8 B_4C	700	20	80
10	$Cu_{10}Sn$ + % 8 B_4C	740	25	60
11	$Cu_{10}Sn$ + % 8 B_4C	780	10	40
12	$Cu_{10}Sn$ + % 8 B_4C	820	15	20
13	$Cu_{10}Sn$ + % 12 B_4C	700	25	40
14	$Cu_{10}Sn$ + % 12 B_4C	740	20	20
15	$Cu_{10}Sn$ + % 12 B_4C	780	15	80
16	$Cu_{10}Sn$ + % 12 B_4C	820	10	60

Tablo 5.1’de gösterilen parametreler; deneysel çalışmalar öncesinde deneme yanılma ile en uygun parametreleri belirlemek amacıyla Tablo 5.2’de belirtilen parametrelerle gerçekleştirilen deneyler içinde en uygun sıcaklık, basınç ve süreler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Deneme yanılma yoluyla Tablo 5.2’de belirtilen parametrelerde gerçekleştirilen difüzyon kaynağı birleştirmelerinin makro görüntüleri Şekil 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.2 Uygulama deneyleri ve seçilen parametreler

Deney No	Malzeme	Sıcaklık (°C)	Basınç (Kg)	Süre (dk)	Sonuç
1	Cu10Sn	850	57	80	Başarısız
2	Cu10Sn	820	50	20	Başarısız
3	Cu10Sn	700	33	60	Başarısız
4	Cu10Sn	700	15	30	Deformasyon yok Difüzyon az
5	Cu10Sn	750	20	60	Deformasyon az Difüzyon iyi
6	Cu10Sn	850	20	60	Başarısız
7	Cu10Sn	700	20	60	Deformasyon var Difüzyon iyi
8	Cu10Sn	800	20	60	Başarısız
9	Cu10Sn	800	20	40	Deformasyon az Difüzyon iyi
10	Cu10Sn	700	20	40	Başarılı
11	Cu10Sn	750	20	40	Başarılı
12	Cu10Sn	700	20	80	Başarılı
13	Cu10Sn	750	20	80	Başarılı

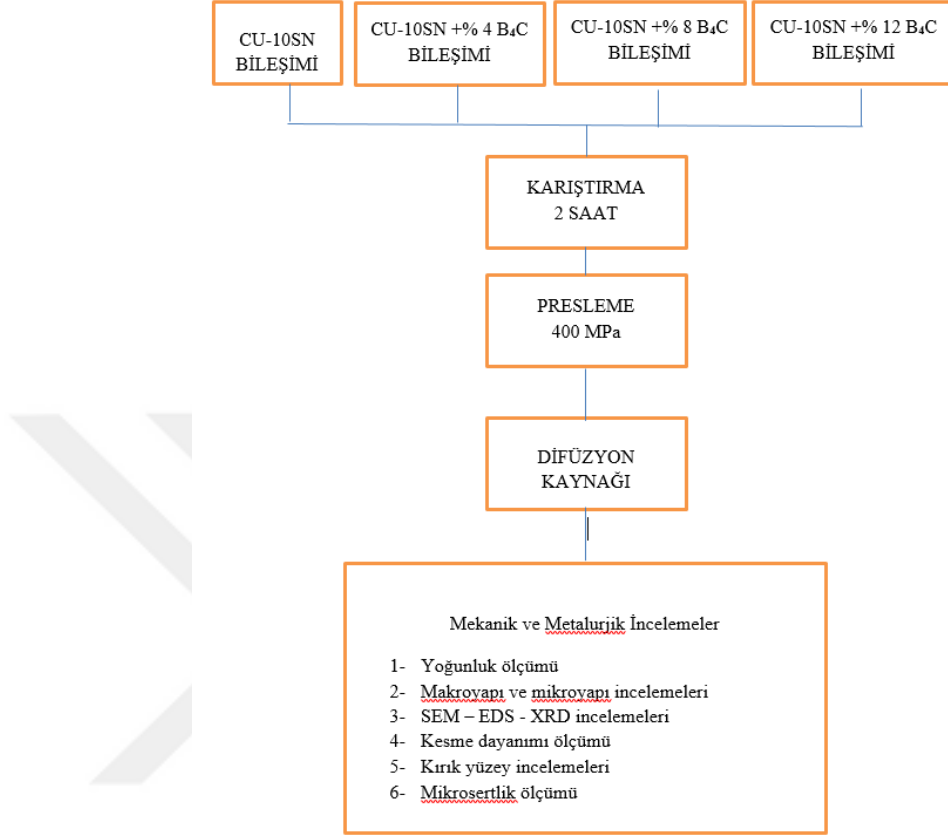


Şekil 5.1 Deneyler öncesi gerçekleştirilen testlere ait makro görüntüler

Yüzeylerde yeterli difüzyonun ve metalurjik bağın gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek amacıyla birleştirilen numuneler ortalama iki metre yükseklikten sert zemine birkaç kez serbest bırakılarak serbest düşürme testine tabi tutulmuştur. Numunelere gerçekleştirilen makro incelemeler ve serbest düşürme testleri ile elde edilen en etkin sonuçlu veriler Taguchi metodunda girdi parametresi olarak işlenmiştir. Deneme yanılma testleri neticesinde sıcaklık 700 – 820°C, yük 10 - 25 kg, süre ise 20 – 80 dakika aralığında belirlenmiştir. Bu yüzden Taguchi metodunda L16(4*4) ortogonal dizinine göre dört adet sıcaklık değeri; 700 – 740 – 780 – 820 °C, dört adet yük; 10 – 15 – 20 – 25 kg ve dört adet süre ise 20 – 40 – 60 – 80 dakika olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerden bağımsız bir şekilde B₄C takviye oranları ise % 0, % 4 - % 8 - % 12 olarak belirlenmiştir.

Deneyisel çalışmaların yukarıda belirtilen parametrelere uygun olarak gerçekleştirilmesi için, istenilen takviye oranlarında numune üretimleri gerçekleştirilmiş, gerekli şartlar ve kaynak ekipmanları sağlanarak birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı oranlardaki B₄C takviyesinin kompozit malzemenin mekanik ve metalurjik özellikleriyle kaynak işlemine etkisi de araştırılmıştır. Deneyisel çalışmalarda izlenen işlem basamakları Şekil 5.2’de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Deneyler; Kastamonu Üniversitesi Merkezi

Araştırma Laboratuvarları ve Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2 Deneysel çalışmalarda izlenen işlem basamakları

Tez çalışmasında kullanılan Cu₁₀Sn ve B₄C toz malzemeler T/M yöntemiyle, uygun sürelerde MA işlemine tabi tutularak homojen bir karışım elde edilmiş ve uygun basınçlarla preslenerek malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen malzemeler daha sonra difüzyon kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan malzemeler ve uygulanan metotlar ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmektedir.

5.1 Materyal

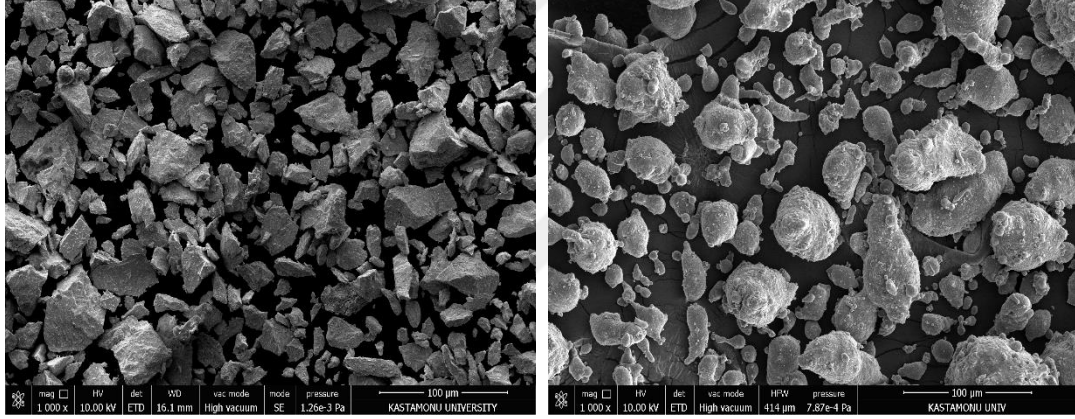
Bu tez çalışmasında, kompozit numunelerin üretimi için bronz alaşımı (% 90 Cu, % 10 Sn) ve Bor Karbür (B₄C) ön alaşımlı tozlar Nanokar firmasından temin edilmiştir. Matris malzeme olarak bronz alaşımı, takviye elemanı olarak ise B₄C seramik tozlar kullanılmıştır. Kompozit numuneler, bronz matrisi içinde ağırlıkça % 4, % 8, % 12 takviye malzemesi (B₄C) oranına sahip olacak şekilde üretilmiştir. Kompozit

malzeme üretiminde kullanılan matris ve takviye malzemelerin özellikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3 Tozlar ve Özellikleri

	Tozlar	Toz Boyutu	%Safılık Değeri
1	Bronz Tozu (% 90 Cu, % 10 Sn)	44 μm	85
2	B ₄ C (Bor Karbür)	$\leq 45 \mu\text{m}$	99,95

Deneylerde kullanılan matris malzemesi Cu10Sn alaşımı ile takviye elemanı B₄C tozlarının deneyler öncesinde işlem uygulanmadan alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ise Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Malzeme üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri, a) Cu-10Sn, b) B₄C

5.2 Metot

5.2.1 B₄C Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi

5.2.1.1 Tozların karıştırılması

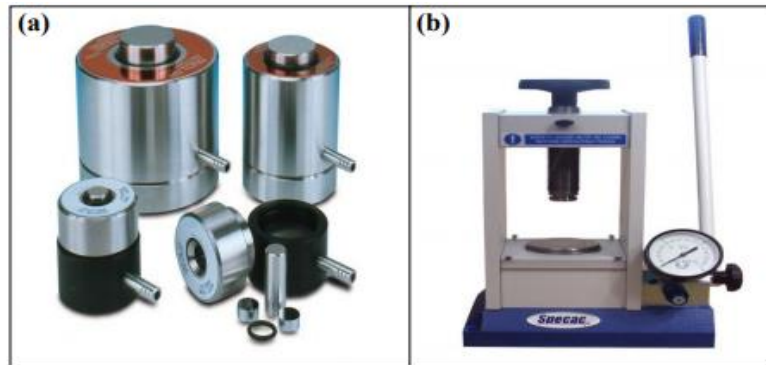
Bronz alaşımı esaslı kompozit malzeme içerisine ağırlıkça % 4, % 8 ve % 12 oranlarında B₄C ilave edilen tozlar karıştırma işlemi öncesinde RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazi ile 10⁻⁴ hassasiyetinde tartılmıştır. Hazırlanan karışım tozlar Şekil 5.4' te verilen Retsch marka PM100 model gezegen hareketli bilyeli öğütücü cihaz ile 400 rpm hızda 2 saat süre ile 10 mm çapında paslanmaz çelik bilyeler içeren bir kap içinde karıştırılarak MA yapılmıştır. Karışımında kullanılan toz: bilye oranı ise 1:10'dur.



Şekil 5.4 Gezegen hareketli bilyeli öğütücü

5.2.1.2 Presleme işlemi

Hazırlanan karışım tozların soğuk preslenmesi Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Specac marka GS15011 model hidrolik pellet presi ile gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleşen presleme işleminde kalıp olarak, 10 mm çapında silindirik çelik kalıp kullanılmıştır. Presleme basıncı olarak 400 MPa basınç uygulanmış ve 10 mm yüksekliğinde numuneler elde edilmiştir.

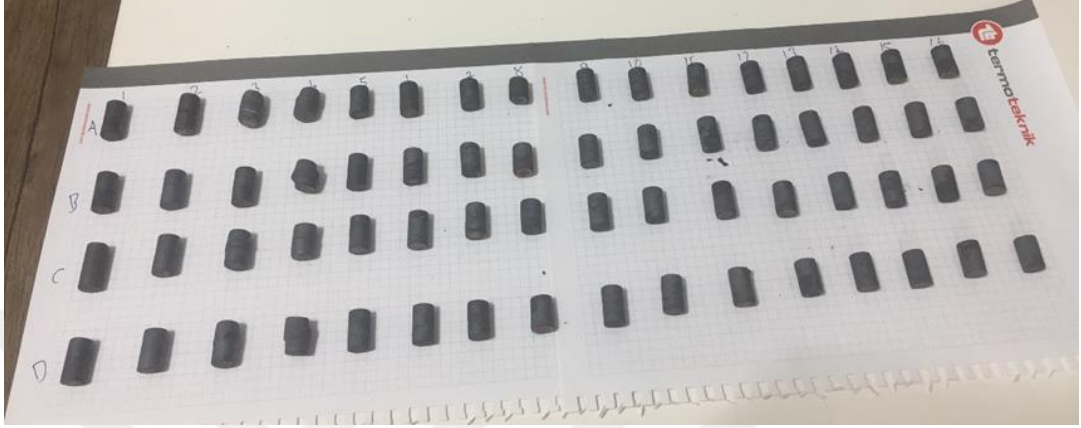


Şekil 5.5 a) Kalıp. b) Specac GS15011 hidrolik pellet presi

Üretilen numuneler difüzyon kaynak işlemine tabi olacağı ve difüzyon için gereken sıcaklığın, numunelerin sinterlenmesi için gerekli sıcaklık ihtiyacını karşılayacağı için numunelere ayrıca sinterleme işlemi gerçekleştirilmemiştir. Böylece numunelerin difüzyon kaynağı esnasında hem sinterlemesi, hem de kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.2.1.3 Difüzyon kaynak işlemi

Difüzyon kaynağı için 64 adet numune hazırlanmış olup, söz konusu numunelerin kaynakla birleştirilmiş görüntüsü Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6 Kaynak işlemleri gerçekleştirilen numunelerin görüntüsü

Numunelerin difüzyon kaynağı için gerekli yüzey şartlarını oluşturması için, numuneler metalografik yöntemlerle 1200 gridlik zımpara ile zımparalama işlemine tabi tutulmuş ve kaynağa hazır hale getirilmiştir. Difüzyon kaynağının belirleyici parametreleri sıcaklık, basınç ve süre baz alınarak ve takviye oranlarının etkisi düşünülerek, en etkin ve optimum parametreleri belirlemek amacıyla Taguchi metoduna göre deney düzeneği Tablo 5.1’de verildiği gibi oluşturulmuştur.

Tablo 5.1’de verilen parametrelere uygun olarak numuneler Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarlarında bulunan ve difüzyon kaynağı için tasarlanan difüzyon kaynak makinesi (Şekil 5.7) ile kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Kaynak işlemlerinin oksijenden arındırılması için 3 lt/dk basınç ile Argon gazı ortama verilerek kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Argon gazı ortama sadece kaynak işlemi süresince değil, kaynak işlemi sonrasında da verilmiştir.



Şekil 5.7 Atmosfer kontrollü difüzyon kaynak makinesi

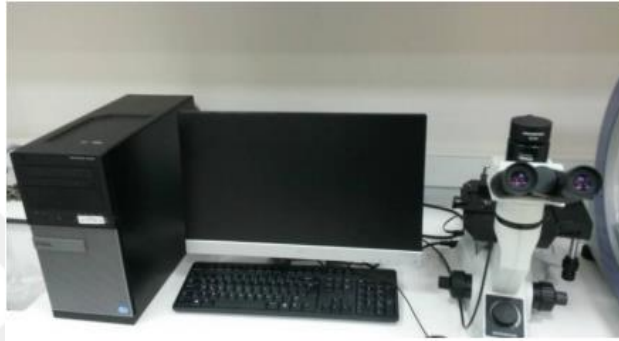
Daha sonra Tablo 5.1’de belirtilen Taguchi metoduna uygun deney düzeneğine bağlı kalınarak kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemleri gerçekleştirilen numunelerin birleştirilmiş halde görüntüleri Şekil 5.6’da verilmiştir.

5.2.1.4 Mikroyapı incelemeleri (optik mikroskop, sem, eds, xrd)

Mikroyapı analizlerinden optik mikroskop, SEM ve EDS incelemeleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde XRD incelemeleri ise Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Optik mikroskop, SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilecek metalografik incelemeler kapsamında difüzyon kaynaklı numuneler; kaynak işleminin metalurjik özelliklerini irdelemek için ortadan ikiye kesilmiştir. Daha düzgün yüzeyli numuneler seçilerek standart metalografik numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler sırasıyla 240; 400; 600; 800; 1000; 1200 ve 2500 gritlik su zımpara kâğıdına tutularak yüzeyleri incelemeye hazır hale getirilen numuneler, daha sonra 3 ve 1 μm ’lik elmas süspansiyonlar ve keçeler yardımıyla numunelerin yüzeyleri parlatılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için numuneler 5 saniye süreyle 10 ml HF + 30 ml HNO₃ ve 50 ml su ile oluşturulan dağlama ayırıcı ile dağlanmıştır. Dağlama

işlemi tamamlandıktan sonra dağlanan yüzeyler alkol ile temizlenmiş, ardından optik mikroskop ve SEM cihazında incelemeye hazır hale getirilmiştir. Öncelikle Şekil 5.8’de verilen Nikon marka optik mikroskop yardımıyla numunelerin mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikro yapının üretim koşullarına bağlı olarak değişimini tespit edip, faz yapılarını tayin etmek, ayrıca EDS analizlerini gerçekleştirmek için Şekil 5.9’da verilen FEI QUANTA 250 FEG marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 5.8 Optik mikroskop



Şekil 5.9 FEI QUANTA 250 FEG SEM analiz cihazı

5.2.1.5 XRD incelemeleri

Difüzyon bölgesinde oluşan yapılar ve yönelmeler hakkında bilgi edinmek amacıyla X- ışını difraksiyonu (XRD) incelemeleri gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan ve Şekil 5.10’da verilen Bruker marka ve D8 Advance model cihaz yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.10 Bruker D8 Advance XRD analiz cihazı

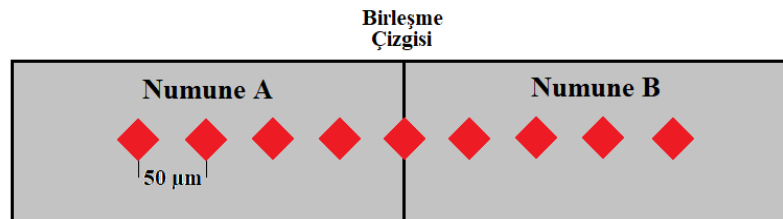
5.2.1.6 Mikrosertlik testi

Malzemelerin plastik deformasyona karşı dirençlerini tespit edebilmek amacıyla numuneler mikrosertlik testlerine tabi tutulmuştur. Yüzeyleri metalografik uygulamalar için hazırlanan numunelerin mikrosertlik ölçümleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Shimadzu marka mikrosertlik ölçüm cihazında (Şekil 5.11) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.11 SHIMADZU HMV-G21 model mikrosertlik ölçüm cihazı

Mikrosertlik ölçümleri 0,98 N kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneden Şekil 5.6’da gösterilen numunelerin üzerinden belirlenen noktalardan 50 μm eşit mesafelerde 9 adet sertlik ölçümü alınarak numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. Numunelerin mikrosertlik ölçümlerinin nasıl yapıldığı şematik olarak Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12 Numunelere uygulanan sertlik işlemlerinin şematik gösterimi

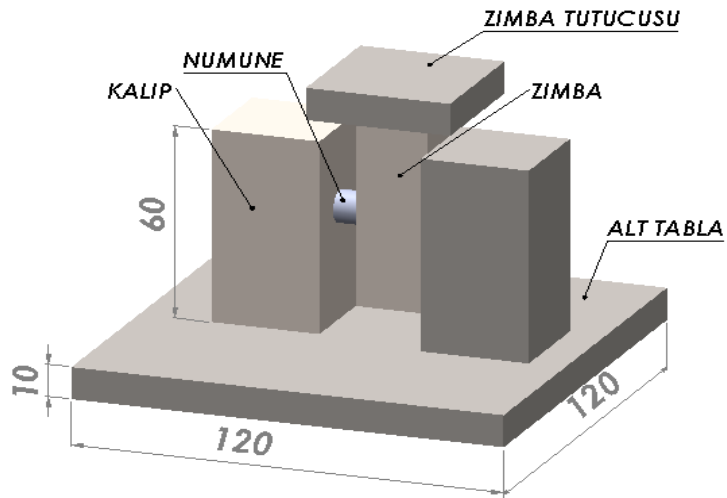
5.2.1.7 Kesme (kayma) testi

Bu çalışmada, difüzyon kaynağıyla birleştirilen kompozit malzemelerin düzlemsel kayma özelliklerinin belirlenmesinde en çok tercih edilen Iosipescu kayma testi metodu kullanılmıştır. Kesme kuvvetinin ölçümünde basma testinin de uygulandığı ve Şekil 5.13’de gösterilen Shimadzu marka çekme – basma cihazına difüzyon kaynağı ile birleştirilen numunelerden 3’er adet alınarak Şekil 5.14’te şematik görüntüsü verilen deney düzeneğinde numunelerin kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Cihazın ilerleme hızı 0,5 mm/dk olarak alınmıştır.



Şekil 5.13 Universal Mekanik Test Cihazı

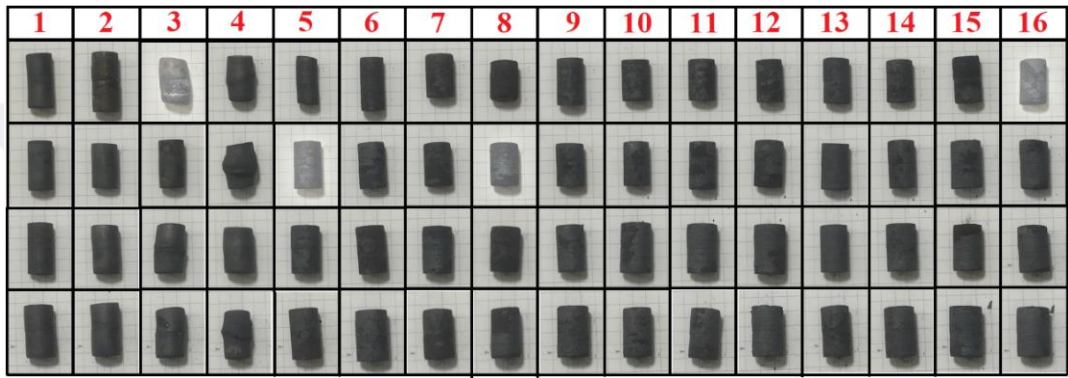
B₄C katkılı ve saf bronz alaşımlı malzemelerin difüzyon kaynaklı numunelere basma yönünde kesme testi uygulanmıştır. Kesme yapılan üç numunenin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 5.14 Kesme kuvvetinin ölçülmesinde kullanılan kesme aparatı

6. DENEY SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

Matris malzemesi olarak bronz (Cu10Sn) tozu, takviye elemanı olarak ise % 4, % 8, % 12 oranlarında B₄C kullanılarak üretilen numuneler difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Her alaşım için gerçekleştirilen birleştirme işlemi 4 kez tekrar edilerek, tüm incelemeler için gerekli olan toplamda 4 birleştirme numunesi elde edilmiştir. Birleştirilen numunelerin makro görüntüleri Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1 Difüzyon kaynak numunelerinin birleştirilmiş görüntüsü

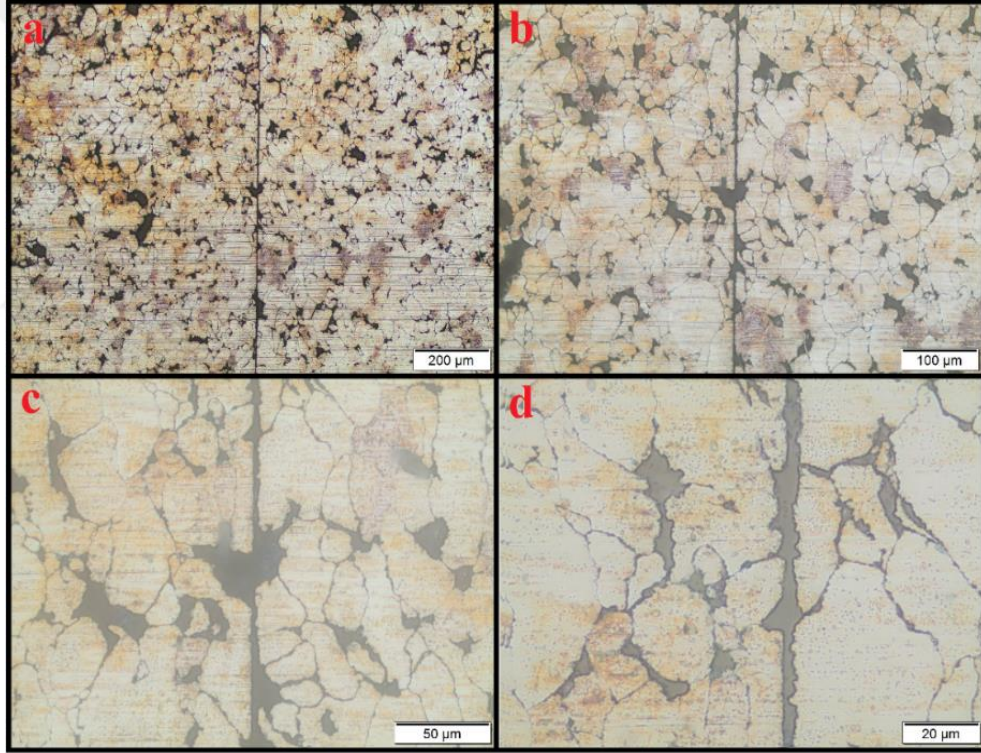
Genel olarak kaynak sonrası numunelerin gözle yapılan kontrollerinde, difüzyon kaynaklı birleştirmelerde, bilinen diğer kaynak yöntemlerine göre daha düzgün birleştirmelerin elde edildiği görülmüştür. Yine bazı birleştirmelerde sıcaklık ve basınç artışına bağlı olarak birleşme yüzeyine yakın kısımlarda, deformasyonun gerçekleştiği görülmüştür. Artan yük, sıcaklık ve oluşan deformasyonla birlikte numunelerin boyutlarında değişimler gözlemlenmiştir. Yük, sıcaklık ve süreye bağlı olarak bazı numunelerin (Deney 3 ve Deney 4) boylarında kısalma meydana gelirken, çaplarında ise bir miktar genişleme olduğu Şekil 6.1’de verilen fotoğrafta görülmektedir. Yine kaynaklı numunelerin dış yüzeylerinde ise koruyucu argon atmosferine rağmen ısı kaynaklı olarak bir miktar kararma ve tufal tabakasının meydana geldiği de fotoğraftan görülmektedir.

6.1 Mikroyapı (Optik mikroskop ve SEM) İncelemeleri

6.1.1 Optik Mikroskop İncelemeleri

Difüzyon kaynak yöntemiyle kaynak işlemi gerçekleştirilen numunelerde, sıcaklık, basınç ve sürenin birleşme bölgesi üzerindeki etkileri optik mikroskop görüntülerine bakılarak detaylı bir şekilde değerlendirilmeye çalışılmıştır. Birleştirmelerden alınan numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.2 - Şekil 6.17 arasında verilmiştir.

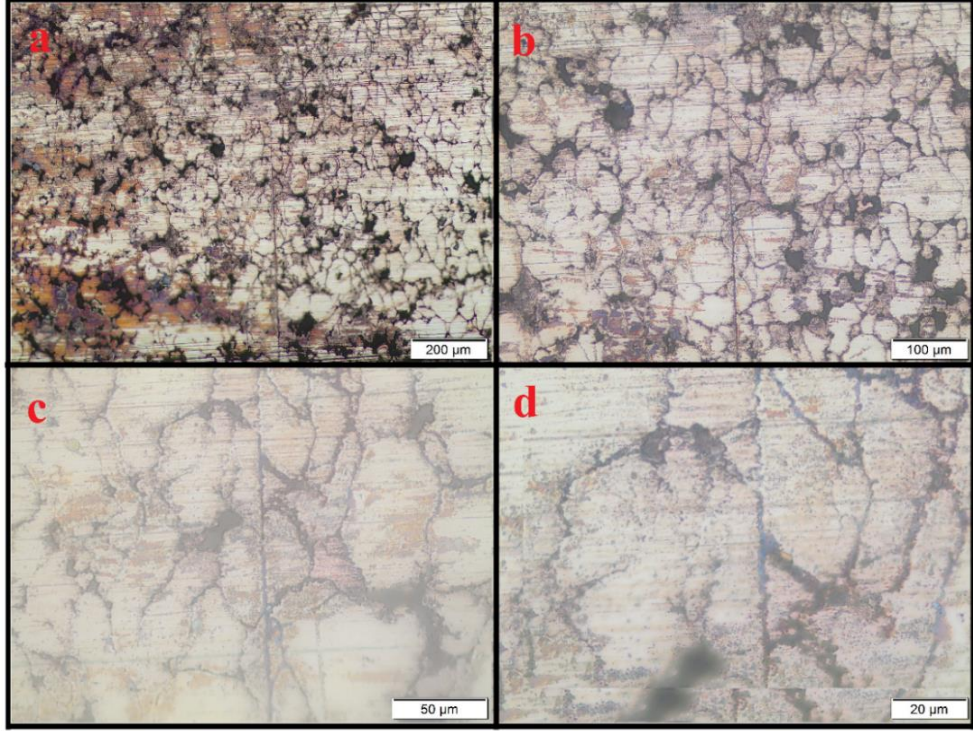
Şekil 6.2’de %100 Cu10Sn matristen takviyesiz olarak üretilen malzemenin (Deney 1) farklı büyütme ölçeklerindeki (100, 200, 500 ve 1000) görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.2 1 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 100 büyütme, b) 200 büyütme, c) 500 büyütme, d) 1000 büyütme

Şekil 6.2 incelendiğinde; 700°C sıcaklık, 10 kg yük ve 20 dk süre ile gerçekleşen birleştirme işleminde söz konusu parametrelerin istenilen birleşmeyi sağlayamadığı, kaynak çizgisi veya kaynak hattı olarak isimlendirilen bölgede difüzyonun gerçekleşmediği verilen tüm fotoğraflarda görülmüştür.

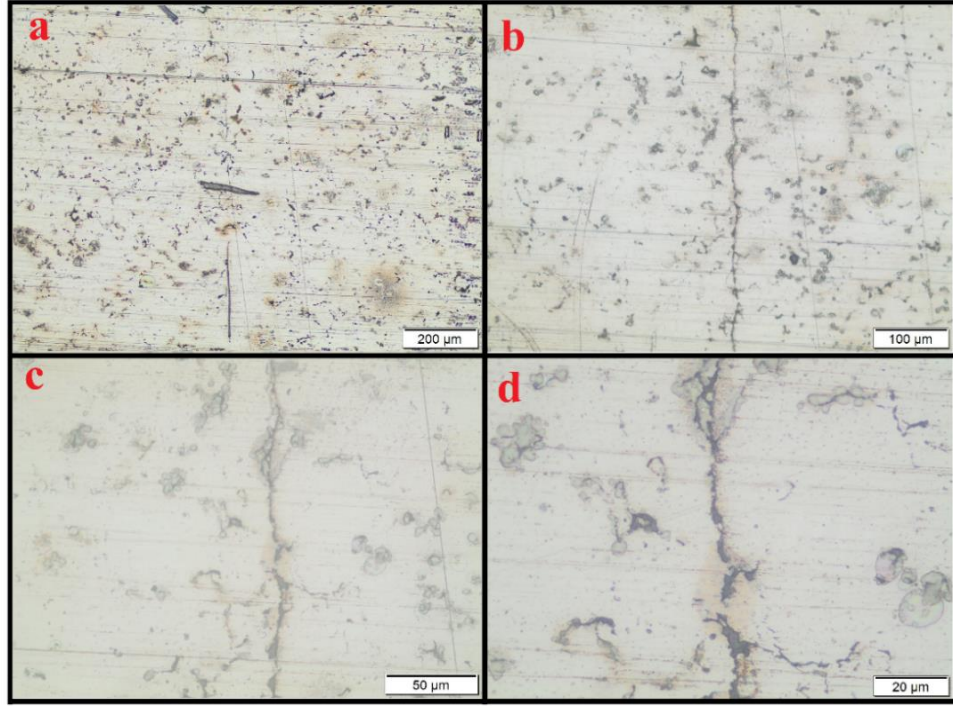
Şekil 6.3'te %100 Cu10Sn matrinden takviyesiz olarak üretilen 2 numaralı numunenin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.3 2 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Şekil 6.3'teki görüntüler incelendiğinde; 740 °C sıcaklık, 15 kg yük ve 40 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, belirtilen parametrelerin istenilen birleşmeyi 1 numaralı deneydeki gibi tam olarak sağlayamadığı, kaynak hattının ince ve net bir şekilde gözlemlenebildiği, bu nedenle de difüzyonun söz konusu deneyde de gerçekleşmediği tüm fotoğraflarda görülmüştür.

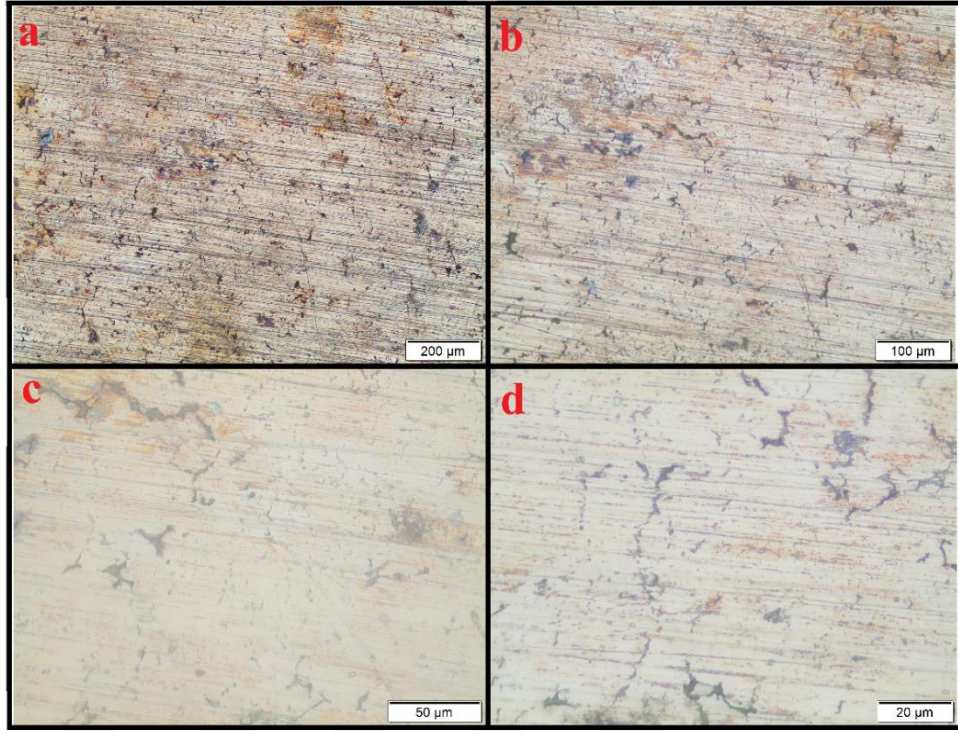
Şekil 6.4'de %100 Cu10Sn matrinden takviyesiz olarak üretilen 3 numaralı numunenin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.4 3 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Şekil 6.4’de ki görüntüler incelendiğinde; 780 °C sıcaklık, 20 kg yük ve 60 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, belirtilen parametrelerin istenilen birleşmeyi kaynak hattının bazı bölgelerinin gözlemlenebildiğinden dolayı tam olarak sağlayamadığı, bu nedenle de difüzyonun söz konusu deneyde de tam olarak gerçekleşmediği tüm fotoğraflarda görülmüştür.

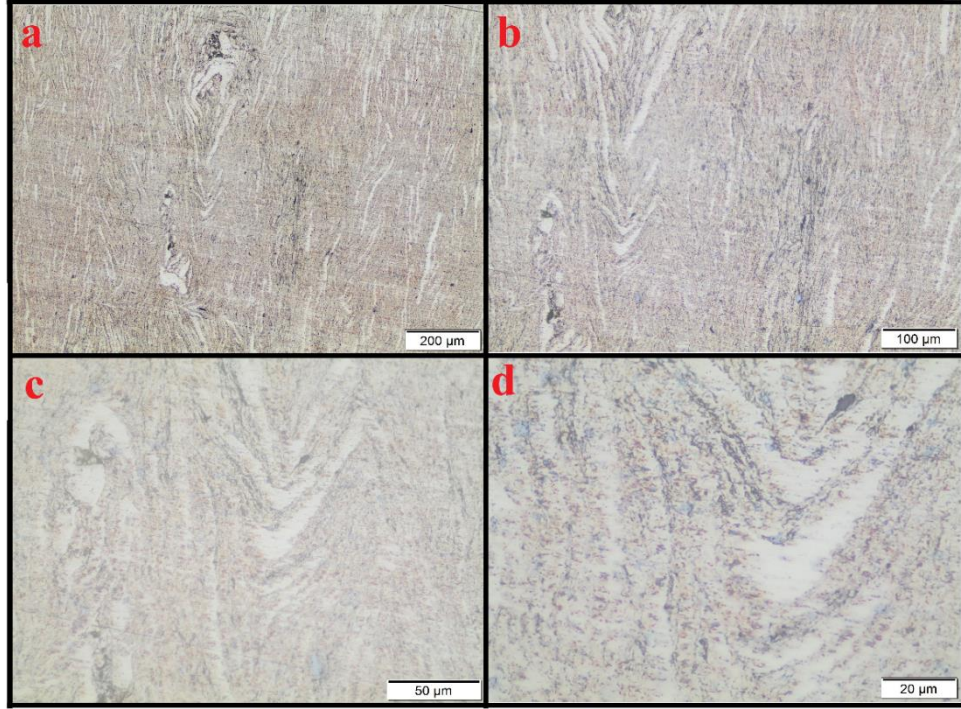
Şekil 6.5’te %100 Cu10Sn matristen takviyesiz olarak üretilen 4 numaralı numunenin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.5 4 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Şekil 6.5'teki görüntüler incelendiğinde; 820°C sıcaklık, 25 kg yük ve 80 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, belirtilen parametrelerin istenilen birleşmeyi sağlayabildiği ve önceki deney numunelerinde görülen kaynak hattının burada görünmediği tespit edilmiştir. Ancak Şekil 6.1'de verilen makro resimlerde 4 numaralı deney numunesinin yüksek sıcaklık, basınç ve bekleme süresinden dolayı aşırı deformasyona uğradığı kaynak birleşme bölgesinin kalınlaştığı görülmektedir.

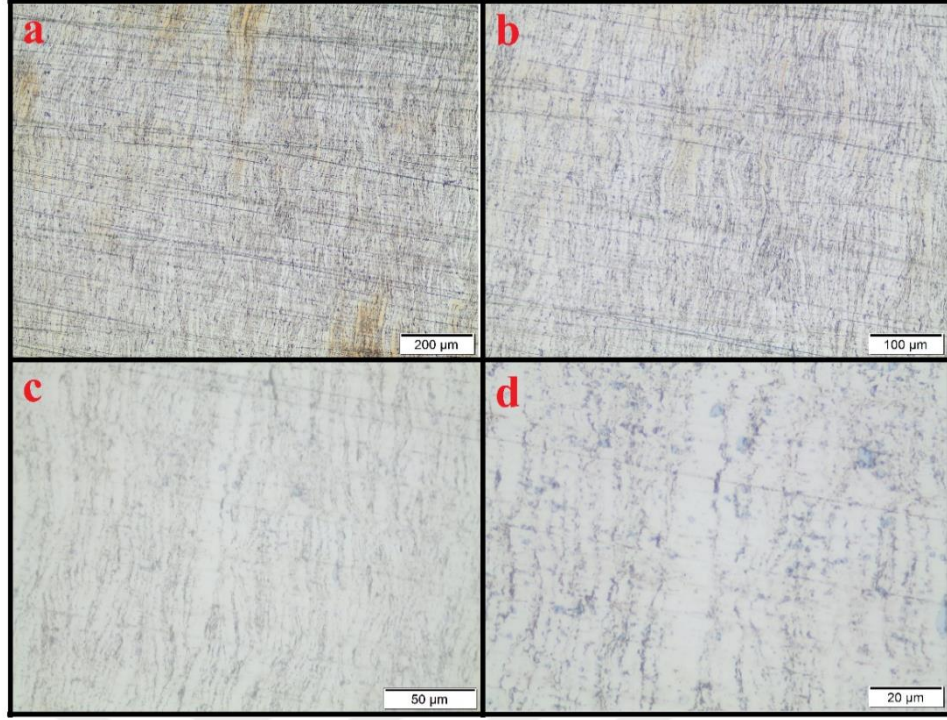
Şekil 6.6'da %96 Cu10Sn matris içine % 4 B₄C takviye elemanı olarak üretilen 5 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.6 5 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda verilen Şekil 6.6'daki görüntüler incelendiğinde; 700°C sıcaklık, 15 kg yük ve 60 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, belirtilen parametrelerin istenilen birleşmeyi kaynak hattında deformasyon izleri gözlemlenebilmesine rağmen gerçekleştirdiğini söyleyebiliriz. Difüzyonun söz konusu deneyde de ayrıca Cu10Sn matrisinin içerisinde B₄C partiküllerinin siyah ya da gri renkte karmaşık şekillerde olduğu gözlemlenebilmektedir.

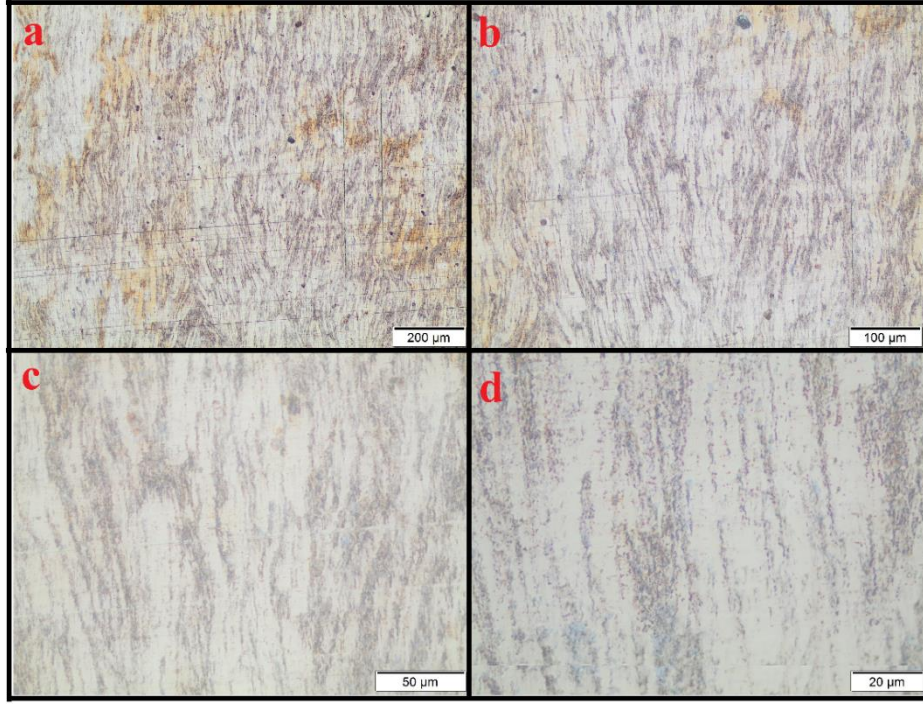
Şekil 6.7'de % 96 Cu10Sn matris içerisinde % 4 B₄C takviye elemanı katılarak üretilen 6 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.7 6 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda verilen Şekil 6.7’deki görüntüler incelendiğinde 740 °C sıcaklık, 10 kg yük ve 80 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının kısmen de görünmesine rağmen difüzyon işleminin sağlandığını söyleyebilmekteyiz. Verilen resimlerde B₄C partiküllerinin siyah renkte homojen bir şekilde dağıldığını söyleyebiliriz.

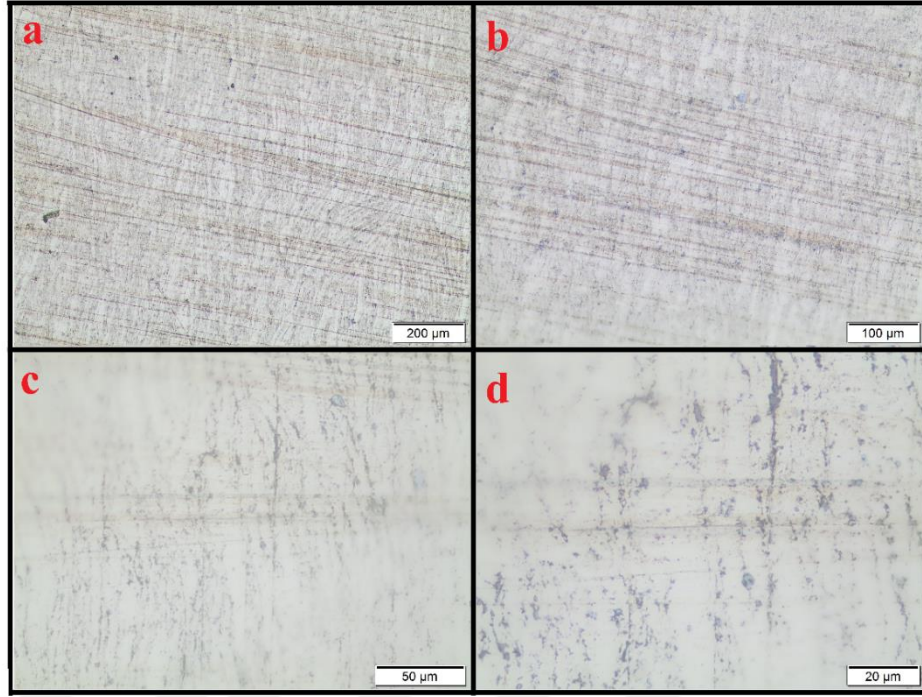
Şekil 6.8’de % 96 Cu10Sn matris içerisinde % 4 B₄C takviye elemanı katılarak üretilen 7 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.8 7 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda verilen Şekil 6.8'deki görüntüleri incelendiğimizde; 780°C sıcaklık, 25 kg yük ve 20 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının tamamen kaybolduğunu ve bu nedenle difüzyon işleminin tam olarak sağlandığını söyleyebilmekteyiz. Burada difüzyon işleminde sürenin kısa tutulmasına rağmen sıcaklık ve basıncın yeterli olduğunu söyleyebiliriz.

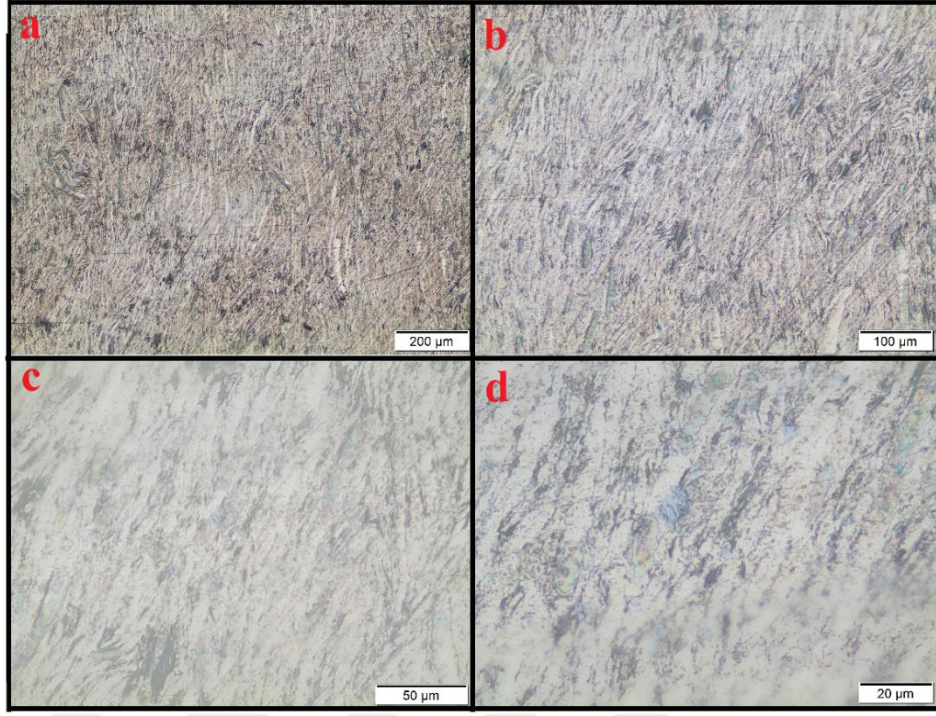
Şekil 6.9'da % 96 Cu10Sn matris içerisinde % 4 B₄C takviye elemanı katılarak üretilen 8 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.9 8 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda verilen Şekil 6.9'daki görüntüleri incelendiğimizde 820 °C sıcaklık, 20 kg yük ve 40 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının kısmen görünmesine rağmen difüzyon işleminin sağlandığını söyleyebilmekteyiz.

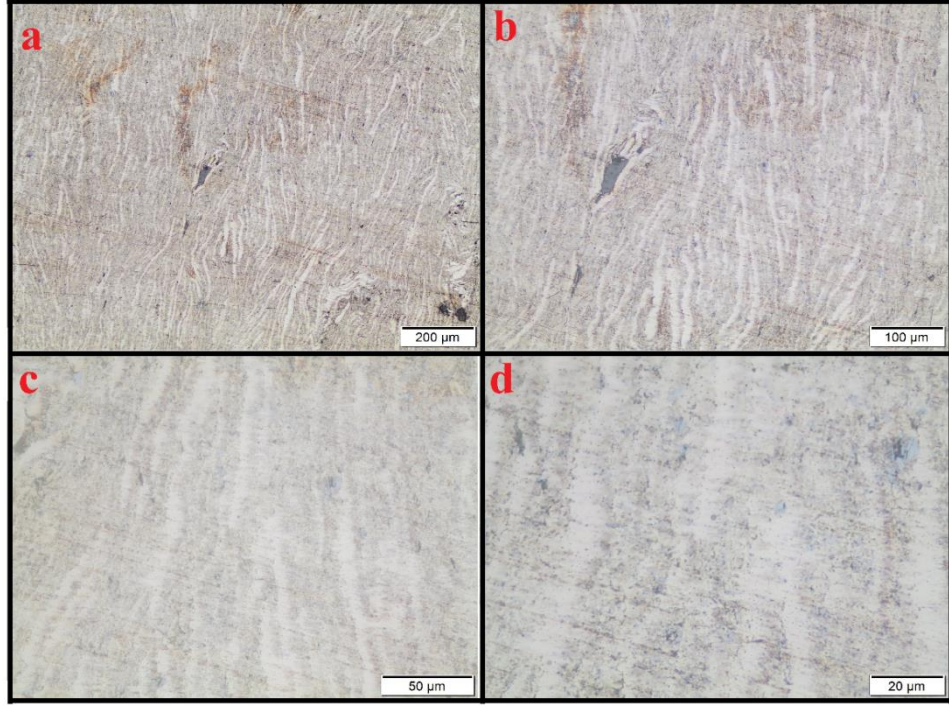
Şekil 6.10'da % 92 Cu10Sn matris içerisinde % 8 B₄C takviye elemanı katılarak üretilen 9 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.10 9 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme.

Yukarıda verilen Şekil 6.10'daki görüntüleri incelendiğimizde 700°C sıcaklık, 20 kg yük ve 80 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının tamamen kaybolmasından dolayı difüzyon işleminin sağlandığını söyleyebiliriz. Verilen resimlerde % 8 oranında katılan B_4C partiküllerinin siyah renkte ve karmaşık şekilli olarak dağıldığı görülmektedir.

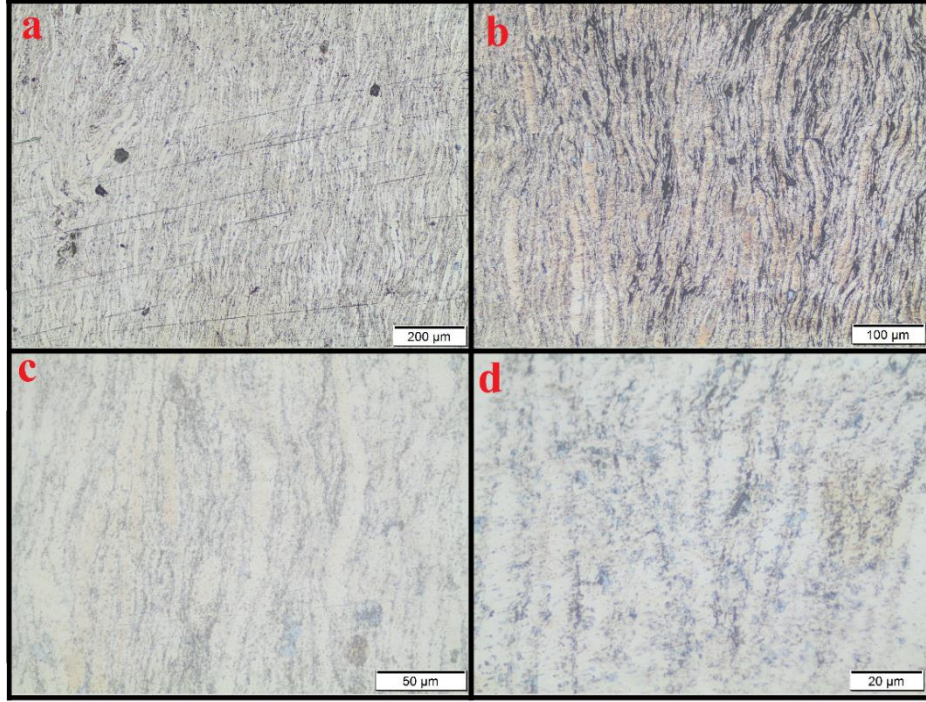
Aşağıda verilen Şekil 6.11'de % 92 $Cu_{10}Sn$ matris içerisinde % 8 B_4C takviye elemanı katılarak difüzyon kaynak işlemi yapılan 10 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.11 10 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda Şekil 6.11’de verilen resimleri incelendiğimizde 740°C sıcaklık, 25 kg yük ve 60 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının tamamen kaybolmasından dolayı difüzyon işleminin sağlandığını söyleyebilmekteyiz. Verilen resimlerde B₄C partiküllerinin yine siyah renkte ve karmaşık şekilli olarak dağıldığı görülmektedir.

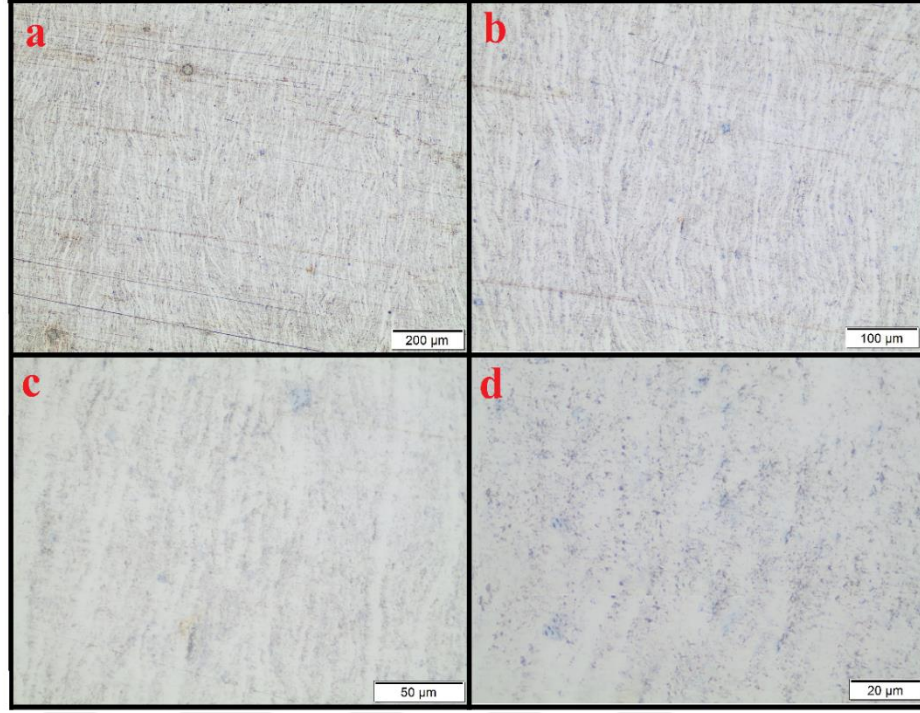
Aşağıda verilen Şekil 6.12’de % 92 Cu10Sn matris içerisinde % 8 B₄C takviye elemanı katılarak difüzyon kaynak işlemi yapılan 11 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.12 11 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda Şekil 6.12’de verilen resimleri incelendiğimizde 780 °C sıcaklık, 10 kg yük ve 40 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının tamamen kaybolmasından dolayı difüzyon işleminin sağlandığını söyleyebilmekteyiz. Verilen resimlerde Cu10Sn matrisi içerisinde B₄C tanelerinin siyah renkte küresel ve karmaşık şekillerde dağıldığını söyleyebiliriz.

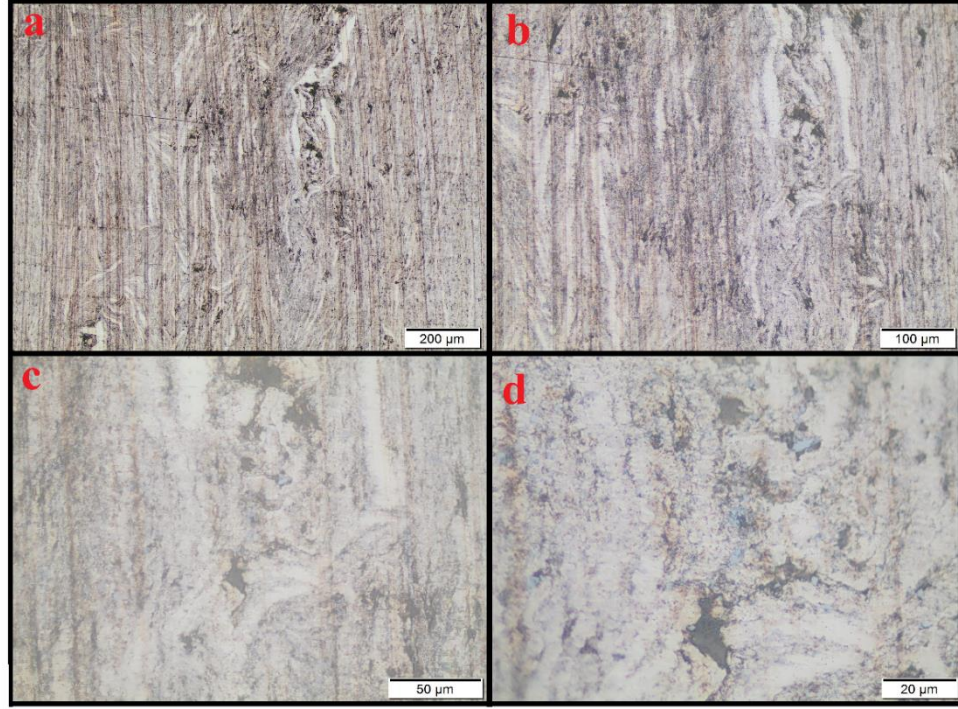
Aşağıda verilen Şekil 6.13’te % 92 Cu10Sn matris içerisinde % 8 B₄C takviye elemanı katılarak difüzyon kaynak işlemi yapılan 12 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.13 12 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda verilen Şekil 6.13'teki görüntüleri incelendiğimizde 820°C sıcaklık, 15 kg yük ve 20 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının tamamen kaybolmasından dolayı difüzyon kaynak işleminin gerçekleştiğini söyleyebiliriz.

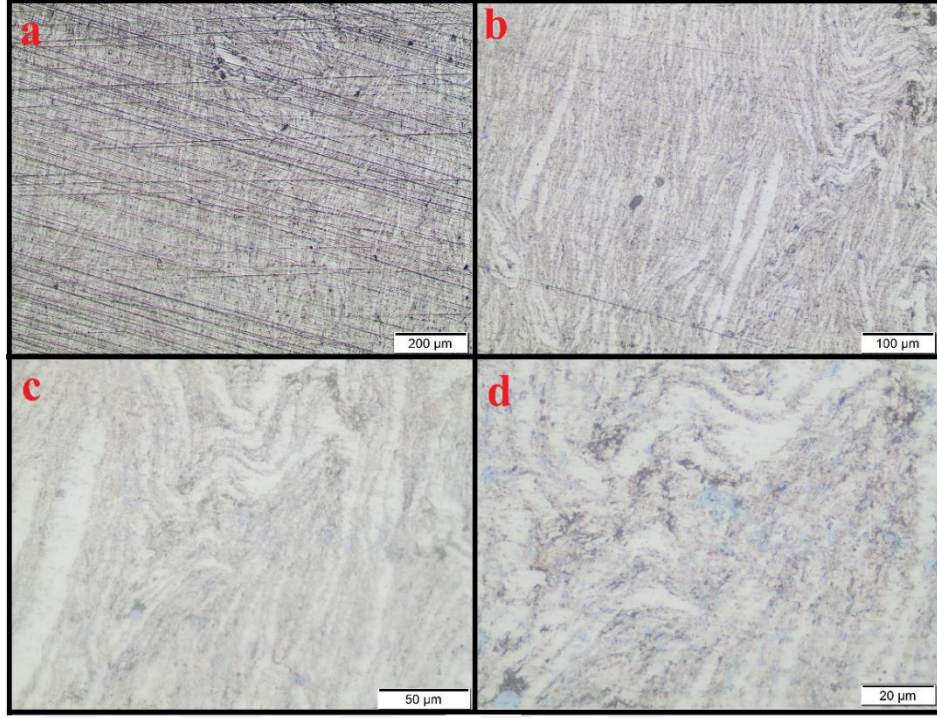
Aşağıda gösterilen Şekil 6.14'te % 88 Cu10Sn matris içerisine takviye elemanı olarak % 12 B₄C ilave edilerek üretilen ve difüzyon kaynak işlemi uygulanan 13 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.14 13 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda Şekil 6.14'te verilen resimleri incelendiğimizde 700°C sıcaklık, 25 kg yük ve 40 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının tamamen kaybolmasından dolayı difüzyon işleminin sağlandığını söyleyebilmekteyiz. Verilen resimlerde % 12 oranında B_4C partiküllerinin siyah ve gri renkte ve karmaşık şekilli olarak % 8 $Cu_{10}Sn$ matris yapı içerisinde dağıldığını söyleyebiliriz.

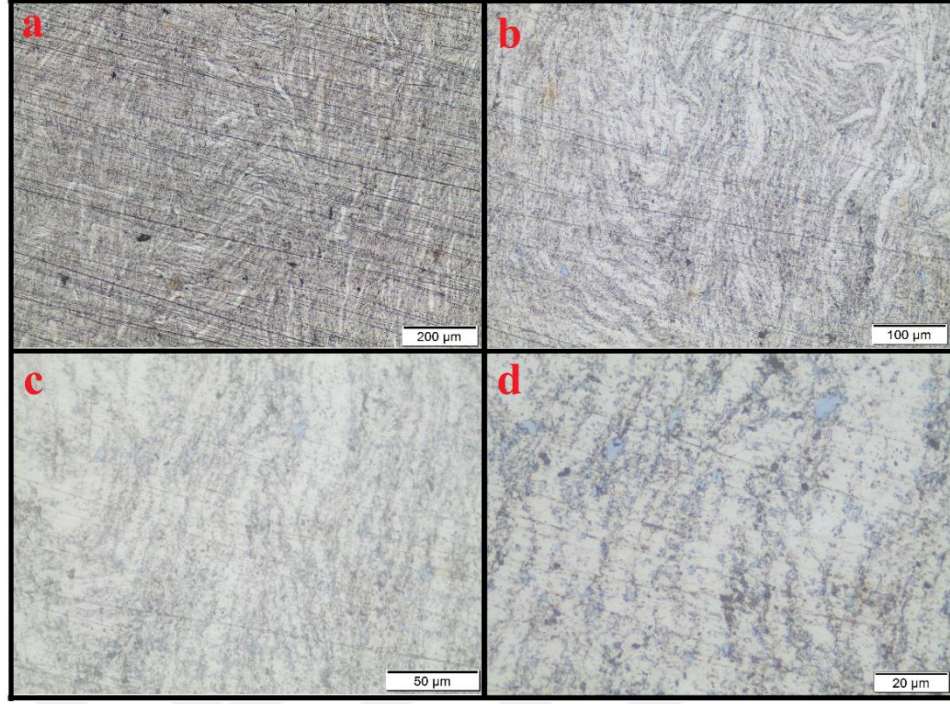
Aşağıda Şekil 6.15'te % 88 $Cu_{10}Sn$ matris içerisine takviye elemanı olarak % 12 B_4C ilave edilerek üretilen ve difüzyon kaynak işlemi uygulanan 14 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.15 14 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda Şekil 6.15'te verilen resimleri incelendiğimizde 740°C sıcaklık, 20 kg yük ve 20 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının tamamen kaybolmasından dolayı difüzyon işleminin sağlandığını söyleyebilmekteyiz. Verilen resimlerde B₄C tanelerinin siyah ve gri renkte ve karmaşık şekilli olarak matris yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir.

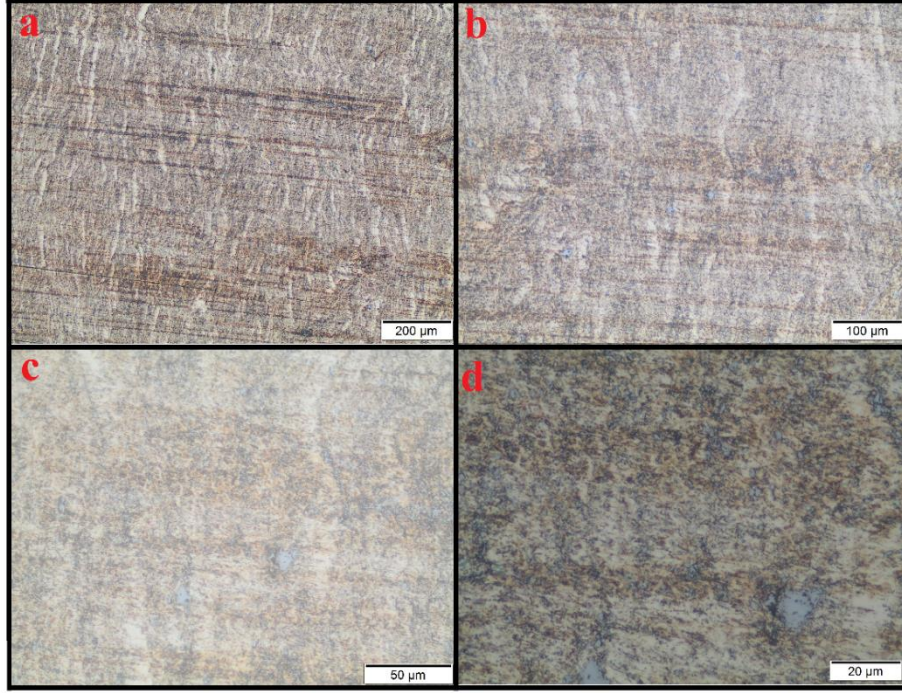
Aşağıda Şekil 6.16'da % 88 Cu10Sn matris içerisine takviye elemanı olarak % 12 B₄C ilave edilerek üretilen ve difüzyon kaynak işlemi uygulanan 15 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.16 15 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda Şekil 6.16’da verilen resimleri incelendiğimizde 780°C sıcaklık, 15 kg yük ve 80 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının tamamen kaybolmasından dolayı difüzyon işleminin sağlandığını söyleyebilmekteyiz. Verilen resimlerde B₄C tanelerinin grili, siyahlı renklerde ve karmaşık şekilli olarak matris yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını söyleyebiliriz.

Şekil 6.17’de % 88 Cu10Sn matris içerisine takviye elemanı olarak % 12 B₄C ilave edilerek üretilen ve difüzyon kaynak işlemi uygulanan 16 numaralı deney numunesinin 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerdeki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.17 16 numaralı birleştirmeye ait mikroyapı görüntüleri a) 10x büyütme, b) 20x büyütme, c) 50x büyütme, d) 100x büyütme

Yukarıda verilen Şekil 6.17’deki görüntüleri incelendiğimizde; 820 °C sıcaklık, 10 kg yük ve 60 dk süre ile gerçekleşen kaynak işleminde, kaynak hattının tamamen kaybolmasından dolayı difüzyon kaynak işleminin gerçekleştiğini söyleyebiliriz. Verilen resimlerde B₄C tanelerinin grili ve siyahlı renklerde, küresel ve karmaşık şekilli olarak matris yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını söyleyebiliriz.

Optik mikroskop görüntülerinin genel olarak değerlendirilmesi:

Şekil 6.2 – Şekil 6.5 arasında verilen görüntüler takviyesiz malzemeler olup, Şekil 6.6 – Şekil 6.17 arasında verilen tüm birleştirme numunelerinde takviye elemanı B₄C partiküllerinin Cu₁₀Sn matris içerisinde dağılımının istenildiği gibi homojen dağılım gösterdiği fotoğraflardan tespit edilmektedir. Farklı kaynak şartlarında birleştirilen numunelerin tümünde, artan sıcaklık, basınç ve süre ile birlikte optik mikroskop fotoğraflarındaki değişim göze çarpmaktadır. Söz konusu fotoğraflarda difüzyon işleminin sıcaklık, basınç ve süreye bağlı olarak değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Difüzyon kaynağının genel olarak dört aşamada gerçekleştiği düşünülürse, (1. Yük altında plastik deformasyon, 2. Sürünme deformasyonu, 3. Difüzyon ve 4. Yeniden kristalleşme ve tane sınır göçü) artan sıcaklık ve sürenin birleşme bölgesini

daraltması gayet doğal bir sonuç olarak karşımıza çıkar. Çünkü yük altında sıcaklık, basınç ve sürenin artmasıyla kaynaklı numunelerin birleşme bölgeleri arasında atom göçünün arttığı bilinmektedir. Bu bilgiden yola çıkarak mikroyapı fotoğraflarında farklı şartlarda gerçekleşen birleştirme işlemlerinde birleşme bölgesinde farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılık, yüzey düzgünlüğünün tam sağlanamaması, yüzeylerin birbirine tam alın alına oturtulamaması, yüzey pürüzlülüğü gibi nedenlerden meydana geldiği düşünülmüştür (Keskin vd., 2019).

Literatürden alınan bilgiler ışığında; difüzyon kaynağı gerçekleşen numunelerde genel olarak kaynağın birinci aşamasında yüzeydeki pürüzlülüklerinde akma ve sürünme mekanizmaları ile ara yüzeyde büyük bir alanda temas sağlanmış ve birleşmeler genelde tane sınırlarında oluşmuştur. Basıncın etkisiyle yüzeydeki oksit filmleri kırılarak oksitlerin kırılmış noktalarından atom akışı başlamaktadır. Kaynağın ikinci aşamasında ise difüzyonun etkisi deformasyondan daha etkilidir. Gözenekler bu aşamada tane sınırı difüzyonu neticesinde kaybolur ve bir kısmı da tane içinde oluşur. Kaynağın üçüncü aşamasında ise birleştirilecek numuneler arasındaki atomik bağın tamamlandığı görülmektedir. Yok, edilemeyen gözenekler bu aşamada hacim difüzyonu ile büyük oranda yok edilir (Kahraman ve Gülenç, 2016).

Cu₁₀Sn / B₄C alaşım oranlarına bağlı olarak gerçekleşen birleştirmelerin birçoğunda ara yüzeylerin oluşarak, temasın sağlandığı görülmüştür. Bazı birleştirmelerde ise (1, 2 ve 3 numaralı) ara yüzey ve temasın tam olarak sağlanmadığı bu yüzden difüzyonun istenildiği şekilde gerçekleşmediği görülmüştür. Yine takviye kullanılarak üretilen numunelerde takviye malzemesi B₄C'nin optik mikroskop fotoğraflarında ağırlıklı olarak koyu gri renkte, köşeli ve karmaşık şekilli tanelerden olduğu gözlemlenmiştir.

Farklı sıcaklık, basınç ve sürelerde gerçekleştirilen difüzyon kaynak işlemleri sonucu 20-40-60-80 dakika süre, 10-15-20 ve 25 kg basınç ile 700-740-780 ve 820°C' sıcaklıkta kaynak işlemine tabi tutulan 1, 2 ve 3 numaralı numunelerde birleşme gerçekleşmezken, diğer deneylerdeki parametrelerde bütün şartlar için olumlu sonuçlar alınmıştır. Olumsuz sonuçlu numunelerde birleşmenin olmamasına sebep

olarak sıcaklığın ve sürenin yetersiz olması gösterilebilir. Nitekim aynı şartlarda süre ve sıcaklık arttırıldığında kaynak işleminin gerçekleştiği görülmüştür.

Bilindiği gibi difüzyon kaynak yönteminde atomların yayınabilmesi için yeterli sıcaklık, süre ve basınç ihtiyacı vardır. Süre, bağımlı bir işlem parametresi olup, sıcaklık, basınç ve birleştirme türü ile ilişkilidir. Her malzeme ya da malzeme çifti için gerekli süre birkaç saniyeden, birkaç saate kadar değişebilir. Kaynak süresinin uzun olması; kaynak ekonomisi açısından bir dezavantaj oluştururken, boşlukların oluşumu, bileşimin değişimi ve kırılğan intermetalik bileşiklerin oluşumunu teşvik etmesi gibi bağlantının mekanik özelliklerini bozan olumsuzluklara da neden olmaktadır (Aydın vd., 2013).

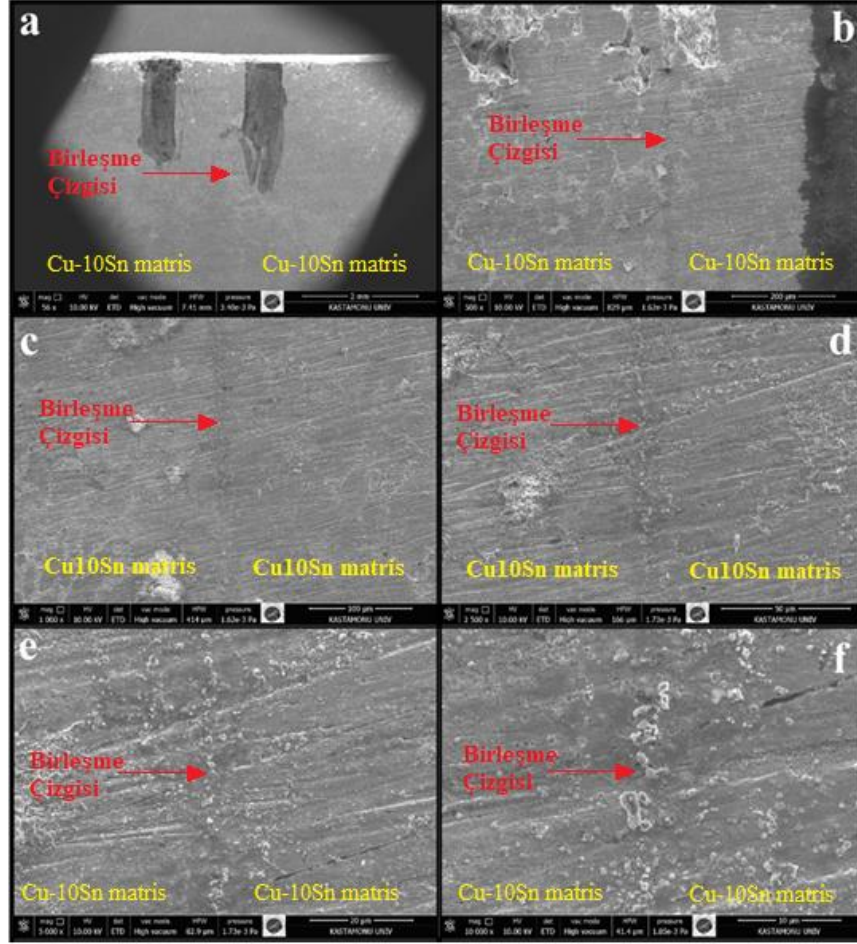
6.1.2 SEM İncelemeleri

Hazır olarak Nanokar firmasından temin edilen ön alaşımlı ağırlık olarak % 10 Sn ve % 90 Cu oranlarına sahip Cu₁₀Sn matrisi ile B₄C takviye elemanı Tablo 5.1’de verilen çizelgedeki parametrelere uygun gerçekleştirilen birleştirmelerin her biri için farklı büyütmelerde taramalı elektron mikroskopuyla SEM fotoğrafları alınmıştır. SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.18 ve Şekil 6.33 arasında verilmiştir. SEM fotoğraflarında difüzyon bölgeleri belirlenmeye çalışılmış, fotoğraflara bakılarak difüzyonun iyi bir şekilde gerçekleşip gerçekleşmediği hususunda yorumlar yapılmaya çalışılmıştır. Mikroyapı incelemelerine göre genel olarak bronz (Cu₁₀Sn) matrisli B₄C takviyeli numunelerin difüzyon kaynağı ile birleştirmelerinin başarılı olduğu belirlenmiştir.

Takviyesiz Cu₁₀Sn matristen üretilen ve farklı parametrelerde birleştirilen 1; 2; 3 ve 4 numaralı deneylerden elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.18 – Şekil 6.21 arasında verilmiştir. Kaynaklı numunelerin mikroyapıları incelendiğinde; mikroyapıların orijinal malzeme mikroyapısına benzediği ve tane ebatlarının kaynak öncesi morfolojilerini genel olarak koruduğu görülmüştür.

Şekil 6.18’de 700°C sıcaklık, 10 kg basınç ve 20 dk. sürede kaynak edilmiş 1 numaralı deney numunesinin (takviye elemansız Cu₁₀Sn) SEM görüntüleri

verilmiştir. Şekilde a, 56x, b, 500x, c, 1000x, d, 2500x, e, 5000x, f ise 10000x büyütmeyi gösteren fotoğraflardır.



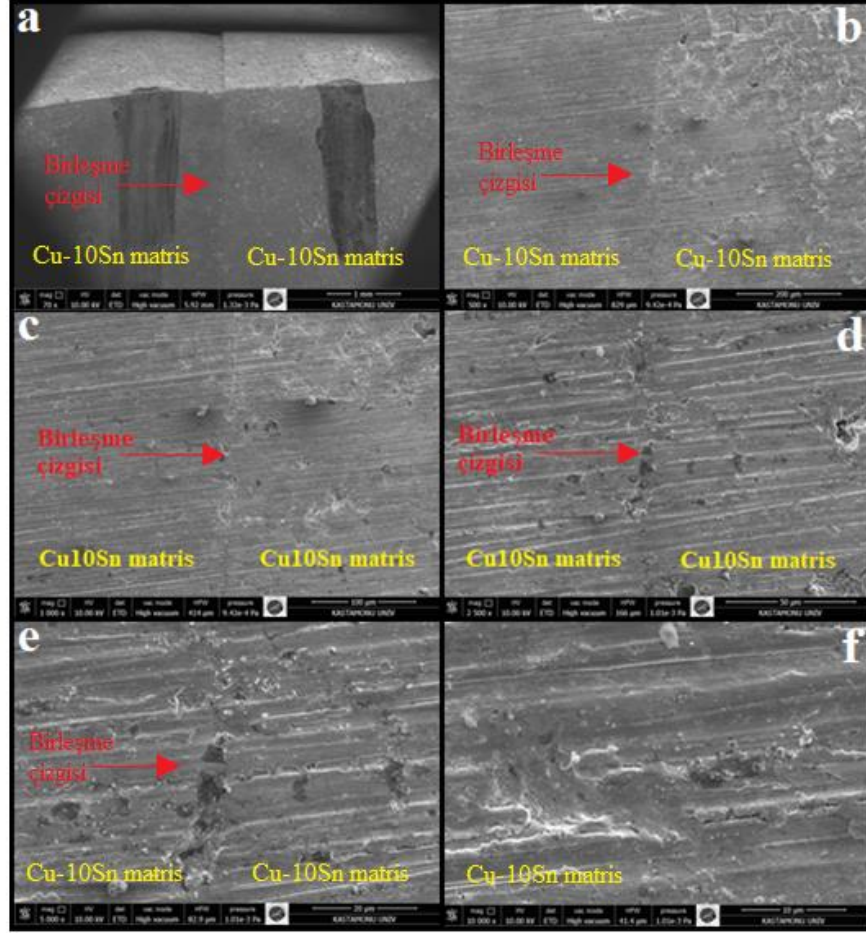
Şekil 6.18 1 numaralı deney numunesinin a) 56x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Deney 1’de takviye elemansız % 10 Sn ve % 90 Cu içeren bronz alaşımından üretilen 2 adet numune 700°C sıcaklık, 10 kg basınç ve 20 dk. süre de birleştirilmiş olup, birleştirmelerden elde edilen SEM görüntüleri (Şekil 6.18) incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Difüzyonun gerçekleşmemesi nedeni için sıcaklığın ve işlem süresinin yetersiz olması gösterilebilir.

Difüzyon kaynak işleminde başarılı bir birleştirme sağlamak için ısı, zaman ve basınç parametrelerinin doğru seçilmesi gerekir. Birleştirme yüzeylerinde üniform bir yapı sağlamak için difüzyon işleminin gerçekleşmesi gerekir. Tüm bu işlemler

için yüksek sıcaklıklarda dahi yeterli kaynak süresi gerekir. Kaynak süresi, yüksek sıcaklıklar ya da yakın difüzyon mesafesi sağlanarak kısaltılabilir.

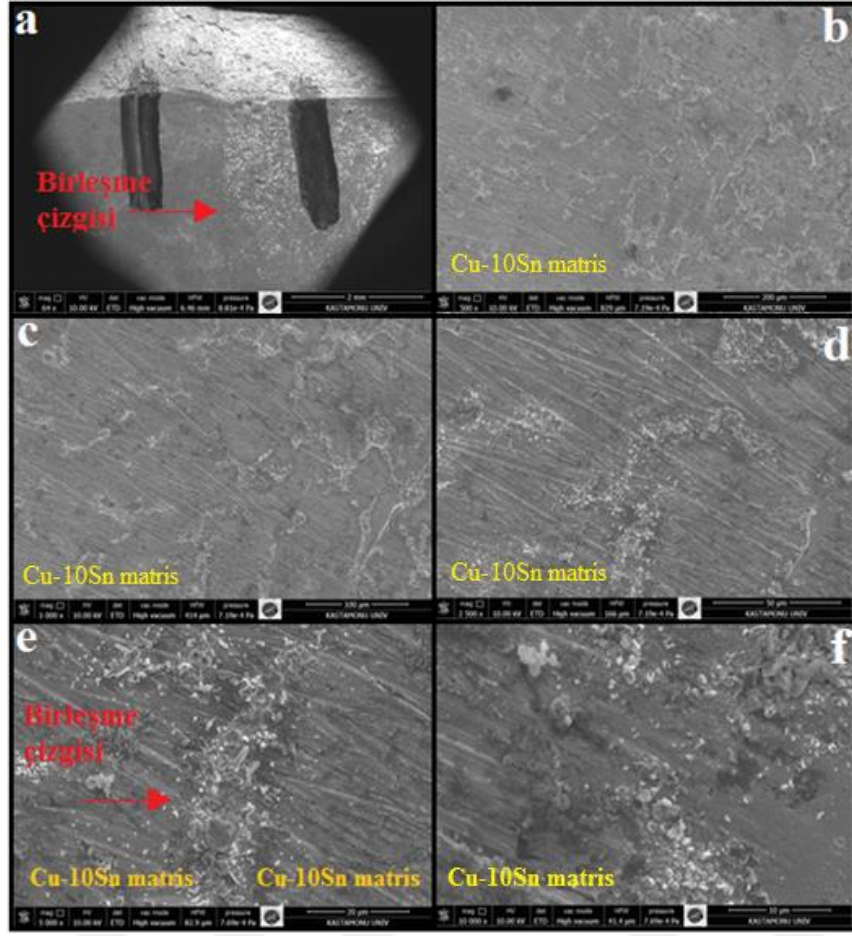
Şekil 6.19'da 740°C sıcaklık, 15 kg basınç ve 40 dk. sürede kaynak edilmiş 2 numaralı deney numunesinin (takviye elemansız Cu10Sn) SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.19 2 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 6.19 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Difüzyon olmamasına sebep olarak halen sıcaklığın ve sürenin yetersiz olması gösterilebilir.

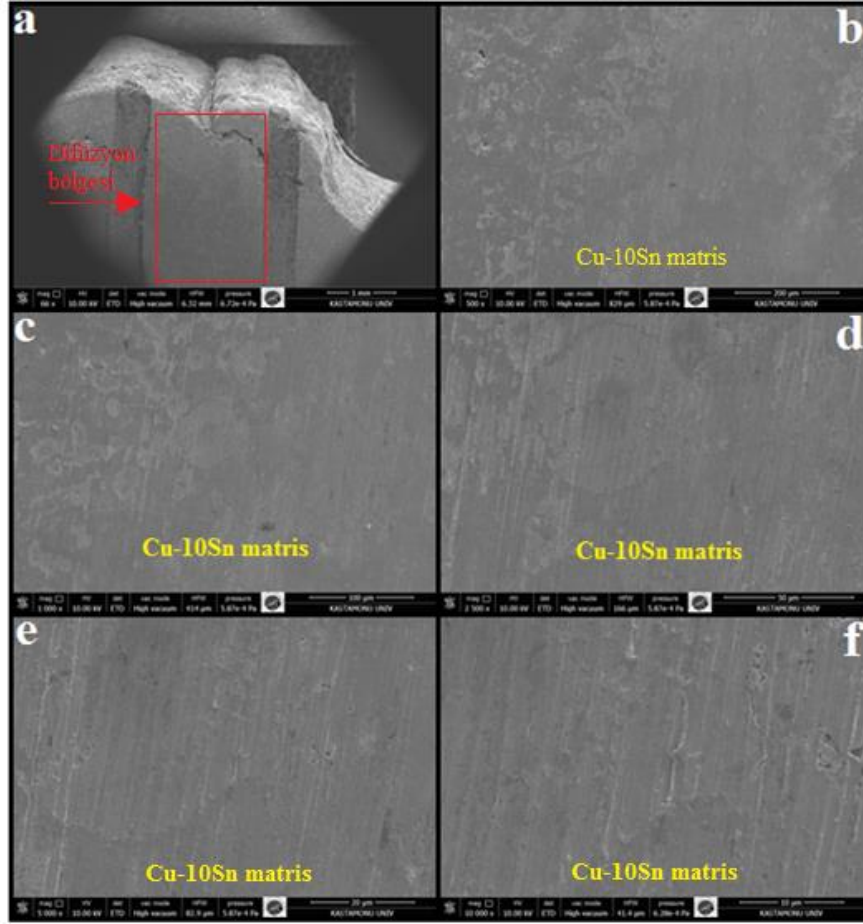
Şekil 6.20'de 780°C sıcaklık, 20 kg basınç ve 60 dk. sürede kaynak edilmiş 3 numaralı deney numunesinin (takviye elemansız Cu10Sn) SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.20 3 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 6.20 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

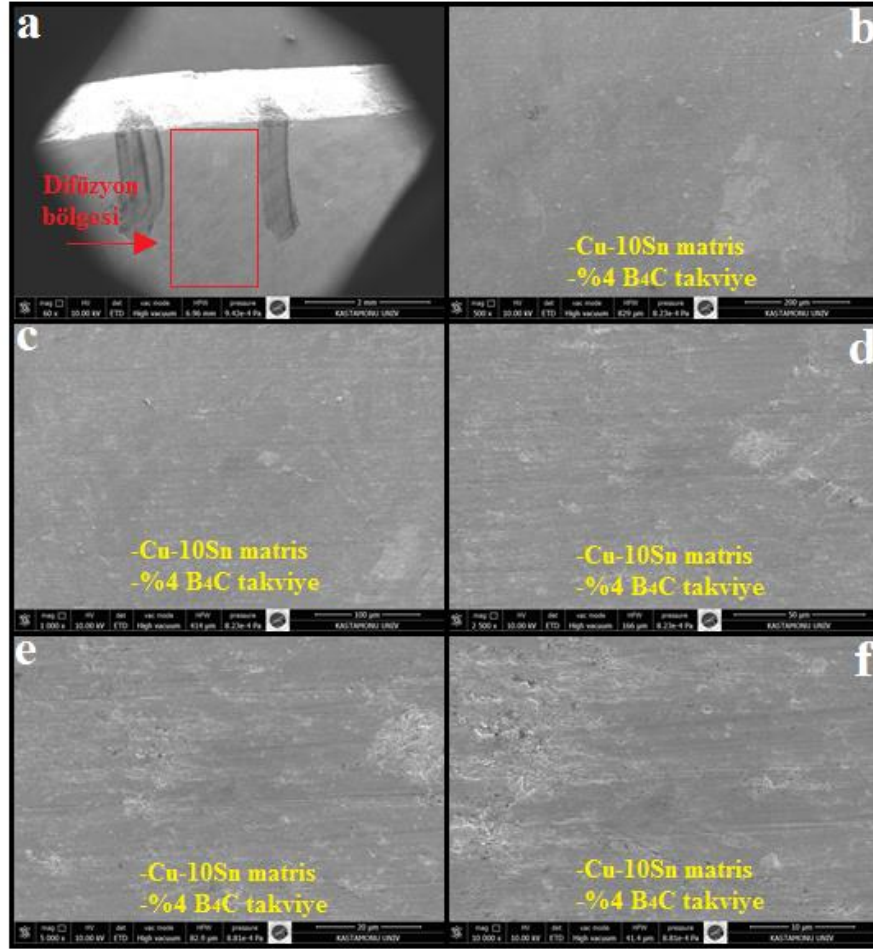
Aşağıda (Şekil 6.21) 820°C sıcaklık, 25 kg basınç ve 80 dk. sürede kaynak edilmiş 4 numaralı deney numunesinin (takviye elemansız Cu10Sn) SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.21 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.21 4 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

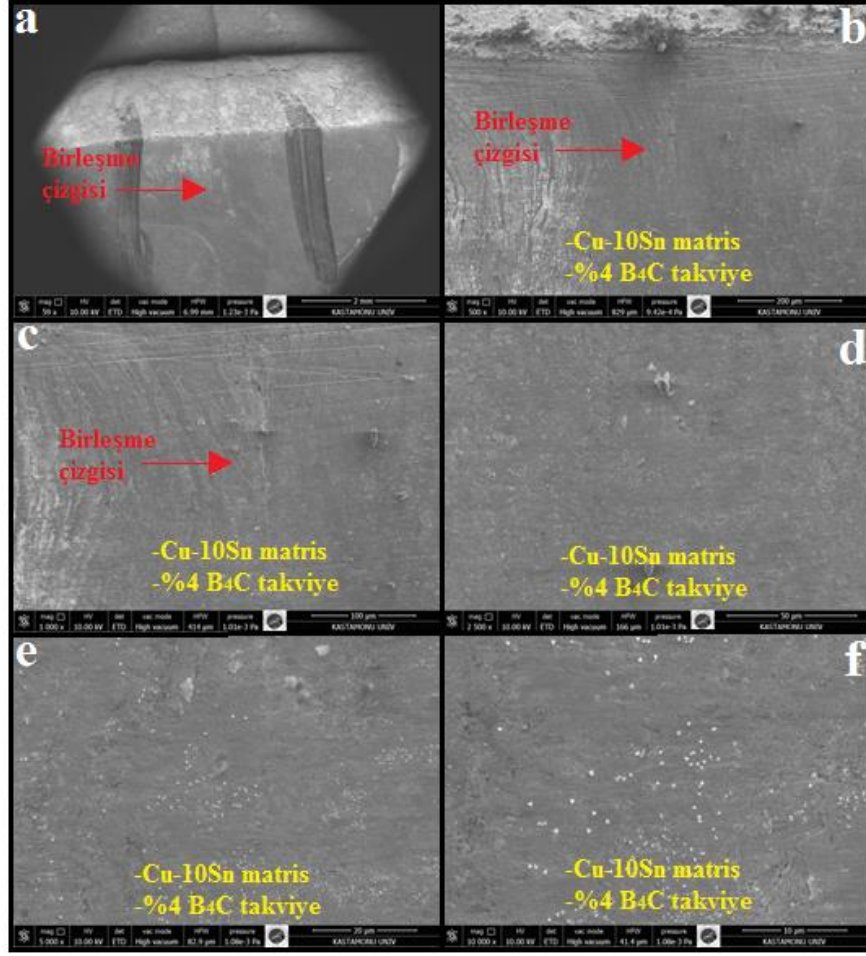
% 4 B₄C takviye malzemesi kullanılarak farklı parametrelerde gerçekleştirilen 5; 6; 7 ve 8 numaralı deneylerin difüzyon kaynak işlemlerinden elde edilen SEM görüntüleri ise sırasıyla Şekil 6.22 – Şekil 6.25 arasında verilmiştir. Parametreler incelendiğinde deneylerin dört farklı sıcaklık, basınç ve sürede birleştirildiği görülmektedir. Söz konusu deneylerde elde edilen mikroyapıların takviye elemansız mikroyapılardan farklı olduğu yine fotoğraflardan görülmektedir Takviye elemanı olarak kullanılan B₄C partikülleri fotoğraflarda görülmektedir.

Aşağıda 700°C sıcaklık, 15 kg basınç ve 60 dk. sürede kaynak edilmiş 5 numaralı deney numunesinin ((% 4 B₄C takviye elemanlı Cu10Sn) SEM görüntüleri (Şekil 6.22) verilmiştir. Şekil 6.22 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



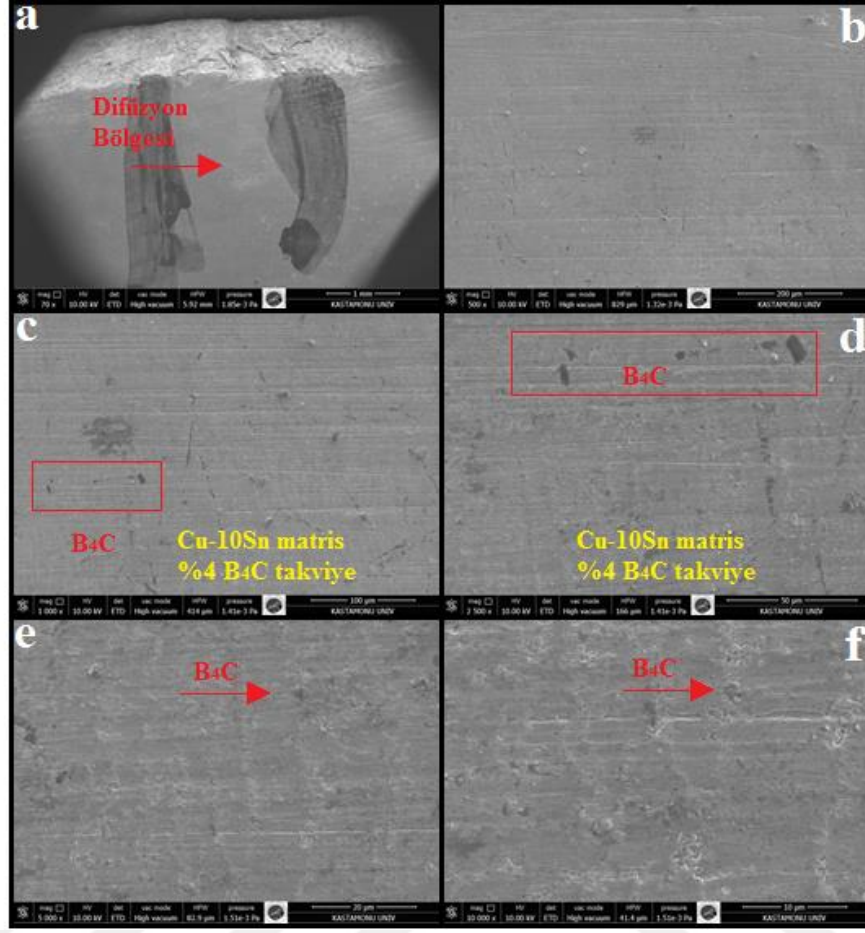
Şekil 6.22 5 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Aşağıda 740°C sıcaklık, 10 kg basınç ve 80 dk. sürede kaynak edilmiş 6 numaralı deney numunesinin (% 4 B₄C takviye elemanlı Cu₁₀Sn) SEM görüntüleri (6.23) verilmiştir. Şekil 6.23 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Difüzyon olmamasına sebep olarak sıcaklık ve süreye rağmen basıncın yeterli olmaması gösterilebilir.



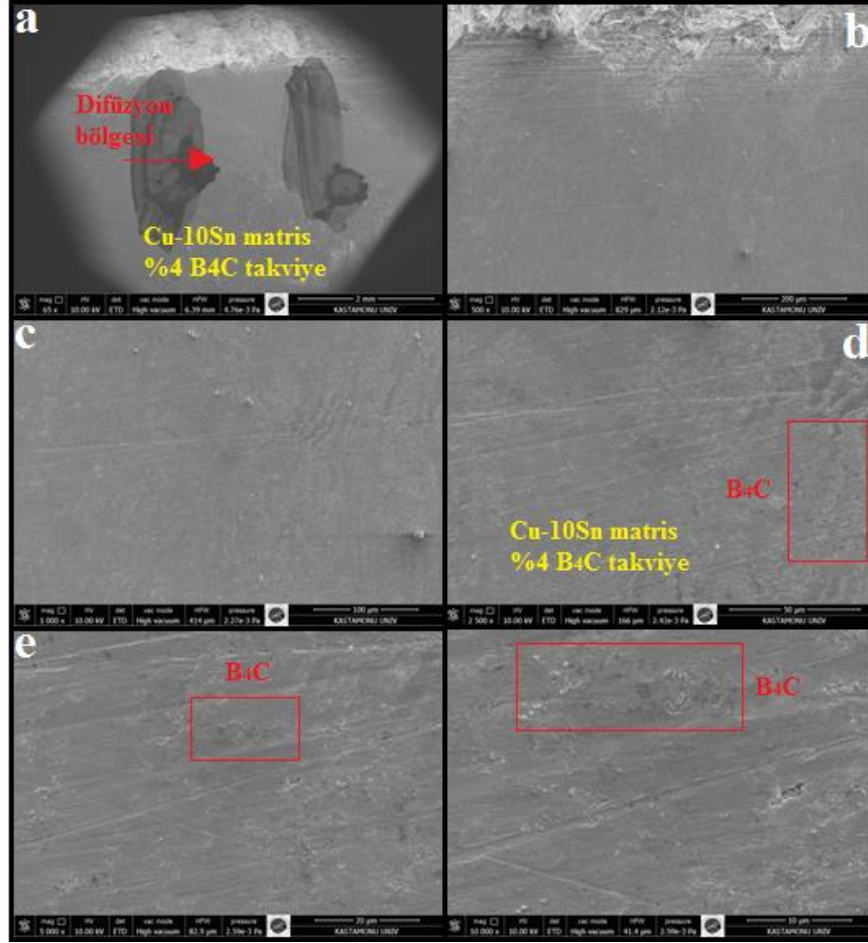
Şekil 6.23 6 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Aşağıda 780°C sıcaklık, 25 kg basınç ve 20 dk. sürede kaynak edilmiş 7 numaralı deney numunesinin (% 4 B₄C takviye elemanlı Cu₁₀Sn) SEM görüntüleri (Şekil 6.24) verilmiştir. Şekil 6.24 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.24 7 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

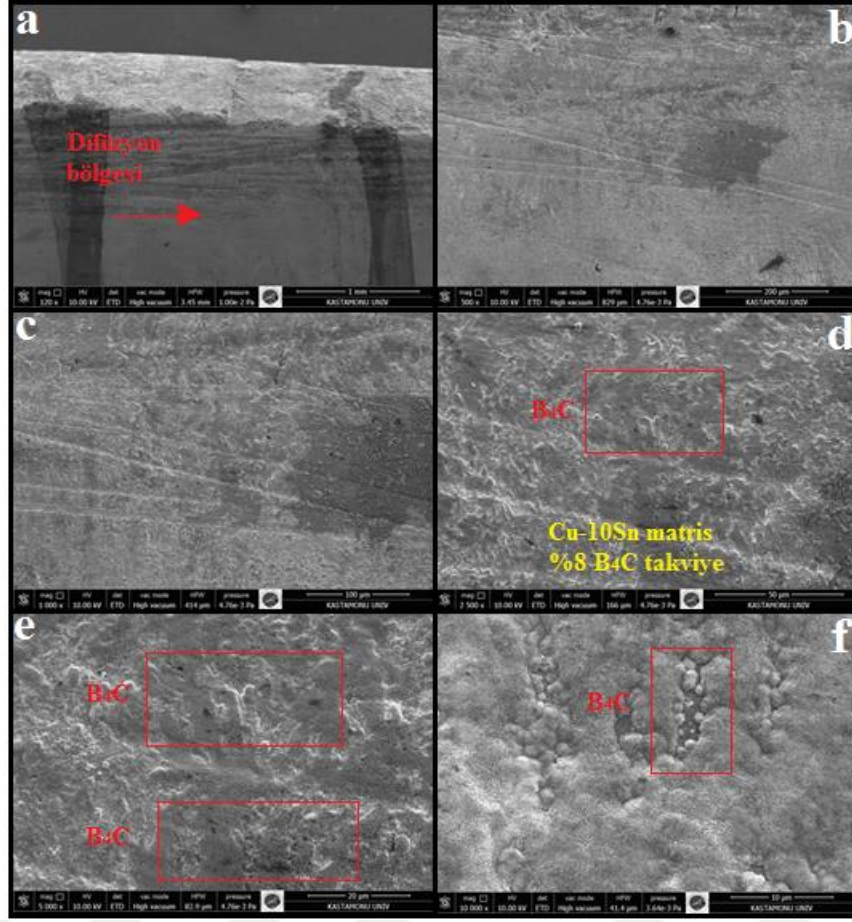
Aşağıda 820°C sıcaklık, 20 kg basınç ve 40 dk. sürede kaynak edilmiş 8 numaralı deney numunesinin (% 4 B₄C takviye elemanlı Cu10Sn) SEM görüntüleri (Şekil 6.25) verilmiştir. Şekil 6.25 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.25 8 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

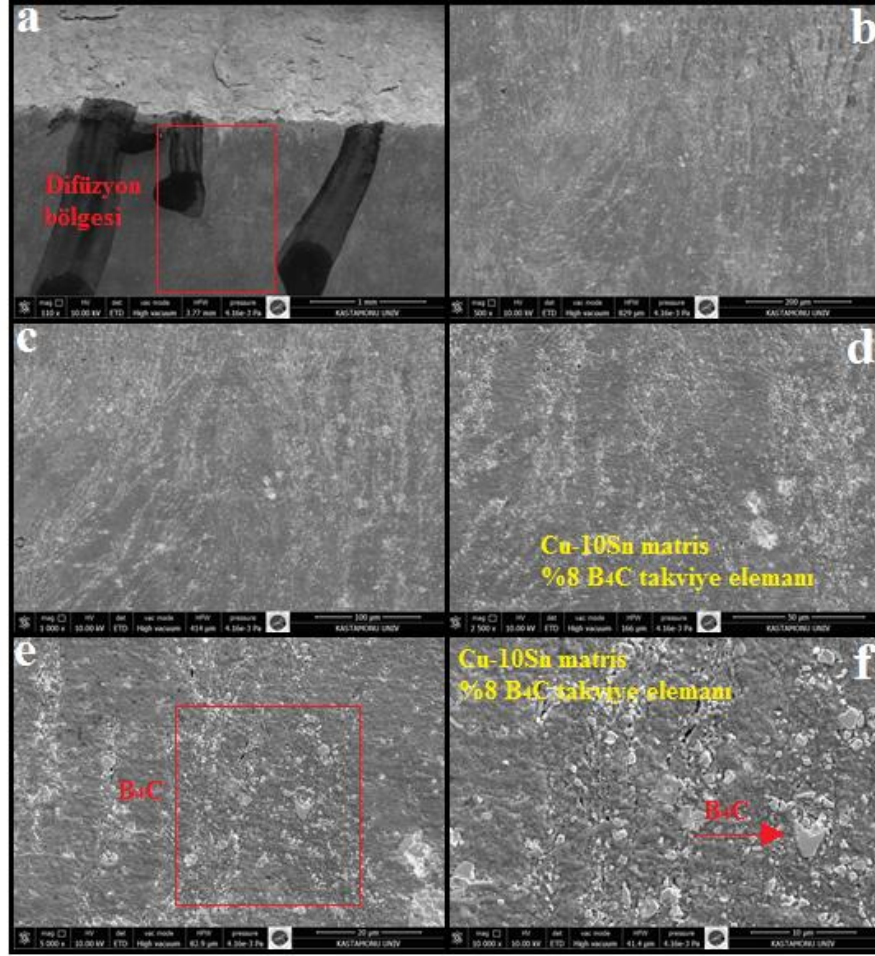
% 8 B₄C takviye malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen 9, 10, 11 ve 12 numaralı deneylere ait SEM görüntüleri Şekil 6.26 – Şekil 6.29 arasında verilmiştir. Söz konusu deneyler yine Taguchi düzeneğine uygun olarak farklı sıcaklık, basınç ve sürelerde gerçekleştirilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde artan takviye oranına bağlı olarak B₄C dağılımının arttığı gözlemlenmiştir.

Aşağıda 700°C sıcaklık, 20 kg basınç ve 80 dk. sürede kaynak edilmiş 9 numaralı deney numunesinin (% 8 B₄C takviye elemanlı Cu10Sn) SEM görüntüleri (Şekil 6.26) verilmiştir. Şekil 6.26 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



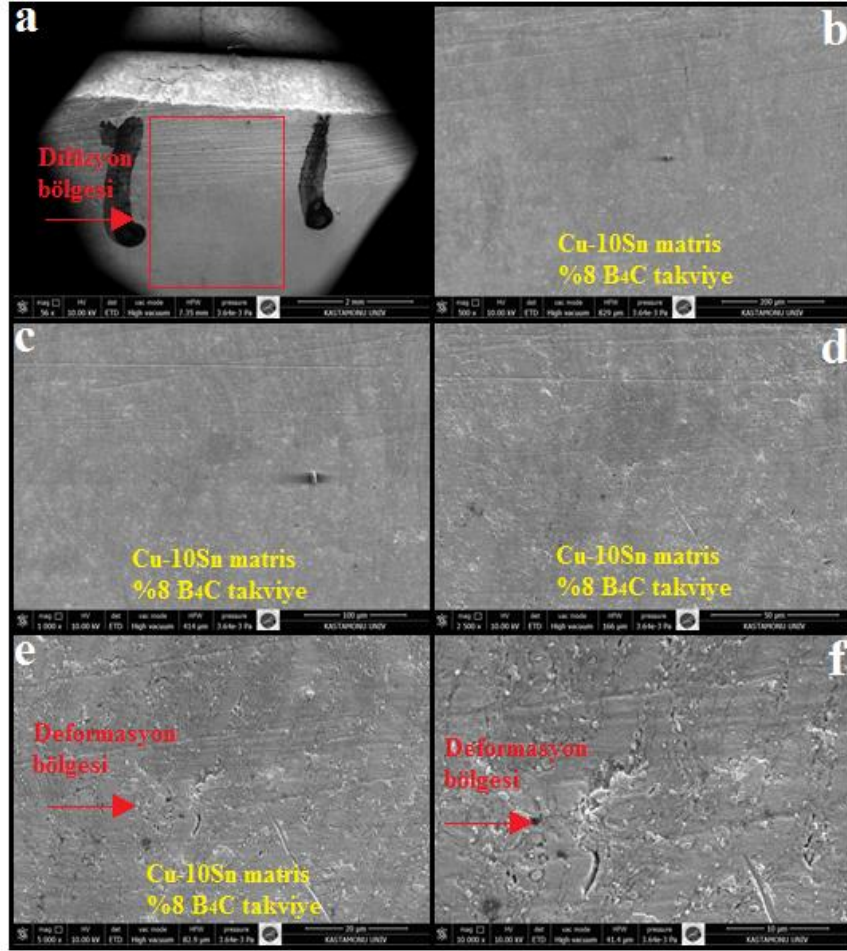
Şekil 6.26 9 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Aşağıda 740°C sıcaklık, 25 kg basınç ve 60 dk. Sürede kaynak edilmiş 10 numaralı deney numunesinin (% 8 B₄C takviye elemanlı Cu10Sn) SEM görüntüleri (Şekil 6.27) verilmiştir. Şekil 6.27 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



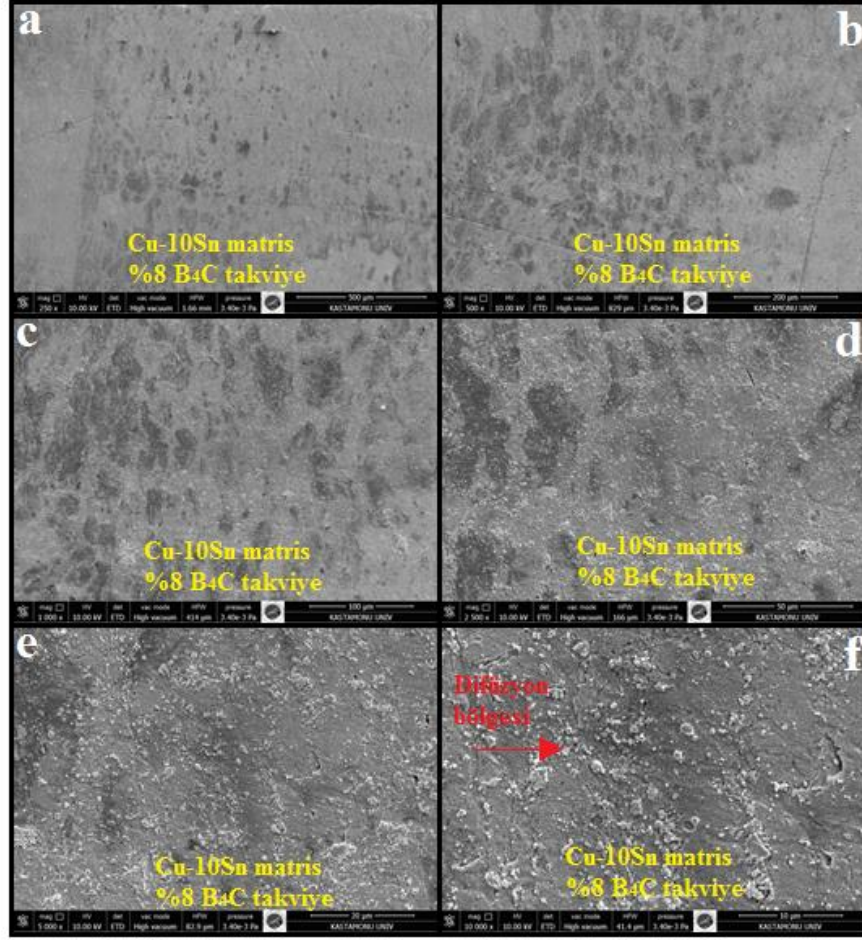
Şekil 6.27 10 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Aşağıda 780 °C sıcaklık, 10 kg basınç ve 40 dk. sürede kaynak edilmiş 11 numaralı deney numunesinin (% 8 B₄C takviye elemanlı Cu₁₀Sn) SEM görüntüleri (Şekil 6.28) verilmiştir. Şekil 6.28 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Ancak e ve f numaralı resimlerde difüzyon bölgesinde deformasyon izlerinin olduğu görülmektedir. Bunun difüzyon kaynağının gerçekleşmesi sonucu oluşan bir durum olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.28 11 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

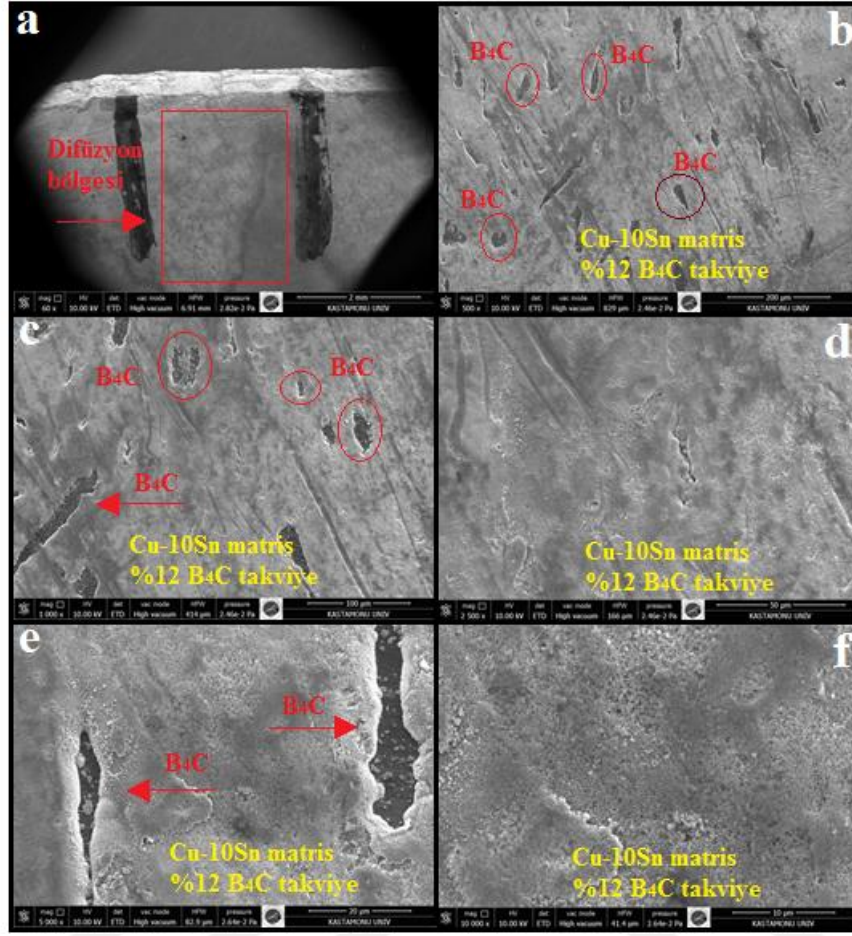
Aşağıda 780°C sıcaklık, 10 kg basınç ve 40 dk. sürede kaynak edilmiş 12 numaralı deney numunesinin (% 8 B₄C takviye elemanlı Cu10Sn) SEM görüntüleri (Şekil 6.29) verilmiştir. Şekil 6.29 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.29 12 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

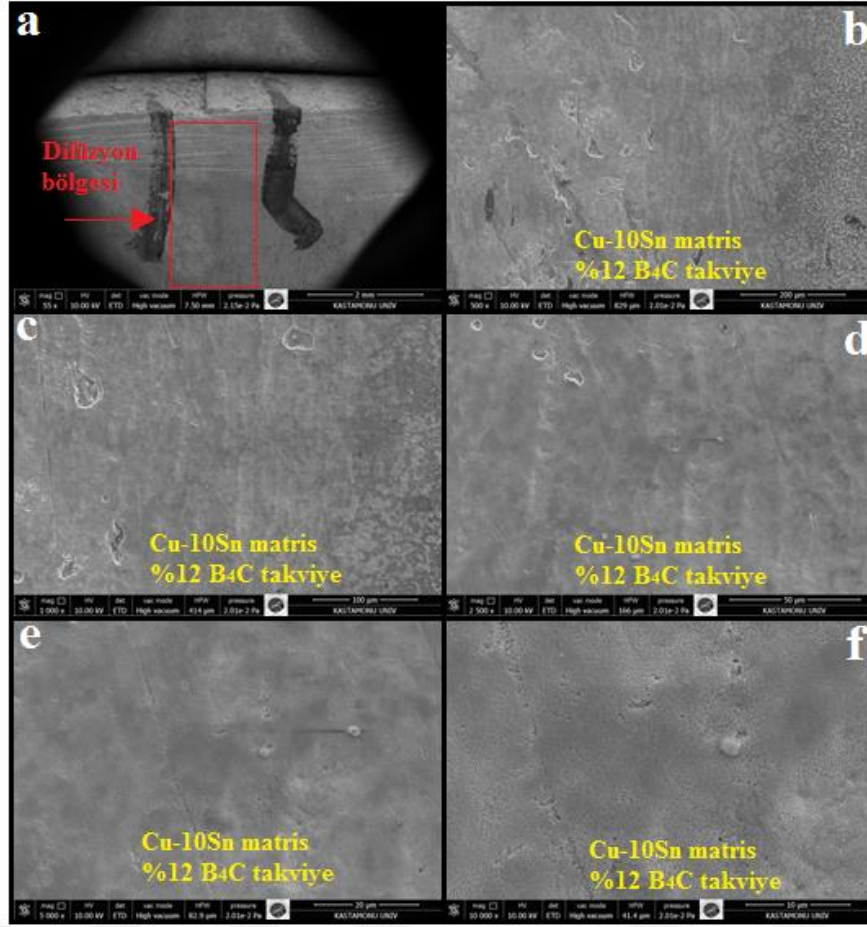
% 12 B₄C takviye edilerek gerçekleştirilen 13, 14, 15 ve 16 numaralı deneylere ait SEM görüntüleri ise Şekil 6.30 – Şekil 6.33 arasında verilmiştir. Söz konusu deneyler Taguchi metoduna uygun olarak farklı sıcaklık, basınç ve sürelerde gerçekleştirilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde artan takviye oranına bağlı olarak B₄C dağılımının da arttığı gözlemlenmiştir. Tüm SEM fotoğrafları içerisinde ağırlıkça % 12 takviye elemanı kullanımının olduğu 13, 14, 15 ve 16 numaralı deneylerdeki takviye elemanı dağılımının daha fazla olduğu yine SEM fotoğraflarında dikkat çekmektedir.

Aşağıda 700°C sıcaklık, 25 kg basınç ve 40 dk. sürede kaynak edilmiş 13 numaralı deney numunesinin (% 12 B₄C takviye elemanlı Cu₁₀Sn) SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.30 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



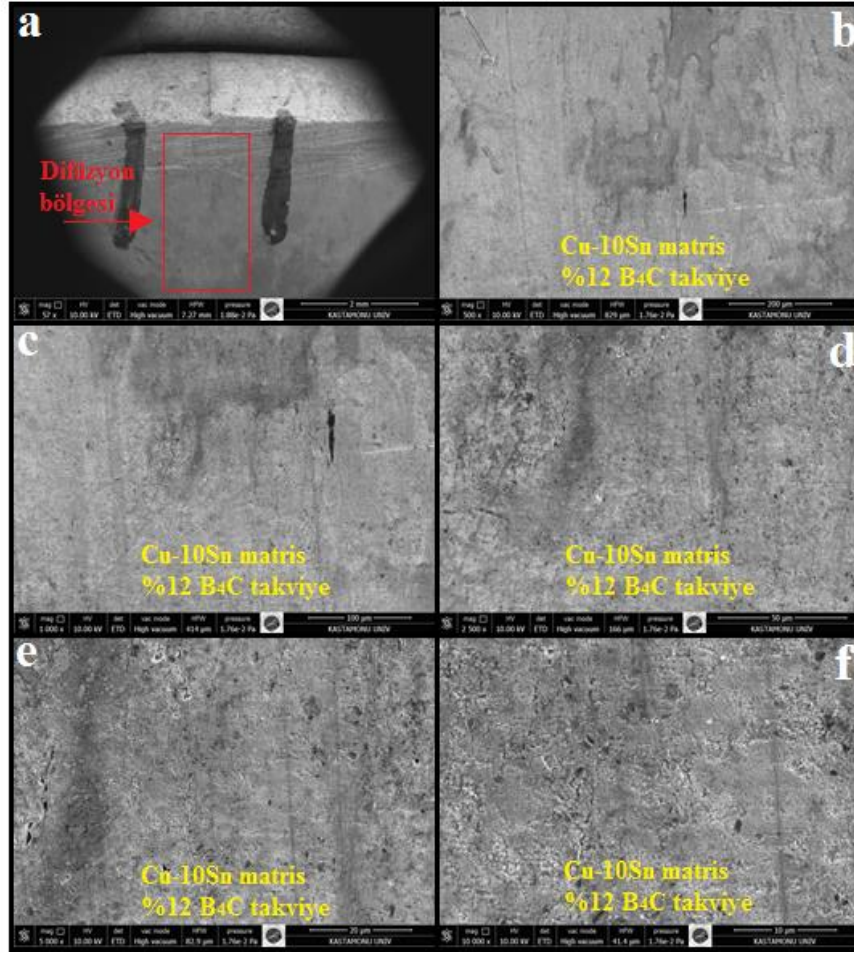
Şekil 6.30 13 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Aşağıda 740°C sıcaklık, 20 kg basınç ve 20 dk. sürede kaynak edilmiş 14 numaralı deney numunesinin (% 12 B₄C takviye elemanlı Cu10Sn) SEM görüntüleri (Şekil 6.31) verilmiştir. Şekil 6.31 incelendiğinde; kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



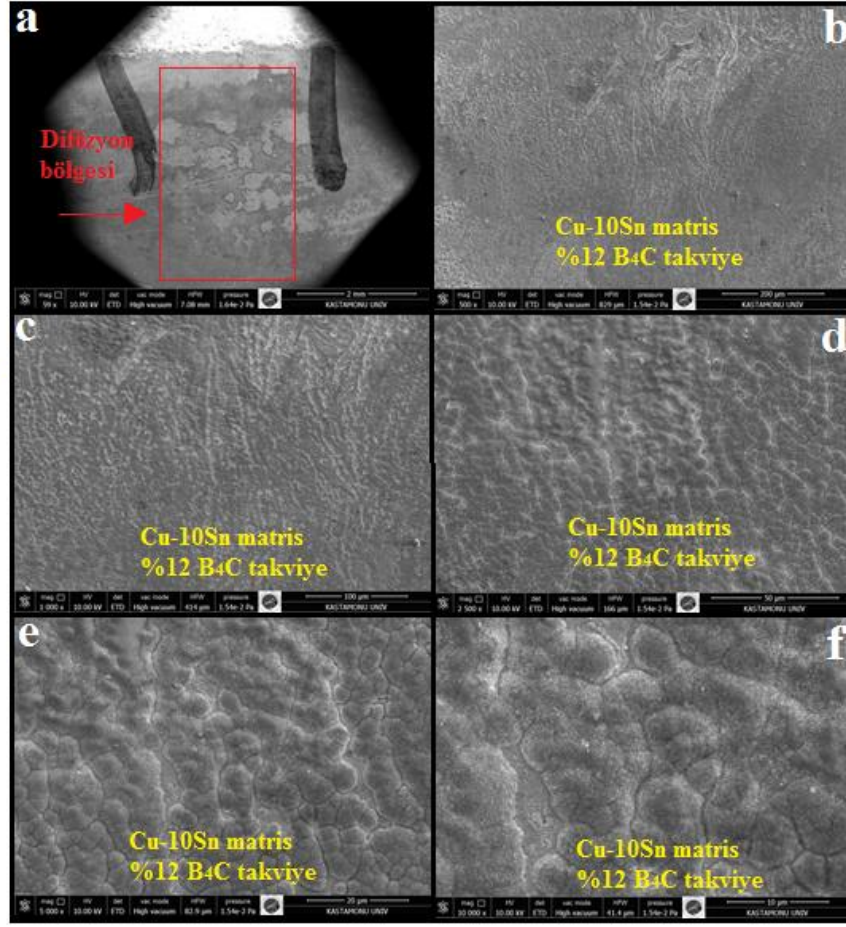
Şekil 6.31 14 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri

Aşağıda 780°C sıcaklık, 15 kg basınç ve 80 dk. sürede kaynak edilmiş 15 numaralı deney numunesinin (% 12 B₄C takviye elemanlı Cu₁₀Sn) SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.32 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.32 15 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyötmelerdeki SEM mikroyapı göröntüleri

Aşağıda 820°C sıcaklık, 10 kg basınç ve 60 dk. sürede kaynak edilmiş 16 numaralı deney numunesinin (% 12 B₄C takviye elemanlı Cu10Sn) SEM göröntüleri (Şekil 6.33) verilmiştir. Şekil 6.33 incelendiğinde kaynak parametrelerinin difüzyonun oluşumu için yeterli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.33 16 numaralı deney numunesinin a) 70x, b) 500x, c) 1000x, d) 2500x, e) 5000x f) 10000x büyütmelelerdeki SEM mikroyapı görüntüleri.

6.1.2.1 SEM görüntülerinin genel olarak değerlendirilmesi

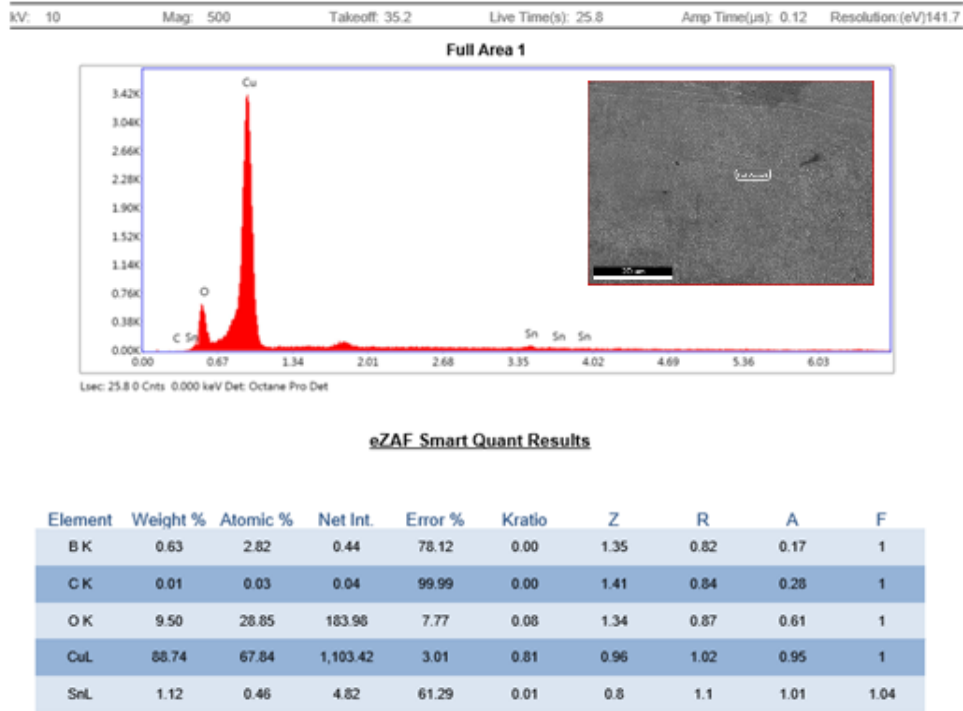
Genel olarak SEM fotoğrafları incelendiğinde 1, 2 ve 3 numaralı birleştirmelerde kaynak hattı belirgin bir şekilde gözlemlenmiş ve kaynak işleminin bu nedenle tam olarak gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Buna neden olarak süre ve sıcaklığın yetersiz olması düşünülmektedir. 4 numaralı deney numunesinde ise kaynak hattının mikroyapı resimlerinde görünmemesinden ve kesme testlerindeki yüksek kesme kuvveti (6362 N) değerinden dolayı difüzyon işleminin gerçekleştiği ancak makro resimlerde görülen aşırı deformasyonun gerçekleştiği görülmüştür. Buna neden olarak sıcaklık, basınç ve bekleme süresinin yeterli olması düşünülmektedir. 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15 ve 16 numaralı birleştirmelerde ise kaynak işleminin istenildiği gibi gerçekleştiği, söz konusu deneylerde kaynak hattının kaybolduğu, bu durum neticesinde difüzyonun gerçekleşerek kaynaklı birleştirmelerin oluştuğu tespit

edilmiştir. Optimum kaynak parametreleri neticesinde yeterli süre, sıcaklık ve yük ile birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapıların tümü (Şekil 6.18 – Şekil 6.33) genel olarak değerlendirildiğinde özellikle sıcaklık ve birleştirme süresine bağlı olarak kaynak işleminin gerçekleştiği belirlenmiştir. Literatür taramaları yapıldığında da aynı sonuç ile karşılaşılmıştır.

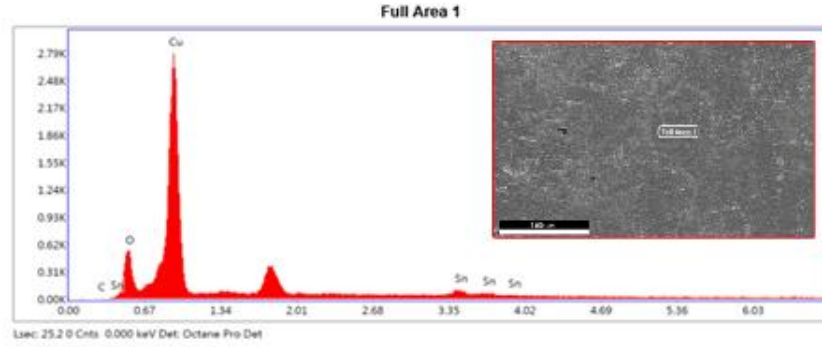
6.2 EDS İncelemeleri

Sem görüntülerinden alınan alan taramalı EDS analiz sonuçları Şekil 6.34 - Şekil 6.49 arasında verilmiştir. EDS analizleri incelendiğinde; Cu₁₀Sn matrisinin içerisinde B₄C takviye elemanın difüzyon bölgesinde iç içe geçtiği, matris elementleri olan Cu ve Sn ile takviye malzemesi elementleri olan B ve C elementlerinin EDS piklerinde yer aldığı, takviye oranının artışına bağlı olarak B ve C piklerinde de artışın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca difüzyon kaynak işlemiyle birleştirilen numunelerin EDS incelemelerinin, kesme (makaslama) testi ve mikroyapı incelemeleri ile de uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Tüm EDS incelemelerinde Cu, Sn, B, C ve O elementlerine bakılmıştır.



Şekil 6.34 1 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

KV: 10 Mag: 1000 Takeoff: 34.3 Live Time(s): 25.2 Amp Time(us): 0.12 Resolution:(eV)141.7

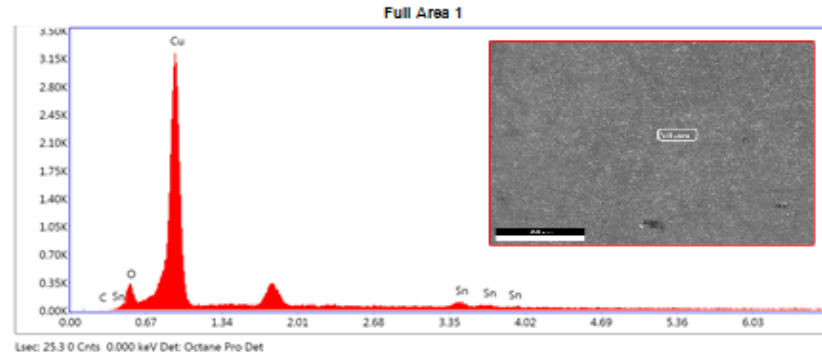


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.21	0.97	0.13	99.99	0.00	1.36	0.82	0.18	1
C K	0.01	0.03	0.04	99.99	0.00	1.42	0.83	0.29	1
O K	9.29	29.43	156.28	8.49	0.08	1.35	0.86	0.6	1
CuL	83.47	66.57	868.57	3.65	0.73	0.97	1.01	0.9	1
SnL	7.03	3.00	26.44	24.63	0.06	0.81	1.1	1.01	1.03

Şekil 6.35 2 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

KV: 10 Mag: 1000 Takeoff: 34.4 Live Time(s): 25.3 Amp Time(us): 0.12 Resolution:(eV)141.7

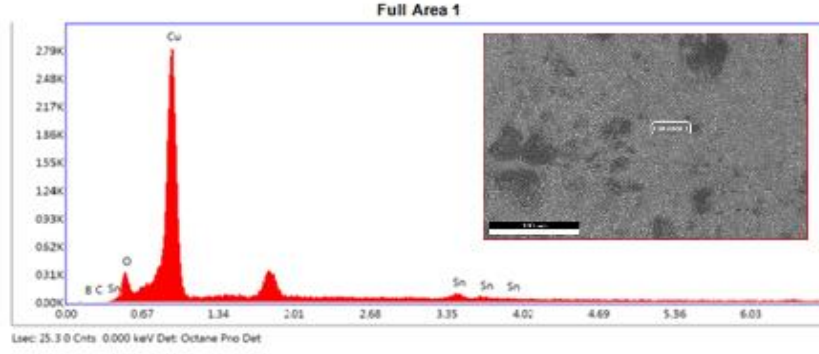


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.55	2.85	0.39	91.88	0.00	1.38	0.81	0.18	1
C K	0.01	0.03	0.04	99.99	0.00	1.45	0.82	0.28	1
O K	4.82	16.28	84.57	9.39	0.04	1.38	0.85	0.59	1
CuL	87.03	77.14	1,027.15	3.43	0.79	0.99	1	0.91	1
SnL	7.79	3.70	32.69	26.07	0.07	0.83	1.09	1.01	1.03

Şekil 6.36 3 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

kV: 10 Mag: 1000 Takeoff: 34.4 Live Time(s): 25.3 Amp Time(μs): 0.12 Resolution (eV): 141.7



eZAF Smart Quant Results

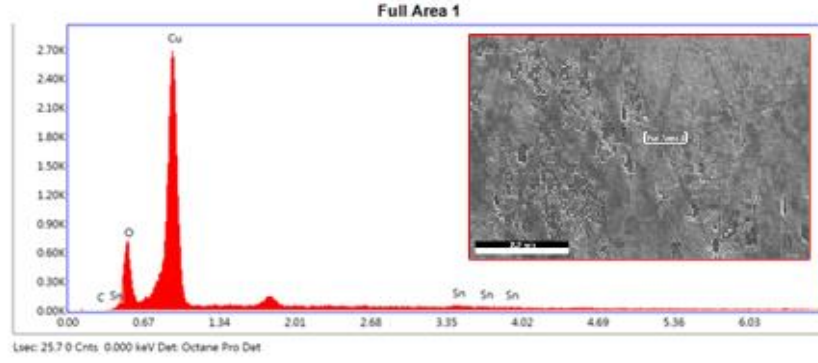
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.24	1.22	0.15	99.99	0.00	1.38	0.81	0.18	1
C K	0.01	0.03	0.04	99.99	0.00	1.45	0.83	0.29	1
O K	5.23	18.30	85.00	10.43	0.04	1.37	0.85	0.59	1
CuL	87.50	77.13	916.33	3.42	0.79	0.99	1	0.92	1
SnL	7.03	3.32	26.08	30.10	0.06	0.83	1.09	1.01	1.03

Şekil 6.37 4 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

Şekil 6.34 - Şekil 6.37’de verilen analiz sonuçları difüzyon kaynağı ile Tablo 5.1’deki 1, 2, 3 ve 4 numaralı deney parametreleriyle birleştirilmiş Cu₁₀Sn matrisli takviyesiz numunelere aittir. Analiz sonuçlarına göre numunelerin difüzyon bölgesinde doğal bir sonuç olarak matris malzemesinin elementleri olan Cu ve Sn elementlerine yoğunlukla rastlanmaktadır. Ayrıca numunelerde oluşan bir miktar oksit kalıntısı nedeniyle de EDS incelemelerinde Oksijen piklerine de rastlanılmıştır.

Şekil 6.38 - Şekil 6.41’de verilen analiz sonuçları Tablo 5.1’deki 5, 6, 7 ve 8 deney numaralı parametrelerde difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Cu₁₀Sn matrisli ve % 4 B₄C takviyeli deney numunelerine aittir. Sonuçlara göre difüzyon bölgesinde Cu ve Sn matris elementleriyle birlikte, takviye malzemesi elementleri B ve C ile oksitlenme nedeniyle oluşan bir miktar O, EDS analizlerinde yer almaktadır.

kV: 10 Mag: 1000 Takeoff: 35.4 Live Time(s): 25.7 Amp Time(μs): 0.12 Resolution(eV):141.7

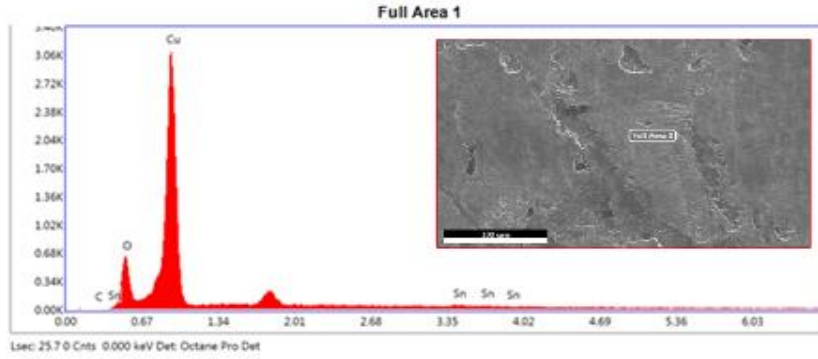


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.73	3.09	0.45	77.11	0.00	1.33	0.83	0.18	1
C K	0.01	0.03	0.04	99.99	0.00	1.4	0.84	0.29	1
O K	12.59	35.79	208.49	7.54	0.10	1.33	0.87	0.62	1
CuL	83.80	59.99	855.34	3.43	0.73	0.96	1.02	0.92	1
SnL	2.87	1.10	10.43	46.21	0.02	0.8	1.11	1.01	1.04

Şekil 6.38 5 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

kV: 10 Mag: 1000 Takeoff: 34.8 Live Time(s): 25.7 Amp Time(μs): 0.12 Resolution(eV):141.7

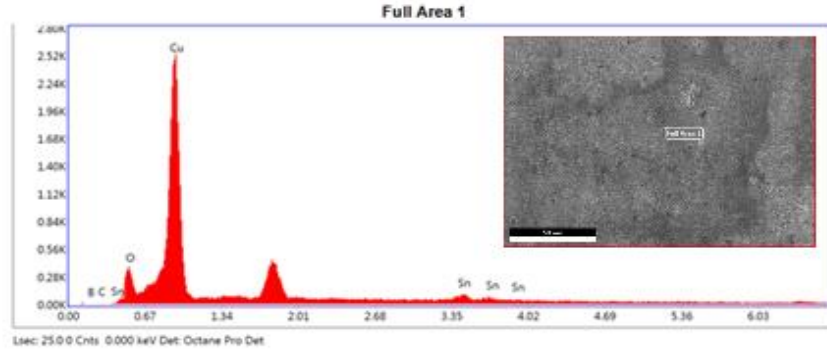


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.68	2.97	0.45	83.47	0.00	1.34	0.83	0.17	1
C K	0.01	0.03	0.04	99.99	0.00	1.41	0.84	0.28	1
O K	10.63	31.59	192.60	7.67	0.09	1.34	0.87	0.61	1
CuL	85.92	64.30	978.77	3.29	0.76	0.96	1.02	0.93	1
SnL	2.77	1.11	11.13	48.34	0.02	0.8	1.1	1.01	1.04

Şekil 6.39 6 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

kV: 10 Mag: 2000 Takeoff: 34.3 Live Time(s): 25 Amp Time(μs): 0.12 Resolution:(eV)141.7

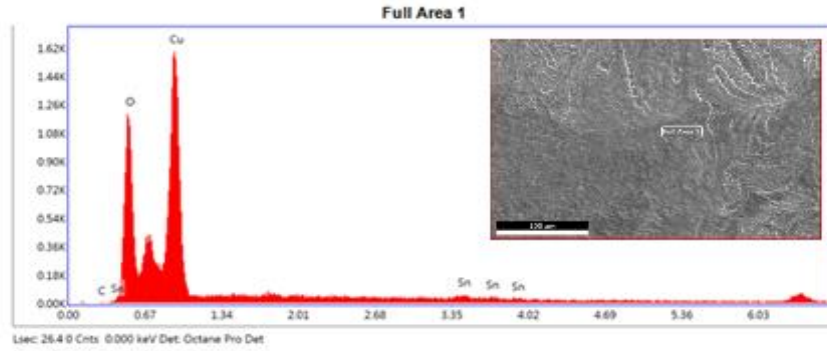


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	1.11	5.36	0.64	69.69	0.00	1.37	0.82	0.18	1
C K	0.01	0.04	0.04	99.99	0.00	1.43	0.83	0.28	1
O K	6.45	21.09	95.57	9.21	0.05	1.36	0.86	0.59	1
CuL	85.57	70.49	811.18	3.60	0.77	0.98	1.01	0.91	1
SnL	6.87	3.03	23.17	31.93	0.06	0.82	1.09	1.01	1.03

Şekil 6.40 7 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

kV: 10 Mag: 1000 Takeoff: 34.2 Live Time(s): 26.4 Amp Time(μs): 0.12 Resolution:(eV)141.7



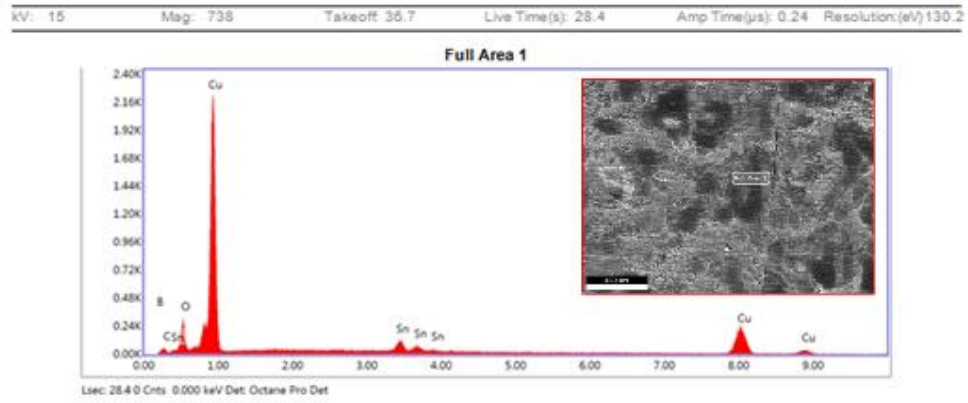
eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.72	2.31	0.38	83.87	0.00	1.27	0.85	0.2	1
C K	0.01	0.02	0.04	99.99	0.00	1.33	0.87	0.33	1
O K	27.62	59.86	374.04	6.46	0.23	1.26	0.89	0.66	1
CuL	66.57	36.33	474.64	4.43	0.51	0.91	1.05	0.84	1
SnL	5.07	1.48	14.05	36.75	0.04	0.75	1.12	1.02	1.04

Şekil 6.41 8 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.

Şekil 6.42 - Şekil 6.45 arasında verilen analiz sonuçları 9, 10, 11 ve 12 numaralı deney parametreleriyle difüzyon kaynağında birleştirilmiş Cu₁₀Sn matrisli ve % 8 B₄C takviyeli deney numunelerine aittir. Analiz sonuçlarına göre difüzyon

bölgesinde Cu ve Sn elementleriyle birlikte B ve C elementlerine de rastlanmaktadır. Burada dikkat çeken takviye oranının artmasıyla birlikte B ve C piklerinde meydana gelen artışlardır. % 4 B₄C takviyeli kompozit malzemelerin difüzyon kaynağında B oranı ağırlıkça yaklaşık %0,7 ve C oranı ağırlıkça yaklaşık 0,01 iken, % 8 B₄C takviyeli kompozit malzemelerin difüzyon kaynağında B ağırlıkça yaklaşık %2,5 C ise ağırlıkça yaklaşık % 5 civarlarındadır.

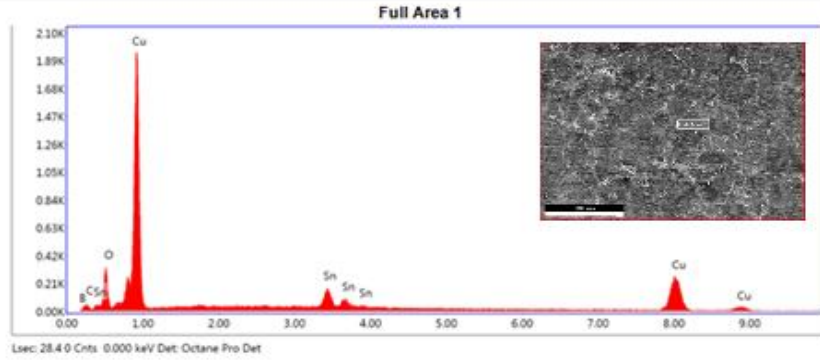


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	3.65	13.23	1.82	34.16	0.01	1.27	0.83	0.16	1
C K	5.37	17.53	21.51	16.10	0.01	1.33	0.84	0.21	1
O K	8.40	20.57	123.42	9.53	0.04	1.27	0.87	0.41	1
SnL	7.81	2.58	71.40	18.09	0.07	0.81	1.14	1.02	1.05
CuK	74.77	46.10	245.21	5.35	0.73	0.94	1.01	1	1.04

Şekil 6.42 9 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

kV: 15 Mag: 538 Takeoff: 35.5 Live Time(s): 28.4 Amp Time(μs): 0.24 Resolution(eV):130.2

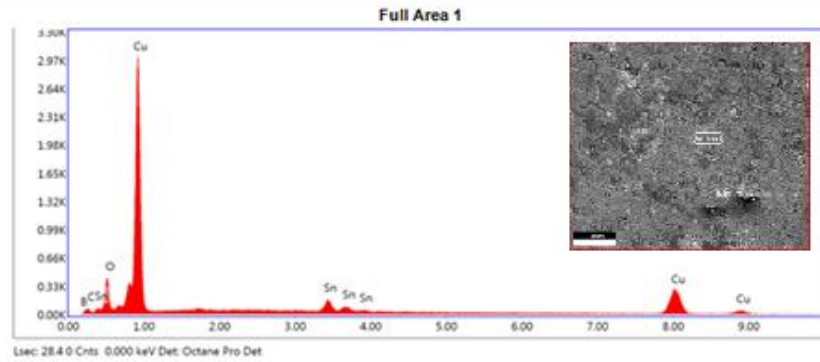


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	3.10	11.81	1.91	34.27	0.01	1.28	0.82	0.17	1
C K	5.08	17.42	25.29	14.71	0.01	1.34	0.84	0.21	1
O K	7.45	19.21	131.85	9.51	0.04	1.29	0.86	0.4	1
SnL	10.58	3.67	116.47	13.80	0.09	0.82	1.13	1.02	1.04
CuK	73.79	47.88	293.57	5.08	0.73	0.95	1.01	1	1.04

Şekil 6.43 10 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

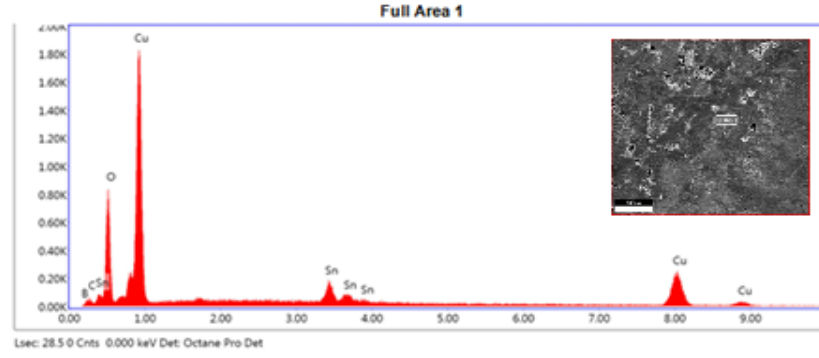
kV: 15 Mag: 621 Takeoff: 34.5 Live Time(s): 28.4 Amp Time(μs): 0.24 Resolution(eV):130.2



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	1.78	6.75	1.16	47.78	0.00	1.27	0.83	0.16	1
C K	5.24	17.88	28.90	14.85	0.02	1.34	0.84	0.22	1
O K	9.23	23.67	182.33	9.14	0.05	1.28	0.87	0.41	1
SnL	7.95	2.75	95.92	15.04	0.07	0.82	1.13	1.02	1.05
CuK	75.80	48.95	328.54	5.06	0.75	0.94	1.01	1	1.04

Şekil 6.44 11 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları



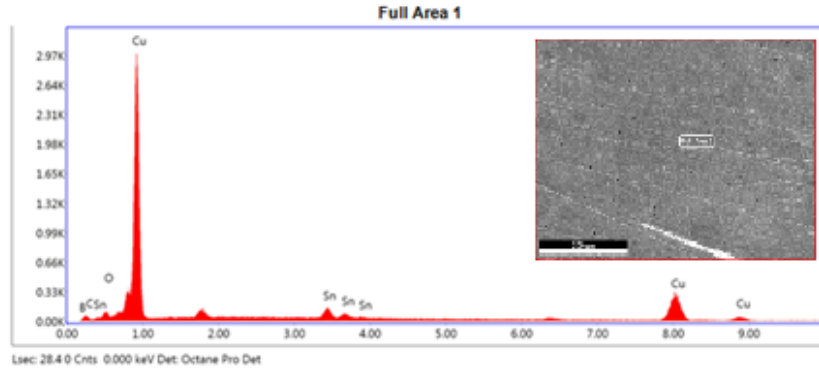
eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	1.55	5.12	1.00	51.69	0.00	1.24	0.84	0.17	1
C K	4.93	14.69	27.70	14.29	0.02	1.3	0.85	0.24	1
O K	17.96	40.17	349.91	8.17	0.10	1.25	0.88	0.44	1
SnL	9.72	2.93	109.45	13.82	0.08	0.8	1.14	1.03	1.04
CuK	65.84	37.08	265.07	5.24	0.63	0.92	1.02	1	1.05

Şekil 6.45 12 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları.

Şekil 6.46 - Şekil 6.49’da verilen analiz sonuçları 13, 14, 15 ve 16 deney numaralı parametrelerde difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Cu₁₀Sn matrisli ve % 12 B₄C takviyeli deney numunelerine aittir. Analiz sonuçlarına göre difüzyon bölgesinde Cu₁₀Sn matrisi ve B₄C bileşiğine ait elementlere rastlanılmaktadır. Söz konusu deneyler ağırlıkça B₄C’nin en fazla kullanıldığı (%12) deneylerdir. Bu kapsamda söz konusu deneylerin EDS incelemelerinde B ve C piklerinin şiddetinin diğer deneylere göre daha artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Söz konusu deneylerde B oranı yaklaşık olarak ağırlıkça % 4,5 C oranı ise ağırlıkça yaklaşık % 5 civarlarında tespit edilmiştir.

kV: 15 Mag: 554 Takeoff: 35.4 Live Time(s): 28.4 Amp Time(μs): 0.24 Resolution(eV):130.2

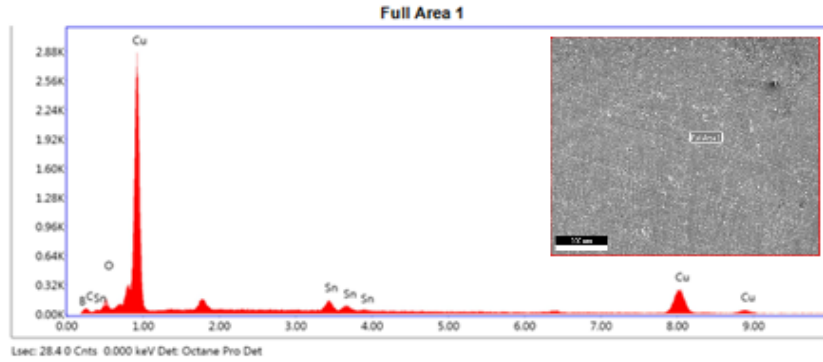


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	3.01	12.81	1.94	34.91	0.01	1.3	0.82	0.15	1
C K	4.68	17.92	24.45	15.96	0.01	1.36	0.83	0.2	1
O K	2.14	6.15	42.25	13.40	0.01	1.3	0.86	0.4	1
CuL	83.67	60.60	1,503.35	2.99	0.71	0.97	1.02	0.88	1
SnL	6.50	2.52	80.20	14.92	0.06	0.83	1.12	1.01	1.03

Şekil 6.46 13 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

kV: 15 Mag: 692 Takeoff: 36 Live Time(s): 28.4 Amp Time(μs): 0.24 Resolution(eV):130.2

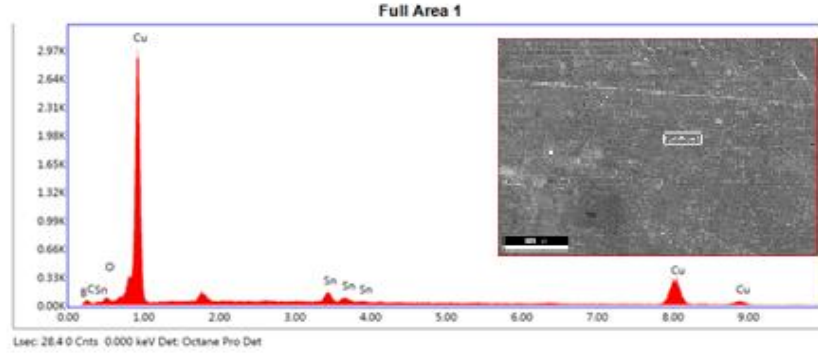


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	3.05	12.14	1.74	38.08	0.01	1.29	0.82	0.16	1
C K	5.62	20.16	25.95	15.27	0.02	1.35	0.84	0.2	1
O K	4.14	11.17	69.23	11.48	0.02	1.29	0.86	0.39	1
SnL	8.27	3.00	87.95	16.50	0.07	0.83	1.13	1.02	1.05
CuK	78.92	53.53	303.10	5.03	0.79	0.96	1.01	1	1.04

Şekil 6.47 14 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

kV: 15 Mag: 723 Takeoff: 35.2 Live Time(s): 28.4 Amp Time(μs): 0.24 Resolution:(eV)130.2

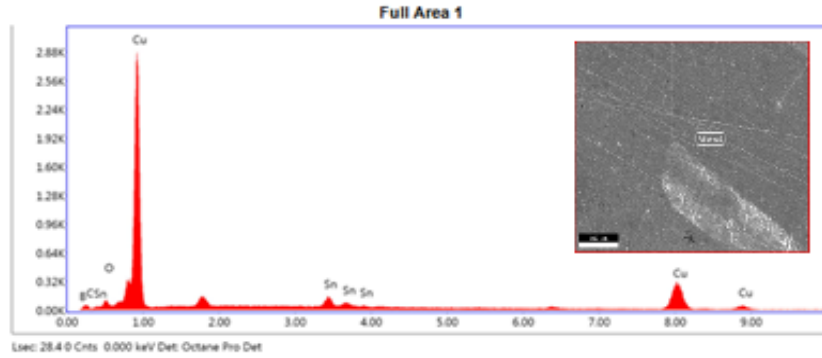


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	4.01	15.91	2.23	32.65	0.01	1.28	0.82	0.15	1
C K	5.57	19.89	24.54	16.04	0.01	1.35	0.84	0.19	1
O K	2.05	6.49	35.31	15.52	0.01	1.29	0.86	0.39	1
SnL	2.93	1.06	32.58	26.12	0.03	0.82	1.13	1.01	1.06
CuK	85.44	57.66	339.46	5.03	0.85	0.95	1.01	1	1.04

Şekil 6.48 15 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

kV: 15 Mag: 608 Takeoff: 34.9 Live Time(s): 28.4 Amp Time(μs): 0.24 Resolution:(eV)130.2



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	4.55	18.41	2.80	29.58	0.01	1.29	0.82	0.16	1
C K	4.56	16.63	21.74	16.35	0.01	1.36	0.83	0.19	1
O K	2.31	6.30	42.06	13.37	0.01	1.3	0.86	0.39	1
SnL	7.29	2.69	85.07	17.18	0.06	0.83	1.13	1.01	1.05
CuK	81.29	55.97	342.27	4.97	0.81	0.96	1.01	1	1.04

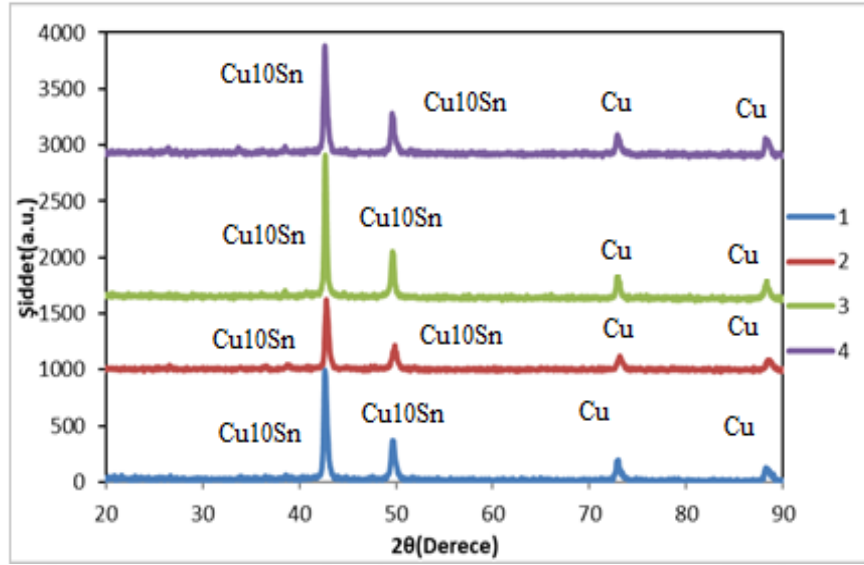
Şekil 6.49 16 numaralı deney numunesinin EDS grafik ve sonuçları

6.3 XRD Analizleri

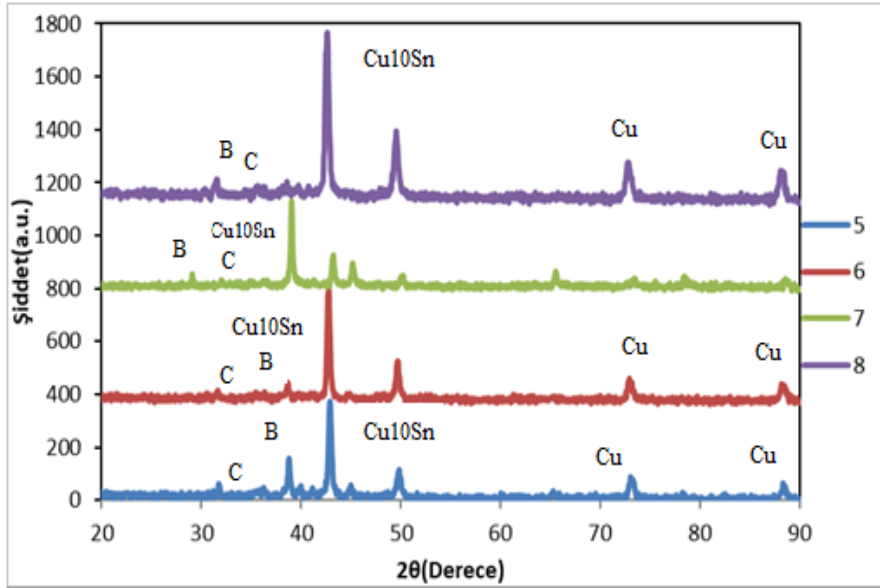
Birleştirmelerden alınan numunelere XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin XRD grafikleri Şekil 6.50 - Şekil 6.53'te verilmiştir. Şekillerde belirtilen incelemeler numunelerin kimyasal kompozisyonuna uygun olarak gruplandırılmıştır. Üretilen tozların XRD sonuçları incelendiğinde yeni bir faz oluşumu gözlemlenmemiştir.

Şekil 6.50 - Şekil 6.53'te, ağırlıkça farklı oranda B_4C içeren $Cu_{10}Sn$ metal matrisli kompozitlerin XRD analizini göstermektedir. Her bir numune için ara yüzeyde kaynaklanacak bir fazın mevcut olup olmadığını belirlemek üzere dört farklı kompozit numunenin (% 100 $Cu_{10}Sn$ - % 0 B_4C , % 100 $Cu_{10}Sn$ - % 4 B_4C , % 100 $Cu_{10}Sn$ - % 8 B_4C ve % 100 $Cu_{10}Sn$ - % 12 B_4C) XRD analizi gerçekleştirilmiştir.

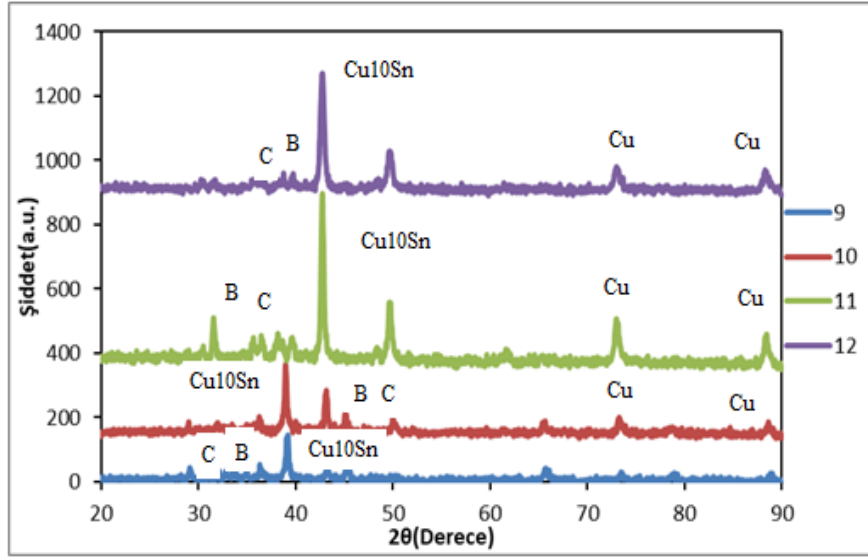
XRD analizleri sonucunda, Cu ve Sn'nin daha güçlü pik noktasına sahip olduğu B_4C 'nin ise çok daha zayıf pik noktasına sahip olduğu görülmektedir. XRD analizlerinde, B_4C takviye içeriğinin artmasıyla birlikte, B_4C 'nin pik yoğunlukları artarken Cu ve Sn piklerinin yoğunluğu kısmen azalır. Alınan numunelerde, B_4C miktarına bağlı olarak bakır oksit fazı ve B_4C fazlarının bulunmadığı, baskın fazın Cu'dan oluştuğu görülmüştür. Spektrumda $Cu_{10}Sn$ matrisleri ve B_4C arasında bir arayüzey reaksiyonu olmadığı tespit edilmiştir. Üretilen numunelerin $Cu_{10}Sn$ - B_4C bileşiklerinden oluştuğu görülmüştür. Sonuç olarak, $Cu_{10}Sn$ - B_4C kompozitlerinde bulunan partiküller arasında etkileşim olmadığı XRD analiz sonuçlarından elde edilmiştir.



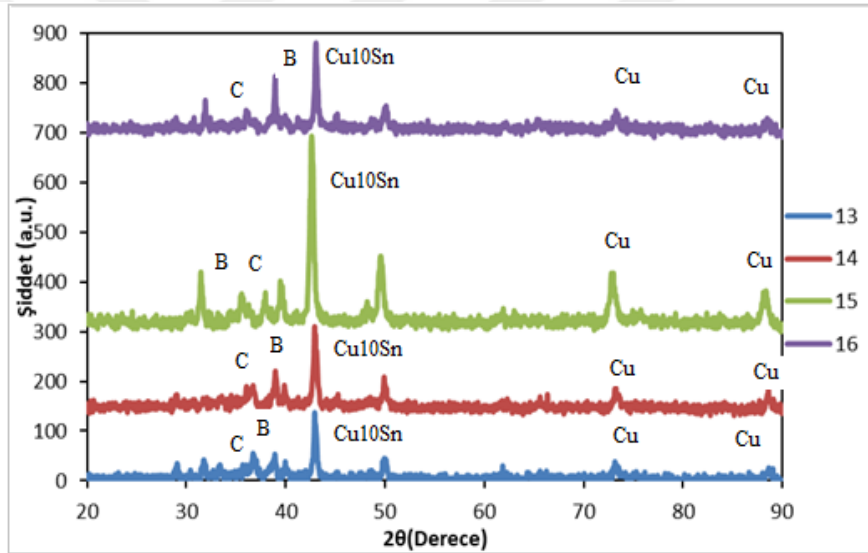
Şekil 6.50 % 100 Cu₁₀Sn, % 0 B₄C içerikli numunelerin XRD analizleri



Şekil 6.51 % 96 Cu₁₀Sn, % 4 B₄C içerikli numunelerin XRD analizleri



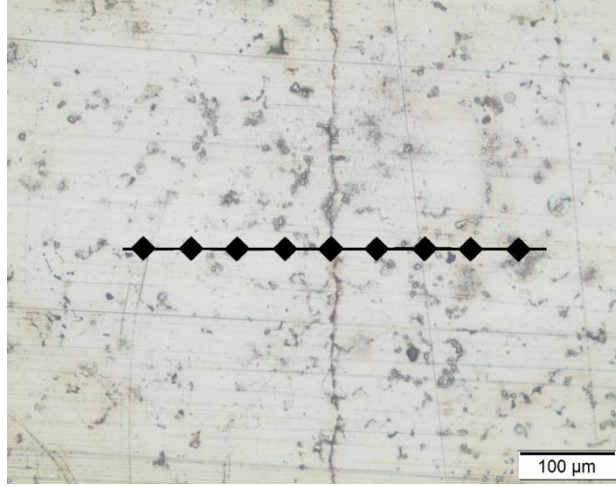
Şekil 6.52 % 92 Cu10Sn, % 8 B₄C içerikli numunelerin XRD analizleri



Şekil 6.53 % 88 Cu10Sn, % 12 B₄C içerikli numunelerin XRD analizleri

6.4 Mikrosertlik Sonuçları

Difüzyon kaynağı ile birleştirilen numuneler mikrosertlik testlerine tabi tutulmuştur. Mikrosertlik testleri Şekil 6.54'te görüldüğü şekilde Vickers sertlik ölçme metoduyla gerçekleştirilmiştir.

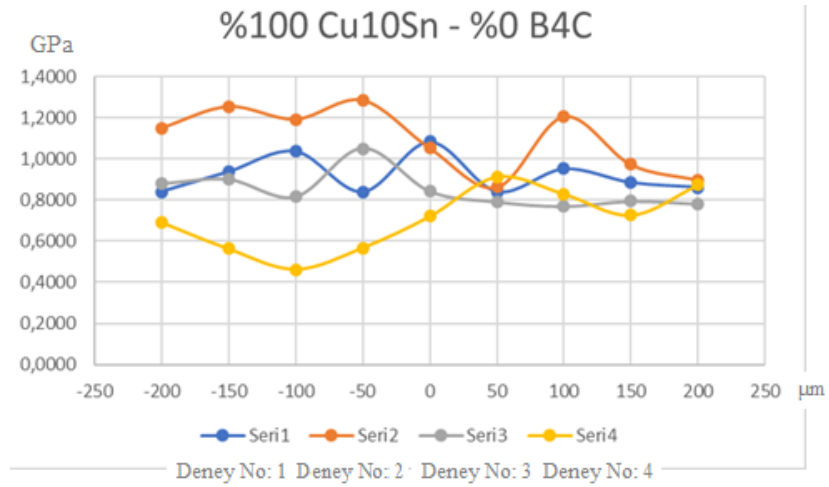


Şekil 6.54 Mikrosertlik ölçümlerinin gerçekleştirildiği noktalar

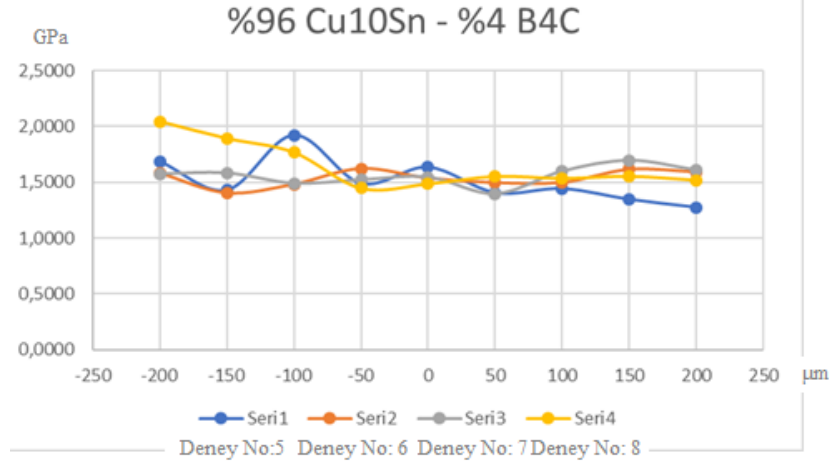
50 μm aralıklarla kaynak merkezinin soluna ve sağına olmak üzere toplam 9 ölçüm yapılmıştır. Ölçümlerde 0,98 N kuvvetinde yük uygulanmış, oluşan izin köşegen uzunluklarının ortalaması alınarak, sertlikler GPa cinsinden Eşitlik 1’de verilen formül kullanılarak tayin edilmiştir.

$$Hv = 1854,4 \left(\frac{F}{d^2} \right) \text{ (GPa)} \quad (6.1)$$

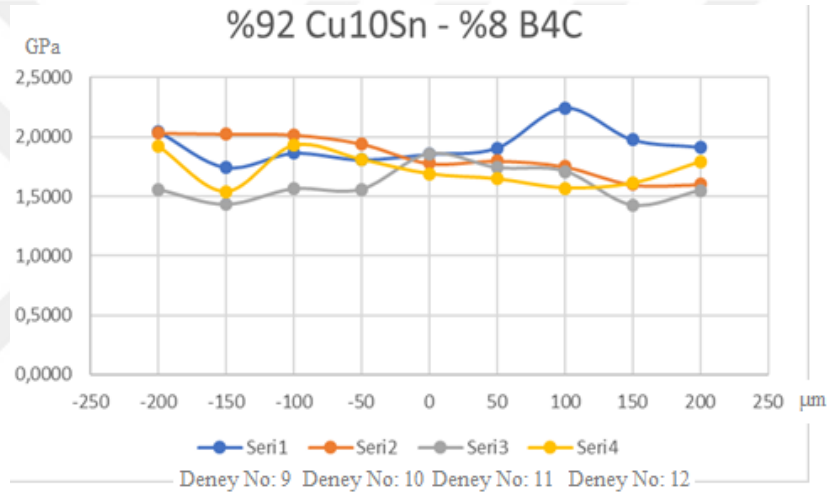
Sertlik testlerinden elde edilen sonuçlar ise yine takviye oranları baz alınarak gerçekleştirilen gruplandırmalar neticesinde Şekil 6.55 – Şekil 6.58’de grafik olarak verilmiştir.



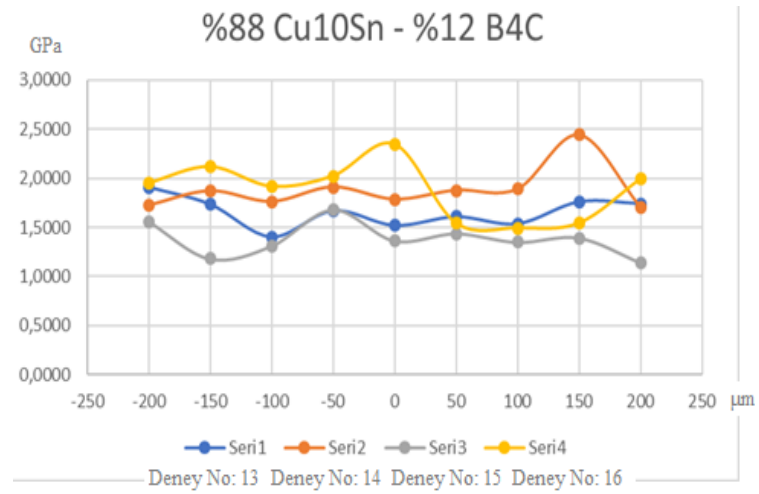
Şekil 6.55 % 100 Cu10Sn - % 0 B₄C içerikli numunelerin mikrosertlik sonuçları



Şekil 6.56 % 96 Cu₁₀Sn - % 4 B₄C içerikli numunelerin mikrosertlik sonuçları



Şekil 6.57 % 92 Cu₁₀Sn - % 8 B₄C içerikli numunelerin mikrosertlik sonuçları



Şekil 6.58 % 88 Cu₁₀Sn - % 12 B₄C içerikli numunelerin mikrosertlik sonuçları

Şekil 6.55'te takviyesiz % 100 Cu₁₀Sn içerikli numunelerin mikrosertlik sonuçları verilmiştir. Mikrosertlik sonuçları incelendiğinde Deney 1 ve Deney 3'ün birbirine yakın ve en ortalama sonuçları içerdiği, en yüksek sertlik sonuçlarının Deney 2'de, en düşük sertlik sonuçlarının ise Deney 4'te görüldüğü tespit edilmiştir. Parametreler incelendiğinde Deney 1'in 700°C sıcaklık, 10 kg yük ve 20 dk süre, Deney 2'nin 740°C sıcaklık, 15 kg yük ve 40 dk süre, Deney 3'ün 780°C sıcaklık, 20 kg yük ve 60 dk süre, Deney 4'ün ise 820°C sıcaklık, 25 kg yük ve 80 dakika süre ile gerçekleştiği bilinmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında sıcaklığın önemli bir etken olduğu düşünülmektedir. En düşük sertlik sonucunun Deney 4'te görülmesinde sıcaklık ve sürenin etkili olduğu görülmektedir. Ara yüzeydeki (0 bölgesi) sertlik ölçümlerinde bahsedilen sıcaklık ve süre ilişkisinden dolayı sırasıyla Deney 1'den Deney 4'e doğru sertliğin yükseldiği gözlemlenmiştir.

Şekil 6.56'da sertlik sonuçları verilen deneylerde; %4 oranında B₄C takviye olarak kullanılmıştır. Şekil 6.56'daki Deney 5 – Deney 8 arasındaki numuneler için gerçekleştirilen sertlik ölçümleri, takviyesiz olan Deney 1 – Deney 4 ile kıyaslandığında (Şekil 6.55) sertliğin çok ciddi oranda artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu duruma sert bir bileşik olan B₄C'nin neden olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.56'daki grafikten Deney 5- Deney 8 arasındaki sertlik sonuçlarının birbirine yakın ve yaklaşık olarak 1,6 GPa civarında olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde ortalama olarak en yüksek sertlik sonucunun Deney 5' de, en düşük sertlik sonucunun ise Deney 8'de olduğu görülmüştür. Ara yüzeydeki (0 bölgesi) sertlik sonuçları incelendiğinde yine deneylerde kullanılan sıcaklıklara bağlı olarak sertliklerin değiştiği gözlemlenmiştir. Ara yüzey bölgesinde sırasıyla sertlik değişimleri Deney 5'ten Deney 8'e doğru düşüş göstermiştir. Burada yine sıcaklık ve süreye bağlı olarak artan sıcaklıkla birlikte sertlik düşüşlerinin olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.57'de verilen sertlik sonuçları %8 B₄C içeren Deney 9 – 13 arasındaki kompozit malzemelerin difüzyon kaynaklı numunelerine aittir. Sonuçlar incelendiğinde; sertliğin artan B₄C miktarıyla birlikte artış gösterdiği dikkat çekmektedir. Ortalama olarak sertliğin yaklaşık 1,8 GPa olduğu görülmüştür.

% 12 B₄C içeren kompozit malzemelerin difüzyon kaynaklı birleştirmelerine gerçekleştirilen sertlik testleri sonucunda elde edilen grafikler Şekil 6.58’de verilmiştir. Şekil 6.58’de verilen kompozit malzemeler en fazla ağırlıkça takviye (B₄C) oranının (% 12) kullanıldığı deneylerdir. Sertlik testlerinden elde edilen sonuçlarda takviye oranının artışıyla birlikte sertlikte %8 orana kıyasla ciddi bir artışın olmadığı gözlemlenmiştir. Kompozit malzemelerde belirli bir oranın üzerinde kullanılan takviyelerde sertlikte herhangi bir etki yapmadığı hatta düşüşe neden olabileceği birçok çalışmadan da bilinmektedir. Sertlik verileri incelendiğinde yaklaşık 1,7 GPa sertlik değerlerine erişildiği gözlemlenmiştir.

Şekil 6.56, Şekil 6.57 ve Şekil 6.58 arasında verilen grafiklerde, numunelerin mikrosertlikleri gösterilmektedir. Ağırlıkça % 4 ve % 8 oranda B₄C parçacıklarının bronz matrise dâhil edilmesi mikrosertliğin arttığı, % 12 B₄C ‘de ise % 8 takviye oranından çok farklı sonuçlar içermediği ve bu nedenle sertliğin bu oranda durağanlaştığı söylenilebilir.

6.5 Kesme (Makaslama) Deneyi Sonuçları

Difüzyon kaynağı yöntemi ile sıcaklık, basınç ve süre gibi değişik kaynak parametreler kullanılarak yapılan birleştirmelerden elde edilen kesme-makaslama test sonuçlarının tamamı aşağıda Tablo 6.1’de verilmiştir. Kesme-makaslama deneyleri sonucunda, tablo dikkatli bir şekilde incelendiğinde artan sıcaklıkla beraber kesme - makaslama kuvvetinin arttığı böylece sıcaklık artışına bağlı olarak mukavemetin arttığı söylenebilir. Bu test sonuçlarına göre, değişen kaynak parametrelerinin kaynak performansını nasıl etkilediği tespit edilmiştir.

Tablo 6.1 Kesme deney sonuçları

Deney No	Malzeme	Sıcaklık (°C)	Basınç (Kg)	Süre (dk)	Ortalama Kesme Kuvveti Yük (N)
1	Cu10Sn	700	10	20	3455
2	Cu10Sn	740	15	40	3565
3	Cu10Sn	780	20	60	5350
4	Cu10Sn	820	25	80	6362
5	Cu10Sn +% 4 B ₄ C	700	15	60	1627
6	Cu10Sn +% 4 B ₄ C	740	10	80	2550
7	Cu10Sn +% 4 B ₄ C	780	25	20	3955
8	Cu10Sn +% 4 B ₄ C	820	20	40	8354
9	Cu10Sn +% 8 B ₄ C	700	20	80	1574
10	Cu10Sn +% 8 B ₄ C	740	25	60	2959
11	Cu10Sn +% 8 B ₄ C	780	10	40	3939
12	Cu10Sn +% 8 B ₄ C	820	15	20	5068
13	Cu10Sn +%12 B ₄ C	700	25	40	1627
14	Cu10Sn +%12 B ₄ C	740	20	20	2690
15	Cu10Sn +%12 B ₄ C	780	15	80	3698
16	Cu10Sn +%12 B ₄ C	820	10	60	5259

(Her bir kaynak şartı için en az üç numune denenmiş ve sonuçların ortalaması alınmıştır.)

% 100 Cu10Sn matrisli kompozit numuneler için yapılan 1, 2, 3 ve 4 numaralı deney numunelerinden en yüksek ortalama kesme kuvvetine 820 °C sıcaklıkta 6362 N ile 4 numaralı deney numunesi ulaşmıştır.

% 96 Cu10Sn matrisli ve %4 B₄C takviye elemanlı kompozit numuneler için yapılan 5; 6; 7 ve 8 numaralı deney numunelerinden kesme (makaslama) kuvvetine 820 °C sıcaklıkta 8354 N ile 8 numaralı deney numunesinin sahip olduğu görülmektedir.

% 92 Cu10Sn matrisli ve % 8 B₄C takviye elemanlı kompozit numuneler için yapılan 9; 10; 11 ve 12 numaralı deney numunelerinden kesme (makaslama) kuvvetine yine 820 °C sıcaklıkta 5068 N ile 12 numaralı deney numunesinin sahip olduğu görülmektedir.

%88 Cu₁₀Sn matrisli ve % 12 B₄C takviye elemanlı kompozit numuneler için yapılan 13; 14; 15 ve 16 numaralı deney numunelerinden 5259 N'luk kesme (makaslama) kuvvetine 820 °C sıcaklıkta 16 numaralı deney numunesinin ulaştığı görülmektedir.

Tablo 6.1'de verilen kesme (makaslama) deney sonuçlarına göre 820 °C sıcaklıkta, 20 kg basınçta ve 40 dakika sürede 8 numaralı deney numunesinin 8354 N'luk kesme (makaslama) kuvveti ile en yüksek dayanıma sahip olduğu sonucu çıkmaktadır. Tablo dikkatli bir şekilde incelendiğinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda sıcaklık artışına bağlı olarak kesme makaslama kuvvetine de arttığı görülmektedir. Özetle difüzyon kaynağı yöntemiyle kaynak yapılan numuneler incelendiğinde 700; 740; 780 ve 820°C sıcaklıklara bağlı olarak kesme (makaslama) kuvvetinin düzenli bir şekilde artış gösterdiği sonucu çıkmaktadır.

7. OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Deney ve model çalışmalarının ilk kısmında daha önceki aşamalarda anlatıldığı üzere deneysel çalışmalar yapılmış ve deney şartları belirlenirken Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. İkinci kısımda ise deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçları değerlendirmek için Taguchi yöntemi kullanılarak optimizasyon işlemi yapılmıştır.

Deneyselerde kullanılan malzeme ve parametreler önceki bölümlerde verildiği için bu bölümde detaylı olarak deney düzeneği ve test sonuçları üzerinde durulmuştur.

7.1 Deney Düzeneği

Bu çalışmada faktör seçiminde dört adet önemli parametre girdi parametreleri olarak belirlenmiştir. Çalışmada difüzyon kaynağı için önem arz eden parametreler; sıcaklık, basınç ve süre ile kullanılan malzeme çeşidi girdi parametreleri olarak tercih edilmiştir. Bu bağlamda; kullanılan malzeme olarak endüstride yoğun tercih edilen bronzun farklı oranlardaki B₄C takviyeli kombinasyonlarından üretilmiş kompozit malzemeler tercih edilmiştir. Bu aşamada en uygun faktörler seçilerek, kompozit malzemeler için optimum kesme dayanımının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Deneyselerde sıcaklık değerleri 700, 740, 780, 820 °C, basınç (yük) değerleri; 10, 15, 20, 25 kg, süre ise; 20, 40, 60, 80 dakika olarak belirlenmiştir. Kullanılan malzemeler de ayrıca bir girdi parametresi olup, % 100 Cu10Sn-% 0 B₄C, % 96 Cu10Sn - % 4 B₄C, % 92 Cu10Sn - % 8 B₄C, % 88 Cu10Sn - % 12 B₄C kompozit malzemeler deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Belirlenen faktör ve seviyeler ile Taguchi *L*₁₆ deney düzeneği kapsamında difüzyon kaynağıyla birleştirmeler yapılmıştır. Belirlenen faktör ve seviyeler Tablo 7.1’de, Taguchi *L*₁₆ deney düzeneği ise Tablo 7.2’de verilmiştir. Taguchi *L*₁₆ deney düzeneğine göre toplam 16 deney gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık, basınç, süre ve malzeme türünün girdi olarak değerlendirildiği bu çalışmada çıktı olarak; kaynaklı birleştirmelerin kesme (kayma) testinden elde edilen kesme kuvveti değerlendirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelere uygulanan kayma testi sonucunda numunelere uygulanan maksimum kesme kuvvetleri belirlenerek numunelerin kesme mukavemetleri hakkında yorum

yapılmaya çalışılmıştır. Birleştirmelere L_{16} deney düzeneğine uygun olarak gerçekleştirilen difüzyon kaynak işlemlerinden sonra uygulanan kesme testi sonucunda elde edilen sonuçlar ve Taguchi optimizasyonundan elde edilen Sinyal / Gürültü (S/N) oranları da yine Tablo 7.2 içerisinde verilmiştir.

Tablo 7.1 Deney faktörleri ve seviyeleri

Sembol	Girdi Parametreleri	Seviyeler			
		1	2	3	4
A	Malzeme Türü	%100 Cu10Sn %0 B ₄ C	%96 Cu10Sn - %4 B ₄ C	%92 Cu10Sn - %8B ₄ C	%88 Cu10Sn - %12 B ₄ C
B	Sıcaklık (°C)	700	740	780	820
C	Basınç (kg)	10	15	20	25
D	Süre (Dakika)	20	40	60	80

Tablo 7.2 Deneyisel çalışmalardaki girdilere bağlı olarak kesme kuvveti için elde edilen çıktılar ve sinyal/gürültü (S/N) oranları

Deney No	-A- Malzeme Türü	-B- Sıcaklık (°C)	-C- Basınç (kg)	-D- Süre (Dakika)	Kesme Kuvveti	
					Deney Sonucu (N)	S/N Oranları
1	Cu10Sn	700	10	20	3455	70,77
2	Cu10Sn	740	15	40	3565	71,04
3	Cu10Sn	780	20	60	5350	74,57
4	Cu10Sn	820	25	80	6362	76,07
5	Cu10Sn +% 4 B ₄ C	700	15	60	1627	64,23
6	Cu10Sn +% 4 B ₄ C	740	10	80	2550	68,13
7	Cu10Sn +% 4 B ₄ C	780	25	20	3955	71,94
8	Cu10Sn +% 4 B ₄ C	820	20	40	8354	78,44
9	Cu10Sn +% 8 B ₄ C	700	20	80	1574	63,94
10	Cu10Sn +% 8 B ₄ C	740	25	60	2959	69,42
11	Cu10Sn +% 8 B ₄ C	780	10	40	3939	71,91
12	Cu10Sn +% 8 B ₄ C	820	15	20	5068	74,10
13	Cu10Sn +%12 B ₄ C	700	25	40	1627	64,23
14	Cu10Sn +%12 B ₄ C	740	20	20	2690	68,60
15	Cu10Sn +%12 B ₄ C	780	15	80	3698	71,36
16	Cu10Sn +%12 B ₄ C	820	10	60	5259	74,42

8. DENEY SONUÇLARININ OPTİMİZASYONU

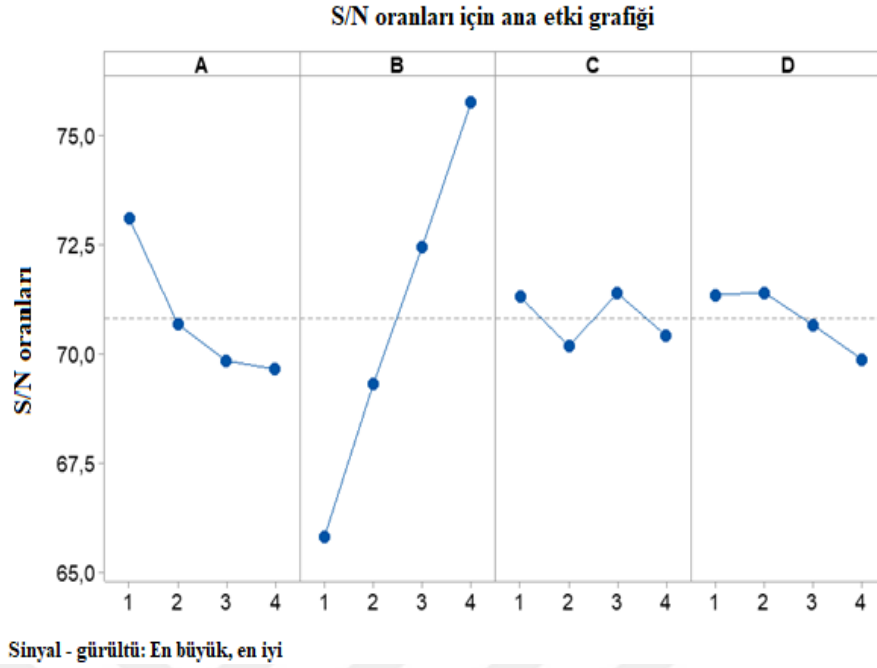
Difüzyon kaynak parametrelerinin (sıcaklık, basınç, süre), kaynaklı birleştirmelerin kesme kuvveti üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada deney malzemesi olarak B₄C takviyeli bronz kompozit malzemeler kullanılmıştır.

Bahsedilen girdi parametreleri ile Taguchi L_{16} deney düzeneğine göre toplam 16 deney gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık, basınç, süre ve malzeme türünün girdi olarak değerlendirildiği bu çalışmada çıktı olarak; kaynaklı birleştirmelerin kesme testinde elde edilen kesme kuvveti değerlendirilmiştir.

8.1 Sonuçların Taguchi Metodu ile Analiz Edilmesi ve Değerlendirilmesi

Tablo 7.2’de belirtilen Taguchi L_{16} ortogonal düzeni kapsamında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirme işlemleri sonrasında kesme (kayma) testi ile numunelere uygulanan kesme kuvveti ölçülmüştür. Deneylerden elde edilen kesme kuvvetleri elde edildikten sonra sonuçların Taguchi metodu yardımıyla optimizasyonu yapılmıştır. Bu optimizasyon işleminde, Taguchi kayıp fonksiyonu olarak bilinen ve aynı zamanda sinyal/gürültü oranı fonksiyonu olarak da ifade edilen 3 farklı amaca uygun fonksiyon bulunmaktadır. Buna göre, amacın “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” olmasına göre kullanılan eşitliklerden en yüksek kesme kuvveti uygulanan numunenin en uygun sonucu vereceği düşünülerek “en büyük en iyi” (Eş. 7.1) kullanılarak S/N oranları hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar neticesinde S/N oranlarına bağlı olarak optimum parametreler tahmin edilmiştir. Kesme kuvveti değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranlarının grafiksel gösterimi Şekil 8.1’de verilmiştir.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (8.1)$$



Şekil 8.1 Kesme kuvveti için S/N oranları ana etki grafiği

Kesme kuvveti için yapılan optimizasyonda Şekil 8.1’den yararlanılarak optimum parametreler “A1B4C3D2” olarak bulunmuştur. Burada; A1, % 100 Cu10Sn - % 0 B₄C malzemeyi, B4 820 °C sıcaklığı, C3 20 kg basıncı (yük), D2 ise 40 dakika süreyi ifade etmektedir

8.2 Doğrulama Deneyleri ve Sonuçları

Taguchi metoduna göre, optimum sonuçları verecek parametrelerin tahmininden sonra, optimizasyonda son aşama olarak doğrulama deneyleri yapılmış ve yapılan optimizasyonun doğruluğu kontrol edilmiştir. Kesme kuvveti için başlangıç parametreleri “A2B2C4D3” (A2-% 96 Cu10Sn - % 4 B₄C malzeme, B2 - 740 °C sıcaklık, C4 - 25 kg yük, D3 – 60 dakika), optimum parametreler ise “A1B4C3D2” (A4-% 100 Cu10Sn - % 0 B₄C malzeme, B4 - 820 °C sıcaklık, C3 - 20 kg yük, D2 – 40 dakika) olarak belirlenmiştir. Optimum parametreler için üç adet kontrol deneyleri sonucunda elde edilen deney sonuçlarının ortalaması alınarak sonuçların güvenilirliği irdelenmiştir. Buna göre en iyi kesme kuvveti değerlerinin elde edilmesinde, optimize edilmiş parametreler ve doğrulama testi sonuçları Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1 Kesme kuvveti için doğrulama test sonuçları

	Başlangıç Kaynak Parametresi	Optimum Kaynak Parametreleri	
		Tahminsel	Deneysel
Seviye	A2B2C4D3	A1B4C3D2	A1B4C3D2
Kesme Kuvveti (N)	2956	8176	8237
S/N ratio (dB)	69.4141	79.1903	78.3154
İyileştirme oranı dB	8.9013 (%11.24)		
Tahminsel hata dB	0.8749 (%1.26)		

Tablo 8.1’den görüldüğü üzere; deneysel çalışmalarda elde edilen mekanik test değerleri ile tahmin edilen değerler arasındaki fark göz ardı edilebilecek seviyededir. Bu durumda Taguchi optimizasyonunun kesme testi sonuçları tahmininde başarı ile uygulanabileceği görülmektedir. Bu şekilde Taguchi optimizasyonu ile difüzyon kaynak işlemi için en geçerli mekanik testlerden olan kayma testi ile elde edilen sonuçlar ile parametre optimizasyonunun uygun bir şekilde yapılabileceği çalışmamız ile ispatlanmıştır.

Minitab programı yardımıyla gerçekleştirilen optimizasyonda kesme kuvveti için elde edilen değerler sırasıyla başlangıç parametresi için 2956 N, optimum parametre için 8176 N olarak belirlenmiştir. Optimum olan A1B4C3D2 parametrelerde kaynak işlemlerini gerçekleştirmek için daha sonra takviyesiz 6 adet numune üretilerek, 820 °C sıcaklık, 20 kg yük ve 40 dakika sürede difüzyon kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kontrol deneyleri kapsamında elde ettiğimiz kaynaklı birleştirmeler, daha sonra kayma testine tabi tutularak deneyler sonlanmıştır. Kontrol deneyleri sonucunda 3 adet numunede elde edilen kesme kuvveti ortalaması 8237 N olarak ölçülmüştür.

Tablo 8.1’de verilen başlangıç parametre değerleri, tahminsel değerler ve doğrulama değerleri birbiriyle mukayese edildiğinde; Taguchi metoduyla optimizasyon işlemlerinde kesme kuvveti için başlangıç parametre değerlerine göre % 11,24 iyileşme olduğu, tahminsel hatanın ise % 1,26 değer ile ihmal edilebilecek bir düzeyde olduğu görülmüştür.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Bu çalışmada, Cu₁₀Sn / B₄C kompozitleri difüzyon kaynak yöntemiyle, argon koruyucu gaz atmosferi altında, Taguchi metoduyla belirlenen birleşme şartları kullanılarak kaynaklanmış ve elde edilen veriler incelenmiştir.
- B₄C parçacık takviyeli Cu₁₀Sn kompozitleri, TM ve soğuk presleme yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- Kaynak sonrasında numuneler incelendiğinde boyutların bilinen diğer yöntemlere göre daha düzgün olduğu görülmüştür. Birleşme yüzeylerinin deformasyona uğradığı ve üzerinde ince bir tufal tabakası meydana geldiği görülmüştür.
- İncelemeler esnasında farklı parametrelerde üretilen numunelerde difüzyon bölgelerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.
- SEM ve optik mikroskop sonuçları incelendiğinde 1, 2 ve 3 numaralı birleştirmelerde kaynak hattı belirgin bir şekilde gözlemlenmiş ve kaynak işleminin bu nedenle tam olarak gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Buna neden olarak süre ve sıcaklığın yetersiz olması düşünülmektedir. 4 numaralı deney numunesinde ise kaynak hattının mikroyapı resimlerinde görülmemesinden ve yüksek kesme kuvveti (6362 N) değerinden dolayı difüzyon işleminin gerçekleştiği ancak makro resimlerde görülen aşırı deformasyonun gerçekleştiği görülmüştür. Buna neden olarak sıcaklık, basınç ve bekleme süresinin yüksek olması düşünülmüştür. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ve 16 numaralı birleştirmelerde ise kaynak işleminin istenildiği gibi gerçekleştiği, söz konusu deneylerde kaynak hattının kaybolduğu, bu durum neticesinde difüzyonun gerçekleşerek kaynaklı birleştirmelerin oluştuğu tespit edilmiştir. 8 numaralı deneyde ise kaynak hattının kısmen görünmesine rağmen yüksek ortalama kesme kuvveti (8354 N) değerinden dolayı kaynaklı birleştirmelerin oluştuğu tespit edilmiştir.
- EDS analizleri incelendiğinde; Cu₁₀Sn matrisin içerisine B₄C takviye elemanının difüzyon bölgesinde iç içe geçtiği, matris malzeme elementleri olan Cu ve Sn ile

takviye malzemesi elementleri olan B ve C elementlerinin EDS piklerinde yer aldığı, takviye oranının artışına bağlı olarak B ve C piklerinde de artışın olduğu gözlemlenmiştir.

- XRD sonuçlarına göre; Cu₁₀Sn - B₄C kompozitlerinde bulunan partiküller arasında etkileşim olmadığı sonuçlardan elde edilmiştir. Üretilen numunelerin XRD sonuçları incelendiğinde yeni bir faz oluşumu da gözlemlenmemiştir.

- Mikrosertlik sonuçları incelendiğinde Deney 1 ve Deney 3'ün birbirine yakın sonuçları içerdiği, en yüksek sertlik sonuçlarının Deney 2'de, en düşük sertlik sonuçlarının ise Deney 4'te görüldüğü tespit edilmiştir. Deney 5 – Deney 8 arasındaki numuneler için gerçekleştirilen sertlik ölçümleri, takviyesiz olan Deney 1 – Deney 4 ile kıyaslandığında sertliğin çok ciddi oranda artış gösterdiği tespit edilmiştir. Deney 9 – 13 arasındaki sonuçlar incelendiğinde; sertliğin artan B₄C miktarıyla birlikte artış gösterdiği burada da dikkat çekmektedir. Ağırlıkça % 4 ve % 8 oranda B₄C parçacıklarının bronz matrise dâhil edilmesiyle mikrosertliğin arttığı, % 12 B₄C takviyeli malzemelerin ise % 8 takviye oranından çok farklı sonuçlar içermediği ve bu nedenle sertliğin bu oranda durağanlaştığı söylenilebilir.

- Taguchi metoduyla belirlenen deneyler içerisinde, en yüksek kesme kuvveti 820 °C sıcaklıkta, 20 kg yükte ve 40 dakika süre parametrelerdeki 8 numaralı deney numunesinin 8354 N'luk kesme (makaslama) kuvveti ile en yüksek dayanıma sahip olduğu sonucu çıkmaktadır. % 8 B₄C takviye oranında daha optimum kesme sonuçları elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda kaynak yapılan numuneler incelendiğinde sıcaklıklara bağlı olarak kesme (makaslama) kuvvetinin düzenli bir şekilde artış gösterdiği sonucu çıkmaktadır. Kesme kuvvetini etkileyen en önemli parametrenin de sıcaklık olduğu anlaşılmıştır.

- Taguchi metoduna göre, optimum sonuçları verecek parametrelerin tahmininden sonra, optimizasyonda son aşama olarak doğrulama deneyleri yapılmış ve yapılan optimizasyonun doğruluğu kontrol edilmiştir. Kesme kuvveti için başlangıç parametreleri “A2B2C4D3” (A2-% 96 Cu₁₀Sn - % 4 B₄C malzeme, B2 - 740 °C sıcaklık, C4 - 25 kg yük, D3 – 60 dakika) olarak belirlenmiştir.

- Minitab programı yardımıyla gerçekleştirilen optimizasyonda kesme kuvvetinde elde edilen değerler sırasıyla başlangıç parametresi için 2956 N, optimum parametre için ise 8176 N olarak belirlenmiştir. Optimum olan “A1B4C3D2” (A1-% 100 Cu10Sn - % 4 B₄C malzeme, B4 - 820 °C sıcaklık, C3 - 20 kg yük, D2 – 40 dakika) parametrelerde “kontrol deneyleri sonucunda kesme kuvveti ortalaması 8237 N olarak ölçülmüştür.

- Başlangıç parametre değerleri, tahminsel değerler ve doğrulama değerleri birbiriyle mukayese edildiğinde; Taguchi metoduyla optimizasyon işlemlerinde kesme kuvveti için başlangıç parametre değerlerine göre % 11,24 iyileşme olduğu, tahminsel hatanın ise % 1,26 değer ile ihmal edilebilecek bir düzeyde olduğu görülmüştür.

- Tüm sonuçlar birbiri içerisinde değerlendirildiğinde B₄C takviyeli Cu10Sn matrisli kompozit malzemelerin difüzyon kaynağı uygulamalarında deney parametrelerinin belirlenmesi ve optimizasyonu aşamasında Taguchi metodunun verimli bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdizadeh, H. Ashuri, M. Tavakoli Moghadam, P. Nouribahadory, A. Baharvandi, H.R. (2011). Improvement in physical and mechanical properties of aluminum/zircon composites fabricated by powder metallurgy method, Mater. Des., 32, 4417-4423.
- Almomani, M.A. Tyfour, W.R. Nemrat, M.H. (2016). Effect of silicon carbide addition on the corrosion behavior of powder metallurgy Cu-30Zn brass in a 3.5 wt% NaCl solution, J. Alloy. Comp. 679, 104-114.
- Atasoy, E. (2007). Titanyum ve Düşük Karbonlu Çelik Çiftinin Arabağlayıcı Kullanılarak Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması. Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Zonguldak
- Ada, H. (2017). API borularının kaynaklı birleştirmelerinde kaynak parametrelerinin Taguchi metodu ile optimizasyonu. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aydın, K. Hıdıroğlu, M. Kaya, Y. Kahraman, N. (2013). Titanyum ve Bakır Malzemelerin Difüzyon Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 28(1), 15-26.
- Anagün, A.S. (1997). Kalite Kontrolünde İleri Teknikler Ders Notları, Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Bhuyan, P. Nasimul Alam, S. Panda, D. Kumar, L. Singh, H. (2017). Synthesis and characterization of Cu-Fe3Al composites using powder metallurgy route, Mater. Today: Proceedings. 4, 213-223.
- Bayrak, Z. (1996). Taguchi Yönteminin Kalite Kontrolüne Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Chen, B. Bi, Q. Yang, J. Xia, Y. Hao, J. (2008). Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction composites, Tribol. Int. 41, 1145-1152.
- Cui, G. Bi, Q. Zhu, S. Fu, L. Yang, J. Qiao, Z. Liu, W. (2013). Synergistic effect of alumina and graphite on bronze matrix composites: tribological behaviors in seawater, Wear, 303, 216-224.
- Çakıroğlu, R., (2011). Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Oluşan Sıcaklığın Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 32-38.
- Devincent, S.M. Michal, G.M. (1993). Reaction layer formation at the graphite/copper-chromium alloy interface, Metallurgical Transactions A24A, 53-60.

- Davim, J. P. (2003). A note the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 116, 305-308.
- Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A., & Chhowalla, M. (2011). Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(11), 3605-3628.
- Fidan, L. (2006). Saf Alüminyum ve Saf Bakırın Difüzyon Kaynağında Arafazların Oluşumu Ve Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Balıkesir.
- Gül, H. Uysal, M. Alp, A. Akbulut, H. (2015). Preparation and characterization of bronze/SiCp composites produced via current activated sintering method, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 38, 413-419.
- Kahraman, N. Gülenç, B. (2016). Modern Kaynak Teknolojisi. Genişletilmiş 3. Baskı, Ankara: Behçet Gülenç.
- Kaku, S.M.Y. Khanra, A.K. Davidson, M.J. (2018). Effect of deformation on properties of Al/Al-alloy ZrB₂ powder metallurgy composite, *J. Alloy. Comp.* 747, 666-675.
- Koç, S. (2003). Kritik Ünitelerin Performansını Etkileyen Faktörlerin Deneysel Tasarım Yöntemi İle Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Keskin, M. S. Kejanlı, H. Bingöl, S. (2019). Farklı Alüminyum Alaşımların Difüzyon Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 10(1), 203-210,
- Laws, K.J. Crosby, C. Sridhar, A. Conway, P. Koloadin, L.S. Zhao, M. Aron-Dine, S. Bassman, L.C. (2015). High entropy brases and bronzes - microstructure, phase evolution and properties, *J. Alloy. Comp.* 650, 949-961.
- Li, T. Yi, D. Hu, J. Xu, J. Liu, J. Wang, B. (2017). Surface modification of h-BN and its influence on the mechanical properties of CuSn10/h-BN composites, *J. Alloy. Comp.* 723, 345-353.
- Li, X. Ivas, T. Spierings, A.B. Wegener, K. Leinenbach, C. (2018). Phase and micro-structure formation in rapidly solidified Cu-Sn and Cu-Sn-Ti alloys, *J. Alloy. Comp.* 735, 1374-1382.
- Liu, J. Upadhyaya, A. German, R.M. (1998). Application of percolation theory in pre-dicting shape distortion during liquid-phase sintering, *Metall. Mater. Trans. A30A*, 1999-2209.
- Moussa, M.E. Waly, M.A. Amin, M. (2018). Effect of high intensity ultrasonic treatment on microstructural modification and hardness of a nickel-aluminum bronze alloy, *J. Alloy. Comp.* 741, 804-813.

- Moustafa, S.F. Abdel-Hamid, Z. Abd-Elhay, A.M. (2002). Copper matrix SiC and Al₂O₃ particulate composites by powder metallurgy technique, Mater. Lett. 53, 244-249.
- Murray, P. (2013). Low temperature synthesis of boron carbide using a polymer precursor powder route. Doctoral dissertation, University of Birmingham. England.
- Nazik, C. (2013). Alüminyum Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya.
- Olgun, S. (1998). Doğal Gaz ve Petrol Taşıyan Boruların Kaynağında Kaynak Hatalarının Tesbiti ve Alınması Gereken Tedbirler. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-8, 9-17.
- Özdemir, N. (2007). Ti-6Al-4V/304L Malzeme Çiftinin Bakır Aratabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elazığ.
- Pan, Y. Xiao, S. Lu, X. Zhou, C. Li, Y. Liu, Z. Liu, B.W. Xu, W. C. Jia, C. Qu, X.H. (2019). Fabrication, mechanical properties and electrical conductivity of Al₂O₃rein-forced Cu/CNTs composites, J. Alloy. Comp. 782, 1015-1023.
- Peace, G.S. (1992). Taguchi Methods: A Hands-On Approach, Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 8.
- Radhakrishna Bhat, B.V. Subramanyam, J. Bhanu Prasad, V.V. (2002). Preparation of Ti-TiB-TiC&Ti-TiB composites by in-situ reaction hot pressing, Mater. Sci. Eng. A325, 126-130.
- Ross, P.J., (1996). Taguchi Tecniques For Quality Engineering. New York: McGraw–Hill International Book Company, 1-73.
- Sahin, Y. (2007). Tribological behaviour of metal matrix and its composite, Mater. Des. 28, 1348-1352.
- Selva Kumara, M. Chandrasekar, P. Chandramohan, P. Mohanraj, M. (2012). Charac-terisation of titanium-titanium boride composites processed by powdermetallurgy techniques, Mater. Char. 73, 43-51.
- Susilowati, S.E. Sumardiyanto, D. (2017) . Effect of sintering temperature on the me-chanical properties for a Cu-Sn-Zn-C alloy produced by powder metallurgy,Int. J. Metall. Eng, 6 (1) , 10-17.
- Şeker, M. (2013). Fren Balatalarının Üretim Şartları ve İçeriğinin Performansa Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

- Şanyılmaz, M., (2006). Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirmeleri Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemiyle Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Şirvancı, M. (1997). Kalite için deney tasarımı Taguchi yaklaşımı. İstanbul: Literatür Yayınları.
- Talaş, Ş. (2010). Demir Esaslı İntermetalik Malzemelerin Mikrodalga Sinterleme İle Üretimi Ve Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmesi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Afyon.
- Taşlıyan, M. F. (2020). Toz Metalurjisi İle Üretilen Mangan Çeliğine TiC, TiN ve TiCN İlavesinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Karabük.
- Unlu, B.S. Atik, E. (2010). Evaluation of effect of alloy elements in copper based CuSn10 and CuZn30 bearings on tribological and mechanical properties, J. Alloy. Comp. 489, 262-268.
- Yang, Y. Lan, J. Li, X. (2004). Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabri-cated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy, Mater. Sci. Eng, 380, 378-383.
- Yeoh, A. Persad, C. Eliezer, Z. (1997). Dimensional responses of copper-graphite powder composites to sintering, Scr. Mater. 37, 271-277.