

YAKIT HÜCRELERİNDE KULLANILACAK GÖZENEKLİ PASLANMAZ ÇELİK TOZ METAL PARÇALARIN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

Yusuf USTA, Adem KÖYLÜ*

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Gazi Üniversitesi 06570 Maltepe/Ankara,
*Arazi, İnşaat ve Kamulaştırma Daire Başkanlığı, Boru Hatlarıyla Petrol Taşıma A.Ş. Bilkent Plaza BOTAS
Bilkent / Ankara

uyusuf@gazi.edu.tr, adamvillager@hotmail.com

(Geliş/Received: 25.07.2011 ; Kabul/Accepted: 27.02.2012)

ÖZET

Bu çalışmada yakıt hücrelerindeki ısı değiştiricilerinde de kullanılabilmesi düşüncesi ile SS316L küresel paslanmaz çelik tozlarından, bir alt plaka (yüzey) üzerine tutundurulmuş gözenekli yüzeye sahip parçalar üretilmiştir. Bu tür yüzeylerin üretiminde en düşük basınç-sıcaklık değerleri ile tozlar ve alt plaka arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca; tozların alt tabakaya tutunabilmesi maksadıyla alt tabakanın yüzey pürüzlülüğünün artırılması için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu amaçla yüzey aşındırma teknikleri araştırılmış, tozların tutunabilmesi için plakadaki gerekli en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri belirlenmiştir. Çalışmalar yapılırken işlemin sanayideki uygulanabilirliği gözetilmiştir. Bunun yanında sıcaklık ve basıncın, açık gözeneklilik üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan deney ve testler 200 MPa presleme basıncı, 500°C presleme sıcaklığı, $R_a=1,7$ µm plaka yüzey pürüzlülüğü ile gözenekliliğin %29,6 olarak ölçüldüğü değerlerin, bu tip yüzeylerin üretimi için yeterli başlangıç koşulları olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yakıt hücresi, gözenek, paslanmaz çelik, sinterleme, pürüzlülük, toz metalurjisi.

INVESTIGATIONS ON PRODUCTION PARAMETERS OF POROUS STAINLESS STEEL SURFACES USED ON FUEL CELLS

ABSTRACT

In this study, porous surfaces made of SS316L spherical stainless steel powder have been produced to be used in heat exchangers of fuel cells by designing and producing forming die and special punches. Minimum pressure and temperature levels for compacting have been examined to obtain sufficient bonding between powders and the substrate. Moreover, surface roughness of the substrate has been increased in order to bond substrate and the powders. Surface etching techniques have been investigated and minimum surface roughness of the substrates has been defined. Besides, the effects of temperature and pressure on open porosity have been investigated. The experiments and the tests showed that 200 MPa compacting pressure, 500°C temperature and $R_a=1.7$ µm roughness, on the substrate are enough to realize such surfaces. Under these circumstances 29.6% porosity has been obtained.

Keywords: Fuel cell, porous stainless steel, sintering, surface roughness, powder metallurgy.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Isı değiştiricilerde yüzey alanının artırılması, aktarılabilecek ısı miktarını doğrudan etkilediğinden, dar hacimler üzerinden daha büyük yüzey alanına sahip ısı değiştiricisi kullanımı zorunluluğu giderek artmaktadır. Isı değiştiricisinde gözenekli yüzeyler

kullanmak veya yüzeyinde çıkıntılar oluşturmak yüzey alanını arttırmak için başlıca yöntemlerdir. Hem çıkıntılı hem de gözenekli yüzeyin aynı anda imalatı ise iki başarılı uygulamanın birleştirilmesidir. Bu yüzey alanını önemli ölçülerde artırmakla birlikte kılcal etki (capillary effect) yardımı ile iki fazlı soğutma (nucleate boiling) da mümkün olmakta ve ısı

değiştiricisinin verimi %300 mertebelerinde artmaktadır [1]. Daha önceki çalışmalarda bu tür bir uygulama bakır tozları kullanılarak yapılmış, teorik sınırların yanında bu sınırların sanayideki uygulanabilirliği araştırılmıştır [8]. Bugün, gelişen yakıt hücreleri ve membran teknolojileri küçük hacimde daha büyük ısı açığa çıkarmaktadırlar. Yüksek sıcaklık ve yakıtın oluşturduğu korozyonlu ortam bu alandaki nitelikli malzeme ihtiyacına yol açmaktadır.

Mühendislik uygulamalarının en önemli ve en çok karşılaşılan işlemlerinden birisi, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı değişimidir. Isı değiştiricilerinin yapımında yumuşak çelikler, alaşımli çelikler, özellikle bakır gibi diğer alaşımlar, seramikler veya özel maksatlar için de grafit gibi malzemeler kullanılır. Bu malzemelerin seçiminde koroziyon, sıcak, basınçlı, asitli veya bazik ortam çalışma koşullarına dayanıklılığının yanı sıra, özellikle metal malzemelerde imalat kolaylığının (bilhassa kaynak edilebilme), ısı iletim katsayısı, yoğunluk, ısı yayılım katsayısı gibi fiziksel özellikler, uygulamada standart çap ve boyutlarda imal edilebilme ve fiyat gibi etkenler göz önünde tutulmalıdır [2].

Paslanmaz çelikler endüstriyel tesislerde, korozyon dayanımı gereken yerlerde sıkça kullanılır. Paslanmaz çelikten mamul ısı değiştiricileri yüksek korozyon dirençleri nedeniyle yakıt hücrelerinin gereksinimlerini sağlamaktadır. Bilindiği gibi yakıt hücrelerinde (yakıt pillerinde); elektrokimyasal tepkime sonucu açığa çıkan ısıyı uzaklaştırmak, bu teknolojinin verimli olarak kullanılabilirliğini etkilemektedir. Yakıt hücreleri yapıları gereği küçük ve karmaşık geometriye sahip olduğundan tepkimeler sonucu ortaya çıkan ısıyı atabilmek için sınırlı boyutlara sahip bir sistem üzerinden ısı transferi gerçekleştirilmelidir. Buna karşın, yakıt hücresinin gücü arttıkça açığa çıkan ısı da doğal olarak artmakta ve daha büyük kapasiteli ısı değiştirici kullanımı zorunlu hale gelmektedir.

Liter ve Kaviany yaptıkları çalışmalarında, gözenekli yüzeylere sahip ısı değiştiricileri ile kılcal etkisiyle (capillary effect) çift fazlı ısı transferi (sıvı ve gaz) ve aynı zamanda artırılmış yüzey alanı elde etmişler ve böylece düz bir plakaya göre %300 gibi bir artışla ısı transferi kapasitesine ulaşabileceğini göstermişlerdir [1]. Ulaşılan bu sonuç, yakıt hücresi ve elektronik cihazların soğutucularında gözenekli yüzeylere sahip ısı değiştiricilerinin kullanılabilirliği yönünde bir motivasyon oluşturmuştur.

İlgili literatür incelendiğinde, gözenekli yüzeylerin oluşturulabilmesi için özellikle başta kimyasal olmak üzere çeşitli yöntemler olduğu görülmektedir [3-6]. Ancak, kontrol edilebilir ve açık gözenekliliğe sahip parçaların üretimi için toz metalurjisi avantajlı bir

imalat yöntemidir. Bunun yanı sıra iki farklı sıvı arasında sızdırmazlığı sağlamak amacıyla bir plaka üzerinde gözenekli yapıyı oluşturmak için de yine T/M yöntemi önemli bir metottur. Tipik T/M parçaların yapısal teorik yoğunluğu %85-%99,9 aralığında değişirken, gözenekli yapı için kullanılan teknik ve sinterlemeyle %25 ile %85 arası teorik yoğunluklu parçalar üretilebilmektedir. Filtreler, kendi kendini yağlayabilen yataklar, pillerin elektrotları, akış kontrol cihazları, darbe emiciler ile köpüksü yapılar bu parçalara örnek olarak verilebilir [7].

Yüksek gözenekliliğe sahip yüzeyler için düşük basınçta presleme gerekirken, tozların alt tabakaya tutunabilmesi için sıkıştırma basıncının belirli bir düzeyde olması gerekmektedir. Bakır ile yapılan çalışmalarda; basınç seviyesinin en az 15 MPa civarında olabileceği, ancak tutunma için sıcaklık preslemenin yapılması gerektiği ve en düşük sıcaklığın da 350°C olması gerektiği rapor edilmiştir [8]. Bakır tozlarından başarı ile üretilen gözenekli yüzeylerin, yakıt hücrelerinin ısı değiştiricilerinde anılan özellikleri nedeniyle paslanmaz çelikten üretilmesi fikri bu çalışmanın kaynağını oluşturmaktadır [8]. Tozlar ve yüzey arasında güçlü bir bağ sağlamak amacıyla, ılık, hatta sıcak presleme zorunluluğu vardır. M. Koç ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sinterlemenin gerekli olduğu, oksidasyonu engellemek için sıkıştırmanın ve sinterlemenin korumalı atmosferde yapılmasının gerektiği, yüksek basınç ve sıcaklık değerleri her ne kadar güçlü ve sağlam bir yapı için gerekse de gözenekliliği sınırladığı, tutarlı gözeneklilik seviyeleri için uygun toz boyutunun sağlanması gerektiği sonucuna varmışlardır [9].

S. Mahabunphachai ve arkadaşları ısı değiştiricisi olarak kullanabilmek için sıvı ile şekillendirme (hydroforming) yöntemiyle, 0,05 mm kalınlığındaki SS304 levha ile 0,5x0,5 mm boyutlarında ince sayılabilecek akış kanallı levhalar üretmişlerdir. Bu kanallar ile ısı transferi sıvısı için akış yolları oluşturulmuştur [10].

Benzer bir çalışmada, doğrudan metal lazer sinterleme kullanılarak, sinterlenmiş gözenekli 316L paslanmaz çelik bileşenlerin işleme koşulları ve mikro yapısal özellikler incelenmiştir. Sinterlenmiş örneklerde genellikle %21-55 gözeneklilik elde edilmiştir [11].

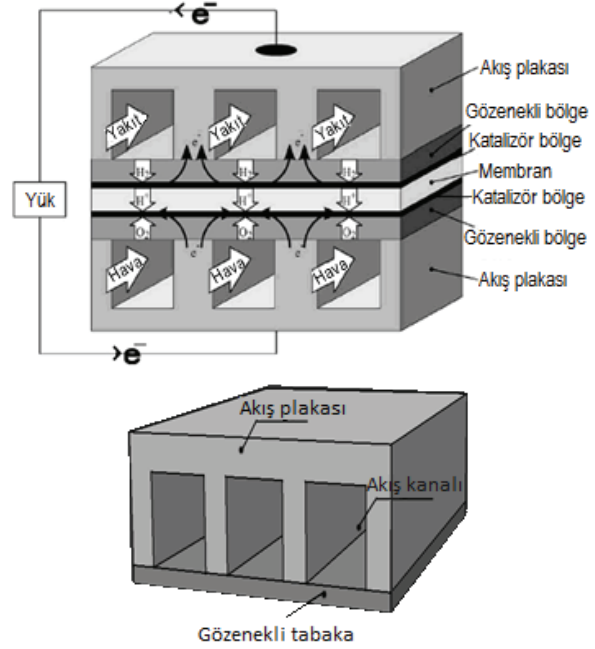
Yakıt hücreleri oluşan kimyasal olaylar nedeniyle koroziyon bir ortam oluşturmaktadır. Östenitik 316L malzeme ile 500°C sıcaklıkta işletilen bir hücrede deneyler yapılarak, hava ile oksitlenmenin yüksek olduğu bu ve üstü sıcaklıklarda paslanmaz çelik kullanmanın uygun olmayacağı belirlenmiştir [12]. 300 saat sonra 800°C'deki yakıt hücresinde oksitlenmeden dolayı paslanmaz çelik başlangıç kütlelerinin %5 oranında azaldığı görülmüştür [12].

Yakıt hücrelerinin; düşük emisyon ve gürültü seviyeleri ile H₂'nin temel enerji kaynağı olması durumundaki yüksek verimlilikleri nedeniyle yakın gelecekte önemli rol oynayacağı tahmin edilmektedir [13]. Zamanla fosil yakıtların azalmasından duyulan endişe ile içten yanmalı motorlara göre pahalı bir yöntem olan yakıt hücreleriyle elektrik üretme, yüksek verimliliği ve emisjonsuz olması sayesinde tekrar araştırılmaya ve geliştirilmeye başlamıştır [14]. Bugüne kadar olan yakıt hücrelerinin kısaca karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir [15].

Şekil 1'de yapısı verilen yakıt pilinde katot tarafındaki akış kanalından hava geçerken, anot tarafındaki akış kanalından hidrojen (yakıt) geçmektedir. Anot tarafındaki gözenekli tabakadan katalizör tabakaya geçen hidrojen, platin katalizör sayesinde elektronlarını bırakır [16].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR (EXPERIMENTAL STUDIES & RESULTS)

Bu çalışmada, Şekil 2a'da gösterilen 55 mm çaplı metal toz sıkıştırma kalıbının tüm parçalarının imalatı yapılmış, imatları tamamlanarak montajları yapılan sıkıştırma kalıbının mekanik kısımlarının yanı sıra elektriksel kısımlarının hesap ve analizleri yapılmıştır. PHONEICS™ yazılımı yardımı ile kalıbın oda sıcaklığından 500°C'lik bir sıcaklığa ulaşması için gerekli süre 37,5 dk. olarak bulunmuştur (Şekil 2).

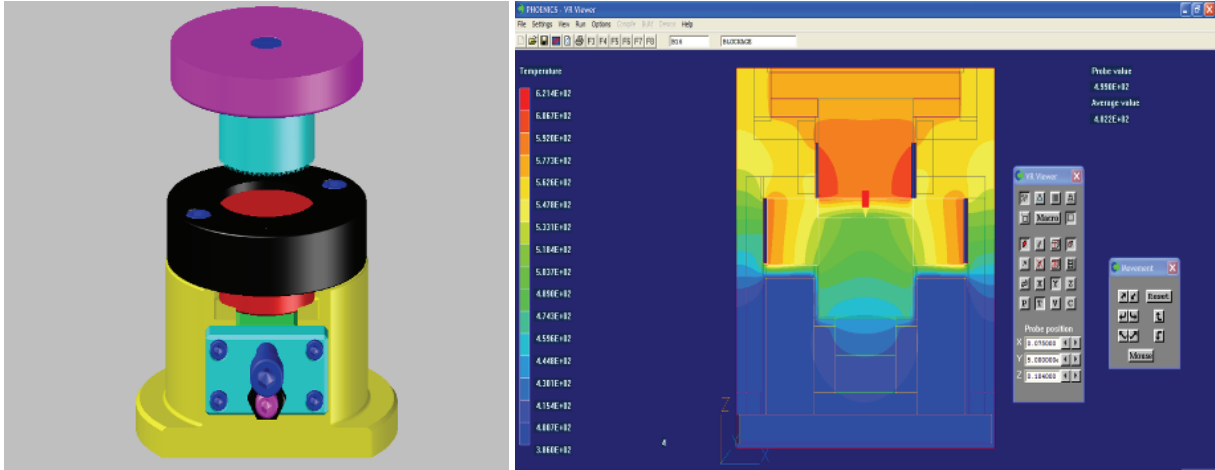


Şekil 1. Yakıt hücresi (PEM) ve soğutma kanalındaki akış [16] (A schematic view of a fuel cell (PEM) and cooling channels [16])

Piyasadan temin edilen 150 µm çapında küresel paslanmaz çelik tozu içerisinde bulunan daha küçük çaptaki tozlar açık gözenekliliği etkileyeceğinden, tozlar 75 µm altı ve üstü olmak üzere elek yardımıyla

Tablo 1. Yakıt hücrelerinin karşılaştırılması [15] (Comparison of fuel cells)

Yakıt Hücresi Türü	Çalışma Sıcaklığı	Çalışma Aralığı	Yakıt	Avantajları	Dezavantajları	Uygulama Alanları
Proton geçirgen zarlı yakıt hücresi (PEMFC)	20-100°C	<1W - 200kW	H ₂	Düşük sıcaklık yüksek enerji yoğunluğu, hafif, hızlı ilk çalışma, Katı elektrolit	Yüksek saflıkta H ₂ , Pahalı katalizör	Portatif Sistemler, Jeneratör, Askeri sistemler
Katı oksit yakıt hücresi (SOFC)	500-1000°C	1W - 250kW	H ₂ , CO ₂ , CH ₄	Yüksek verim, yakıt çeşitliliği, ucuz katalizör, hızlı ilk çalışma, Katı elektrolit	Yüksek Sıcaklık, Korozyon, Hücre üretimi zor ve pahalı	Elektrik santralleri, Orta Ölçekli işletmeler için ısı ve elektrik, Portatif Sistemler
Alkaline (bazik) yakıt hücresi (AFC)	50-100°C	200W - 10kW	H ₂	Katottaki aktivasyon kaybı düşük, sıvı elektrolit, yüksek temas	Yüksek saflıkta H ₂ , Pahalı katalizör	Uzay araçları
Fosforik Asit yakıt hücresi (PAFC)	190-220°C	10kW - 1MW	H ₂	Saflığı düşük hidrojen kullanılabilir, sıvı elektrolit, yüksek temas		Elektrik santralleri, Orta ölçekli işletmeler için ısı ve elektrik
Eriyik Karbonat yakıt hücresi (MCFC)	600-650°C	200kW - 10MW	H ₂ , CO	Yüksek verim, yakıt çeşitliliği, ucuz katalizör, Sıvı Elektrolit, yüksek temas	Yüksek sıcaklık, Korozyon	Elektrik santralleri
Doğrudan Metanol (veya Etanol) yakıt hücresi (DMFC veya DEFC)	50-100°C	<1W - 200W	CH ₃ OH, (C ₂ H ₅ OH)	Ucuz Yakıt, Kolay depolanan sıvı yakıt	Düşük verim, metanolün zehirli bir yakıt olması	Portatif sistemler
Doğrudan Bor hidrür yakıt hücresi (DBFC)	20-100°C	1W - 200W	BH ₄ ⁻¹	Alternatif yakıt, yüksek açık uç gerilimi	Yakıtın elde edilmesi zor	Deneme aşamasında
Doğrudan Glikoz yakıt hücresi (Biyolojik yakıt hücreleri) (DGFC)	10-50°C	1µW - 20µW	C ₆ H ₁₂ O ₆	Yakıt vücudta bol miktarda bulunmakta, Glikozdan bakterisiz olarak akım üretimi	Düşük güç yoğunluğu	Kalp pili, İlaç pompası, sensör



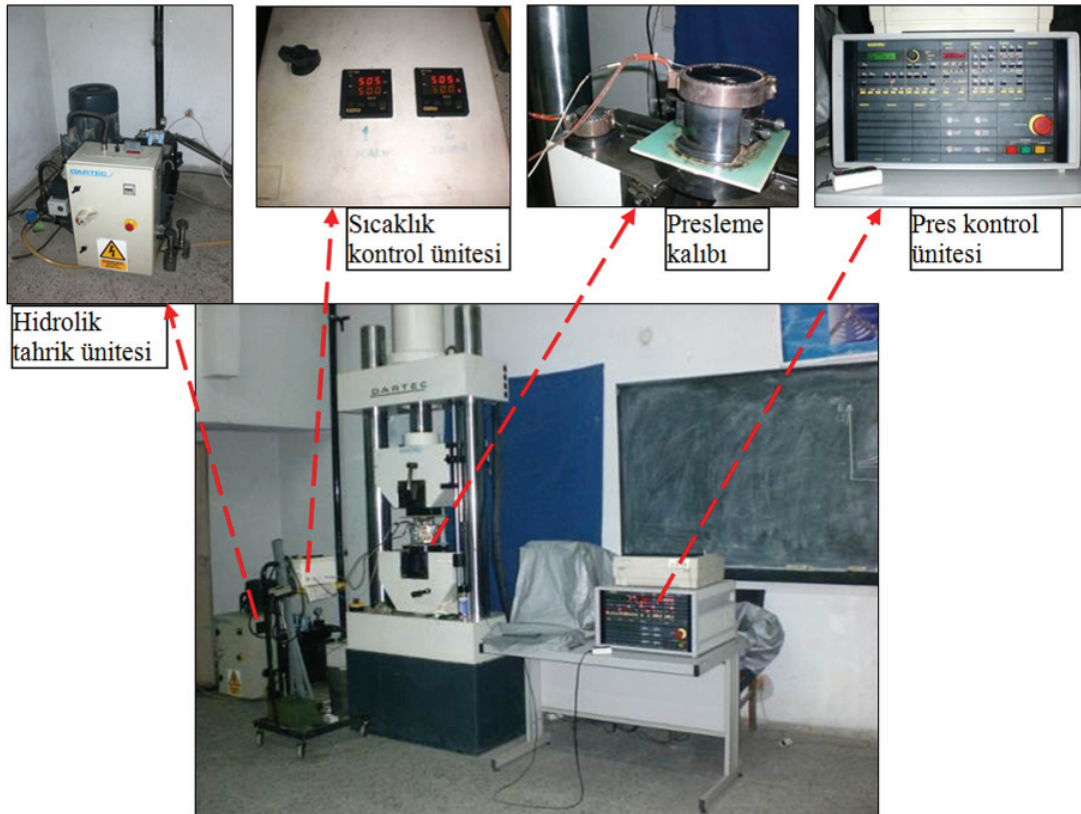
Şekil 2. Toz sıkıştırma kalıbının katı modeli ve ısıtma süresi sonunda kalıpta oluşan sıcaklık dağılımı (3D model of the compacting die and temperature gradient after heating)

ayrılmıştır. Deneylerde 100 μm kalınlığında SS316L paslanmaz çelik levhalar alt tabaka/yüzey olarak kullanılmıştır.

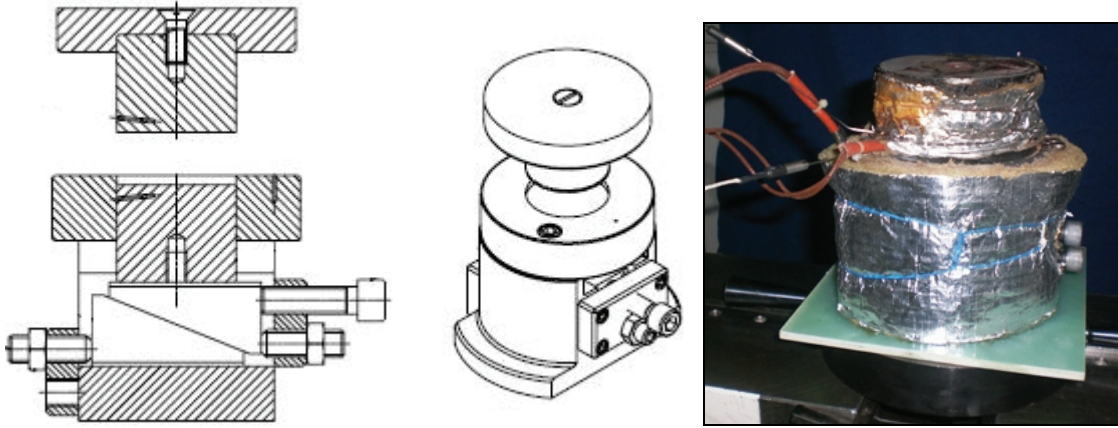
2.1. Toz Presleme Deney Düzeneği ve Deneyinin Yapılışı (Powder Compaction Test Setup and Performing the Tests)

Tozların preslenmesi için, Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü mekanik laboratuvarında bulunan DARTEC marka universal çekme-basma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3). Cihazın kontrol ünitesi kullanılarak basma yükü profili oluşturulmuştur. Sıkıştırma kalıbının resmi ise Şekil 4’te sunulmuştur.

Öncelikle, düz yüzeyli numuneler oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu maksatla 55 mm çapında kesilen plakaların, tozlara doğrudan temas edecek yüzeyleri zımparalanarak hazırlanmıştır. 75 μm elek altı tozlar, yaklaşık 2 mm kalınlıkta bir katman oluşturacak şekilde alt kalıba koyulmuştur. Bu tozların üzerine plaka yerleştirilmiştir. Daha sonra üst zımba yerleştirilerek ve kalıp etrafına ısı yalıtım malzemeleri sarılarak kalıp ısıtılmıştır. İstenilen sıcaklığa gelene kadar ısıtma yapıldıktan sonra, önceden ayarlanmış basınç değerine 10 saniyede ulaşacak şekilde rampa girişi uygulanmış ve sistem bu basınç altında 60 s bekletilmiştir. Bu süre bitiminde pres üst çenesi kalıp üst zımbasından ayrılmış, yalıtım ceketleri çıkarılarak



Şekil 3. Toz presleme deney düzeneği (Experimental setup)



Şekil 4. Toz sıkıştırma kalıbının montaj resmi (Assembly of the compacting die)

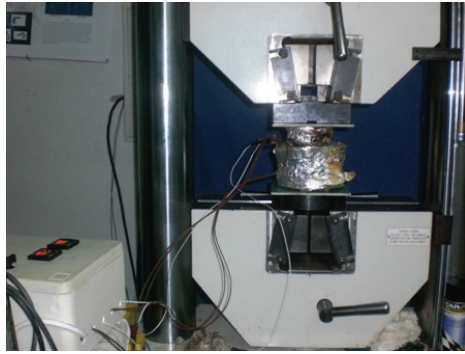
kalıbın soğuması beklenmiştir. Şekil 5'te kalıptan çıkan numuneler görülmektedir.

Presten çıkan numuneler, tozların kendi aralarında tutunduğunu ancak alt plakaya tutunmadığını ortaya koymuştur. Kullanılan plakalar haddeden geldiği gibi preslenmiş, herhangi bir yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmamıştır. Dolayısıyla plakalara ait pürüzlülük değerlerinin yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Plakada yüzey pürüzlülüğü artırma işlemi öncelikle kaba zımparalarla gerçekleştirilmiş ve presleme işlemi tekrarlanmıştır. Ancak başarılı sonuç alınamamıştır. Bu durumda daha etkin bir yöntem kullanılarak plakalarda daha yüksek yüzey pürüzlülük değerlerine

ulaşılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Araştırmalar neticesinde, kimyasal yöntemlerin başarılı sonuçlar verebileceği, yüzeylerin korozyona uğratılması neticesinde yeterli pürüzlülükler elde edilebileceği anlaşılmıştır. Pürüzlülük artırma çalışmaları aşağıdaki başlık altında verilmiştir.

2.2. Kimyasal Yöntemle Yüzey Pürüzlülüğünün Arttırılması (Surface Roughness Increasing by a Chemical Method)

Plakaların yüzey pürüzlülüklerini artırmak için malzemeler 30 gün süreyle %20NaCl, %18HCl, %20Fe₃Cl çözeltilerinde oda sıcaklığında bekletilmiştir. Literatürde bu sürenin 180 güne kadar



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5. (a) Presleme, (b) Numunenin çıkarılması, (c) 450°C sıcaklık ve 100 MPa basınç altında tozların alt plakaya tutunmamış ancak kendi aralarında tutunmuş hali, (d) 490°C presleme sıcaklığı ve 150 MPa basınç altında plakaya bölgesel tutunmuş bir numune ((a) Compacting, (b) Sample ejecting, (c) a sample with bonding between powders but not bonding with substrate under 450°C temp. & 100 MPa pressure, (d) a sample with bonding between powders and substrate under 490°C temp. & 150 MPa pressure)

uzayabildiği görülmektedir [19]. Ancak bu sıvılarla yapılan pürüzlendirmeler yeterli olmamış tozlarla plakalar arasında tutunma sağlanamamıştır. İncelemeler neticesinde elektrolitik ortamlarda daha etkin korozyon sağlanabileceği görülmüştür. Bu yöntemde alt tabaka olarak kullanılan saçlar NaCl bulunduran elektrolitik bir ortam içerisine konulmuştur.

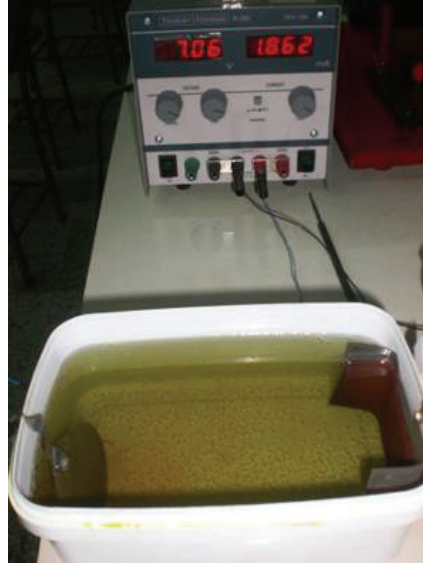
Paslanmaz çelikler en basit tanımıyla en az %10,5 krom içeren alaşımlardır. Bu çelikler elektrolitik ortamda iken elektrik potansiyeli artırıldığında numune anodik olarak davranmakta, metal çözünmesi başlamakta ve oksit koruyucu tabakası oluşmaktadır. Bu arada tane sınırları boyunca kromca az olan bölgeler ile taneler arasında da potansiyel farkı meydana gelmekte ve böylece taneler katodik, tane sınırları da anodik rol oynamaktadır [20]. Bu sebepten dolayı paslanmaz çelik altlıklar elektrolitik ortamda anot olarak polarize edilerek yüzeyde pürüzlülüğü artıracak korozyon hedeflenmiştir.

Çalışmada alt plaka olarak kullanılan SS316L levha (100 µm kalınlığında) anot olarak, katot olarak da yine aynı levhadan oluşturulmuş bir başka levha

kullanılmıştır. Elektrolitik sıvı içerisinde elektrot bağlantısı olmayacak şekilde katot bağlantı ucu çıkarılmıştır. Anot levhasının tek tarafı (korozyonun istendiği yüzey) 80 mesh zımpara ile pürüzlendirilmiştir. Anodun bu pürüzlendirilmiş yüzeyi katot tarafına doğru konumlandırılmıştır. Pürüzlülük deneyleri önce farklı çözeltilerde oda sıcaklığında yapılmış ancak belirgin bir pürüzlülük artışı gözlenmemiştir. Fakat sıcaklık artışına bağlı olarak korozyonun hızla arttığı gözlemlenmiştir. Bu gözlem, çözelti kabı içerisindeki $FeCl_2$ floklarının hızlanması yani tabanda bu partiküllerin demetler halinde birikmesinin ve belirginleşmesidir (Şekil 6).

Sıcaklığın etkisinin görülmesi üzerine, 70°C üzerinde bir sıcaklığa sahip %_(w/w)20 (kütlece) NaCl çözeltisinde Şekil 7’de görüldüğü gibi akım verilip, tepkime başlatılmıştır.

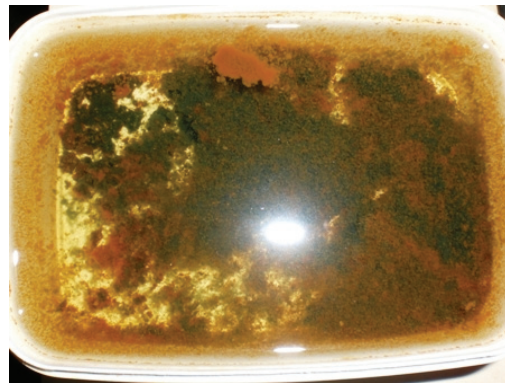
Deneylerde 32V-2A DC güç kaynağı kullanılmış ve bekleme süresi olarak da 8 dakika belirlenmiştir. İlk yüksek pürüzlülük değerine sahip yüzeyler elde edilip, olumlu sonuçlar alınmasından sonra sekiz adet plaka hazırlanmış ve aynı şartlarda korozyona uğratılmıştır.



(a)

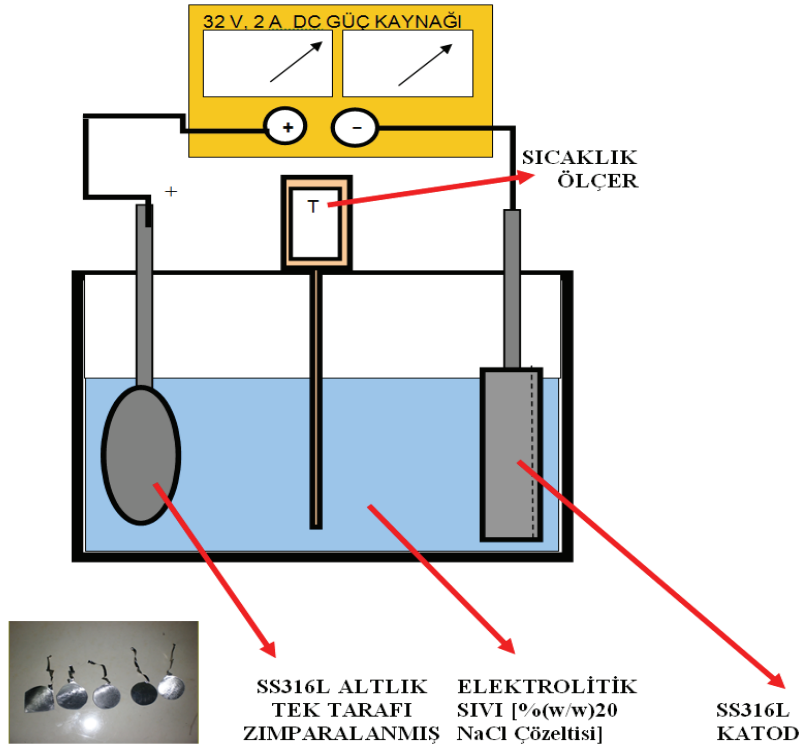


(b)



(c)

Şekil 6. (a) Korozyon oluşturma düzeneği, (b) Numune hazırlama, (c) NaCl çözeltisinde $FeCl_2$ birikmeleri (Setup for creating corrosion, (b) Sample preparing, (c) $FeCl_2$ blocks in the NaCl dispersion)



Şekil 7. Altlıkları pürüzlendirmek için hazırlanan düzeneğin şematik görünümü (Schematic view of the setup for roughening the substrates)

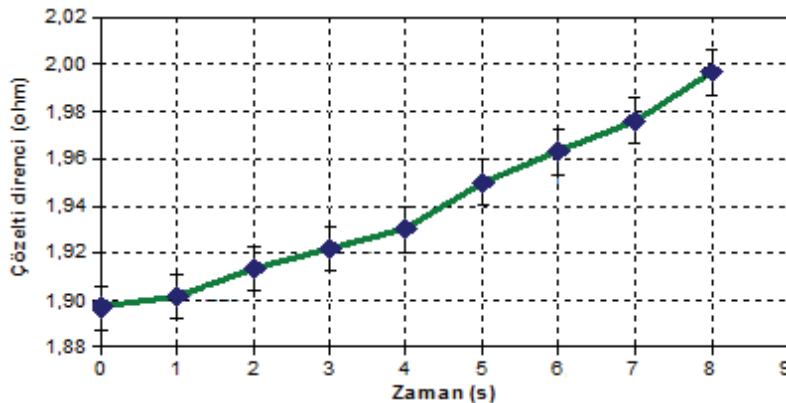
Deney sırasında zaman ilerledikçe güç kaynağından okunan besleme geriliminde bir artış gözlemlenmiştir (başlangıçtaki gerilim 3,8V-4V arasındadır). Gerilimdeki artışın nedeni çözeltinin iletkenliğindeki azalmadır. Çözelti iletkenliğinin azalması, serbest Cl⁻ iyonlarının azalmasını ifade etmektedir. Bu durum, tepkimenin gerçekleşmekte olduğunu göstermektedir. İletkenliğin azalmasıyla meydana gelen çözelti iç direncinin artışı gerilimde yükselme olarak kendini göstermektedir. Bu artışın 8 dakika içerisindeki değişimi Şekil 8’de görülmektedir.

Elde edilen sekiz adet plakanın pürüzlülük değerleri Taylor Hubson SURTRONIC 3+ pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler sonucundaki ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) ve profildeki tepe-çukur yükseklikleri (Rz) Şekil 9’daki grafikte verilmiştir. Ra ortalama değeri 1,7 µm civarında iken

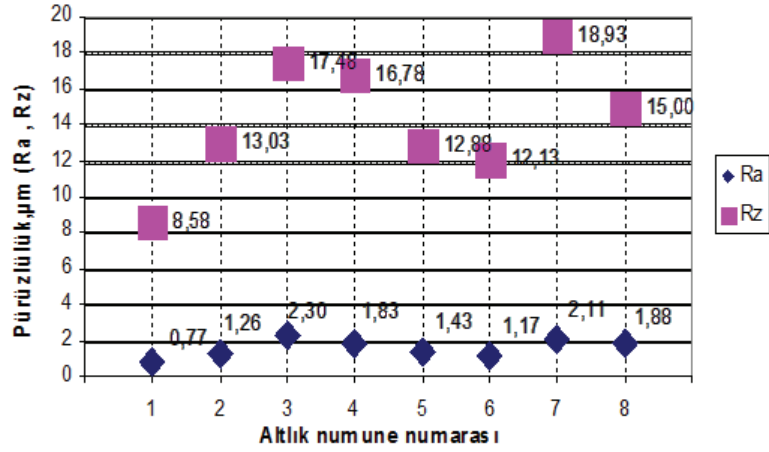
Rz değerleri 8,58–18,93 µm arasında değişmektedir. Ortalama Rz değeri ise 14,4 µm civarındadır. Bu fark düzgün dağılmış bir yüzey korozyonunun olmadığını göstermektedir. Normal bir pürüzlülük testinde Rz/Ra oranının 4 civarında olması gerekir [21].

Pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinden sonra, sayısal ortama görüntü aktarabilen OLYMPUS marka GX71 modelindeki optik mikroskopta numunelerin yüzeyleri incelenmiştir. Elde edilen en düşük ve en yüksek pürüzlü yüzeyler Şekil 10’da görülmektedir.

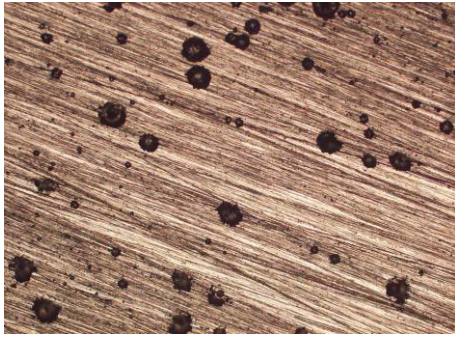
Bu şartlarda; pürüzlülük değerleri Ra=0,77 µm, Rz=8,58 µm olarak ölçülmüş olan düşük pürüzlülük değerine sahip plaka kullanılarak T=500°C ve P=150 MPa şartlarında preslenmiş, ancak altlığa tutunma gerçekleşmemiştir. Tozlar geri kalan pürüzlendirilmiş altlıklara T=500°C ve P=200 MPa şartlarında pres-



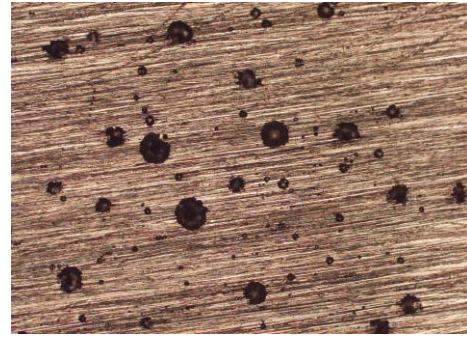
Şekil 8. Elektrolitik çözelti direncinin zamanla değişimi (Resistance of the electrolytic solution vs. time)



Şekil 9. Alt plaka numunelerine ait Ra ve Rz değerleri (Ra and Rz values of substrates)



Ra=0,77 µm, Rz=8,58 µm
(Düşük pürüzlülük değerine sahip plaka)



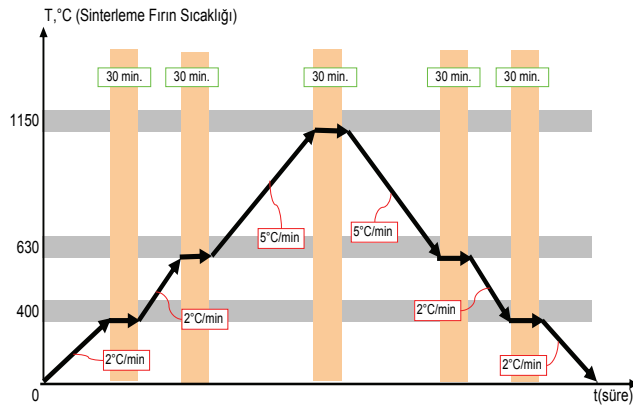
Ra=2,30 µm, Rz=17,48 µm
(Yüksek pürüzlülük değerine sahip plaka)

Şekil 10. En düşük ve en yüksek pürüzlü numunelere ait yüzey görüntüleri (50x) (Optical view of the surfaces of low and high roughness valued substrates)

lenmiş, hepsinde hem tozlar hem de altlık arasında tutunma sağlanmıştır. Altlığa tutunan bu numuneler, 1150°C sıcaklıkta 30 dk. beklenmek suretiyle koruyucu atmosferde sinterlenmiştir. Koruyucu gaz olarak %95 Argon %5 Hidrojen karışımı kullanılmıştır. Sinterleme işlemi PROTHERM marka PTF 12/38/250 model tüp fırında gerçekleştirilmiştir (Şekil 11).

Sinterleme sonucunda malzeme üzerinde görünür renk değişimleri meydana gelmiştir. Yani numunede sinterleme sırasında oksijenle tepkime gerçekleşmiştir. Buna gerekçe olarak koruyucu gaz atmosferinin yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Bu durum koruyucu gaz karışım oranından veya fırına giren koruyucu gaz karışımının debisinden olabileceği gibi, tüp fırının girişinde ve çıkışında dışarıdan havanın girişi tamamen engellenememiş de olabilir. Bunun yanında, disk şeklinde giren malzemede şekil değişiklikleri (çarpılmalar) meydana gelmiştir. Altlığın tutunduğu yüzeyde meydana gelen bombenin derinliği 3 mm civarındadır. Bu durum ise yüksek gözenekliliğin bir tarafta tam dolu kısmın ise diğer tarafta olması nedeniyle genleşmelerin (daralmaların) farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu ise bir dezavantaj

rinin yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Bu durum koruyucu gaz karışım oranından veya fırına giren koruyucu gaz karışımının debisinden olabileceği gibi, tüp fırının girişinde ve çıkışında dışarıdan havanın girişi tamamen engellenememiş de olabilir. Bunun yanında, disk şeklinde giren malzemede şekil değişiklikleri (çarpılmalar) meydana gelmiştir. Altlığın tutunduğu yüzeyde meydana gelen bombenin derinliği 3 mm civarındadır. Bu durum ise yüksek gözenekliliğin bir tarafta tam dolu kısmın ise diğer tarafta olması nedeniyle genleşmelerin (daralmaların) farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu ise bir dezavantaj



Şekil 11. Sinterleme fırını ve uygulanan sıcaklık profili (Sintering furnace and applied temperature profile)

sayılmayıp, bazı T/M parçalarında da olduğu gibi, sinterlemeden sonra bir kalibrasyon işleminin uygulanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Gözeneklilik değerlerinin belirlenmesi için sinterlenmiş numunelerin yüzeyleri parlatılarak optik mikroskopta incelenmiştir. Görüntüler düzenlendikten sonra Image-J™ görüntü analiz yazılımı yardımıyla binary modunda (ikili renk modu) gözeneklilik ölçümü yapılmıştır (Şekil 12). Her numunenin farklı bölgelerinden 7 adet görüntü analiz edilmiş ve numunelerin gözeneklilik oranı ortalama %29,6 olarak tespit edilmiştir. Bunun, daha önceki çalışmalarda başka metallerde elde edilen %22-41 gözeneklilik değerleriyle [1,8] kıyaslandığında iyi bir değer olduğu anlaşılmaktadır. Ölçülen gözeneklilik değerleri %23,3 ile %35,6 arasında değişmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada paslanmaz çelik tozlarının paslanmaz çelik bir levhaya tutundurulması için yüksek gözenekliliğe sahip parçaların üretimi ve bunun için de sıcaklık, basınç ve toz boyutu parametrelerinin araştırılması hedeflenmiştir. 500°C sıcaklık ve 50 MPa basınç altında tozlar birbiri arasında tutunurken doğrudan hadde ile elde edilmiş yüzeye sahip plakada tutunma sağlanamamıştır. Basınç değeri 200 MPa'a kadar artırılarak testler yapılmış ancak başarılı olunamamıştır. Bu nedenle gözeneklilik testlerinden önce alt plaka yüzeyi pürüzlülüğünün artırılması konusuna yoğunlaşmıştır.

Hadde yüzeyine sahip plakaların zımpara ile pürüzlendirilmesi tutunma için yeterli olmamıştır. Bunun üzerine kimyasal yöntemle bir pürüzlülük artırma çalışması yapılarak, mekanik tutunma için plakadaki minimum pürüzlülük değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kararlı bir korozyon oluşturmak üzere elektrolitik NaCl çözeltisi hazırlanmış ve oda sıcaklığı üzerinde (yaklaşık 70°C) numuneler sekiz dakika süreyle bekletilmiştir. Plakalarda elde edilen ortalama pürüzlülük değeri $Ra=1,7 \mu m$, Rz değeri ise $14,4 \mu m$ civarındadır.

Ancak gerek Rz/Ra oranının yaklaşık 8 olması ve gerekse plaka yüzeyinden alınan fotoğraflarla pürüzlülüğün dengeli olarak dağılmadığı anlaşılmaktadır. Plakalarda meydana gelen pitting korozyonu deliklerinin akım, zaman, konsantrasyon ve levha kalınlığı parametreleri ile farklılaştırılabileceği görülmektedir.

Yapılan çalışmalarda, özellikle sinterleme işleminde koruyucu ortam bakımından şartların yeterince sağlanmadığı anlaşılmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalardan sağlıklı sonuçların alınabilmesi için laboratuvar şartlarının (sinterleme işlemi) iyileştirilmesi önerilmektedir.

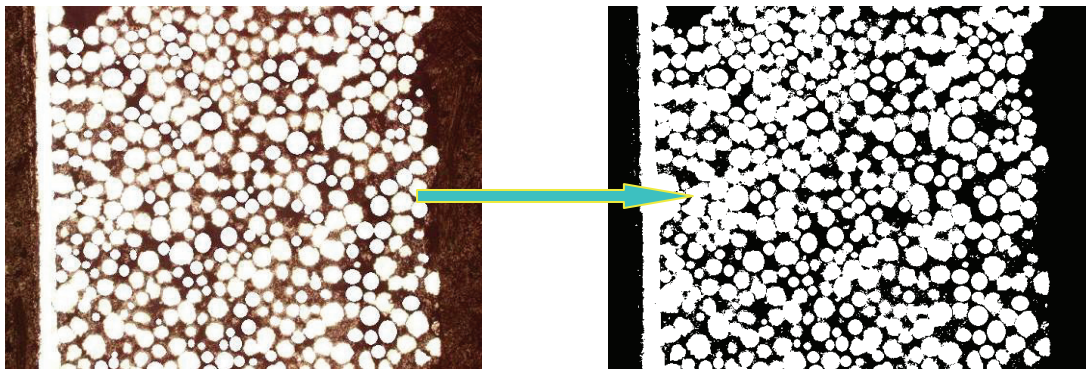
Çalışma sırasında düz yüzeylere sahip numuneler elde edilmiştir. Alt plakaya tutunmanın başarı ile sağlanmasının ardından, yüzey alanını artırmak amacıyla mikro kanalların bulunduğu numunelerin üretilmesi ve bu yüzeylere ait gözenekliliğin incelenmesi planlanmaktadır.

Kimyasal yöntemden farklı olarak elektroerezyon yöntemi, daha kontrol edilebilir yüzey pürüzlendirme imkanı sunabilir. Bu sebeple, yüzey pürüzlendirmede elektroerezyonla pürüzlülük artırma yönteminin kullanılması önerilmektedir.

Pürüzlendirilmiş plakalar ve tozlar $T=500^\circ C$ ve $P=200$ MPa şartlarında preslenmiş, hepsinde hem tozlar hem de altlık arasında tutunma sağlanmıştır. Böylece plaka yüzeyinin pürüzlülüğüne bağlı olmakla birlikte paslanmaz çelik tozlarından gözenekli yüzeyler üretebilmek için presleme şartlarının bu değerler olduğu anlaşılmıştır.

Analizler neticesinde, tutunmanın sağlandığı minimum presleme şartlarında gözeneklilik oranı %29,6 olarak tespit edilmiştir. Pürüzlülüğün artırılması ile tutunmayı sağlayan basınca bağlı olarak gözeneklilik değerlerinin değişebileceği görülmüştür.

Sonuç olarak, yakıt hücrelerinin ısı değiştiricilerinde kullanılmak üzere T/M yöntemi ile paslanmaz çelik tozlarından mamul gözenekli yüzeylerin endüstriyel olarak üretilebilecekleri ve bunun için de presleme



Şekil 12. Gözeneklilik analizi için alınan resim ve siyah-beyaza dönüştürülmüş görüntüsü. (Optical view of a compacted sample for porosity analysis and its conversion to a binary code)

şartlarının 500°C sıcaklık, 200 MPa basınç ve en az 2 µm ortalama pürüzlülüğe sahip alt plaka kullanımı şeklinde olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Liter S.G., Kaviany M., “Pool-boiling CHF enhancement by modulated porous-layer coating: theory and experiment”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Cilt 44, 4287–4311, 2001.
2. İnternet: Türk Toz Metalurjisi Derneği “Toz Metalurjisi Üretim Teknikleri” http://www.turktoz.gazi.edu.tr/ttmd_tr.htm, 2009.
3. Qiao, Y.X., Zheng, Y.G., Okafor, P.C., Ke, W., “Electrochemical behaviour of high nitrogen bearing stainless steelin acidic chloride solution: Effect of oxygen, acid concentration and surface roughness”, **Electrochimica Acta.**, Cilt 54, 2298–2304, 2009.
4. Sato, S., Enoeda, M., Kuroda, T., Oharo, Y., Mohri, K., Cardella, A., “Characteristic evaluation of HIP bonded SS/DSCu joints for surface roughness”, **Fusion Engineering and Design**, Cilt 58-59, 749–754, 2001.
5. Torikai, Y., Penzhorn, R.D., Matsuyama, M., Watanabe, K., “Tritium uptake by SS316 and its decontamination”, **Journal of Nuclear Materials**, Cilt 329-333, 1624–1628, 2004.
6. Wang, Y., Northwood, D.O., “An investigation into polypyrrole-coated 316L stainless steel as a bipolar plate material for PEM fuel cells”, **Journal of Power Sources.**, Cilt 163, 500–508, 2006.
7. Neikov O., Naboychenko S., Mourachova I., Gopienko V., Frishberg I., **Handbook Nonferrous Metal Powders: Technologies and Applications**, Elsevier, Amsterdam, 2009.
8. Cora Ö. N., Usta Y., Koç Y., “Micro-manufacturing of micro-scale porous surface structures for enhanced heat transfer applications: an experimental process optimization study” **Journal of Micromechanics and Microengineering**, pp.1-19, 2009.
9. Koç, M, Usta, Y., Karakoç, A., “Investigations on thermo-mechanical fabrication of micro-scale porous surface features”, **Journal of Power Sources**, Cilt 179, 592–602, 2008.
10. Mahabunphachai, S., Koç, M., Ni, J., “Development of a novel process for manufacturing of fuel cell bipolar plates: internal pressure assisted embossing of microchannels with in-die mechanical joining”, **2006 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering**, MSEC2006-21034, Ypsilanti, 1-5, 2006.
11. Gu, D., Shen, Y., “Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS-mechanical fabrication of micro-scale porous surface features”, **Applied Surface Science**, Cilt 255, 1880–1887, 2008.
12. Molin, S., Gazda, M., Kusz, B., Jasinski, P., “Evaluation of 316 L porous stainless steel for SOFC support”, **Journal of the European Ceramic Society**, Cilt 29, 757–762, 2009.
13. İnternet: Hacettepe Üniversitesi “Yakıt Hücrelerinin Tarihi” <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~yilser/yakitpili.htm>, 2010.
14. İnternet: University of Denver “The Telegraph Line: Batteries” <http://mysite.du.edu/~jcalvert/>, 2010.
15. İnternet: The Hebrew University of Jerusalem The Institute of Chemistry “Origin of the Electric Current: Galvanic Batteries” <http://chem.ch.huji.ac.il/history/grove.htm>, 2010.
16. F. Barbir, “PEM Fuel Cells: Theory and Practice”, **Elsevier**, 2005.
17. Dündar F., **PEM tipi yakıt hücrelerinde kullanılan katalizörlerde farklı karbon desteği kullanılarak yüzey alanının artırılması ve kinetik özelliklerinin geliştirilmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2006.
18. Berning, T., Djilali, N., “Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell: A Parametric Study Using a Three-Dimensional Computational Model Transport phenomena in a PEM fuel cell”, **11th Canadian Hydrogen Conference**, Victoria, 699-707, 2001.
19. İnternet: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası “Çimento Tipinin Donatı Korozyonuna Etkisi” <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/3157.pdf>, 2010.
20. İnternet: TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası “AISI 316L Tipi Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Taneler Arası Korozyona Duyarlılığının Elektrokimyasal Polarizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi” http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi140/d140_5061.pdf, 2010.
21. TS 2040 EN ISO 1302, “Geometrik mamul özellikleri (GMÖ) – Teknik mamul dokümantasyonunda yüzey durumlarının gösterilişi”, **Türk Standardı**, (2005).