



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

KOMPOZİT ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMESİNİN
HAZIRLANMASI
VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARATERİZASYONU

2002-80 ✓

PROJE NO : MİSAG-135

Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu

Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee

**KOMPOZİT ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMESİNİN
HAZIRLANMASI
VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARATERİZASYONU**

2002-80 ✓

PROJE NO : MİSAG-135

**PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ
YRD. DOÇ. DR. SELAHATTİN YILMAZ**

**ARAŞTIRICILAR
DOÇ. DR. MUSTAFA GÜDEN
ARŞ. GÖR. SEMİH ELBİR**

KASIM-2001

ÖZ

Toz tabletlerden köpükleştirme yöntemi ile SiC-parçacık (SiC_p) takviyeli kapalı hücreli alüminyum (Al) köpüklerin üretim fizibilitesini incelemek ve SiC_p takviyesinin Al tablet köpükleşmesine ve üretilen köpüklerin mekanik özelliklerine etkilerini belirlemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. SiC_p/Al kompozit toz tabletlerin köpükleşme ve üretilen kompozit köpüklerin ise basma altında mekanik davranışları belirlenmiş ve bunlar saf Al tabletlerin köpükleşme ve Al köpüklerin mekanik davranışları ile karşılaştırılmıştır.

Kompozit ve Al tabletler $425\text{ }^\circ\text{C}$ 'de çelik bir kalıp içerisinde ve sabit bir basınç altında (220 MPa) sıcak presleme yöntemiyle hazırlanmıştır. Nispi yoğunluğu %99'a ulaşan ve içerisinde % 0.5 (ağırlık yüzdesi) TiH_2 (titanyum hidrür) bulunan tabletler, Al metalinin erime sıcaklığının üstünde önceden ısıtılmış bir fırında köpükleştirilmiştir. Isıtma esnasında, TiH_2 bozunarak hidrojen gazı çıkartırken, tablet tek yönde genişlemektedir. Belirli fırında kalma sürelerinde, köpükleşmiş veya kısmi köpükleşmiş numuneler fırından alınarak soğutulmuş ve boyutları ölçülerek lineer uzama hesaplanmıştır.

Al tabletlerle 750 ve $850\text{ }^\circ\text{C}$ 'de yapılan ön köpükleşme deneylerin sonucunda, her iki sıcaklıkta da lineer uzamanın benzer bulunmasına rağmen $750\text{ }^\circ\text{C}$ 'de köpükleşme daha yavaş ve kontrollüdür. Yine bu deneyler sonucunda, sıvı metal köpük yapısının katı halde de korunabilmesi için sıvı metalin hızlı soğutulması gerektiği de bulunmuştur.

SiC_p/Al ve Al tabletlerle $750\text{ }^\circ\text{C}$ 'de yapılan köpükleştirme deneyleri, SiC_p takviyesinin; a) toz tabletlerde lineer uzamayı arttırdığını ve b) köpükleşme esnasında sıvı metalin aşağı doğru akmasını (drenaj) azalttığını göstermiştir. SiC_p takviyesi ile Al köpüklerin plato gerilmeleri ve enerji emme kapasiteleri de artmıştır. Bu sonuçlar, değişen darbe gerilmelerinde, kompozit yapıların uygun köpük malzemesinin seçilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Benzer presleme parametreleri ile hazırlanan Al_2O_3 -parçacık/Al ve SiC-kıl kristal/Al kompozit tabletler de $750\text{ }^\circ\text{C}$ 'de köpükleştirilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum köpük, Kompozit metal köpük, SiC kompozit köpük, Metal toz işleme teknolojisi, Metal köpük micro yapısı, Metal köpük mekanik özellikleri .

ABSTRACT

An experimental study has been conducted to investigate the feasibility of the production of SiC-particulate (SiC_p) reinforced Al (Aluminum) closed-cell foams using the foaming from powder compacts process and to determine the effect of SiC_p addition on the foaming behavior of Al compacts and the mechanical properties of Al foams. The foaming behavior of SiC_p/Al composite powder compacts and the compression mechanical behavior of SiC_p/Al composite foams were determined and compared with those of pure Al compacts and Al foams prepared by the same processing parameters.

Composite and Al powder compacts were prepared by hot uniaxial compaction inside a steel die at 425 °C for 1/2 hour under a constant die pressure of 220 MPa. Compacts of 99 % dense with a small amount of blowing agent of TiH₂ (0.5 wt%) were heated above the melting temperature of Al inside a pre-heated furnace. During heating, as the TiH₂ decomposed and released hydrogen, the compact expanded uniaxially. Foamed/partially foamed samples were taken from the furnace at the specified furnace holding times and their heights were measured in order to calculate linear expansion.

Initial foaming experiments with Al compacts at 750 and 850 °C have shown that foaming at the former temperature was slower and more controllable, although linear expansion was similar at both temperatures. From these experiments, it was also found that rapid cooling of the liquid metal was necessary in order to maintain the liquid foam structure in the solid state.

Foaming experiments of SiC_p/Al and Al compacts at 750 °C have shown that SiC_p addition a) increased linear expansion of the powder compacts and b) reduced the extent of liquid metal drainage. SiC_p addition also increased the plateau stress and energy absorption capability of the Al foams. These results have shown the potential of composite foams for tailoring energy absorption of Al foams for varying levels of impact stresses.

Foaming experiments have also been conducted on aluminum oxide-particulate/Al and SiC-whisker/Al composites compacts prepared using the same compaction parameters and foamed at the same temperature, 750 °C.

Keywords: Aluminyum foam, Composit metal foam, SiC composit foam, Metal powder processing, Metal foam micro-structure, Metal foam mechanical properties.

ÖNSÖZ

MISAG-135 nolu “Kompozit Alüminyum Köpük Malzemesinin Hazırlanması ve Mekanik Özelliklerinin Karakterizasyonu” başlıklı proje kapsamındaki bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. Mekanik testler Delaware Üniversitesinde (Amerika) Doç.Dr. Mustafa Güden tarafından yapılmıştır. TÜBİTAK ve Delaware Üniversitesinin katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Doç. Dr. Mustafa Güden’in projenin yapılması için gösterdiği gayret ve koyduğu katkıdan dolayı çok teşekkür ederiz.

Proje desteğinin kullanılması için TÜBİTAK’ın kullandığı sistemin çok etkin olduğunu, zamanında alımlarımızı yapmamıza sağladığını ve işlerimizi aksatmadığını bildirmek isterim. TÜBİTAK’ ta uzman olarak görevli Faruk Altun beyin projenin gerçekleşmesi için gösterdiği yardım, yaptığı öneriler ve çalışmaların titizlikle yapılması için koyduğu katkılar için teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
1 GİRİŞ	1
2 KAPALI HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİM METOTLARI	3
2.1 Ergimiş Metale Gaz Enjektisi ile Köpük Üretimi	3
2.2 Ergimiş Metale Köpük Yapıcı Madde İlavesi ile Köpükleştirme	4
2.3 Preslenmiş Tabletlerin Köpükleştirilmesi	6
3 KAPALI HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK METALLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	10
3.1 Basma Yükleri Altında Deformasyon	11
3.2 Elastik Özellikler	12
3.3 Plastik deformasyon ve yoğunlaşma	14
3.4 Enerji Emme	15
4 DENEYSEL ÇALIŞMA	18
4.1 Malzemeler	18
4.2 Tablet Hazırlanması	19
4.3 Tabletlerin Köpükleştirilmesi	19
4.4 Basma Mekanik testleri	20
5 SONUÇ VE TARTIŞMALAR	21
5.1 Al ve SiC _p /Al tabletlerin köpükleşme davranışları	21

5.2	Al_2O_3 -parçacık/Al, SiC-kıl kristal/Al ve Granüle Al Tabletlerin Köpükleşme Davranışları	28
5.3	SiC-parçacık/Al Kompozit Köpüklerin Basma Davranışları	29
6	SONUÇ	41
	REFERANSLAR	42
	EK-A	46

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Köpük hazırlamada kullanılan malzemelerin özellikleri.

18

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Ergimiş metale gaz enjektisi ile köpük üretimi.	4
Şekil 2.2	Ergimiş metale köpük yapıcı madde ilavesi ile köpükleştirme.	5
Şekil 2.3	Karıştırma zamanı ve Ca oranının Al metalinin viskositesine etkisi.	5
Şekil 2.4	Preslenmiş tabletlerin köpükleştirilmesi yöntemi.	6
Şekil 2.5	Kalıpta köpükleştirme a)yarı ürünün kalıba yerleştirilmesi ve b) köpükleştirilmesi.	8
Şekil 2.6	a) karmaşık köpük yapısı ve b) sandviç panel.	8
Şekil 3.1	6061 Al köpüğün basma gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışı.	11
Şekil 3.2	6061 Al köpüğün değişik yoğunluktaki basma gerilme-birim şekil değişim miktarı grafikleri.	11
Şekil 3.3	6061 Al köpüğün %10 birim şekil değişim miktarına tekabül eden gerilmelerin nispi yoğunlukla değişimi.	12
Şekil 3.4	Yoğun Al metali ve değişik yoğunluktaki Al köpüklerin enerji-emme özelliklerinin karşılaştırılması.	16
Şekil 3.5	Boş tüp, köpük ve tüp+köpük yük-deplasman grafikleri ve tüp+köpük etkileşimi.	16
Şekil 3.6	Ters yönde basılmış köpük dolu pirinç tüp.	17
Şekil 4.1	Köpük hazırlama yönteminin şematik gösterimi.	19
Şekil 4.2	Silindir basma testi numunesi (sol) ve numunenin delinerek hazırlandığı köpük (sağ).	20
Şekil 5.1.	Presleme sıcaklığının nispi yoğunluğa etkisi.	22
Şekil 5.2	(a) Al ve b) SiC _{parçacık} /Al kompozit tabletlerin mikroyapıları.	23
Şekil 5.3	Fırında kalma süresinin lineer uzamaya etkisi (havada soğutulan köpük numuneleri).	24
Şekil 5.4	Havada ve suda soğutulan köpüklerde fırında kalma süresinin lineer uzamaya etkisi.	25
Şekil 5.5	Çeşitli zamanlarda fırından alınan köpüklerin yapısı a) alüminyum köpük (a=6, b=6,45, c=7,d=8, e=9, f=10, g=15, h=20 dakika) b) kompozit köpük (A=5, B=5,30 , C=5,45, D=6, E=7, F=8, G=15 dakika).	26

Şekil 5.6	Al ₂ O ₃ -parçacık kompozit ve Al köpüklerin LU'nın karşılaştırılması.	28
Şekil 5.7	Aynı fırında kalma süresinde (9 dakika) oluşan kompozit köpük hücre yapıları a) % 8.6 Al ₂ O ₃ -parçacık/Al ve b) % 8.6 SiC-parçacık/Al köpükler	29
Şekil 5.8	Farklı yoğunluktaki a)saf Al (b) % 8.6 SiC-parçacık/Al ve (c) % 20 SiC-parçacık/Al köpüklerin basma altında gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışları.	31
Şekil 5.9	Aynı yoğunluktaki a)saf Al ve % 8.6 SiC-parçacık/Al ve (b) saf Al ve % 20 SiC-parçacık/Al köpüklerin basma davranışlarının karşılaştırılması.	32
Şekil 5.10	% 8.6 SiC-parçacık/Al kompozit köpük hücre yapısı.	33
Şekil 5.11	% 8.6 SiC-parçacık/Al kompozit köpükte basma altında oluşan ince hücre duvarlarının bükülmesi (% 60 birim şekil değişimi).	33
Şekil 5.12	% 8.6 SiC-parçacık/Al kompozit köpükte basma altında oluşan ince hücre bükülmesi ve yırtılması (% 60 birim şekil değişimi).	34
Şekil 5.13	Kompozit ve Al köpüklerde çökme gerilmesinin yoğunlukla değişimi.	35
Şekil 5.14	Kompozit (% 8.6 SiC) köpükte a) hücre köşesi ve duvarı ve b) hücre duvarında parçacık dağılımı.	36
Şekil 5.15	%30 ve %10 birim şekil değişim miktarlarında enerji -emme miktarları.	38
Şekil 5.16	Enerji emme ve verime karşılık gerilme	39
Şekil 5.17	Kompozit ve Al köpüğün maksimum verimde enerji emme miktarına ve yoğunluğa karşılık gerilme.	40
Şekil A.1	a) açık hücre modeli ve b) basma modeli	47
Şekil A.2	Kapalı hücre modeli.	48
Şekil A.3	Kapalı hücrede plastik hücre yüzeyi uzama modeli.	48

1. GİRİŞ

Kapalı hücreli alüminyum köpük metallerin sahip olduğu önemli özellikler (düşük yoğunluk, darbe enerjisini emme, yalıtkanlık, ve vs.) bu malzemelere karşı ilgiyi son yıllarda oldukça artırmıştır [1]. Köpük metallere, darbe enerjisinin büyük bir kısmını plastik enerjiye çevirerek, yoğun metalden daha fazla deformasyon enerjisi emebilirler. Tüplerde dolgu malzemesi olarak kullanıldığında, köpüğün ve tüpün tek başına emdiği enerjilerin toplamından daha fazla enerji emilmesini sağlamaktadırlar [2, 3, 4]. Köpüklerde, plastik deformasyon hücrelerin çökmesi ile başlamaktadır. Çökme genellikle sabit veya birim şekil değişim miktarı ile çok az artan bir gerilmeye (plato gerilmesi) çok yüksek birim şekil değişim miktarlarına kadar sürebilir. Plato gerilmesi korunmak istenen yapıya veya cihaza yüklenebilecek maksimum yükü ve buna tekabül eden enerji miktarını belirlemede önemli bir parametredir [5]. Darbe yüklerinin yüksek olduğu uygulamalarda yüksek plato gerilmelerine sahip köpükler tercih edilebilir.

Morfolojik düzensizliklerin (örneğin hücre duvarındaki katlanmalar ve eğimler, hücre duvarı ve köşesi kalınlık farklılıkları ve hücre şekli ve dağılımındaki düzensizlikler) köpüklerin plato gerilmesini ve enerji emme kapasitesini düşürdüğü bilinmektedir [6, 7]. Köpük yapısının iyileştirmesi, örneğin hücre duvar kalınlığı/hücre köşe kalınlığı oranının artırılması, plato gerilmesini artırarak daha kararlı bir plato gerilmesinin oluşmasını sağlamıştır [5, 8]. Hücre morfojisıyla birlikte plato gerilmesini etkileyebilecek diğer iki önemli faktör ise: köpük yoğunluğu ve köpük alaşımının akma gerilmesidir. Yüksek akma gerilimli Al alaşımlarının kullanımı ve köpük yoğunluk artırımı plato gerilmelerini artıracaktır. Birincisinin kullanımı (yüksek akma gerilimli Al alaşımı kullanımı) nispeten ikincisinden daha avantajlıdır; çünkü plato gerilmesi artarken ağırlık sabit kalmaktadır. Metal akma gerilmesi ve/veya plastik deformasyona geçiş direnci seramik parçacıkların örneğin SiC-parçacık (SiC_p), Al_2O_3 -parçacık (Al_2O_3p) ve SiC-kıl kristal, takviyesi ile de artırabilir. Bu çalışmanın amacı, SiC_p/Al Metal Matris Kompozit (MMK) köpüklerin, köpükleşme ve

mekanik özelliklerinin araştırılması ve aynı şartlarda hazırlanmış saf Al köpük ile karşılaştırılmasıyla SiC_p takviyesinin köpükleşmeye ve Al köpük mekanik özelliklerine etkilerinin belirlenmesidir. Kompozit ve saf alüminyum köpükler Fraunhofer Resource Center tarafından geliştirilen toz metalürjisi yöntemiyle hazırlanmıştır [9]. Kompozit köpük yapıların bu yöntemle üretimi henüz araştırılmamıştır. Ancak, Cymat köpükleştirme yönteminde (sıvı metale gaz enjektisi ile köpükleştirme) SiC-parçacıkları köpükleşecek sıvı alüminyum metalin viskozitesini artırmak için ilave edilmektedir [10]. Bu yöntemle üretilen köpükler MMK yapısında olmasına karşın, SiC-parçacıklarının etkileri özellikle de mekanik özelliklere etkileri detaylı çalışılmamıştır.

2. KAPALI HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Kapalı hücreli alüminyum köpüklerin ticari üretimi üç farklı yöntem ile yapılmaktadır. Bunlar 1) ergimiş metale gaz enjektisi ile 2) ergimiş metale köpük yapıcı madde ilavesi ile, 3) toz metalürjisi ile hazırlanmış preslenmiş tabletlerin köpükleştirilmesiyle.

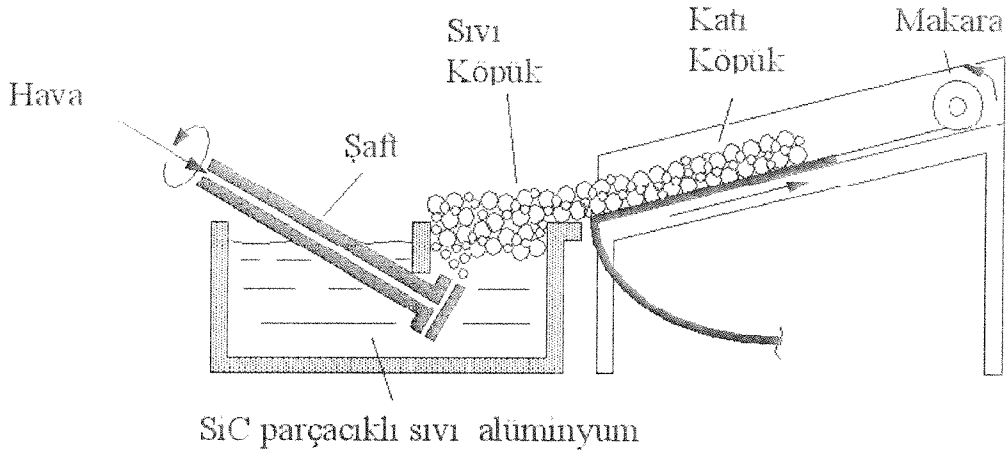
2.1 Ergimiş Metale Gaz Enjektisi ile Köpük Üretimi

Bu yöntem Alcan N. Hydro (Norveç) ve Cymat Aluminuyum Corporation (Canada) tarafından halen kullanılmaktadır [10, 11]. SiC, Al₂O₃ ve MgO benzeri seramik tozlar vizkositeyi arttırmak amacıyla köpükleştirilecek sıvı metale köpükleşme öncesi ilave edilmektedir. Dönen bir enjeksiyon şaftı yardımıyla gaz sıvı metal içerisinde küçük gaz baloncukları halinde homojen dağıtılmaktadır (hava veya azot) (Şekil 2.1) [12]. Gaz baloncukları seramik tozlarla kararlı hale gelerek yüzeye çıkmakta ve oluşan sıvı köpük bir bant üzerine taşınarak (Şekil 2.1) ergime sıcaklığının altına soğutulmaktadır.

Kullanılan seramik tozların hacimsel oranı %10 ile %20, boyutları ise 5 ile 20 µm arasında değişmektedir [11, 13]. Üretilen köpüğün yoğunluğu, hücre büyüklüğü ve hücre kalınlığı sırasıyla 0.0069-0.54 g/cm³, 3-25 mm ve 50-85 µm'dur [12]. Ortalama hücre boyutu, hücre duvar kalınlığı ve yoğunluğu, gaz enjeksiyon ve şaft hızlarını da içine üretim parametrelerinin değiştirilmesi ile kontrol edilebilir.

Köpükleşme esnasındaki sıvı metalin aşağıya doğru akmasıyla (drenaj), köpük yoğunluğunda ve gözenek boyutunda bölgesel farklıklar oluşmaktadır. Taşıyıcı bant ve sıvı köpük arasında oluşan kayma gerilmeleri eliptik hücrelerin oluşmasına neden olmaktadır [10]. Yüzeyinde yoğun bir metal tabakası oluşan katılaştırılmış köpükler direk olarak kullanılabilir

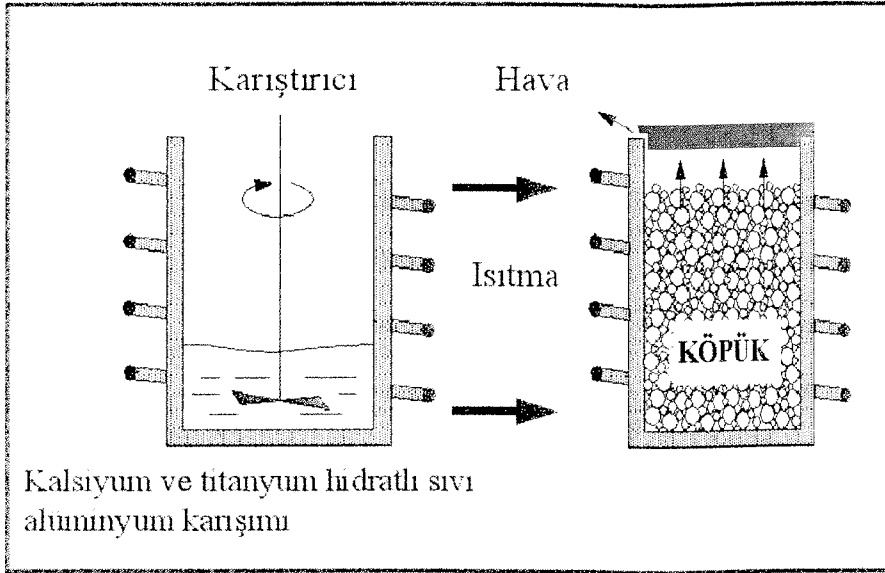
veya işlenerek istenen şekle getirilebilir. Sürekli olması ve düşük yoğunluğa sahip büyük hacimli MMK köpüklerin nispeten ekonomik üretilmesi bu yöntemin önemli avantajlarıdır. Dezavantajı ise kesme ve işleme benzeri ikincil işlemleri gerektirmesidir.



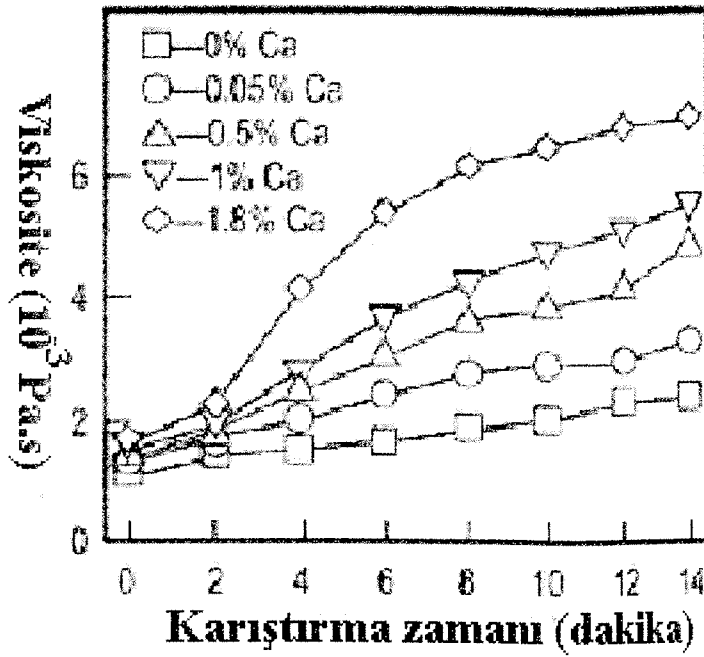
Şekil 2.1 Ergimiş metale gaz enjektörü ile köpük üretimi.

2.2 Ergimiş Metale Köpük Yapıcı Madde İlavesi ile Köpükleştirme

Kapalı hücreli köpük alüminyum üretilmesinde ikinci yöntem ise köpük yapıcı (örneğin TiH_2) maddelerin sıvı metale eklenmesidir. Köpük yapıcı maddenin bozularak hidrojen gazı çıkarması köpükleşmeyi sağlamaktadır (Şekil 2.2) [14, 15]. Köpükleştirme öncesinde, sıvı alüminyuma ($680\text{ }^\circ\text{C}$) % 1.5 miktarında kalsiyum ilave edilerek sıvı hızla karıştırılmaktadır (Şekil 2.2) [16]. Karıştırma esnasında oluşan oksit ve metal bileşikleri (kalsiyum oksit, kalsiyum-alüminyum oksit veya Al_4Ca intermetalik) sıvının viskozitesini artırmaktadır. Kalsiyum miktarının ve karıştırma süresinin ergimiş Al metalinin viskozitesine etkisi Şekil 2.3'de gösterilmiştir [15]. Viskozitesi istenen düzeye getirilen ergimiş metale daha sonra TiH_2 (% 1.6) ilave edilmektedir. TiH_2 sıvı metal içerisinde bozularak hidrojen gazı açığa çıkarmaktadır. Bunun sonucu sıvı metal sabit basınçta genişlemekte ve kalıbı sıvı köpük ile doldurmaktadır. Sıvı köpük, son olarak köpükleştirilen alaşımın erime sıcaklığının altına hızlıca katılaştırılarak özel uygulamalar için işlenmektedir.



Şekil 2.2 Ergimiş metale köpük yapıcı madde ilavesi ile köpükleştirme.



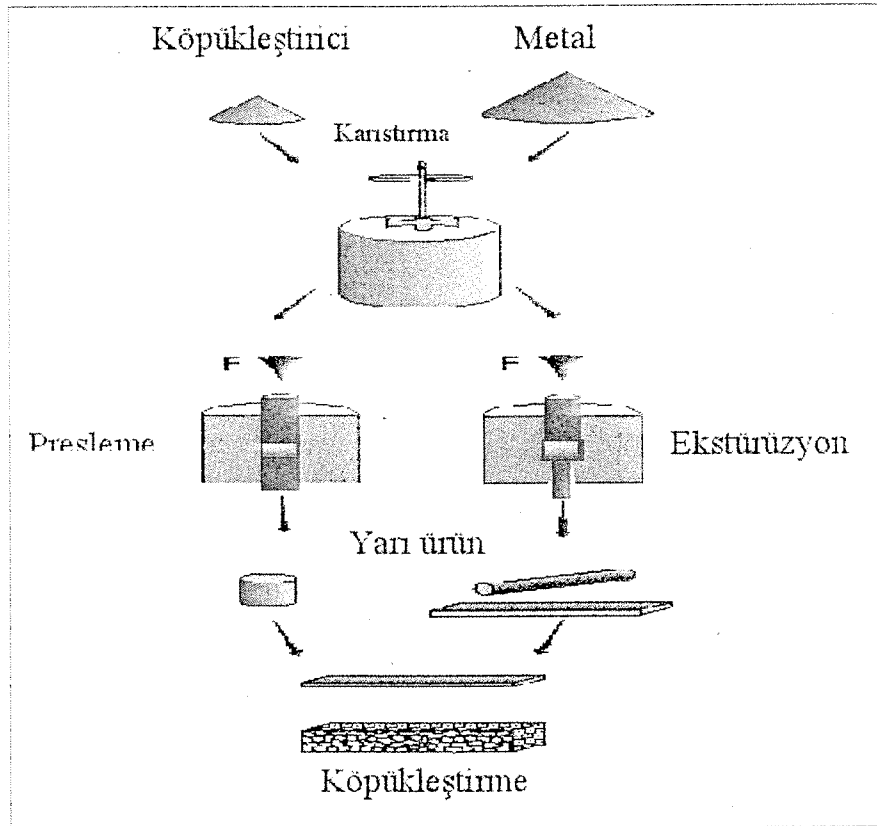
Şekil 2.3 Karıştırma zamanı ve Ca oranının Al metalinin viskozitesine etkisi [13].

Yöntemler arasında, en homojen köpük yapısı Alporas yöntemi ile üretilmektedir [15]. Köpüklerin tipik yoğunlukları 0.18 g/cm^3 ve 0.24 g/cm^3 arasında olup, ortalama gözenek boyutları 2 ile 10 mm arasında değişmektedir [14, 15]. Alüminyum sıvı metalin viskozitesi oksijen, hava ve başka gaz karışımlarının enjeksiyonu ile veya viskoziteyi arttıran

SiC ve alüminyum oksit benzeri katkı maddelerinin ilavesi ile ayarlanabilir. Gaz enjeksiyonu Al_2O_3 parçacıklarının oluşumunu sağlayarak vizkositeyi arttırmaktadır. Karmaşık sıcaklık çevirimleri, parametrelerin ayarlanmasındaki zorluklar ve ikincil işlemler bu yöntemin dezavantajlarıdır.

2.3 Preslenmiş Tabletlerin Köpükleştirilmesi

Bu yöntemde, toz metal ve köpük yapıcı madde karıştırıldıktan sonra sıcak presleme, ekstrüzyon ve haddeleme benzeri metal şekillendirme yöntemleri ile köpükleşecek yoğun yapıya sahip yarı ürün haline getirilmektedir (Şekil 2.4) [17]. Köpükleşecek yarı ürün, metalin erime sıcaklığının üstüne ısıtılmaktadır. Isıtma esnasında köpük yapıcı madde bozunmakta ve gaz açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan gaz, erimiş metalin genişlemesine ve gözenekli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 2. 4 Preslenmiş tabletlerin köpükleştirilmesi yöntemi.

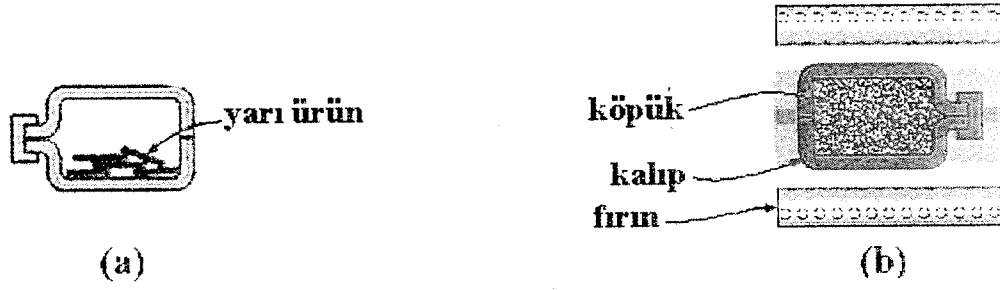
Metal hidrürlerin yanında (örneğin titanyum hidrür), karbonatlar (örneğin kalsiyum karbonat, potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat), hidratlar (örneğin alüminyum sülfat hidrat ve alüminyum hidroksit) ve buharlaşan maddeler (örneğin civa bileşikleri ve pulverize organikler) köpükleştirici madde olarak kullanılabilirler.

Etkin bir köpükleşme için, gazın kaçmasına engel olabilecek yoğunluğa sahip bir yarı ürünün hazırlanması çok önemlidir; köpükleştirici maddenin metal içinde tamamen hapis edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden sıcak şekillendirmede kullanılan sıcaklık ve basınç miktarları, toz metal parçacıklarını birbirine bağlayacak ve köpük yapıcı maddenin bozunumu ile oluşan hidrojen gazının kaçışını önleyecek şekilde ayarlanmalıdır. Haddeme yöntemi ile yapılan sıkıştırılmalarda 350 ile 450 °C arası sıcaklıklar parçacıklar arasında özellikle yüzey tabakalarında yayınma sağlamak için yeterlidir [17].

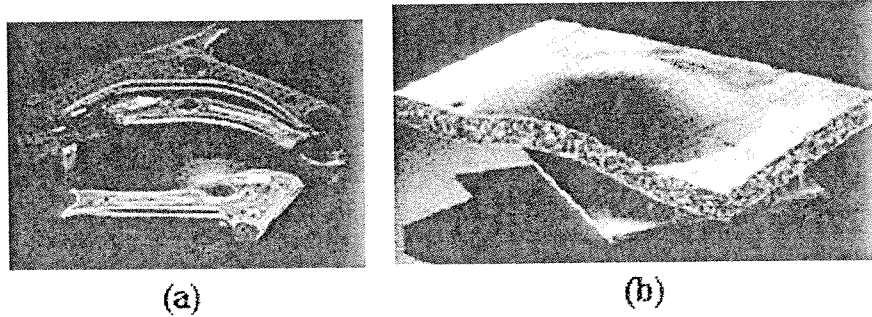
Alüminyum tabletleri köpükleştirmek için gerekli köpük yapıcı madde miktarı oldukça azdır. Hesaplamalar, ağırlıkça % 0.6 TiH₂ içeren köpükleşecek alüminyum tabletin hacimsel genişlemesinin % 17 olabileceğini göstermiştir. Bu değer deneysel çalışmalardan elde edilen genişlemeden yaklaşık 4 kat daha büyüktür [9]. Bu açığa çıkan hidrojen gazının ancak % 25' inin köpükleşme için kullanıldığını ve kalan kısmın ise köpükleştirme esnasında kaçtığını göstermektedir.

Yarı ürünün köpükleşmesi için gereken zaman, uygulanan sıcaklığa ve yarı ürünün büyüklüğüne bağlı olup, birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişmektedir. Bu yöntem sadece Al ve Al alaşımlarının kullanımı ile sınırlı olmayıp, kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımlar da uygun köpük yapıcı madde ve proses parametrelerinin seçilmesi suretiyle köpükleştirilebilir [18].

Köpükleşecek yarı ürün bir kalıp içinde köpükleştirilmediğinde şekilsiz bir metal köpük parçası oluşur. Kalıp içerisinde ise yarı ürün köpükleşerek kalıbın şeklini almaktadır (Şekil 2.5). Bu yöntem ile dış yüzeyi yoğun bir metal tabakası ile kapalı ve ancak içerisinde oldukça gözenekli son kullanım şekline yakın yapılar üretilmektedir. Karmaşık yapılar, sıvı köpüğün kalıba dökülmesi ile hazırlanabilir (Şekil 2.6 (a)). Plaka yüzeylerine metal köpüğün yapıştırılması ile Sandviç paneller hazırlanabilir. Başka bir yöntem ise Al veya çelik plakalar arasına köpükleşecek yarı ürünün kaplama ile sıkıştırılması ve daha sonra yarı ürünün köpükleştirilmesidir (Şekil 2.6. (b)) [19]. Bahsedilen yöntem ile, alüminyum köpük yapılar çelik, titanyum ve alüminyum plakalarıyla birleştirilebilir. Alüminyum plakalar kullanıldığında, plakanın ergime sıcaklığının köpükleştirme sıcaklığından daha yüksek olması gerekmektedir.



Şekil 2.5 Kalıpta köpükleştirme a) yarı ürünün kalıba yerleştirilmesi ve b) köpükleştirilmesi.



Şekil 2.6 a) karmaşık köpük yapısı ve b) sandviç panel [19].

Yüzey boyunca devamlı ve kesikli yoğunlukları değişen köpük yapılar uygun ısıtma yöntemiyle hazırlanabilir. Sabit sıcaklıkta köpükleştirme işlemi belirli bir süre sonunda durdurulduğunda, oluşan köpük belirli bir yoğunluğa sahip olacaktır. Eğer köpükleştirme süreci devam ettirilirse, daha düşük yoğunlukta köpük elde edilir. Bu yöntemle, büyük yüklere maruz kalan yüzey kısımlarında daha yüksek yoğunluğa sahip yapılar oluşturmak mümkündür. Ayrıca, presleme aşamasında köpükleştirici maddenin miktarını bölgesel değiştirerek yoğunluğu farklı köpük bölgeleri aynı yapı içerisinde oluşturulabilir. Bu tür uygulamalar dış yüzeyinde yoğun bir metal tabakasını gerektiren yapıların (otomobil kapıları, tamponlar) üretilmesine olanak sağlar.

Preslenmiş tabletlerden köpükleştirme yöntemi, TiH_2 'nin sıvı Al metaline toz metalürjisi yöntemi yerine direkt eklenmesi şeklinde geliştirilmiştir. Erken H_2 gazı çıkışını engellemek için TiH_2 'lü sıvı Al metalinin hızlıca soğutulması veya TiH_2 parçacıklarının

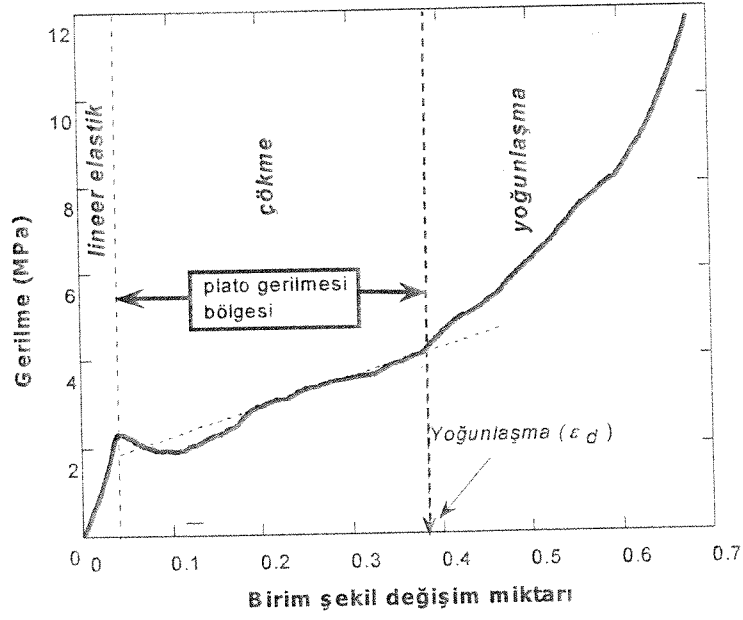
pasifleştirilmesi gerekmektedir. İlk yöntem, köpük döküm yöntemi olarak bilinir ve köpükleştirici madde ve sıvı Al döküm kalıbına aynı anda dökülerek hızlıca soğutulur [20]. Elde edilen döküm ısıtılarak köpükleştirilebilir. İkinci yöntemde ise TiH_2 parçacıklarının yüzeyinde oksit tabakası oluşturularak bozunması geciktirilmektedir [21].

3. KAPALI HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK METALLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

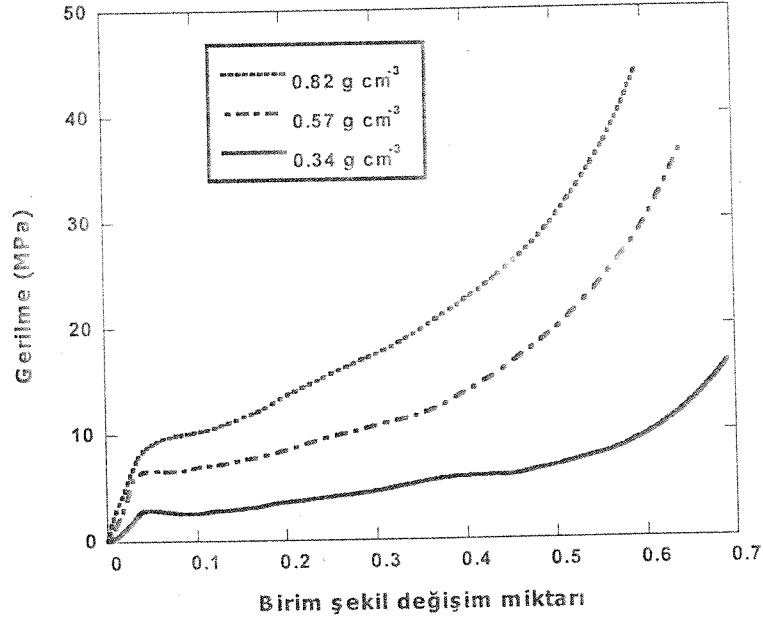
Yüksek mukavemet ağırlık oranı, iyi enerji emme kapasiteleri ve benzeri önemli özellikleri kapalı hücreli Al köpükleri çeşitli mühendislik alanlarda kullanılabilir potansiyel malzemeler yapmaktadır [22-25]. Bu özellikler mühendislik uygulamalarında potansiyel uygulama alanları yaratmaktadır. Diğer bir çok özelliklerinden, basma yükleri altında ve elastik deformasyon, çökme veya plato gerilmeleri ve enerji emme özellikleri en önemlileridir.

3.1 *Basma Yükleri Altında Deformasyon*

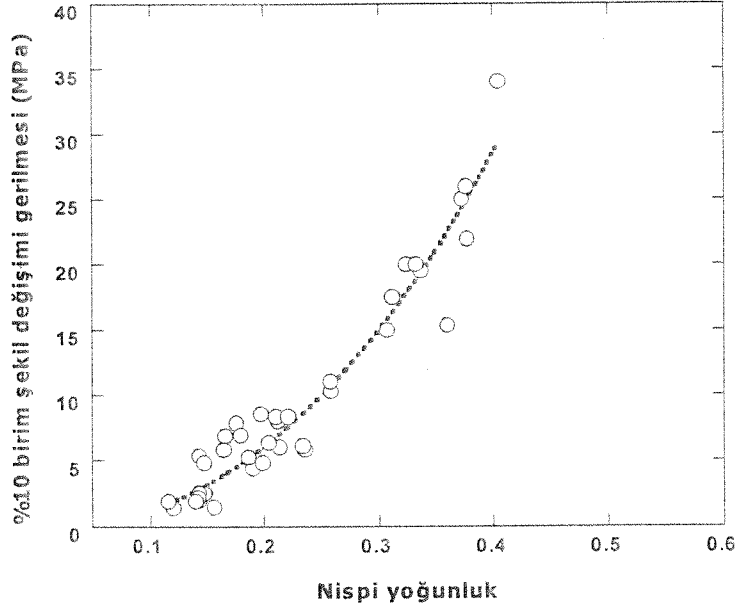
Kapalı hücreli Al köpükler basma altında karakteristik gerilme-birim şekil değişim miktarı grafiği gösterirler. Basma grafiği, Şekil 3.1'de 6061 Al köpüğü için gösteriliği gibi, üç farklı bölgeden oluşmaktadır: lineer elastik, çökme ve yoğunlaşma [26]. Lineer elastik bölgede, deformasyon hücre duvarlarının bükülmesi veya genişlemesiyle kontrol edilmektedir. Bu bölge, birkaç deformasyon mekanizmasından oluşan (elastik bükülme, gevrek kırılma veya deformasyonun yoğunlaşması) çökme bölgesi ile sona ermektedir. Bu bölgede bir alandaki hücrelerin çökmesiyle oluşan yerel deformasyon çökmeyen bölgelere doğru ilerlemesi ile devam etmektedir. Deformasyonun belirli bir bölgede yoğunlaşması ve deforme olmayan bölgelere doğru ilerlemesi sebebiyle bu bölgede ki gerilmelerde düşme ve yükselmeler gözlenmektedir (Şekil 3.1). Çökme bölgesi, sabit veya birim şekil değişim miktarı ile artan bir plato gerilmesinde gerçekleşmektedir (Şekil 3.1). Kritik bir birim şekil değişim miktarından (ϵ_d) sonra hücre duvarlarının tamamen çökmesi ile yoğunlaşma bölgesi başlamaktadır (Şekil 3.1). Bu bölgede gerilme artarak yoğun Al metalinin gerilmesine ulaşmaktadır.



Şekil 3.1 6061 Al köpüğün basma gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışı [26].



Şekil 3.2 6061 Al köpüğün değişik yoğunluktaki basma gerilme-birim şekil değişim miktarı grafikleri [27].



Şekil 3.3 6061 Al köpüğün %10 birim şekil değişim miktarına tekabül eden gerilmelerin nispi yoğunlukla değişimi [28].

Al köpüklerin basma altındaki davranışları yoğunluğa, hücre geometrisine ve yapıldıkları metalin akma gerilmesine bağlı olarak değişmektedir. Çökme veya plato gerilmesi yoğunluğun artması ile yükselmektedir (Şekil 3.2 ve 3.3) [27, 28]. Benzer şekilde yapıldıkları metalin akma gerilmesinin artmasıyla köpükteki gerilmelerin yükselmesi beklenmektedir.

3.2 Elastik Özellikler

Gibson ve Ashby, basit çubuk modelleri kullanarak, ideal kapalı (Denklem 3.1) ve açık hücreli (Denklem 3.2) köpüklerin elastik Modülleri için aşağıdaki denklemleri türetmişlerdir (Ek A), [1]

$$\frac{E^*}{E_s} = \alpha_1 \rho \quad (3.1)$$

ve

$$\frac{E^*}{E_s} = \alpha_2 \rho^2 \quad (3.2)$$

Bu denklemlerde, sırasıyla E^* ve E_s köpük ve hücre metalinin Elastik Modülleridir. Nispi yoğunluk (ρ) ise

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'de, sırasıyla ρ^* ve ρ_s köpüğün ve hücre metalinin yoğunluğudur. α_1 ve α_2 ise hücre geometrisine bağlı sabitlerdir. α_1 'in değeri izotropik kapalı hücreli köpükler için 1/3 [5], tetrakaidecahedron hücreler ve içi boş kürelerin yüzey merkezli kübik şeklinde paketlenmesi için 0.35 ve bal peteği için 1 olarak hesaplanmıştır [29]. α_2 'nin değeri ise yaklaşık 1'dir [30].

Ticari üretilen kapalı hücreli Al köpüklerin ve özellikle düşük yoğunluktaki köpüklerin deneysel elastik modülleri Denklem 3.1'den hesaplanandan oldukça düşüktür [31]. Modül azalması kısmen hücre köşelerinin hücre duvarlarından daha kalın olmasından kaynaklanmaktadır. Bu ise yüzey gerilmelerinin sıvı metali hücre köşelerine doğru çekmesinden dolayı oluşmaktadır. Gibson ve Ashby, köpük metalinin hücre duvarları ve köşelerinde ki dağılımını da içeren aşağıdaki denklemi önermişlerdir

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \rho^2 + C_2 (1 - \phi) \rho \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'de ϕ hücre köşelerinde bulunan metalin oranı ve C_1 ve C_2 ise geometriye bağlı sabitlerdir. Denklem 3.4'ün sağındaki ilk terim hücre duvarlarının bükülmesinin, ikincisi ise genişlemesinin köpüğün elastik modülüne katkılarıdır. ϕ 'nin yüksek değerleri, bu genellikle ticari Al kapalı hücreli köpüklerde gözlenmektedir (örneğin Alulight köpüğü için bu değer 0.92-0.94 arasındadır) hücre duvarları bükülmesinin elastik modül değerinde etkin olduğunu göstermektedir [32]. Bu yüzden kapalı hücreli köpükler açık hücreli köpükler gibi

davranırlar. Deneysel ölçülen elastik modül değerleri genellikle aşağıdaki denkleme uydurulamaya çalışılmaktadır [33]:

$$\frac{E^*}{E_s} = \alpha \rho^n \quad (3.5)$$

Alulight köpüğü için n değeri 1.5-2 ve α değeri ise 1/2-3 arasında bulunmuştur [5].

Al köpüklerin mekanik özelliklerini azaltan diğer faktörler ise şöyle sıralanabilir; eğri ve kayıp hücre duvarları, hücre duvarı ve köşesinde oluşan boşluklar ve heterojen yoğunluk dağılımıdır [6, 34, 35]. Hücrelerin elips şeklinde olması köpükte anizotropik özelliklere neden olabilir. Cymat köpüklerinde sıvı köpüğü taşıyan kayış ve sıvı köpük arsında oluşan kayma gerilmelerin sonucunda hücrelerin elips şeklini aldığı [36] ve Fraunhofer yönteminde ise hücrelerin presleme yönüne dik bir yönde uzadığı bilinmektedir [37].

Basma testinde hücre duvarlarının yırtılması ve bunun sonucunda hücre gazının hücreleri terk etmesi nedeniyle basma esnasında hücre-gaz sıkışmasının mekanik özelliklere etkileri ihmal edilmektedir.

3.3 Plastik Deformasyon ve Yoğunlaşma

Şekil 3.1'nin ikinci bölgesinde gösterilen çökme veya plato gerilmesi, köpükte oluşan plastik deformasyonun bir göstergesidir. Plato gerilmesinin köpüğün enerji-emme kapasitesine etkisi oldukça fazladır. Mükemmel bir kapalı hücreli köpük yapısında plastik deformasyonun hücrelere uygulanan basma kuvvetine dik bir yönde hücre duvarlarının genişmesi şeklinde oluşması beklenmektedir [1] (Ek-A). Bu durumda plato gerilmesi aşağıdaki denkleme ifade edilebilir

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C\rho \quad (3.6)$$

Burada C geometriye bağlı sabittir. Hücre genişlemesi, hücre duvarı bükülmesi ile eş zamanlı oluşması durumunda ise, aşağıdaki denklem plato gerilmesinin belirlenmesinde kullanılabilir [1]:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_6 (1 - \varphi) \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3.7)$$

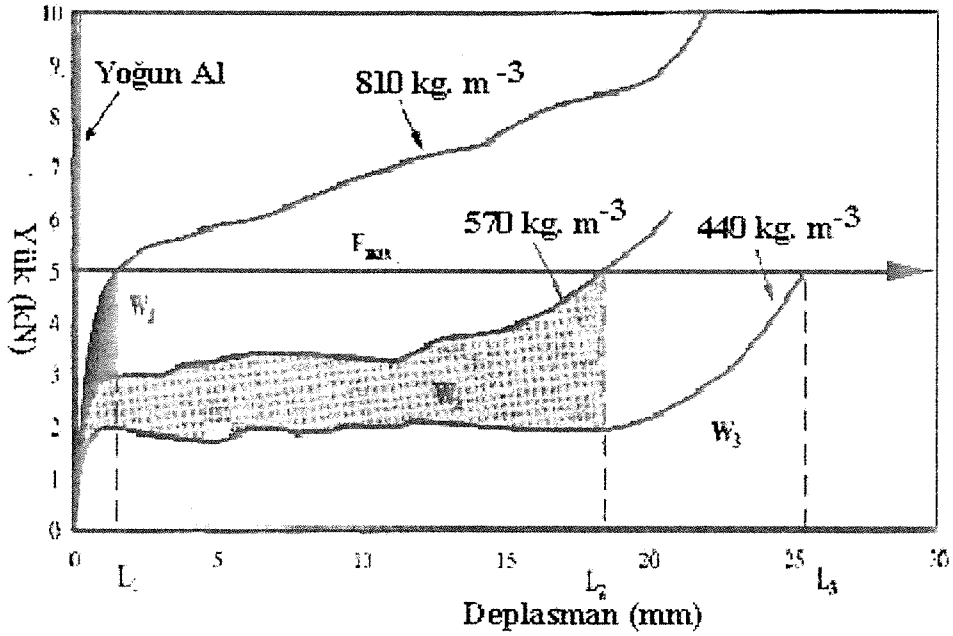
Burada, C_5 ve C_6 geometriye bağılı sabitlerdir. Eğer hücre duvarları, uygulanan yük yönünde bükülecek kadar ince ise plato gerilmesi hücre duvarı bükülmesi ile belirlenir ve bu durumda kapalı hücreli köpüğün plato gerilmesi açık hücreli köpüğün gerilmesine yaklaşır. Daha önce bahsedildiği üzere, ticari Al köpükler yüksek φ değerine sahiptirler ve dolayısıyla açık hücreli köpüklere benzer davranış gösterirler.

3.4 Enerji Emme

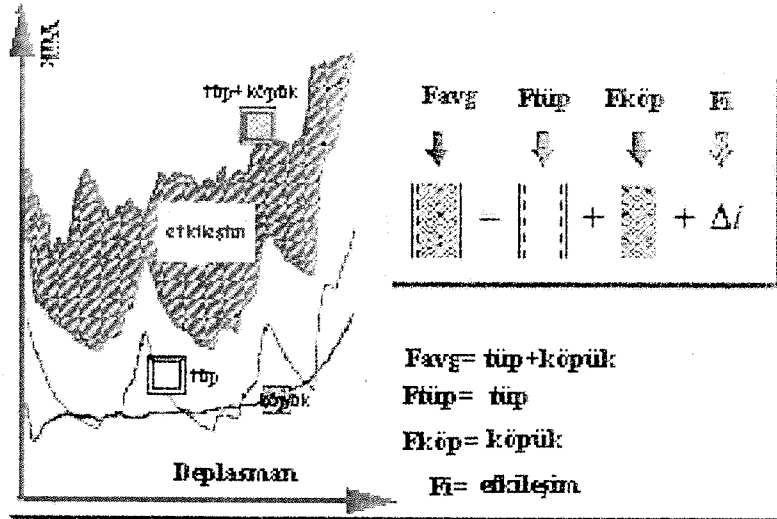
Köpükler darbe enerjisinin büyük bir kısmını plastik deformasyon enerjisine çevirerek, objedeki yükü zarar verebilecek seviyelerin altında tutar. Bu özellik köpükleri insan vücudunun ve hassas cihazların dıştan gelebilecek darbelere karşı korunması için kullanılabilir potansiyel malzemeler yapmaktadır.

Yoğun metallerle karşılaştırıldığında, köpük malzeme sabit bir yük altında daha fazla enerji emme kapasitesine sahiptir, Şekil 3.4 [38]. Enerji emme miktarı basitçe (W) yük-deplasman grafiği (belirli bir deplasmana kadar L) altındaki alana tekabül etmektedir (Şekil 3.4). Al köpüklerin, Al ve çelik tüplerde dolgu malzemesi olarak kullanılması da çalışılmıştır [2, 4, 39]. Bu çalışmaların sonucunda köpük dolu tüplerdeki spesifik enerji emme miktarının boş tüp ve sadece köpüğün enerji emme miktarlarının toplamından daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu ise tüp ile köpük metalin basma esnasında birbirlerinin deformasyonunu etkilemelerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.5 bu etkiyi göstermektedir: dolu tüpü deforme etmek için gerekli yük (F_{avg}), sadece tüpü ($F_{tüp}$) ve köpüğü ($F_{köp}$) deforme etmek için gerekli yüklerin toplamından daha büyüktür [39]. Mikroskobik incelemeler, aynı yük altında köpük dolu tüplerdeki katlanma sayısının boş tüpünkünden daha fazla olduğunu ve dolayısıyla enerji emme miktarının köpük dolu tüplerde daha fazla olduğunu göstermiştir (Şekil 3.5). Tüp-köpük etkileşimi ters yönde basma testi yapılan tüplerde de gözlenmiştir [40]. Bu yönde köpükte yüke dik yönde bir genişleme ve tüpün ezilmesine karşı artan bir direnç gözlenmiştir (Şekil 3.6). Köpük dolu tüplerin kullanım alanlarından birisi ise taşıtlarda şase ve tampon

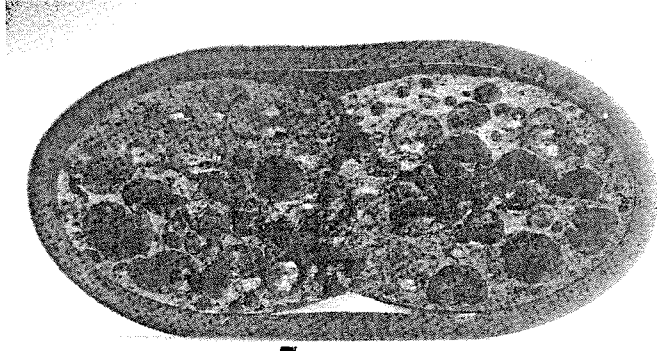
arasına yerleştirilen, 15 km/saat 'a kadar oluşan çarpışmalarda şasenin eğilmesini önleyen ezilme kutularındır [23].



Şekil 3.4 Yoğun Al metali ve değişik yoğunluktaki Al köpüklerin enerji-emme özelliklerinin karşılaştırılması [38].



Şekil 3.5 Boş tüp, köpük ve tüp+köpük yük-deplasman grafikleri ve tüp+köpük etkileşimi [39].



5 mm

Şekil 3.6 Ters yönde basılmış köpük dolu pirinç tüp [40].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

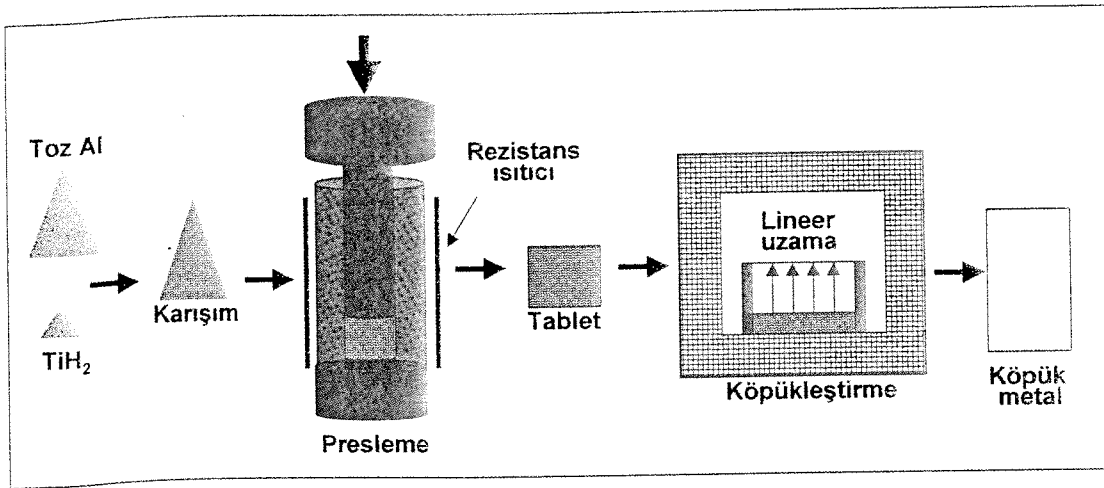
4.1 Malzemeler

Köpük yapımında kullanılan malzemelerin (toz ve granüle Al, TiH_2 (köpük yapıcı), SiC_p , Al_2O_{3p} ve SiC_w) özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Köpükleşme esnasında takviye malzemesi ile alışımlı elementlerinin reaksiyonunu engellemek ve saf ve kompozit köpükleri karşılaştırmak amacıyla saf Al-tozu tercih edilmiştir. Köpükleşme ve mekanik özellik belirleme çalışmaları 8.6 hacim yüzdeli SiC_p tabletler üzerinde yapılmış ve birkaç % 20 SiC_p Al köpük numuneleri hazırlanarak basma testi yapılmıştır. Granüle Al, Al_2O_{3p}/Al ve SiC_w/Al tabletlerine köpükleşme denemeleri de yapılmıştır. Hazırlanan tüm toz tabletlerde köpük yapıcı miktarı % 0.5'dir (ağırlık) ve bu miktarın Al tabletlerde etkin köpükleşme oluşturmak için yeterli olduğu bulunmuştur.

Köpük metal hazırlama yöntemi Şekil 4.1'de gösterilmiştir ve iki kısımdan oluşmaktadır: a) tablet hazırlama ve b) köpükleştirme.

Tablo 4.1 Köpük hazırlamada kullanılan malzemelerin özellikleri.

Malzeme	Boyut	Safılık
<i>Al tozu (Aldrich)</i>	< 74 μm	99%
Al granüle (Aldrich)	250-1680 μm	>99%
<i>TiH₂ (Merck)</i>	< 37 μm	>98%
SiC_p (Aldrich)	< 37 μm	
<i>Al₂O_{3p} (Aldrich)</i>	< 10 μm	99.7%
<i>SiC_w (Tokai)</i>	2-50 μm uzunluk, ~2 μm çap.	



Şekil 4.1 Köpük hazırlama yönteminin şematik gösterimi.

4.2 Tablet Hazırlanması

Homöjen bir karışım hazırlamak için, Al tozu, köpük yapıcı ve katkı malzemesi plastik bir kap içerisinde bilyeli değirmende 5 saat karıştırılmaktadır. 27 mm çapında ve 9 mm kalınlığında tabletler çelik bir kalıp içerisinde preslenmiştir. Presleme ilk olarak oda sıcaklığında birkaç dakika için yapılmakta ve daha sonra tablet 425 °C 'de 1/2 saat sıcak preslenmektedir. Tablet presleme sıcaklığına çelik kalıp etrafına yerleştirilen bir rezistans ısıtıcı ile yapılmaktadır. Presleme sıcaklığına 1 saatte çıkılmaktadır ve soğuk ve sıcak presleme ve ısıtma esnasında basınç 220 MPa da sabit tutulmuştur.

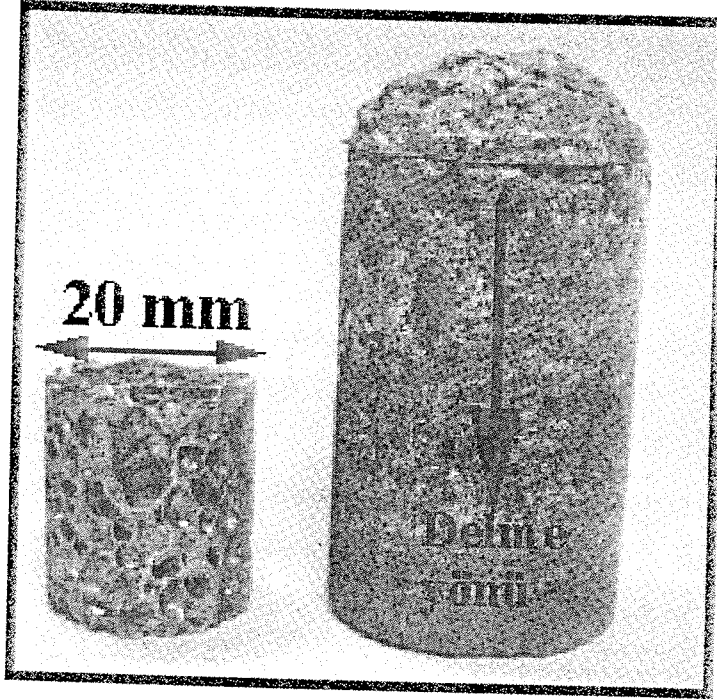
4.3 Tabletlerin Köpükleştirilmesi

Köpükleşme deneyleri önceden ısıtılmış kül bir fırında yapılmaktadır Şekil 4.1. İki farklı fırın sıcaklıklarında köpükleştirme yapılmıştır, 750 ve 850 °C, Tabletler önceden ısıtılmış fırına oda sıcaklığında çapı tabletinkiyle aynı olan çelik bir tüp içerisinde yerleştirilmektedir. Çelik tüpün altı sıkı bir şekilde kapatılmakta ve dikey şekilde fırına yerleştirilerek köpükleşmenin tek bir yönde (lineer) olması sağlanmaktadır (Şekil 4.1'de oklarla gösterilmiştir). Tabletleri fırına koyma ve köpükleşen tabletleri fırından alma işlemleri 10 saniye içerisinde yapılmaktadır. Her deneyde fırın sıcaklığı kaydedilmiş ve fırın sıcaklığının köpükleşme esnasında artı/eksi 10 °C değiştiği bulunmuştur. Yapılan ilk deneylerin amacı fırında kalma süresinin lineer uzamaya etkisini belirlemektir ve dolayısıyla

köpükleşen veya yarı köpükleşen tabletler belirli zaman aralıklarında fırından alınarak soğutulmuştur. Bu köpükler havada ve sıvı köpüğü saran çelik borunun üzerine su serperek soğutulmuştur. Katılaştıran köpüklerin son uzunluğu ölçülerek lineer uzama belirlenmiştir. Ayrıca bu numuneler hassas kesme cihazı ile kesilerek mikroskopik incelemeler için hazırlanmıştır.

4.4 Basma Mekanik Testleri

Yukarıda bahsedilen yöntemler kullanılarak ikinci grup köpükler mekanik basma testleri için hazırlanmıştır. Farklı yoğunlukta köpük yapıları elde etmek için farklı fırında kalma süreleri kullanılmıştır. Bu numunelerden köpükleşme yönünde göbek-delgi yöntemi ile silindir şeklinde (20 mm çap, 20 mm boy) basma test numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 4.2 bu yöntemle hazırlanan basma numunesini ve göbek-delgi işleminin yapıldığı numuneyi göstermektedir. Basma testleri Instron çekme-basma makinesinde 0.1 mm s^{-1} basma hızda yapılmıştır. Test edilen köpükler kesilerek metalografik gözlemler için hazırlanmıştır.



Şekil 4.2 Silindir basma testi numunesi (sol) ve numunenin delinerek hazırlandığı köpük (sağ).

5. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

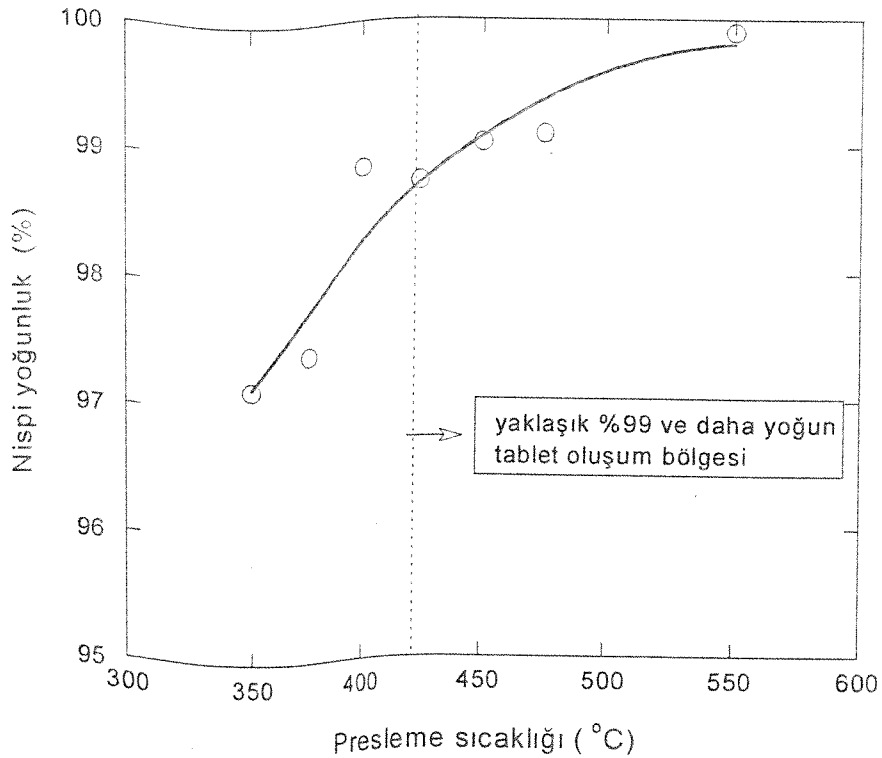
5.1 Al ve SiC_p/Al Tabletlerin Köpükleşme Davranışları

Al-Si alaşım tabletleri üzerine yapılan bir çalışmada, maksimum lineer uzamanın 400-450 °C' ler arasında (110 MPa basınç altında) preslenmiş %98-99 nispi yoğunluğa sahip tabletlerde gerçekleştiği bulunmuştur [41]. Daha düşük sıcak presleme sıcaklıklarında hazırlanan tabletlerde ise nispi yoğunluğun azalması nedeniyle (<98%), köpükleşme öncesi oluşan H₂ gazı açık-gözeneklerden kaçarak genleşmeyi azaltmaktadır (TiH₂ bozunumu tabletlerin erimesi/yumuşamasından daha önce gerçekleştiği varsayılmaktadır) [41]. 500 °C'nin üstünde preslenmiş tabletlerde ise TiH₂'ün bozunması ile çıkan H₂ gazının preslenme esnasında kaybedilmesi sonucunda köpükleşmenin azaldığı ileri sürülmüştür [41]. Bahsedilen çalışmanın (kaynakça [41]) sonuçları temel alınarak değişik presleme sıcaklıklarında preslenmiş (sabit basınç, 220 MPa,) tabletlerin yoğunlukları ölçülerek, çalışılan tabletler için optimum presleme sıcaklığı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, % 99'a yakın ve daha yüksek nispi yoğunluğa sahip tabletlerin ancak 425 °C'nin üstündeki presleme sıcaklıklarında oluştuğu bulunmuştur (Şekil 5.1). TiH₂ bozunumunun daha yüksek presleme sıcaklıklarında artacağı için kullanılan presleme basıncında seçilen presleme sıcaklığı (425 °C) optimum kabul edilmiştir. Şekil 5.2 (a) ve (b) bahsedilen presleme sıcaklığı ve basıncında hazırlanan % 99 yoğun Al toz ve %8.6 SiC_p/Al tabletlerin mikroyapılarını göstermektedir. Gözenekler sadece kompozit tabletlerde topaklaşan SiC-parçacıkları arasında gözlenmektedir (Şekil 5.2.(b)).

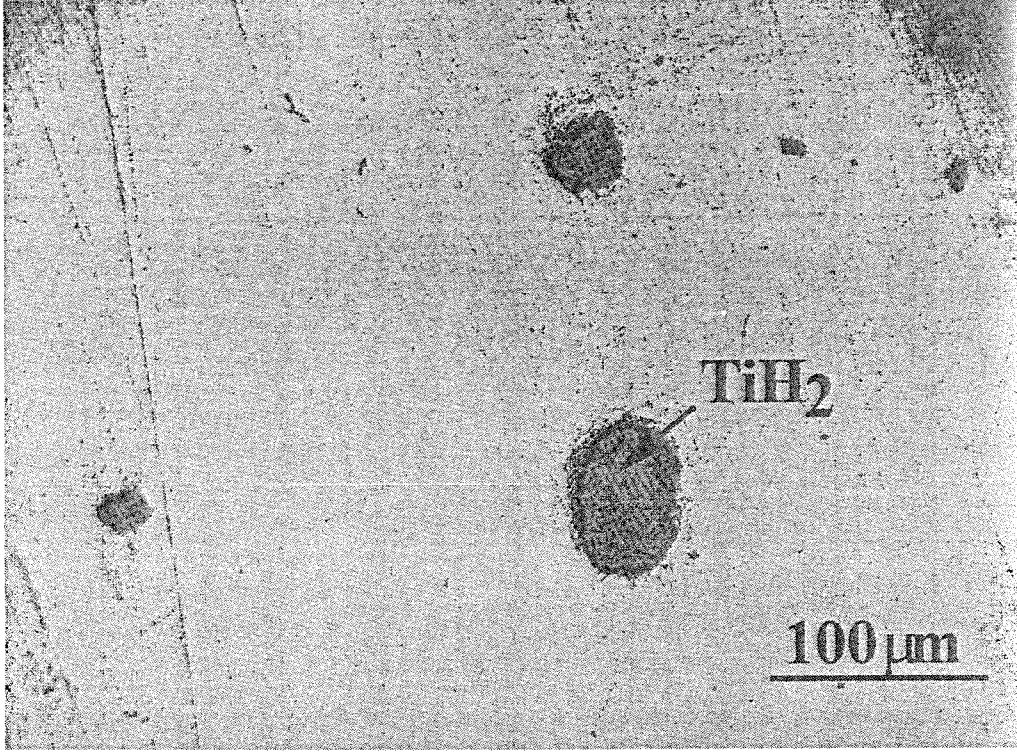
İlk köpükleşme deneyleri seçilen iki sıcaklıkta yapılmıştır, 750 °C ve 850 °C. Bu sıcaklıkta hazırlanan köpükler çelik bir plaka üzerinde havada soğutulmuştur. Bu köpüklerde fırın sıcaklığının lineer uzamaya etkisi Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Lineer uzama (LU) aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$LU = \frac{l_s}{l_i} \quad (5.1)$$

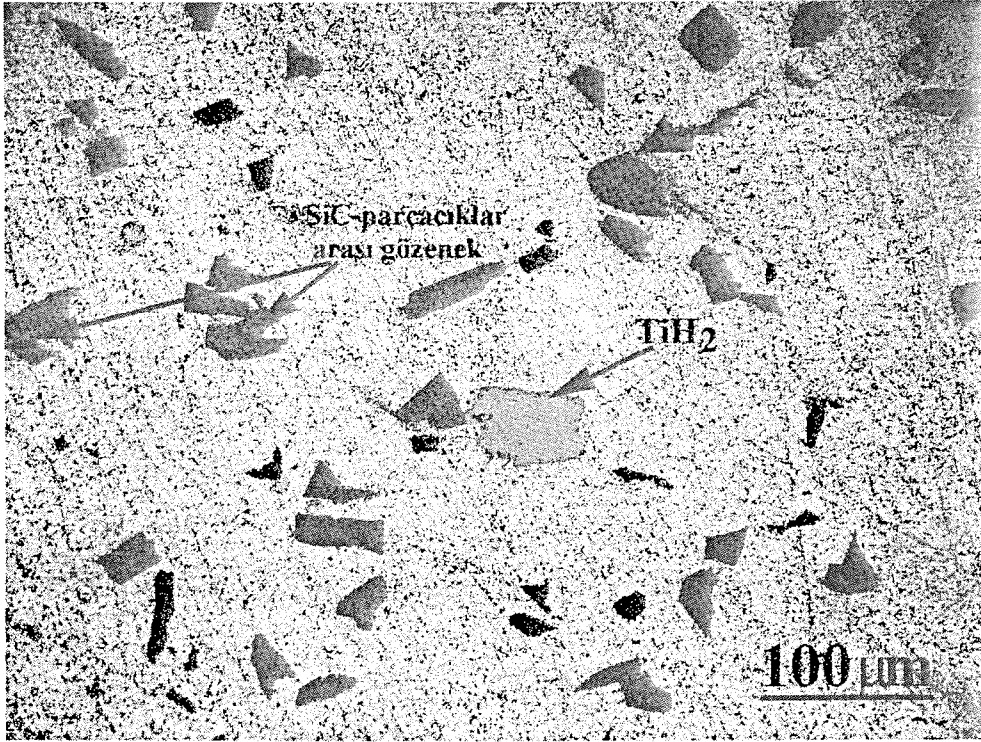
Burada I_s köpüklenen tabletin son, I_1 ise ilk uzunluğunu temsil etmektedir. Köpüklenme 750 °C'de 5, 850 °C'de ise 2-3 dakikadan sonra başlamaktadır. Bu süreler esnasında köpükleneyecek tabletin kritik bir sıcaklığa kadar ısındığı varsayılmaktadır. Fırından alınan köpükler hava ile soğutulma esnasında büzölmüşlerdir. Dolayısıyla, Şekil 5.3'deki LU'lar sıvı köpükteki LU'larla aynı değildir. Ancak Şekil 5.3, tabletlerin köpüklenmeye başlama zamanları fırın sıcaklığından etkilendiğini göstermektedir. Çalışılan fırın sıcaklıkları için, 850 °C'de köpükleştirilen tablet daha önce ergime ve/veya yumuşama noktasına ulaşması nedeniyle 750 °C'de köpükleştirilen tablete göre köpüklenme daha önce başlamıştır, 2-3 dakika. Eğer farklı fırında kalma sürelerinde fırından alınan köpüklerin benzer miktarlarda büzöldüğü kabul edilirse, Şekil 5.3 köpüklenmenin belirli bir süreden sonra (TiH_2 bozunumunun bitmesi) sona erdiğini de göstermektedir. Bu süre sonucunda köpüklenme veya LU sabit kalmaktadır. Ayrıca bu süre 850°C'de daha erken başlamaktadır (5 dakika). Köpüklenme 850 °C'deki tabletlerde daha erken başlamasına rağmen, her iki sıcaklıkta da benzer LU miktarlarına ulaşılmıştır. AlSi7 ve 6061Al alaşım tabletlerinin 750 ve 800 °C'de köpüklenmesinde benzer sonuçlar bulunmuştur [41]. 750 °C'de köpükleştirme daha kontrollü yapıldığı için (köpüklenen numunelerin fırından alınması ve fırında kalma sürelerinin köpüklenmeye etkilerinin belirlenmesi) köpükleştirme çalışmaları bu sıcaklıkta yapılmıştır.



Şekil 5.1. Presleme sıcaklığının nispi yoğunluğa etkisi.

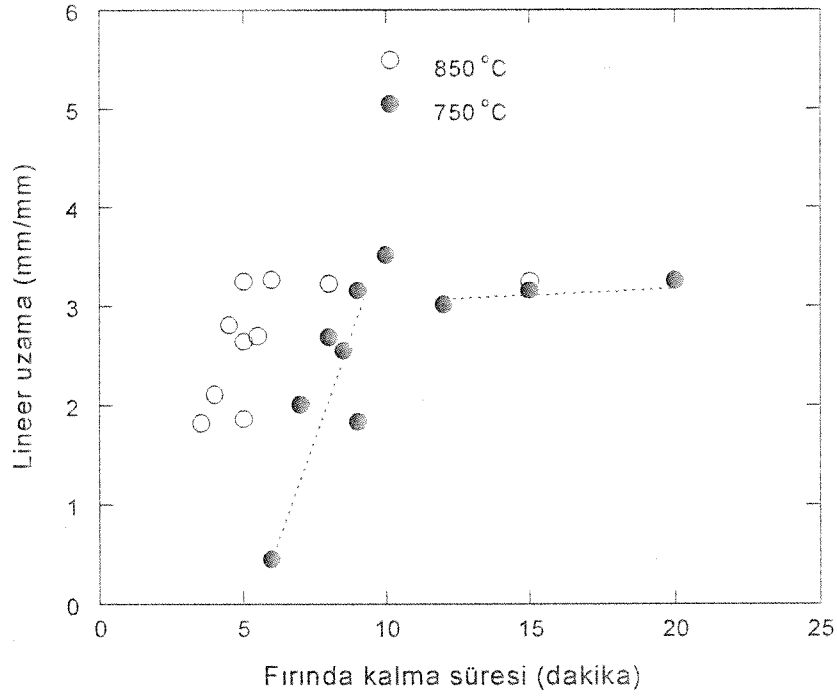


(a)



(b)

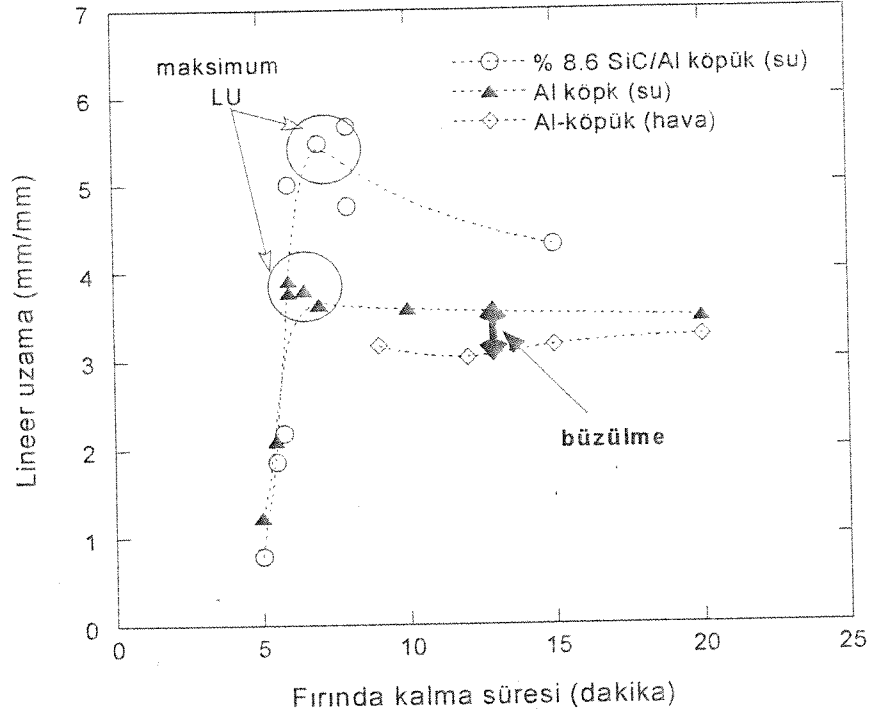
Şekil 5.2 (a) Al ve b) SiC_{parçacık}/Al kompozit tabletlerin mikroyapıları.



Şekil 5.3 Fırında kalma süresinin lineer uzamaya etkisi (havada soğutulan köpük numuneleri).

Hava ile soğutulan köpüklerde büzülme oluşmasından dolayı sıvı köpük, etrafını saran çelik silindire su püskürtülerek hızlıca soğutulmuştur. Şekil 5.4 Al tabletlerde su ile soğutmanın ve SiC-parçacık takviyesinin köpükleşmeye etkilerini göstermektedir. Su ile soğutma, saf Al köpüklerin LU'larını oldukça artırmıştır. Soğuma esnasında oluşan büzülme miktarı da bu şekilde gösterilmiştir. Hızlı soğutma ile hazırlanan köpüklerde LU maksimum bir değere kadar artmakta ve bu değerden sonra azalmakta veya sabit kalmaktadır. Şekil 5.5 (a) ve (b) hava ile soğutulmuş saf Al ve su ile soğutulmuş SiC-parçacık katkılı Al köpüklerin değişik fırında kalma zamanlarında ki hücre yapılarını göstermektedir. Şekil 5.5'den görüldüğü üzere maksimum LU'ya karşılık gelen fırında kalma sürelerine (hava ile soğutulan Al köpüklerinde 8-9 dakika, su ile soğutulan SiC_p/Al köpüklerde ise 7-8 dakika) kadar genişleme artmakta, daha sonra bir miktar azalma ile sabit kalmakta veya azalmaktadır. Şekil 5.5(a) ve (b) uzun fırında kalma sürelerinde köpüklerin alt kısmında yoğun bir metal tabakasının oluştuğunu da göstermektedir. Bu tabakanın kalınlığı kompozit köpüklerde oldukça azalmıştır. Al tabletlere SiC-parçacık eklenmesinin iki etkisi görülmüştür: 1) LU'yı artırmıştır ve 2) köpüklerin alt kısmında (tabanda) oluşan yoğun Al metal tabakasının kalınlığını azaltmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi hava ile soğutma esnasında üst kısımlarda

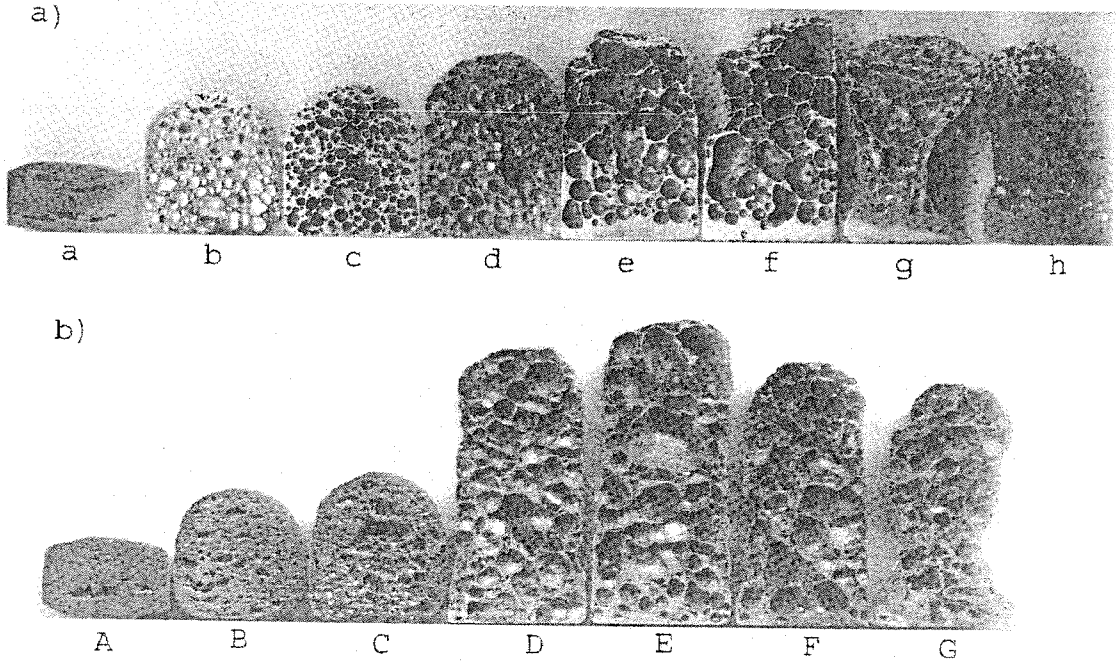
hücreler çökmüştür. Bu etki su ile soğutulmuş Al ve kompozit köpüklerde gözlenmemiştir. Şekil 5.5(a) ve (b) uzun fırında kalma sürelerinde üst ve orta bölgelerde hücrelerin çöktüğünü de göstermektedir. Aynı zamanda, uzun fırında kalma sürelerinde köpük metalin alt bölgesindeki biriken yoğun Al metal tabakasının kalınlığı da artırmaktadır.



Şekil 5.4 Havada ve suda soğutulan köpüklerde fırında kalma süresinin lineer uzamaya etkisi.

TiH₂ tozu üzerine yapılan çalışmalar sonucunda bozunmanın 380 °C'de başladığı bulunmuştur [9, 41]. Çalışılan sıcak presleme sıcaklığı (425 °C) TiH₂'ün bozunma sıcaklığından daha yüksektir ve dolayısıyla presleme esnasında bir miktar H₂ gazının açığa çıktığı düşünülmektedir. Bu fazla H₂ gazının köpükleştirilmenin ilk safhalarında açığa çıkarak bazı zayıf hücre duvarlarını patlattığı ve dolayısıyla maksimum LU dan sonra genişlemenin azalmasına neden olduğu varsayılmaktadır [41]. Bahsedilen geçiş noktası (maksimum LU) 450 °C'nin altında preslenmiş tabletlerde gözlenmiştir ve 500 °C'de preslenen tabletlerde ise belirli bir süre sonunda LU'nun geçiş noktası göstermeden sabit bir değere ulaştığı bulunmuştur. Bu veriler sonucunda, presleme esnasında ortaya çıkan fazla H₂ gazının yüksek presleme sıcaklıklarında (muhtemelen 450 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda) tableti presleme esnasında terk ettiği de ileri sürülmüştür. Bu çalışmada bahsedilen geçiş noktasının oluştuğu

çalışılan Al ve kompozit tabletlerde belirlenmiştir. Bu nokta kompozit tabletlerde daha belirgindir (Şekil 5.4). Ancak, geçiş noktasının tam zamanının çalışılan deney düzeneği ile belirlenmesi güçtür. Dolayısıyla bu geçiş noktaları Şekil 5.4'de tahmini bölgeler olarak (daireler) gösterilmiştir. Bu noktaların belirlenmesi için diğer bir çalışmada yapıldığı üzere, tek bir tabletin LU'nun direkt olarak köpükleşme esnasında bir cihazla (lazer sensör) ölçülmesi gerekmektedir [41].



Şekil 5.5 Çeşitli zamanlarda fırından alınan köpüklerin yapısı a) alüminyum köpük (a=6, b=6,45, c=7,d=8, e=9, f=10, g=15, h=20 dakika) b) kompozit köpük (A=5, B=5,30 , C=5,45, D=6, E=7, F=8, G=15 dakika).

Köpükleşme tabletlerde oldukça hızlı gerçekleşmektedir ve ergiyen veya yumuşayan tablet maksimum LU noktasına 1-2 dakika içerisinde gelmektedir. Köpükleşme öncesinde (tablet erimesi ve/veya yumuşaması öncesinde) tablet yüzeyindeki veya yüzeye yakın TiH_2 parçacıkların bozunması sonucunda H_2 gazının çıktığı ve fırında yandığı gözlenmiştir. Tablet ergimesi ve/veya yumuşaması ile birlikte köpükleşme başlamaktadır. Aynı yöntemle hazırlanan her bir tabletin köpükleşme karakterleri köpükleştirici dağılımı, boyutu ve benzeri gibi bir takım faktörlere bağlı olmasına rağmen, Şekil 5 (a) ve (b)'den, üzerinden çalışılan tabletlerin köpükleşme mekanizmalarına ilişkin bazı sonuçlar da çıkartılabilir. Bunlar; 1) köpükleşmenin ilk safhalarında hücreler presleme yönüne dik yönde uzama göstermişlerdir, a,

A, B ve C, 2) gözeneklerin arttığı daha sonraki safhalarda ise ilk uzama göstermiş hücreler daha küresel hale gelmişlerdir, b, c ve d, 3) maksimum LU noktasına gelmeden önce küresel hücreler polihedral bir yapıya dönüşmektedirler, e, f, D ve E ve 4) varsayılan maksimum LU'nın sonrasında H₂ gazı çıkışı olmadığı için bu noktadan sonra LU azalmakta veya sabit kalmaktadır, g, h, F ve G. Bu noktadan sonra hücrelerde çökmeler de gözlenmektedir. Bahsedilen sonuçlar, AlSi7 ve 6061 Al alaşım tabletlerinin köpükleştirilmesinde de bulunmuştur [41].

Köpük çökmesi iki mekanizma ile oluşmaktadır: hücre büyümesi ve köpüğün alt tarafında yoğun bir metal tabakası oluşması [42]. Hücre büyümesi küçük hücrelerin büyük hücreler tarafından yutulması ile oluşmaktadır. Bu mekanizma iki komşu hücrenin basınç farkından dolayı veya basitçe iki komşu hücre arasındaki duvarın yırtılması ile oluşmaktadır. Köpüğün alt tarafında yoğun bir metal tabakası oluşması ise sıvı metalin yerçekimi kuvveti etkisiyle hücre duvarlarından ve hücre köşelerinden aşağıya doğru akmasının sonucudur. Bu olaya drenaj denmektedir. Drenaj silindir şeklindeki köpük numunenin alt kısmında ve ortasında kalın duvarlı hücrelerin oluşmasına neden olmaktadır. Sıvı köpüklere tanecik eklenmesinin hücreleri kararlı (stabilize) hale getirdiği bilinmektedir. Hücre duvarlarındaki tanecikler sıvının viskozitesini artırarak, sıvı metal akışını azaltmaktadır [43]. Bu etki şekil 5.5'de gösterilen Al ve kompozit köpüklerde görülmektedir.

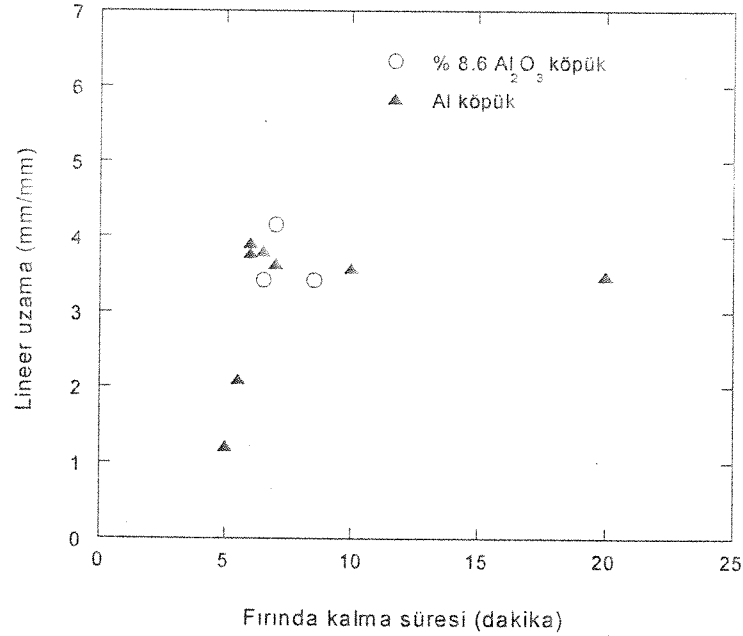
Sıvı köpük hücre yapısının katı halde korunması için, köpüğün hızlı soğutulması gerekmektedir. Yavaş soğutulmalarda ise özellikle üst kısımdaki hücrelerde çökmeler oluşmaktadır. Uzun fırında kalma sürelerinde gözlenen yanal çekmeler ise (Şekil 5.5 (a) ve (b)) zamanla gaz baloncuklarının üst kısımlara doğru hareket etmesi ve aynı zamanda TiH₂ bozunumunun sona ermesi ile oluşmaktadır. Sıvı köpük, köpüğü tutan çelik kalıbın üzerine su püskürtülerek soğutulmasına karşın, endüstriyel uygulamalarda kalıplar su soğutmalı tasarlanabilir.

Çalışılan Al köpükler için bulunan maksimum LU'lar, diğer bir çalışmada ki Al/Si ve 6061 Al alaşımlarınkiyle karşılaştırılabilir [41]. 6061 Al tabletler için maksimum LU (800 °C) 3 civarında, Al/Si tabletleri içinde 4-5 civarındadır. Al tabletlerinde maksimum LU 3.5-4, kompozit tabletlerde ise 5-6 arasındadır. Dolayısıyla, SiC-parçacıklı tabletlerde LU saf ve alaşımlı tabletlere nispeten daha fazladır.

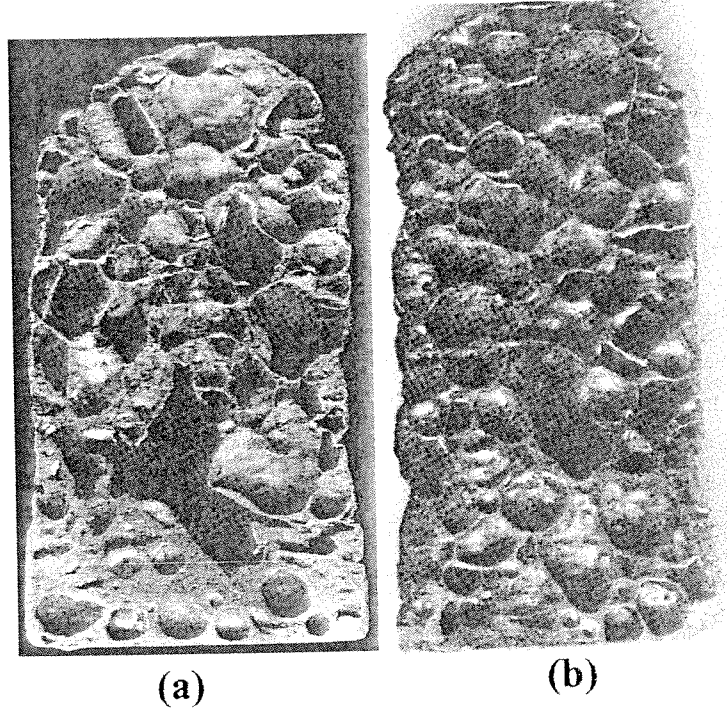
5.2 Al₂O₃-parçacık/Al, SiC-kıl kristal/Al ve Granüle Al Tabletlerin Köpükleşme Davranışları

Aynı presleme parametreleri ile hazırlanmış %8.6 Al₂O₃-parçacık/Al tabletlerin üzerinde yapılan köpükleştirme deneylerinde (750 °C) Al tabletlerinkine benzer LU'lar (~4) bulunmuştur. (Şekil 5.6). Ancak hazırlanan bu köpüklerde hücre dağılımı ve boyutunda daha fazla düzensizlik gözlemlenmiştir (Şekil 5.7 (a) ve (b)).

Granüle Al ile de aynı presleme parametreleri kullanılarak tabletler hazırlanmıştır. Granüle kullanımının başlıca nedeni tozlara oranla ucuz olmasıdır. Ancak granüle ile hazırlanan bu tabletlerde LU oldukça düşük bulunmuştur (2'den daha az). Bunun iki nedeni olabileceği varsayılmaktadır: köpükleştirici toz ile granüle Al arasındaki boyut farkından dolayı homojen olmayan köpükleştirici dağılımı ve uygulanan presleme basıncının gaz-geçirmez bir tablet üretimi için yeterli olmaması. Benzer LU'lar %8.6 SiC-kıl kristal/Al tabletlerde de gözlemlenmiştir. Bu tabletlerde H₂ gazı kaçıışı tabletlerin ergime/yumuşama noktasından daha önce gerçekleştiği düşünülmektedir. Granüle ve SiC kıl kristal/Al tabletler üzerine ayrıntılı bir çalışma ileride yapılacak bir deneysel çalışmaya konu olacaktır. Ancak, bu sonuçlar homojen olmayan toz dağılımı ve gaz-geçirmez tablet yoğunluğu ile sonuçlanan optimum toz büyüklüğü-presleme basıncı kombinasyonunun önemini göstermektedir.



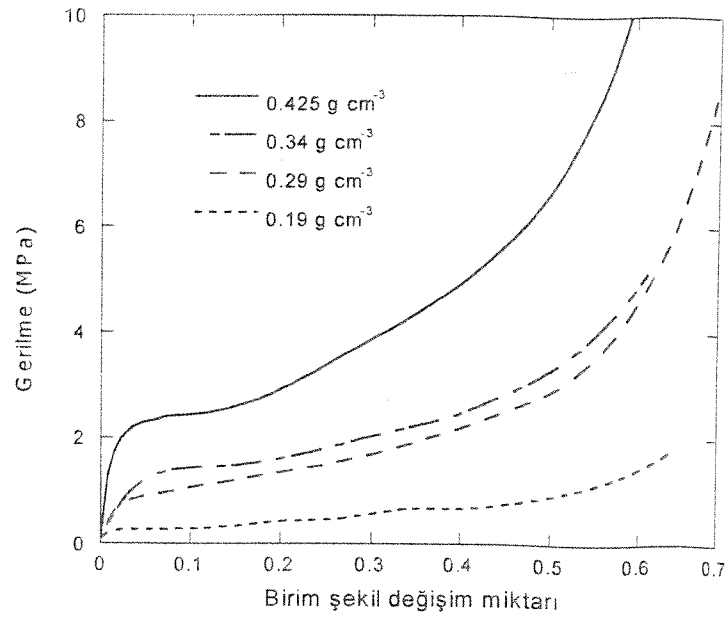
Şekil 5.6 Al₂O₃-parçacık kompozit ve Al köpüklerin LU'nın karşılaştırılması.



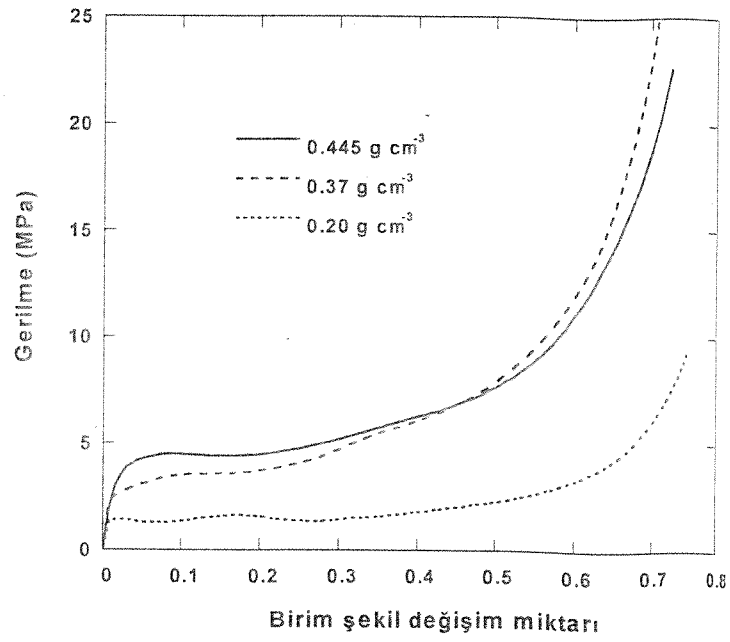
Şekil 5.7 Aynı fırında kalma süresinde (9 dakika) oluşan kompozit köpük hücre yapıları a) % 8.6 Al_2O_3 -parçacık/Al ve b) % 8.6 SiC-parçacık/Al köpükler.

5.3 SiC-parçacık/Al Kompozit Köpüklerin Basma Davranışları

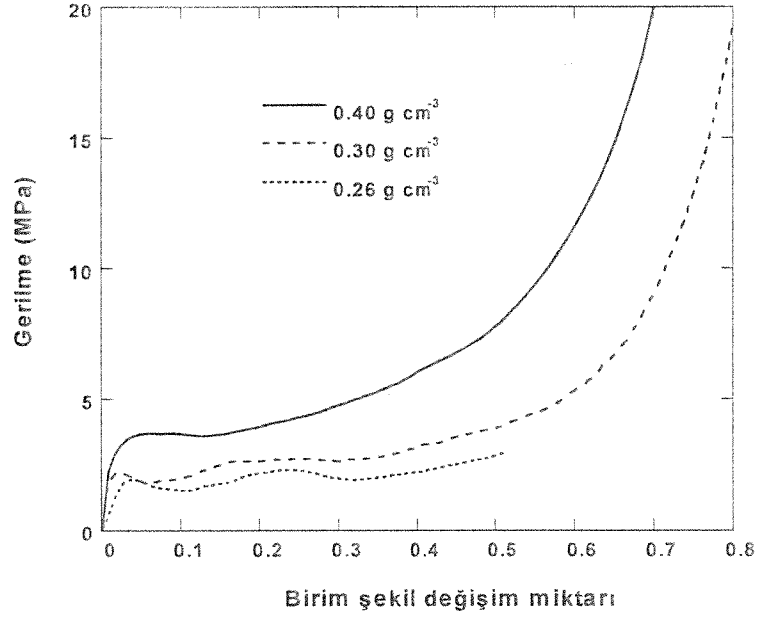
Şekil 5.8 (a), (b) ve (c) sırasıyla köpük yoğunluğunun Al ve %8.6 ve %20 SiC-parçacık/Al kompozit köpüklerin basma (altındaki) gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışları üzerindeki etkisini göstermektedir. SiC_p/Al kompozit köpüğün gerilmesi Şekil 5.9 (a) ve (b)'de gösterildiği gibi aynı yoğunluktaki Al köpükten daha yüksektir. Fakat bu fark yüksek birim şekil değişimi değerlerinde, yaklaşık 0.8, azalmaktadır ve her iki köpükte benzer basma gerilme-birim şekil miktarı değişimi davranışları göstermektedir (Şekil 5.9(a)).



(a)

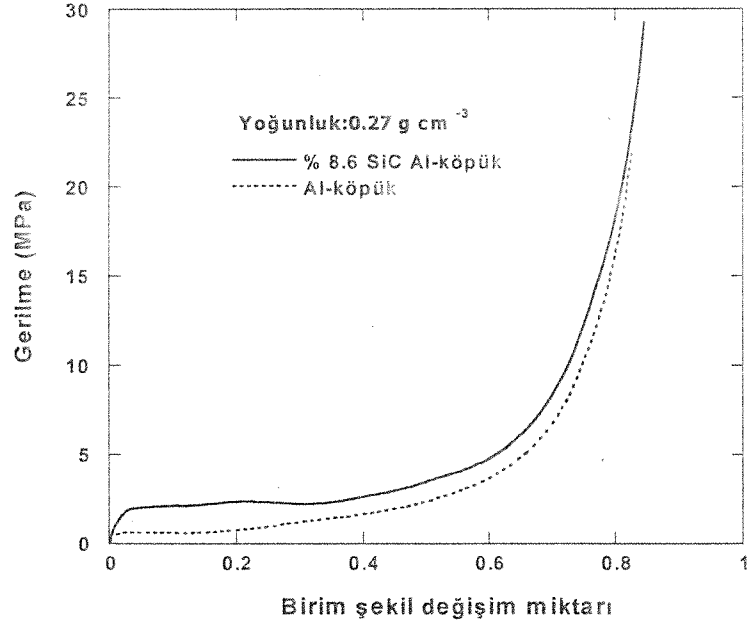


(b)

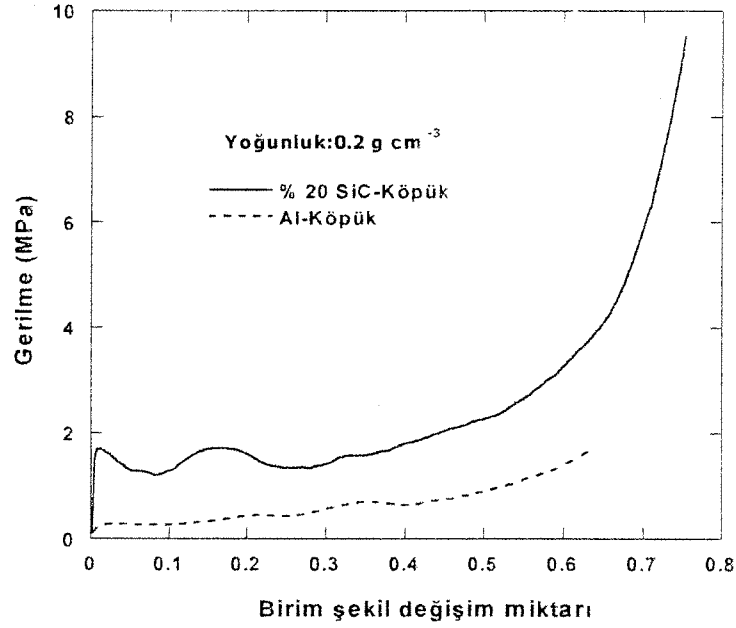


(c)

Şekil 5.8 Farklı yoğunluktaki a)saf Al (b) % 8.6 SiC-parçacık/Al ve (c) % 20 SiC-parçacık/Al köpüklerin basma altında gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışları .



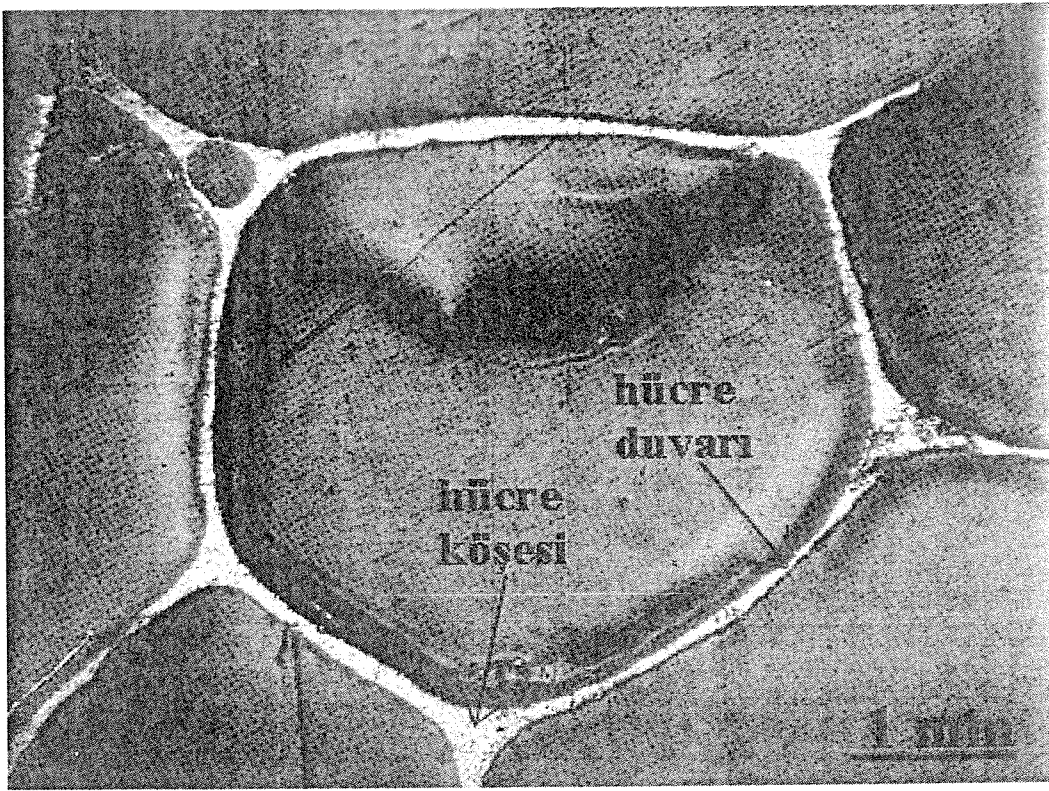
(a)



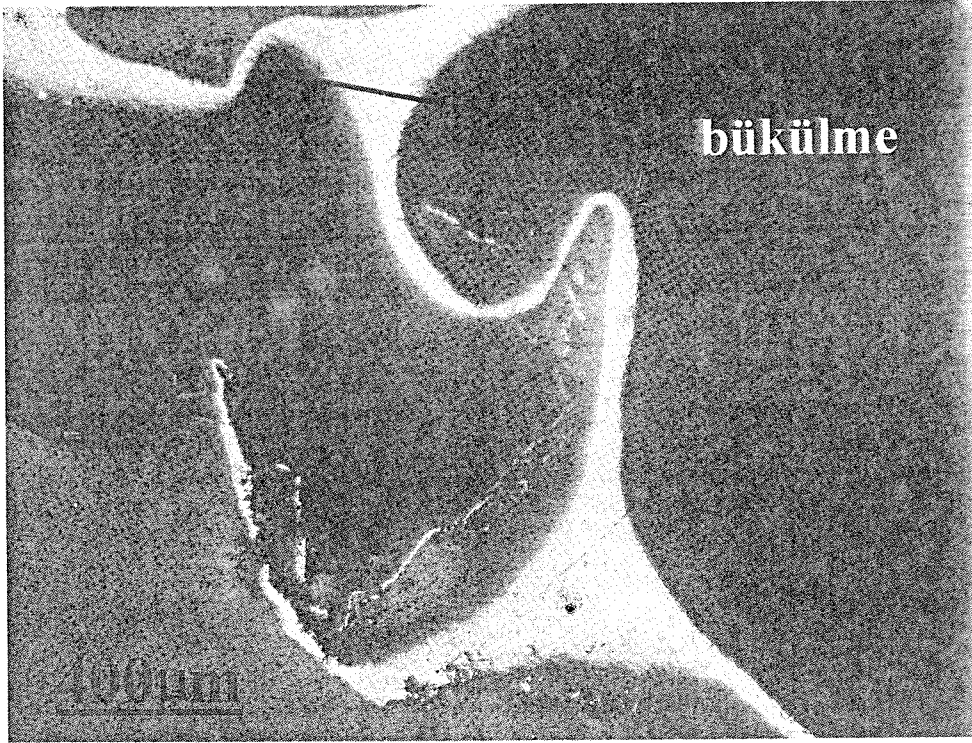
(b)

Şekil 5.9 Aynı yoğunluktaki a)saf Al ve % 8.6 SiC-parçacık/Al ve (b) saf Al ve % 20 SiC-parçacık/Al köpüklerin basma davranışlarının karşılaştırılması.

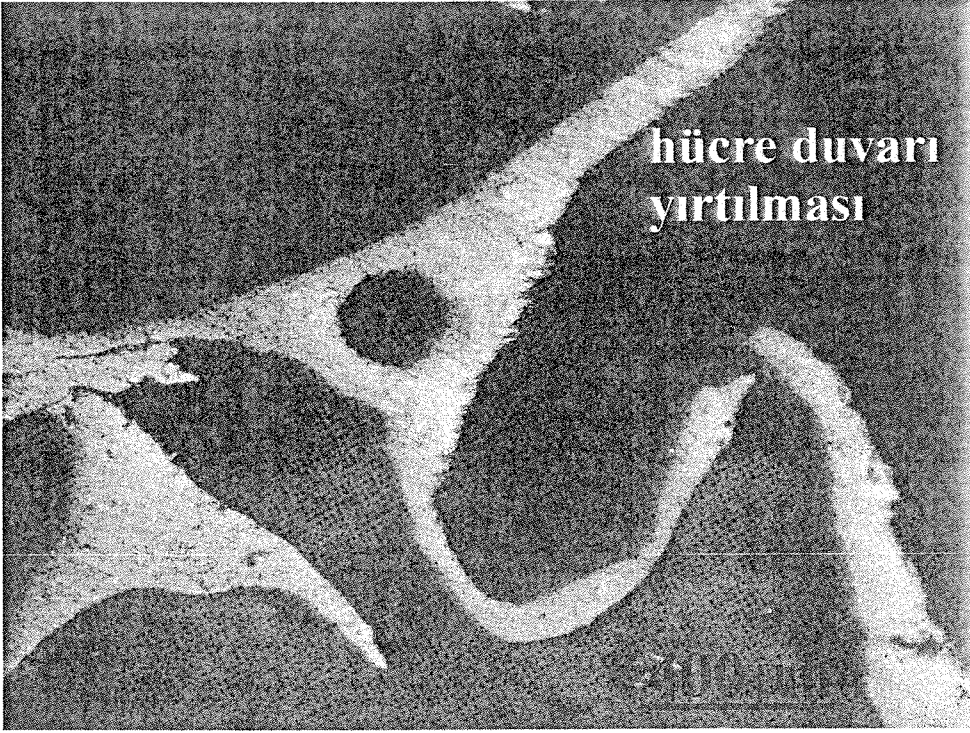
Kapalı hücreli Al köpüklerin basma altındaki mekanik davranışları Gibson tarafından incelenerek, ticari üretilen kapalı hücreli Al köpüklerin basma davranışlarının açık hücreli köpüklerin davranışlarına benzer olduğu gösterilmiştir [44]. Basma esnasında, ince hücre duvarları bükülerek hücre köşelerinin hücre duvarları üzerine yıkılmasına neden olmaktadır. Test edilen ve hazırlanan köpüklerin morfolojik yapılarının ayrıntılı incelenmesi başka bir çalışmada yapılacak olmasına karşın, test edilen ve edilmeyen örneklerin üzerinde yapılan ilk mikroskopik incelemeler kompozit ve Al köpüklerin hücre morfolojisi ticari üretilen kapalı hücreli Al köpüklere benzer olduğunu göstermiştir. Bunlar; 1) hücre köşeleri hücre duvarlarından daha kalındır (Şekil 5.10), 2) basma sırasında hücre köşeleri hücre duvarları bükülmesi ile çökmektedir (Şekil 5.11) ve 3) hücre duvarları yanal çekme birim şekil değişimi etkisi ile yırtılmaktadır (Şekil 5.12).



Şekil 5.10 % 8.6 SiC-parçacık/Al kompozit köpük hücre yapısı.



Şekil 5.11 % 8.6 SiC-parçacık/Al kompozit köpükte basma altında oluşan ince hücre duvarlarının bükülmesi (% 60 birim şekil değişimi).



Şekil 5.12 % 8.6 SiC-parçacık/Al kompozit köpükte basma altında oluşan ince hücre bükülmesi ve yırtılması (% 60 birim şekil değişimi).

Yukarıdaki gözlemlere dayanarak, köpüklerin plato veya çökme gerilmesi açık hücreli köpükler için geliştirilen aşağıdaki denkleme uydurulmuştur (Ek-A):

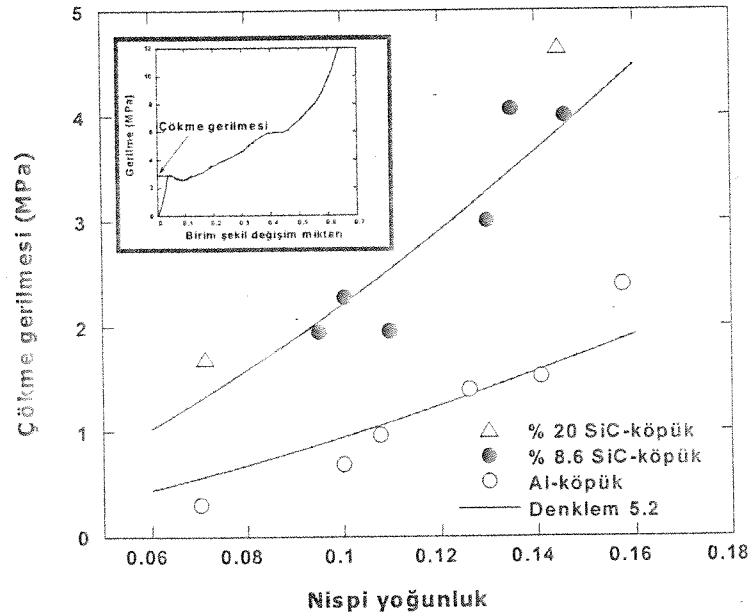
$$\sigma_{pl}^* = \sigma_{ys} C(\rho)^{3/2} \quad (5.2)$$

Geniş bir aralıktaki Al köpüklerden elde edilen veriler sonucunda, C sabiti 0.3 önerilmiştir [44]. Kompozitin nispi yoğunluğu karışımlar kuralı kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışılan kompozit ve Al köpüklerin çökme gerilmelerinin (Şekil 5. 13) Denklem 5.2'e uydurulmaları sonucunda σ_{ys} değerleri kompozit ve Al köpükler için sırasıyla 230 ve 100 MPa bulunmuştur. Bu sonuçlar kompozitin plato gerilmesinin Al köpüğünün yaklaşık iki katı olduğunu göstermektedir. Ayrıca Al köpüğün hücre köşesi ve duvarlarına uygulanan Vickers sertlik test sonuçları Denklem 5.2'den hesaplanan σ_{ys} değeriyle karşılaştırılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri sonucunda bulunan Vickers Sertlik Numarasından (HV) Al köpüğün σ_{ys} değeri şu denklemlerle hesaplanmıştır [45]:

$$\sigma_{ys} = \frac{HV}{3} \quad (5.3)$$

Denklem 5.3'den hesaplanan σ_{ys} değerleri hücre duvarı ve hücre köşesi için sırasıyla 90 ve 80 MPa'dır. Denklem 5.2 ve 5.3'ün sadece bir yaklaşım olduğu, hazırlanan köpüklerde ki plato gerilmesinin sabit olmadığı ve aynı yoğunluğa fakat farklı hücre morfolojisine sahip köpüklerin gerilme-birim şekil değişim miktarı grafiğinin farklı olabileceği düşünüldüğünde bulunan σ_{ys} değerlerinin (80-100 MPa) yaklaşık olduğu kabul edilebilir. Hücre köşesi ve hücre duvarı arasındaki sertlik farklılıkları ise hücre köşesi ve duvarında oluşan farklı mikroyapılardan (sert Al-Ti intermetalik bileşikleri) kaynaklanabilir.

Sert seramik taneciklerin varlığı metal matrisin akma gerilmesini artırdığı bilinmektedir. SiC-parçacık/Al kompozit köpüklerde, MMK'lerin (Metal Matris Kompozit) mukavemetine katkılar, parçacıklara yük transferi (σ_p), iç gerilmeler, tane boyutu, termal genleşme katsayıları arasındaki fark ve dolayısıyla dislokasyon yoğunluğunun artışı olabilir.

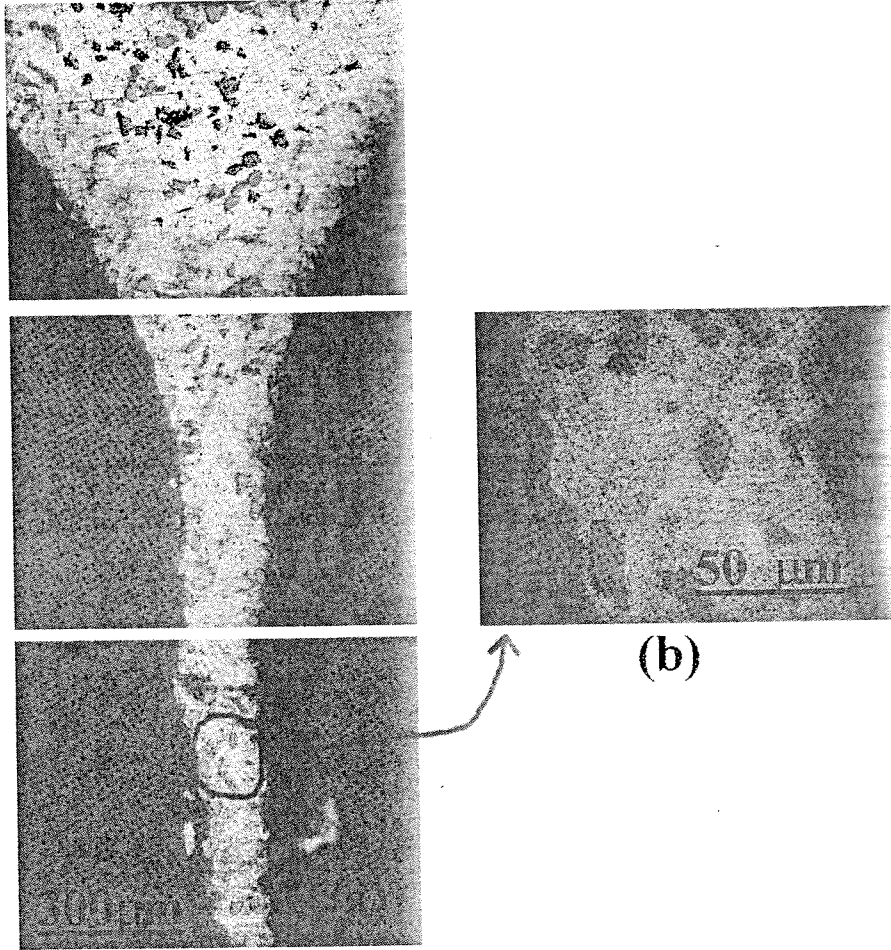


Şekil 5.13 Kompozit ve Al köpüklerde çökme gerilmesinin yoğunlukla değişimi.

Parçacıkların yükü paylaşması sonucunda oluşan mukavemet,

$$\sigma_p = \sigma_{um} \left(\frac{1}{2} V_p (s + 2) + V_m \right) \quad (5.4)$$

denklemiyle hesaplanabilir [46]. Burada σ_{um} , V_p , ve V_m sırasıyla takviye edilmemiş matris mukavemeti ve parçacık ve matris hacmi oranları, s ise parçacıkların uzunluk/çap oranıdır. SiC parçacıklarının uzunluk/çap oranı, %8.6 SiC-parçacık/Al kompozit köpükteki parçacıkların hücre köşesi ve hücre duvarında ki dağılımını ve yönelimini gösteren Şekil 5.14 (a) ve (b)'den tahmin edilmiştir. Bu şekilde hücre duvarının uzandığı yön, köpükleşme, presleme ve basma testi doğrultusunu göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, parçacıklar düzensiz bir şekilde dağılmıştır, ancak parçacıkların uzun eksenleri hücre duvarında basma doğrultusunda yönelmiştir. Şekil 5.14'den parçacık uzunluk/çap oranı 4 olarak tahmin edilmiş ve bu oran ile Denklem 5.4'den, parçacığın kompozitin mukavemetine katkısı ($\sigma_p - \sigma_{um}$) sadece 20 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.14 Kompozit (% 8.6 SiC) köpükte a) hücre köşesi ve duvarı ve b) hücre duvarında parçacık dağılımı.

Matris ve takviye arasındaki termal genişleme katsayısının farkı kompozitte iç gerilmelere yol açar. Bu gerilmelerin bir kısmı dislokasyon oluşumu ile yok edilir ve kalan kısım ise kompozitte çekme gerilmelerinin oluşumuna neden olur. Oluşan dislokasyonların kompozitin kuvvetine katkısı şu denklemle bulunabilir [46].

$$\Delta\sigma_{Dis} = \alpha G b \sqrt{\rho} \quad (5.5)$$

Bu denklemde, $\Delta\sigma_{Dis}$ dislokasyon yoğunluğu artışı sonucunda oluşan gerilim artımını, α bir sabiti, G kayma modülünü ve sırasıyla b ve ρ Burgers vektörü ve dislokasyon yoğunluğunu temsil etmektedir. Termal soğutma yoluyla artan dislokasyon yoğunluğu, kenar uzunluğu L olan kübik parçacıklar için Humphreys [47] tarafından (termal gerilmelerin tümü dislokasyon oluşumu ile yok olduğu varsayılarak) şöyle ifade edilmiştir:

$$\rho = 12V_p \Delta(CTE) \frac{\Delta T}{bL} \quad (5.6)$$

Burada, $\Delta(CTE)$ ve ΔT sırasıyla fazların termal genişleme katsayılarının farkı ve sıcaklık değişimidir. Çalışılan kompozit yapılar için şu değerler hesaplamalarda kullanılmıştır; $V_p \sim 0.1$, $\Delta(CTE) = 19.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [48], $\Delta T = 700 \text{ K}$, $L \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m}$, $\alpha = 1.25$ [49], $G = 2.64 \times 10^4 \text{ MPa}$, $b = 2.86 \times 10^{-10} \text{ m}$. Artan matris mukavemeti bu değerleri Denklem 5.5 ve 5.6'de kullanarak yaklaşık 20 MPa bulunmuştur.

MMK'ler genellikle takviyesiz alaşımlara göre daha küçük tane boyutuna sahiptirler. Parçacık takviyeli MMK'lerde tane boyutu ile oluşan mukavemet artışı Hall-Petch denklemi ile hesaplanabilir;

$$\Delta\sigma_G = k_y d_g^{-1/2} \quad (5.7)$$

Burada k_y bir sabit ve d_g tane boyutudur. Mesela $10 \mu\text{m}$ 'lik tane boyutu ($k_y = 0.1 \text{ MPa m}^{-1/2}$) 30 MPa'lık bir mukavemet artışına neden olacaktır.

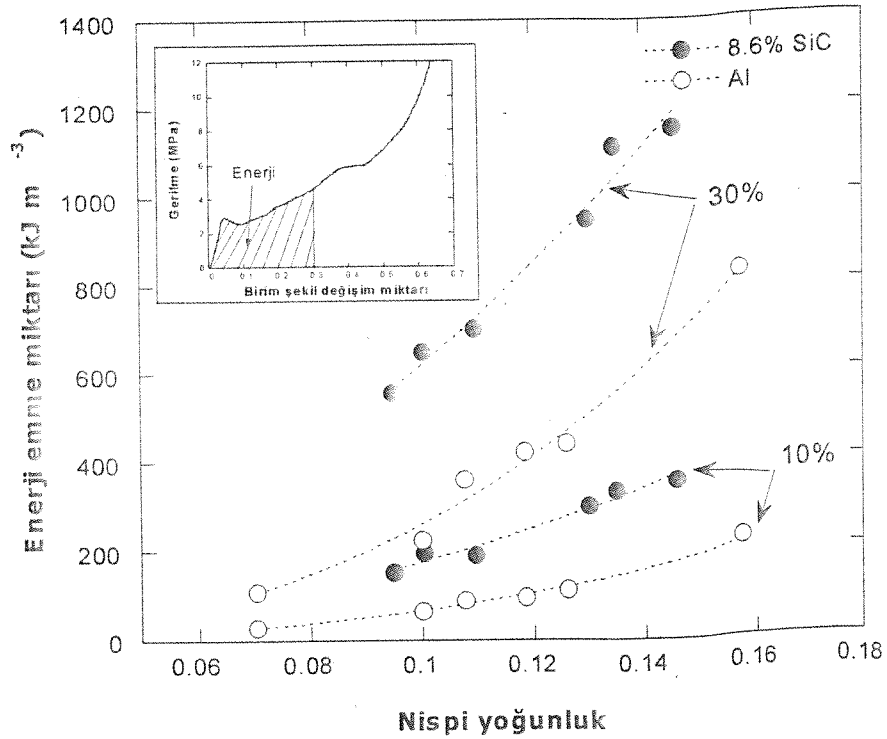
Denklem 5.2 kullanılarak hesaplanan kompozit akma gerilmesi (230 MPa) yukarıda ki etkilerin toplam katkılarında daha yüksektir. Benzer bir kompozit yapısı (%15 SiC-parçacık/Al) ve matris alaşımı akma gerilmesi için ($\sim 100 \text{ MPa}$), kompozit yapıda matrise oranla 100 MPa'lık bir basma akma gerilmesi yükselmesi bulunmuştur [50].

Hücre morfolojisinin örneğin hücre köşesi ve hücre duvarı kalınlığı plato gerilmesini etkilediği bilinmektedir. SiC-parçacık takviyesinin, köpükleşen malzemenin akma gerilmesinin yükselmesine ve hem de hücre morfolojisinin değişmesine etkisi olabilir. Bu etkiler detaylı olarak ilerideki bir projede incelenecektir.

Birim hacim başına enerji emilimi (E), gerilme-birim şekil değişimi miktarı eğrisi altındaki alandır

$$E = \int_0^{\epsilon^*} \sigma d\epsilon \quad (5.8)$$

Burada ϵ^* enerji emilimi için limit birim şekil değişim miktarıdır. Çalışılan köpüklerde %10 ve %30 limit birim şekil değişimi miktarına kadar enerji emme kapasiteleri nispi yoğunluğa karşılık Şekil 5.15'de gösterilmiştir. Kompozit köpüklerde enerji emme miktarının Al köpüklerden daha yüksek olduğu bu şekilde görülmektedir.

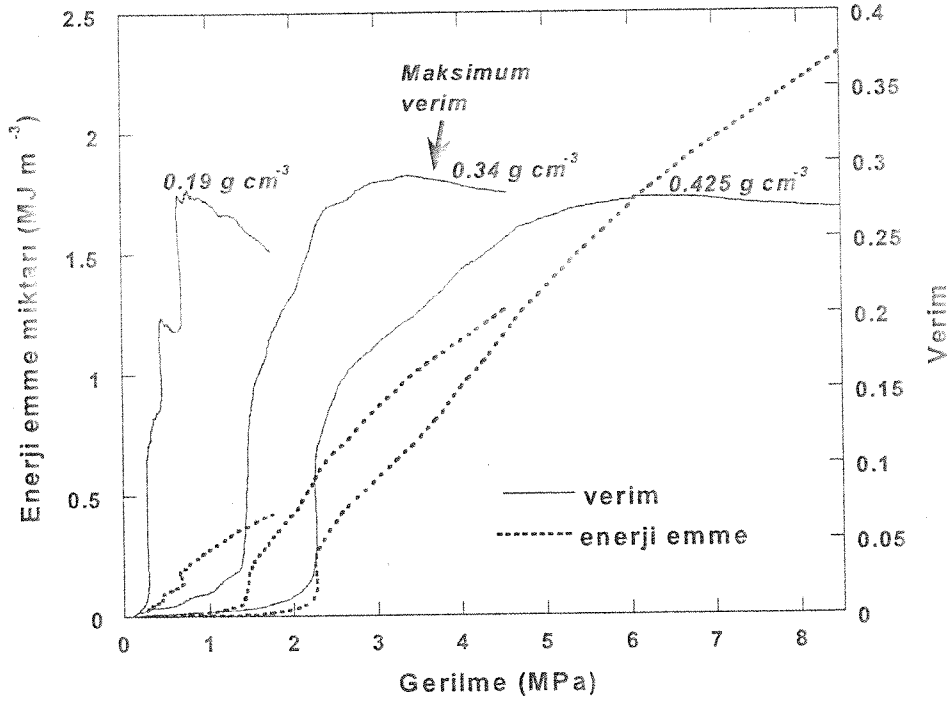


Şekil 5.15 %30 ve %10 birim şekil değişim miktarlarında enerji emme miktarları.

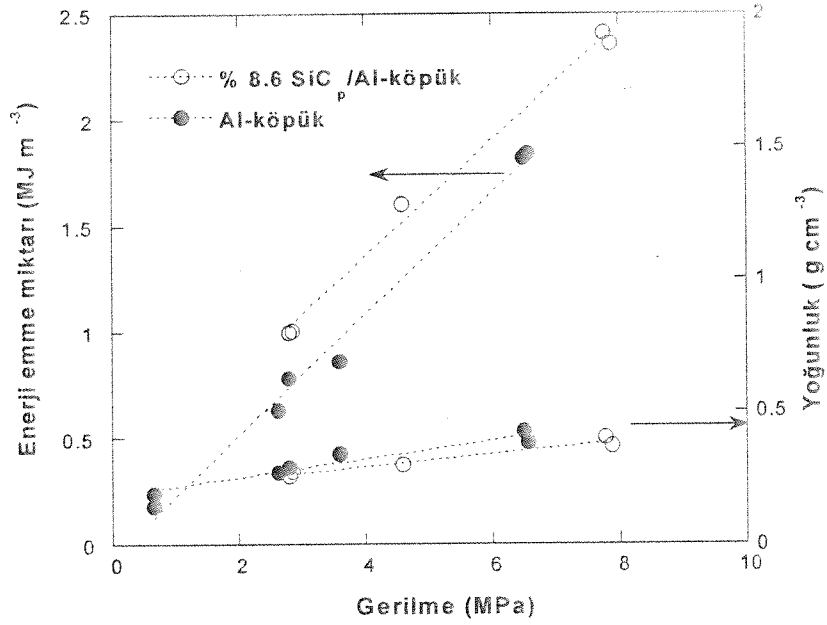
Hazırlanan köpüklerdeki enerji emme kapasitelerini karşılaştırmak için kullanılacak bir başka yöntem ise, maksimum enerji emme verimliliğine karşılık gelen enerji emme miktarı ve gerilmelerini kullanmaktır [51]. Enerji emme verimliliği (I),

$$I = \frac{\sigma d\varepsilon}{\sigma}$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Şekil 5.16'de hazırlanan değişik yoğunluktaki saf Al köpükler için gerilmeye karşılık enerji emme verimliliği ve enerji emme miktarı gösterilmektedir. Verimlilik belirli bir kritik gerilmeye kadar yükselmekte ve bu noktadan sonra azalmaktadır. Artan yoğunlukla birlikte köpükler için kritik gerilme miktarı (maksimum verimliliğe karşılık gelen gerilme) artmaktadır. Enerji emme miktarı ise gerilme ile devamlı artmaktadır. Maksimum verimliliğe karşılık gelen enerji emme miktarları Şekil 5.17'de saf Al ve % 8.6 SiC-parçacık kompozit köpükler için kritik gerilmeye karşılık çizilerek, karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Aynı şekilde kullanılan köpüklerin yoğunlukları da gösterilmiştir. Örneğin 5 MPa'lık yük altında kullanılacak bir köpük seçiminde, kompozit köpük saf Al köpüğe nispeten % 20 daha fazla deformasyon enerjisi emebilecek ve bu yapı Al köpükten %10 daha hafif olacaktır.



Şekil 5.16 Enerji emme ve verime karşılık gerilme



Şekil 5.17 Kompozit ve Al köpüğün maksimum verimde enerji emme miktarına ve yoğunluğa karşılık gerilme.

Bu çalışma SiC-parçacık katkısının Al köpüklerin plato gerilmesini ve dolayısıyla enerji emme kapasitesini artırdığını göstermiştir. Hacimsel oran, boyut ve hatta parçacık şekli değiştirilerek, değişik miktarda enerji emme kapasitesine sahip köpükler yoğunluk artırılmaksızın üretilebilir. SiC parçacık hacimsel oranını artırarak yapılan ilk denemeler Şekil 5.13'de gösterildiği gibi plato gerilmesinde artışla sonuçlanmış ve daha yüksek plato gerilmeleri için potansiyel oluşturduğu ispatlanmıştır.

6. SONUÇ

SiC-parçacıklarının Al tabletlerin köpükleşmesine ve köpüklerin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için, toz tabletlerden köpükleştirme yöntemi kullanılarak SiC_p/Al kompozit ve saf Al toz tabletlerin köpükleşme ve mekanik özellikleri deneysel çalışılmıştır.

Köpükleşme nispi yoğunluğu % 99'a yakın veya daha yüksek sahip tabletlerde olmuştur. Bu yoğunluk 425 °C presleme sıcaklığında ve 220 MPa pres basıncında elde edilmiştir. 750 ve 850 °C fırın sıcaklıklarında yapılan testlerde, köpüklerde benzer linear uzama elde edilmekte, yüksek fırın sıcaklığında köpükleşme daha erken olmaktadır. Buna karşın köpükleşme düşük sıcaklıkta nispeten yavaş olmakta, bunun sonucunda kontrollü köpükleşme olmaktadır. Bundan dolayı 750 °C, çalışmalarda fırın sıcaklığı olarak seçilmiştir.

Fırın içinde oluşan köpük malzemesinin yapısını koruması için hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Su ile soğutulan köpüklerde hava ile soğutmaya göre daha fazla linear uzama elde edilmiştir. SiC toz ilavesi ile hazırlanan kompozit köpükler köpük alüminyum ile karşılaştırıldığında, linear uzama daha fazla ve tabanlarında oluşan tabakanın kalınlığı düşük olmuştur: kompozit köpüklerde linear uzama 5-6 arasında olurken köpük alüminyumlarda linear uzama 3-4 olarak bulunmuştur. Bu sonuç SiC'din vizkoziteyi arttırmasına bağlanmıştır.

Granule Al₂O₃ parçacık/Al ve SiC-visker (kıl kristal)/Al tabletleri köpükleştirilememiştir. Bu tabletlerin iyi sıkıştırılmamış olabileceğinden ve homojen bir şekilde hazırlanamamasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Gerilme birim şekil değişikliği ile ilgili yapılan testler, kompozit köpüklerin plato gerilmesini arttırdığını (enerji emme miktarını arttırdığını) göstermiştir; enerji emme miktarı kompozit köpüklerde alüminyum köpüklerden daha yüksek olmuştur. Hacimsel oran, boyut ve hatta parçacık şekli değiştirilerek, değişik miktarda enerji emme kapasitesine sahip köpükler yoğunluk arttırmadan üretilebilir.

REFERANSLAR

1. Gibson L. J., Ashby M. F., *Cellular solids: structures and properties*, University Press, Cambridge, 1997.
2. Seitzberger M., Rammerstorfer F. G., Degischer H. P., Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminum foam, *Acta Mechanica*, 125, 93-105, (1997).
3. Hanssen A. G., Langseth M., Hopperstad O. S., *Int. J. Solids and Structures* 24, 475, (2000).
4. Hall I. W., Ebil Ö., Güden M., Yu C.-J., Quasi-static and dynamic crushing of empty and foam-filled tubes, *J. Mater. Sci.*, basımda, (2001).
5. Evans A. G., Hutchinson J. W., Ashby M. F., Multifunctionality of cellular metal systems, *Prog. Mater. Sci.*, 43, 171-121, (1999).
6. Simone A. E., Gibson L. J., The effects of cell face curvature and corrugations on the stiffness and strength of metallic foams, *Acta mater.*, 46, 3929-3935, (1998).
7. Gradinger R., Rammerstorfer F. G., On the influence of meso-inhomogenities on the crush worthiness of metal foams, *Acta Mater.*, 47, 143-148, (1999).
8. Miyoshi T., Itoh M., Mukai T., Kanahashi H., Kohzu H., Tanabe S., Higashi K., Enhancement of energy absorption in a closed-cell aluminum by the modification of cellular structures, *Scripta Mater.*, 41, 1055-1060, (1999).
9. Baumgartner F., Duarte I., Banhart J., Industrialization of powder compact foaming process, *Advanced Eng. Mater.*, 2, 168-174, (2000).
10. Wood, J. T., Production and applications of continuously cast foamed aluminum, *Fraunhofer USA Metal Foam Symposium*, eds: Banhart J. and Eifert H., Stanton, Delaware, (1997).
11. *US Patent*, 4973358.
12. Gibson L. J., Simone A. E., Aluminum foams: structure and properties, *Mechanics and materials seminar*, (1997).
13. Prakash O., Sang H., Embury J. D., Structure and properties of Al-Si foam, *Mater. Sci. Eng.*, A199, 195-203, (1995).
14. Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A., Alporas aluminum foam: production process, properties, and applications, *Adv. Eng. Mater.*, 2, 179-183, (2000).

15. Banhart J., Metallic foams: challenges and opportunities, *Eurofoam 2000*, MIT-Verlag Bremen, (2000), pp:13-20.
16. Banhart J., Production Methods for Metallic Foams, *Fraunhofer USA, Metal Foam Symposium*, Delaware, (1997), Verlag Pub. Bremen, (1998).
17. *US Patent*, 5151246.
18. Yu C., Eifert H., Banhart J., Baumeister J., Metal foaming by a metallurgy method: production, properties and applications, *Journal of Materials Research Innovations*, 2, 3, (1998).
19. Metal foams near commercialization, *Metal Powder Report*, (1997) pp: 38-41.
20. Banhart J., Manufacturing routes for metallic foams, *J. Mater. Sci*, 52, 22-27, (2000).
21. Gergely V. and Clyne B., The Formgrip process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors, *Adv. Eng. Mater.*, 2, 175-178 (2000).
22. Harte, A., Fleck N. A., Ashby M. F., Sandwich panel design using aluminum alloy foam, *Adv. Eng. Mater.*, 2, 219-222, (2000).
23. Fuganti A., Lorenzi L., Hanssen A. G., Langseth M., Aluminum foam for automobile applications, *Advan. Eng. Mater.*, 2, 200-204, (2000).
24. Galovsky U., Kretz R., Manufacturing of large size aluminum foam netshape parts for automotive applications, *ISATA-Wien*, (1999).
25. Banhart J., Properties and applications of cast aluminum sponges, *Advan. Eng. Mater.*, 2, 188-191, (2000).
26. Güden M., Hall I. W., Yu C. -J., Quasi-static and dynamic crushing of an aluminum closed-cell foam, *TMS Meeting*, (1998).
27. Hall I. W., Güden M., Yu C. -J., Crushing of aluminum closed-cell foams: density and strain rate effects, *Script. Mater.*, 43, 515-521, (2000).
28. Elbir S., Yılmaz S., Güden M., Kapalı hücreli alüminyum köpük metallerin üretim metotları ve mekanik özellikleri, *Metallurji Dergisi*, 120, 35-42, (1999).
29. Simone A. E., Gibson L. J., Effect of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams, *Acta Mater.*, 46, 2139-2150, (1998).
30. Maiti S. K., Gibson L. J. and Ashby M. F., Deformation and energy absorption diagrams for cellular solids, *Acta Mater.*, 32, 1963-1975, (1984).
31. Ashby M., Evans A. G., Fleck N. A., Gibson L. J., Hutchinson J.W., Wadley H. N. G., *Metal foams design guide*, Cambridge, (1999).

32. McCullough K. Y. G., Fleck N. A. and Ashby M. F., Uniaxial stress-strain behavior of aluminum alloy foams, *Acta Mater.* 47, 2323-2330, (1999).
33. Yu C-J. and Banhart J., Mechanical properties of metallic foams, *Fraunhofer USA Metal Foam Symposium*, eds: Banhart J., Eifert H., Stanton, Delaware, (1997).
34. Beals J. T. and Thompson M. S., Density gradient effects on aluminum foam compression behavior, *J. Mater. Scie.*, 32, 3595-3600, (1997).
35. Sugimura Y., Meyer J., He M. Y., Bart-Smith H., Grenstedt J., Evans A. G., On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams, *Acta Mater.*, 12, 5245-5259, (1997).
36. Grenstedt. J. L., Influence of imperfections on effective properties of cellular solids, *MRS Symposium*, San Francisco, (1998), Vol.521.
37. Banhart J. and Baumeister J., Deformation characteristics of metal foams, *J. mater. Scie.* 33, 1431-1440, (1998).
38. Facts & Data, Alulight.
39. Hanssen A. G., Langseth M., Hopperstad O. S., Static and dynamic crushing of square aluminum extrusions with aluminum foam filler, *Int. J. Impact Eng.*, 24, 347-383, (2000).
40. Hall I. W. and Guden M., 'Transverse and longitudinal crushing of Al-foam filled tubes, *Scripta. Mater.*, in press.
41. Duarte I., Banhart J., A study of aluminum foam formation-kinetics and microstructure, *Acta Mater.*, 48, 2349-2362, (2000).
42. Cox S., Bradley G., Weaire D., Modelling metallic foam formation, submitted.
43. Simone A. E., Gibson L. J., Aluminum foams produced by liquid-state processes, *Acta Mater.*, 26, 3109-3123, (1998).
44. Gibson L. J., Mechanical behavior of metallic foams, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 30, 191-227, (2000).
45. Shaw M. C., *Mechanical Behavior of Materials*, eds: McClintock F. A., Argon A. S., Addison-Wesley, Reading, Mass, (1966), p. 443.
46. Nardone V. C., Prewo K. M., On the strength of discontinuous silicon carbide reinforced aluminum composites, *Scripta Metall*, 20, 43, (1986).
47. Miller W. S., Humphreys F. J., Strengthening mechanisms in particulate metal matrix composites, *Scripta Metall.*, 25, 33, (1991).
48. Clyne T. W., Withers P. J., *An introduction to metal matrix composites*, Cambridge University Press, Cambridge, (1993).

49. Sarkar J., *Scripta Metall.*, 32, 37, (1995).
50. Güden M., *High strain rate mechanical behavior of metal matrix composite*, (Doktora tezi), University of Delaware, ABD (1998).
51. Avalle M., Belingardi G., Montanini R., Characterization of polymeric foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram, *I. J. Impact Engn.*, 25, 445, (2001).

AÇIK VE KAPALI HÜCRELİ KÖPÜKLERİ GIBSON VE ASHBY MODELİ

Elastik Deformasyon

Basma kuvvetleri yatay olmayan çubuklarda elastik çubuk teorisinden hesaplanabilecek bir δ deplasmanı oluşturur (Şekil A.1 (a) ve (b))

$$\delta = \frac{C_1 F l^3}{E_s I} \quad (A.1)$$

Burada, C_1 , F , l , E_s ve I sırasıyla hücre geometrisi faktörü, uygulanan kuvvet, hücre duvarı uzunluğu veya boyutu, hücre duvar metal Elastik Modülü ve hücre duvarlarının ikinci moment alanıdır. Kuvvet ve deplasman, gerilme (σ) ve birim şekil değişimi miktarı (ϵ) cinsinde şöyle ifade edilebilir ;

$$F \propto \sigma l^2 \quad (A.2)$$

ve

$$\epsilon \propto \frac{\delta}{l} \quad (A.3)$$

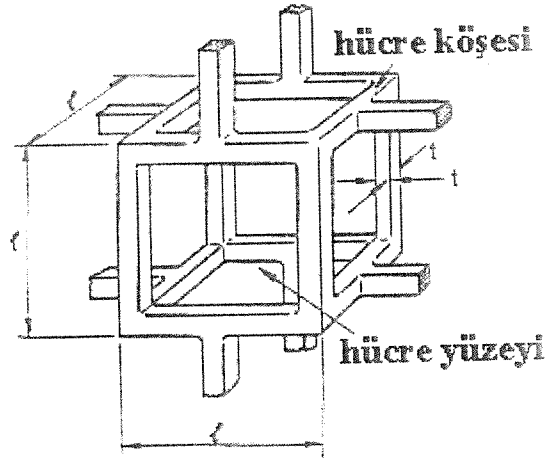
Hücre köşesinin ikinci moment alanı, açık hücre için t^4 (t kalınlık) ve kapalı hücre için $l t^3$ 'le orantılıdır. Bunlar, Denklem A.1'e yerleştirildiğinde sırasıyla açık ve kapalı hücreli köpükler için Elastik Modülü

$$E^* \propto E_s \left(\frac{t}{l} \right)^4 \quad (A.4)$$

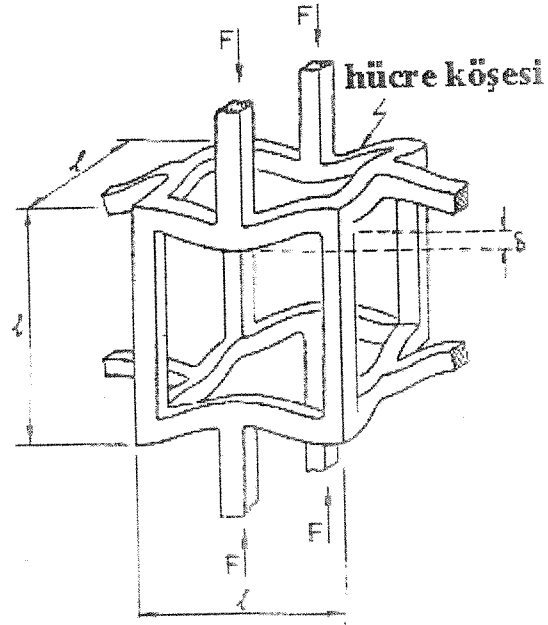
ve

$$E^* \propto E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (A.5)$$

denklemleriyle ifade edilebilir.

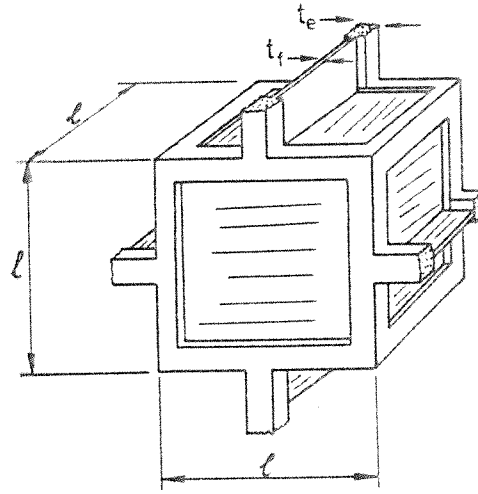


(a)

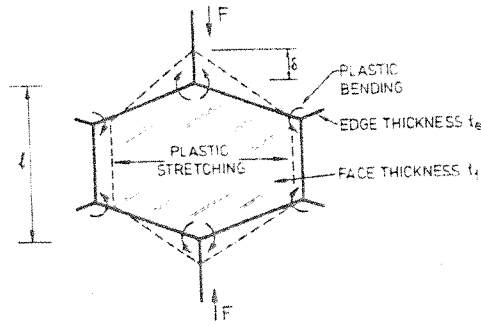


(b)

Şekil A.1 a) açık hücre modeli ve b) basma modeli



Şekil A.2 Kapalı hücre modeli.



Şekil A.3 Kapalı hücrede plastik hücre yüzeyi uzama modeli.

Açık ve kapalı hücre nispi yoğunluğu sırasıyla

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \propto \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (\text{A.6})$$

ve

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \propto \left(\frac{t}{l}\right) \quad (\text{A.7})$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Denklem A.4 ve A.5 şöyle düzenlenebilir:

$$\frac{E^*}{E_s} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \quad (\text{A.8})$$

ve

$$\frac{E^*}{E_s} = C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (A.9)$$

Bu denklemlerde C_2 ve C_3 geometri sabitleridir.

Hücre duvarı bükülmesi yanında, kapalı hücreli köpüklerin elastik modülüne katkıda bulunacak iki başka mekanizma daha vardır. Bunlar hücre yüzeyi gerilmesi ve hücrede sıkışan gaz basıncıdır. Köpük sıvı metalden oluştuğu zaman yüzey gerilmeleri sıvı metalin büyük bir kısmının hücre köşelerinde birikmesine neden olur (Şekil A.2). Bunun sonucunda hücre duvarları veya yüzeylerinin kalınlığını nispi olarak azalmaktadır. Bu ince tabaka hücre köşelerinin bükülmesiyle kolayca yırtılabilir. Eğer yırtılmazsa, uygulanan yüke dik yönde gerilerek elastik modüle önemli derecede katkıda bulunur. Şekil A.3 basma yükü F altında hücre yüzeyindeki gerilmeyi göstermektedir. Bu yapı için, toplam elastik deformasyon enerjisi hücre yüzeylerinin gerilmesi ve hücre köşelerinin bükülmesinin toplamı olacaktır:

$$\frac{1}{2} F\delta = \frac{1}{2} S\delta^2 + \frac{1}{2} E_s \varepsilon^2 V_f \quad (A.10)$$

Burada S hücre köşesi rijiditesi ($\alpha E_s l^3$), ε hücre yüzeyinin gerilmesinden kaynaklanan birim şekil değişimi miktarı, V_f hücre yüzeyindeki metalin hacimsel oranı ve t_e ve t_f hücre köşesi ve yüzeyinin kalınlığıdır. Denklem A.10 şöyle de yazılabilir;

$$\frac{1}{2} F\delta = \frac{\alpha E_s l \delta^2}{1^3} + \beta E_s \frac{\delta^2}{1} l^2 t_f \quad (A.11)$$

$l\alpha t_e^4$ ve $E^* \alpha (F/l^2)(\delta/l)$ kullanarak, Denklem A.11

$$\frac{E^*}{E_s} = \alpha \frac{t_e^4}{l^4} + \beta \frac{t_f}{l} \quad (A.12)$$

olarak düzenlenebilir. Eğer hücre köşesindeki metal fraksiyonu (ϕ), t_e/l alınırsa Denklem A.12 şöyle olacaktır:

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 + C_1 (1 - \phi) \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (A.13)$$

Basma altında sıkışan gazın basıncı önemli olduğunda, Denklem A.13 şu şekilde önerilmiştir [1]:

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \varphi^2 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 + C_1 (1 - \varphi) \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) + \frac{P_o (1 - 2\nu^*)}{E_s (1 - \frac{\rho}{\rho_s})} \quad (A.14)$$

Burada P_o ve ν^* sırasıyla başlangıç gaz basıncı ve köpüğün Poisson oranıdır.

Plastik Çökme

Kapalı hücreli köpüklerde, plastik çökme basma kuvveti yönünde çubukların bükülmesine neden olurken hücre yüzeylerinin bu yöne dik olarak gerilmesine neden olabilir. Çökme esnasında yapılan toplam iş

$$F\delta = \alpha M_p \frac{\delta}{l} + \beta \sigma_y \delta t_f l \quad (A.15)$$

denklemlerle ifade edilebilir. Burada M_p ve σ_{ys} sırasıyla hücre köşelerinin plastik momenti ve köpük metalinin akma gerilmesidir. F yerine σl^2 ve M_p yerine $\sigma_{ys} t_e^3/4$ yerleştirilirse

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5 \left(\varphi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_5'' (1 - \varphi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (A.16)$$

eşitliği bulunur. Sıkışan gaz etkisi katılırsa, Denklem A.16 şöyle düzenlenebilir;

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5 \left(\varphi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_5'' (1 - \varphi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) + \frac{P_o - P_{atm}}{\sigma_{ys}} \quad (A.17)$$

Denklem A.16, açık hücre için ($\varphi=1$)

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (A.18)$$

eşitliğini ve kapalı hücre için ise ($\varphi=0$)

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5'' \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (A.19)$$

eşitliklerini verecektir.

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU

1- Proje No: MISAG-135 2- Rapor Tarihi: 7 Kasım 2001

3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 2 Ağustos 1999- 2 Ağustos 2001

4- Projenin Adı:

**Kompozit Aluminyum Köpük Malzemesinin Hazırlanması
ve Mekanik Özelliklerinin Karakterizasyonu**

5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar:

Yrd. Doç.Dr. Selahattin Yılmaz.

Doç.Dr. Mustafa Güden

Yrd.Doç.Dr. Hacer Aygün

Araş. Gör. Semih Elbir

6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü
Gülbahçe Köyü, Urla, İZMİR

7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:

Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, Atatürk Bulvarı No: 221, Kavaklıdere 06100
ANKARA

8- Öz (Abstract):

Bu projede SiC tozları (SiC_t), SiC viskerları (SiC_v , kıl kristal) ve granule Al_2O_3 tozları (Al_2O_{3g}) ayrı ayrı Alüminyum ile karıştırılarak metal matris kompozit (MMK) köpükler hazırlanmıştır. Matris malzemesi olarak Alüminyum seçilmiştir. TiH_2 tozları şişirici ajan olarak kullanılmışlardır. MMK köpükler toz metallurji tekniği ile hazırlanmıştır. Matris, şişirici ajan (%0.5%) ve takviye malzemesi (SiC_t veya SiC_v veya Al_2O_{3g}) iyice karıştırıldıktan sonra, sıcak preste 450 °C ve 200 MPa basınç altında sıkıştırılmaktadır (%99 Relative yoğunluk). Burada yarı mamül olarak tanımlayabileceğimiz tabletler elde edilmektedir. Yarı mamül matris malzemesinin erime sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa (750-850 °C) kadar ısıtılmış bir fırına konmaktadır. Bu sıcaklıklarda, TiH_2 bozunması ile açığa çıkan H_2 gazları metal içerisinde genişmekte ve metalin içinde gaz hücrelerinin oluşmasını (köpükleşme) sağlamaktadır. Köpükleşen malzeme fırından çıkarılarak hızlıca soğutulmaktadır. Bu yöntem izlenerek MMK köpükler üretilmiştir. Fırın sıcaklığı ve fırında kalma süresi parametre olarak çalışılmıştır. MMK köpükler malzemeler darbe enerjisini emme için kullanılabilirler. Sonuç olarak Alüminyum köpüklerden daha yüksek enerji emme kapasitesine sahip MMK köpükler hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum köpük, Kompozit Metal köpük, SiC kompozit köpük, Metal toz işleme teknolojisi.

9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler

1- Kompozit Alüminyum Köpüklerin Hazırlanması ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi''
2. Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu, Manisa, s:317-325, 2001.

10- Bilim Dalı

Doçentlik B. Dalı Kodu: Üretim ve Mekanik Metallurji

ISIC Kodu:

Uzmanlık Alanı Kodu: 1.094

11- Dağıtım(*):

Sınırlı

X Sınırsız

12- Raporun Gizlilik Durumu:

Gizli

X Gizli Değil

(*) Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz.