



Effect of the Intergranular Carbide on the Mechanical Properties of 316L Open Cell Steel Foams

Ali Can KAYA¹

Keywords

metal foams, carbide, mechanical properties, microstructure.

Article History

Received

19 Jan, 2019

Accepted

17 Mar, 2018

Abstract

316 L steel foams are lightweight structures that are considered to replace bulk steel materials. It is thought that it can be used as armor material with its energy absorption feature. In this study, the steel foams were annealed at three different temperatures, 650, 850 and 1050 degrees, respectively. In microstructure, it was observed that carbide was produced in materials which were annealed at 650 °C for 24 hours. It was seen that carbides were not formed at other temperatures. Mechanical properties, however, did not change in the small modifications of the microstructure. For this reason, it is not expected that 316L steel foams will have a change in performance at high temperatures and in the severe conditions.

316L Açık Hücreli Çelik Köpüklerde Tanelerarası Karbidin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi

Keywords

metal köpük, karbid, mekanik özellik, mikroyapı.

Makale Geçmişi

Alınan Tarih

19 Ocak 2019

Kabul Tarihi

17 Mart 2019

Özet

316 L çelik köpükler yığın çelik malzemelerin yerine düşünülen hafif yapılarıdır. Enerji absorbe etme özelliği ile zırh malzemesi olarak kullanılabilen çok fonksiyonlu malzemelerdir [1]. Ayrıca yüksek poroslu yapısı sayesinde hafiftirler ve de enerji absorbe etme özellikleri ve spesifik mekanik özellikleri oldukça yüksektir [1]. Bu sebeple gelecekte araçların gövdelerinde zırh malzemesi olarak yer alabileceği düşünülmektedir [2].

1. Giriş

316L çelik köpükler açık hücreli yapısı sayesinde işi ve ses yalıtımı uygulamalarının yanı sıra katalizatörlere destek sağlamak için kullanabilen çok fonksiyonlu malzemelerdir [1]. Ayrıca yüksek poroslu yapısı sayesinde hafiftirler ve de enerji absorbe etme özellikleri ve spesifik mekanik özellikleri oldukça yüksektir [1]. Bu sebeple gelecekte araçların gövdelerinde zırh malzemesi olarak yer alabileceği düşünülmektedir [2].

¹ Corresponding Author. ORCID: 0000-0003-2856-5508. Türk-Alman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, alican.kaya@tau.edu.tr

Açık hücreli çelik köpüklerin mekanik özellikleri önceki çalışmalarda az sayıda olsa da yer bulmuştur [3]-[8]. Bu çalışmalarda mikroyapının köpüklerin deformasyonuna ve enerji absorbe etme özellikleri üzerine olan etkileri incelenmiştir. Önceki çalışmalarımızda [7] kırıç mikroyapılarında bulunan porların ve tam olarak sinterlenmemiş toz parçalarının deformasyon üzerine olan etkisi 3 boyutlu olarak sinkrotron tomografisi yardımıyla araştırılmıştır. Buna göre çatlak mikroyapı içerisinde hareket ederken toz parçası tarafından saptırılır ve çatlak toz parçası çevresinden devam ederler. Aynı şekilde 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilmiş ve büyük porlar etrafında gerilmelerin konstrasyonu gösterilmiştir. Fakat sonlu elemanlar yöntemi için oluşturulan model için tomografi verisi kullanılmış ve veride gözükmeyen bazı mikroyapı elemanları (küçük boyuttaki porlar) simülasyonda dikkate alınmamıştır. Bunun yanında kırıç mikroyapısının makro seviyede enerji absorbe etme özelliği üzerine olan etkisi incelenmiştir. Buna göre 316L çelik köpüklerde oluşan TRİP (plastik deformasyon sonucu oluşan faz dönüşümü) etkisi ile metalin sertleşme özelliği artmış [3] ve bununla çelik köpüklerin enerji absorbe etme kapasitesi artarken enerji absorbe etme verimliliği azalmıştır [8].

Gibson-Ashby tarafından oluşturulan tek hücre modeline göre köpüğün mekanik özellikleri köpüğün bağıl yoğunluğu ile önemli ölçüde değişirken [9], enerji absorbe etme özellikleri köpüğün basma kuvveti altında gerilme-gerinme eğrisi şekline bağılı olarak değişmektedir. Gerilme gerinme eğri şeklinin ise mikroyapının değiştirilmesiyle değişebileceği belirtilmiştir [8].

316L paslanmaz çelikleri daha çok malzemenin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çeliklerde kromyum zengini $M_{23}C_6$ karbidi tane sınırları kenarlarında ısıtılardan veya kaynak işleminden dolayı oluşabilir. Karbon atomları sıcaklıkla tane sınırlarına yüzey enerjisini minimum tutmak için difüze olurken, kromyum atomları daha yavaş difüze olur ve bu kromun oluşan karbidlerin çevresinde tane sınırları bölgesinde tükeltilmesine sebep olur. Kromun tane sınırlarında harcanmasıyla oluşan karbid çeliğin korozyona karşı direncini bozar ve buna sensitizasyon (duyarlılaşma) denilir. Sensitizasyon karbon miktarına önemli ölçüde bağılıdır ve karbon miktarının artmasıyla sensitizasyonun sıcaklıkla oluşması daha da kolaylaşmaktadır [11]. 316L paslanmaz çeliği maksimum % 0.030 karbon miktarına sahiptir. 316L paslanmaz çelikler 24 saat boyunca 538-816 °C aralığında sıcaklığa maruz bırakıldığında tane sınırlarında krom karbidler oluşmaktadır. Sensitizasyon tane sınırlarında korozyonun oluşmasına sebep olurken uygulama alanlarında kaçınılması gereken bir özelliktir [12].

Tane sınırlarında oluşan karbidin yığın malzemelerin mekanik özellikler üzerine etkisi iyi bilinmektedir. Fakat çok küçük boyutlu kırıçlere sahip olan açık hücreli metal köpüklerde ısıtılardan ve ısıtılardan sonucu oluşan taneler arası karbidlerin mekanik özelliklere olan etkisi bilinmemektedir. Kesit alanı üzerinde var olan tane sayısının kırıçlerin eğilme özellikleri üzerine büyük etkisi olduğu bilinmektedir. Kesit alanı üzerinde tane sayısının bire düşmesiyle kırıçlerin sünekliliğinde artma olduğu belirtilmiştir [13]. Fakat μm boyutlu kırıçlerde taneler arası karbidin köpük deformasyonuna olan etkisi bilinmemektedir.

Bu çalışmada 316L çelik köpükler farklı ısıtma işlemlere maruz bırakılmış ve mekanik özellikleri basma deneyi ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar yığın malzemelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

2. Malzeme

45 ppi'lik (inç başına por sayısı) açık hücreli 316L çelik köpükler Hollomet (Dresden, Almanya) firmasından satın alınmıştır. Üretimi kabaca şu şekildedir [1]. İlk önce şu, organik yapıştırıcı ve metal tozlarıyla bir karışım hazırlanmıştır. Bu poliüretan şablonu hazırlanan karışım ile silindirler yardımıyla kaplanmıştır. Karışımla kaplanmış poliüretan şablon kompoziti kurutulduktan sonra 723 K derecede nitrojen gazı altında bir saat süreyle ısıtılmış ve poliüretan ve organik yapıştırıcı kompozitten uzaklaştırılarak yalnız çelik bırakılmıştır. Ve son olarak hidrojen gazı altında 1523K derece de 1 saat süreyle sinterleme gerçekleştirilerek fırında soğumaya bırakılmıştır.

3. Metod

3.1. Metalurjik İşlemler

Mikroyapı muayenesi için açık hücreli çelik kopuk parçalar epoksi reçine içerisine yerleştirilmiştir. Bunlar SiC taşlama taşı ile bir kaç adımda tane büyüklüğü 10 µm oluncaya kadar taslanmış ve ardından 3 dakika boyunca soğutucu ve elmas süspansiyon yardımıyla 3 ve 1 µm tane büyüklüğü ile cilalanmıştır. Tane sınırlarını görüntüleyebilmek için çelik kopuk V2A asidi ile 343K'de 40 saniye boyunca dağlanmıştır.

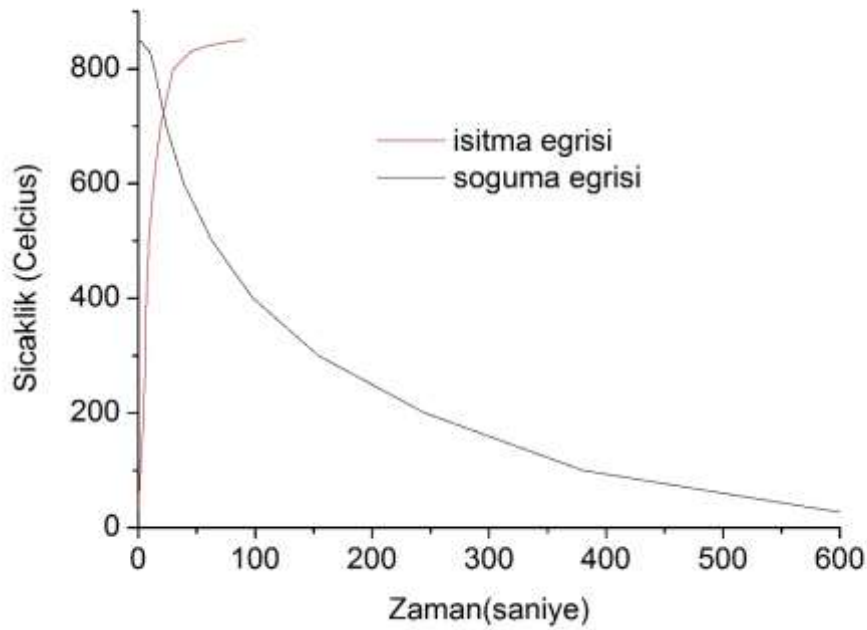
4. Isıl İşlem

Isıl işlem için Heraeus M110 tip (Fischer Scientific GmbH, Schwerte, Almanya) muflalı fırın kullanılmıştır. Açık hücreli çelik köpükler önce uzun bir cam tüp içerisine yerleştirilerek açık uçundan 50 mbar seviyesine vakumlanmıştır. Sonrasında cam tüp daha önceden ısıtılmış fırının içine yerleştirilmiştir. Gerçekleştirilmiş ısıtma işlemleri ile ilgili bilgiler aşağıdaki tabloda verilmiştir. Metal köpüklerin soğuması 9 K/saniye hızıyla gerçekleşirken, ısıtma 1.4 K/saniye hızıyla gerçekleşmiştir (Şekil 2).

Şekil 1.a) Malzemelerin vakum pompasıyla cam tüp içerisinde vakumlanması, siyah ok malzemenin bulunduğu noktayı, kırmızı ok cam tüpü, mavi ok vakum pompasını işaret etmektedir. **b)** İşıl işleminin gerçekleştirildiği fırın. Siyah ok cam tüpün fırına yerleştirildiği noktayı göstermektedir.



Şekil 2. Açık hücreli çelik köpüklerin ısıtma soğuma eğrisine bir örnek



Tablo 1. İşıl işleme maruz bırakılan parçalar ve gerçekleştirilen işıl işlemler

Malzeme	Miktar (adet)	Sıcaklık	İşıl işlem süresi	Atmosfer
316L	3	650	24 saat	vakum
	3	850	24 saat	vakum
	4	1050	24 saat	vakum

5. Basma Deneyi

Açık hücreli 316L çelik köpüklerin basma deneyleri Kammrath und Weiss (Kammrath & Weiss, Düsseldorf, Germany) mikro basma çekme test aletiyle, 5µm/seç basma hızı ile gerçekleştirilmiştir. 10kN'lük yük hücresi 1N'lük hassasiyetle kullanılmıştır. Uzama ölçüm çözünürlüğü yaklaşık olarak 1.2µm'dir. Parça boyutları ve test edilen parça sayıları tablo 1`de gösterilmiştir. Deneylerde yükleme tablo 1`de belirtildiği gibi hücre uzama eksenine dik veya paralel olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Her parça sürtünmeyi önlemek için önceden cilalanmış iki silindir arasına yerleştirilmiştir. Köpüklerin in-sitü testleri dijital mikroskop (DM; Keyence-100 vhx, Neu-İsenburg, Germany) altında gerçekleştirilmiştir. Basma deneyi sırasında parçaların yüzeyleri dijital mikroskopla görüntülenmiş ve her 15 saniyede resimler alınmıştır.

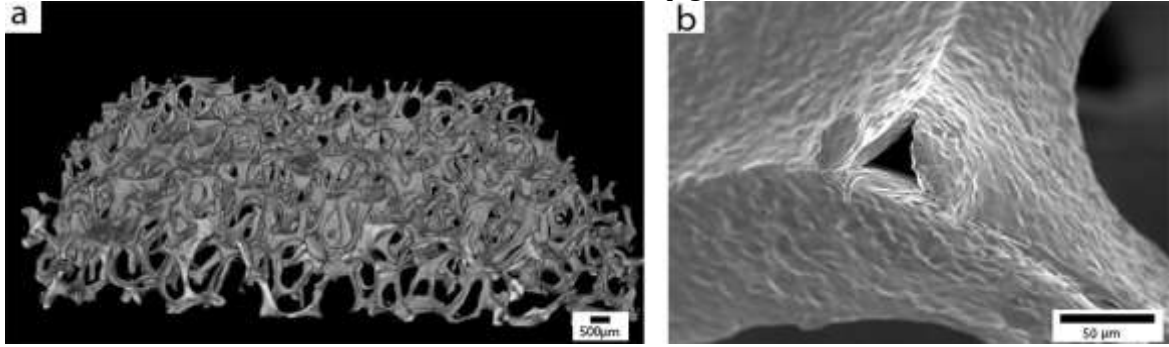
Metal köpüklerin elastik özellikleri [8] çalışmasında belirtildiği gibi ilk yükleme esnasında oluşan plastik deformasyonlardan dolayı tam elastik bir değer ölçülememektedir. Bundan dolayı ilk yükleme eğrisine kuazı elastik eğri denilir. Köpüklerin mukavemeti farklı metodlar ile belirlenebilir. Bu çalışmada %2 gerinimde kuazı elastik rejime paralel çizilerek gerilim-gerinim eğrisi ile kesiştiği nokta [8] çalışmasında olduğu gibi kopuk mukavemeti (σ_p) olarak ölçülmüştür. Sıklaştırma gerinimi ise [8] çalışmasında olduğu gibi %20-30 gerinimde bir paralel çizgi çizilerek, sıklaştırma eğrisine paralel olan bir başka eğriyle kesişme noktası olarak alınmıştır.

6. Sonuçlar

6.1. Makroyapı

Açık hücreli köpüklerin makroyapıları üretimde kullanılan açık hücreli Poliüretan şablonların şekillerini almaktadır. 3 boyutlu tomografik görüntüsü Şekil 3`te verilmiştir. İçi boş kirişin üstten görünüşü elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. Kirişteki boşluk bir üçgen şeklini almıştır ve üçgen köşelerinin deformasyona etkileri büyüktür. Gerilim yığılmasına sebep olmaktadır.

Şekil 3. a) Açık hücreli çelik köpüğün tomografik rekonstrüksiyonu, **b)** Tek kirişin elektron taramalı mikroskop görüntüsü.

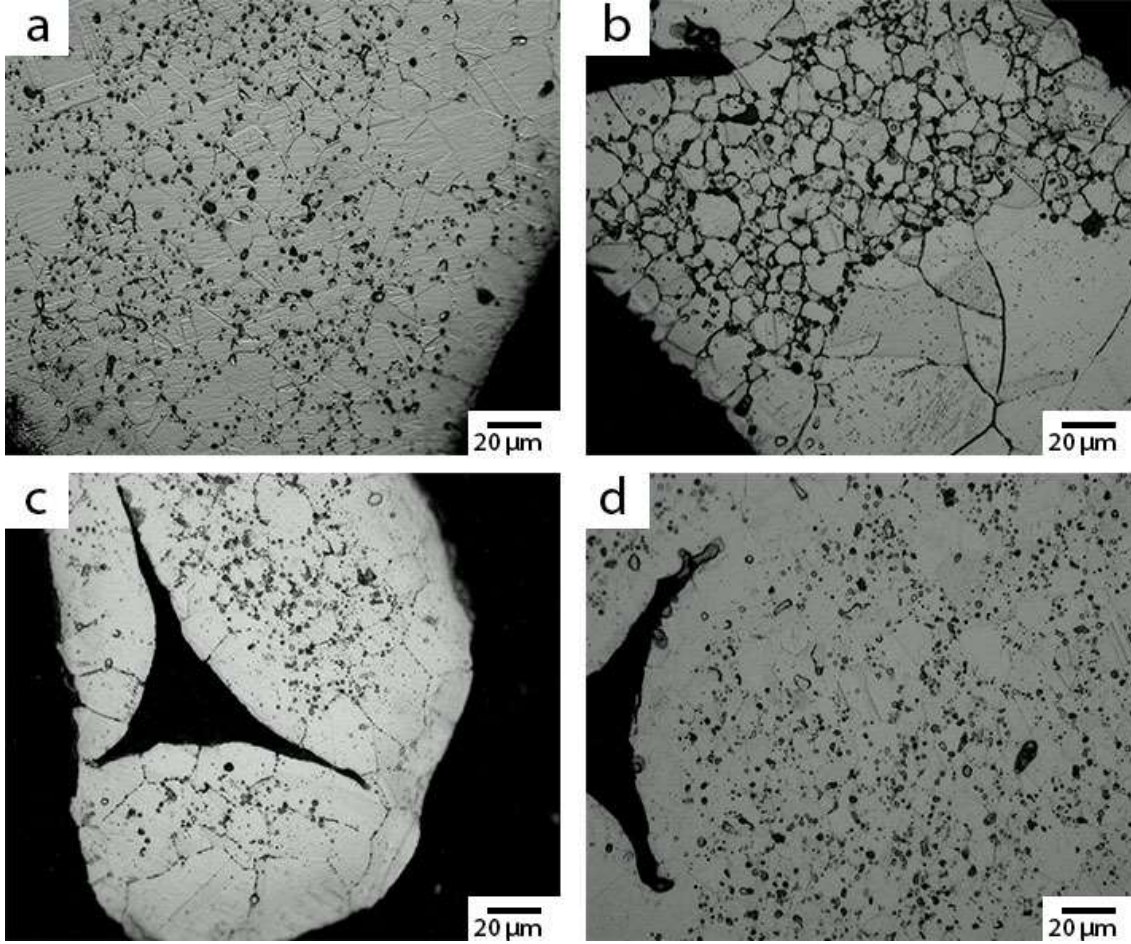


6.2. Mikroyapı

Sinterlenmiş ve tavlanmış çelik kopuk kirişlerin mikroyapıları Şekil 4`te görüldüğü gibidir. Tavlanmamış çelik kopuk kirişinin tane yapıları ve mikroporlarlar mikroyapı resiminde belirtilmiştir. 650 derecede tavlanmış 316L çelik kopuk kirişinin tane sınırlarında köyü renk almış karbidlerin olduğu görülmektedir.

850 ve 1050 derecede tavllanmış mikroyapılarda ise herhangi bir değişim gözükmemiştir ve tavlananmış çelik kopuk kırisindeki gibi mikroporların olduğu görölmektedir.

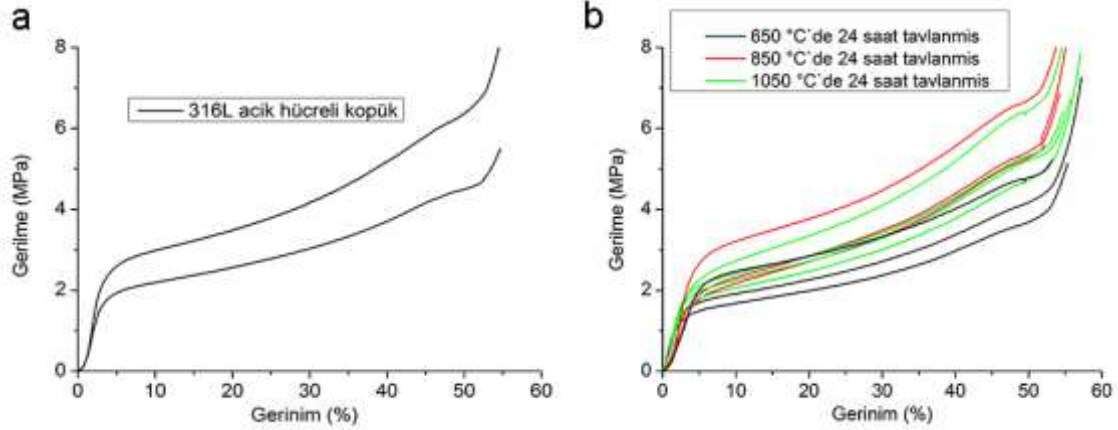
Şekil 4. 316L açık hücreli köpüğün dallarının **a)** tavlananmamış, **b)** 650 derecede tavlananmış, **c)** 850 derecede tavlananmış, **d)** 1050 derecede tavlananmış, çeliklerin mikroyapı resimleri.



7. Mekanik Özellikler

Tavlananmış ve tavlananmamış çelik köpüklerin gerilme-gerinim eğrileri sırasıyla Şekil 5a ve b'de görüldüğü gibi oluşmuştur. Kuazi elastik deformasyon, gerinim sertleşmesi taşıyan plato bölgesiyle takip edilerek birden artan sıkılaşıma gerinimiyle basma eğrisi tamamlanır (Şekil 5). Şekil 5b'de tavlananmış çelik köpüklerin her birinin eğrisi verilmiştir. Görüldüğü gibi tavlananmış çelik köpüklerin gerinim-gerilim eğrilerinde tavlananmamış çeliklere göre her hangi bir fark oluşmamıştır.

Şekil 5. 316L açık hücreli çelik köpüklerin basma gerilim-gerinim eğrileri, b) farklı sıcaklıklarda 24 saat tavllanmış çeliklerin basma gerilim-gerinim eğrileri verilmiştir.



Tablo 2. Çelik köpüklerin mekanik özellikleri

Numune	Ortalama bağıl yoğunluk	Köpük mukavemeti	Densifikasyon gerinimi
316L tavlınmamış [8]	8.5±0.7	1.6±0.3	52.3±0.6
650 °C de tavlınmış	7.5±0.4	1.8±0.4	51.1±0.7
850 °C de tavlınmış	8.7±0.3	2.2±0.6	53.0±0.4
1050 °C de tavlınmış	8.5±0.6	2.1±0.3	51.8±0.7

8. Tartışma

316L çelik köpükler farklı derecelerde ışıl işleme maruz bırakılmıştır. Beklendiđi gibi 650 derecede tavlannan çelik köpükte taneler arasında karbid oluşmuş fakat diğer sıcaklıklarda tavlannan çelik köpüklerde karbid oluşumu gerçekleşmemiştir.

Mekanik özelliklerinde tavlannanın herhangi bir etksi olmamıştır. Oluşan karbidlerin veya ışıl işleme çeliklerde meydana gelebileceği öngörülebilir gerilme azalması veya yumuşamanın da her hangi bir etksi görülmemiştir. Bunun en önemi sebebi de açık hücreli köpüklerin çok kompleks yapılı olması, kusurların örneğin mikroporların, delikli kiriş yapılarının deformasyonu domine etmesinden veya 316L çeliklerin sertleşme katsayılarının yüksek olmasından dolayı deformasyona büyük etkilerinin olmasıyla mekanik özelliklerde küçük mikroyapıdaki değişimler mekanik özelliklere etki etmemiştir. Yığın malzemelerde de aynı şekilde oluşan karbidlerin mekanik özelliklere olan etksi çok azdır. Öyle ki sadece gerinim özelliklerinde hafif bir düşme yaşanmıştır [14]. Köpüklerde bu gerçekleşen küçük değişim açık olarak görülememektedir. Çünkü köpüklerin mekanik özelliklerinde dalgalanma %20 oranındadır ve bu yüzden küçük değişimler büyük olasılık bu dalgalanma içerisinde belli olmamaktadır.

9. Sonuç

Farklı sıcaklıklarda tavllanmış 316L çelik köpüklerin mekanik özellikleri ölçülmüş ve oluşan karbidin mekanik özelliklere olan her hangi bir etkisi bulunmamıştır. Burada köpüklerin karmaşık makro ve mikroyapısı sebep olarak gösterilmiştir. Köpüklerin mekanik özelliklerinde büyük bir değişim ancak mikroyapıda oluşabilecek büyük değişimlerde beklenmektedir.

Referanslar

- [1] A.C.Kaya, Failure observations in sintered steel foams from the submicron to the macro scale, TU Berlin, Dissertation, 2018.
- [2] <https://materialdistrict.com/article/composite-metal-foams-stronger-lighter-tanks/> (Son erişim tarihi 26.12.2018)
- [3] D. P. Mondal, H. Jain, S. Das, A. K. Jha, Stainless steel foams made through powder metallurgy route using NH_4HCO_3 as space holder, Mater. Des. 88 (2015) 430-437.
- [4] E. M. Castrodeza, A. Gruttadauria, C. Mapelli, and D. Mombelli, Processing and Characterization of Dual Phase Steel Foams Featured by Different Pore Distribution, Steel Res. Int. 82 (2011) 918-925.
- [5] C. Mapelli, D. Mombelli, A. Gruttadauria, S. Barella, E.M. Castrodeza, Performance of stainless steel foams produced by infiltration casting techniques, J. Mater. Process. Technol. 213 (2013) 1846–1854.
- [6] J. Weise, J. Baumeister, D. Ehinger, L. Krüger, U. Martin, J. B. P. Junior, Investigation of processing, microstructure and mechanical behavior of 304L TRIP steel foams produced by injection moulding, in: 8th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams, Metfoam 2013.
- [7] A. C. Kaya, P. Zaslansky, A. Nikolaus and C. Fleck, Tensile failure observations in sintered steel foam struts revealed by sub-micron contrast-enhanced microtomography, Mater. Des. 105 (2016) 190-200.
- [8] A. C. Kaya, P. Zaslansky, M. Ipekoglu, C. Fleck, Strain hardening reduces energy absorption efficiency of austenitic stainless steel foams while porosity does not, Mater. Des. 143 (2018) 297-308.
- [9] L. J. Gibson, M. Ashby, Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1997.
- [10] A. S. LIMA, A. M. NASCIMENTO, H. F. G. ABREU, P. DE LIMA-NETO, Sensitization evaluation of the austenitic stainless steel AISI 304L, 316L, 321 and 347, J Mater Sci, 40 (2005) 139– 144
- [11] Ernest L. Hall, Clyde L. Briant, Chromium depletion in the vicinity of carbides in sensitized austenitic stainless steels, Metallurgical Transactions A, 15, 1984, 793–811.

- [12] ASTM A240/A240M, Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications, 2018 Edition, November 1, 2018
- [13] J. Zhou, S. Allameh and W. O. Soboyejo, Microscale testing of the strut in open cell aluminum foams, *J. Mater. Sci.* 40 (2005) 429-439.
- [14] S.Y. ChenD GAN, Effects of grain boundary carbides on the tensile and impact properties of type 316 stainless steel, *Materials Science and Engineering* 84, 1986, 65-76

© Copyright of Journal of Current Research on Engineering, Science and Technology (JoCREST) is the property of Strategic Research Academy and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.