

# INCONEL 718 GELİŞTİRİLDİ: ALLVAC 718 PLUS™

Sinem ÜZGÜR<sup>1</sup>, Yağız UZUNONAT<sup>2</sup>, Melih Cemal KUŞHAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Arş. Gör., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Samsun, sinemu@omu.edu.tr

<sup>2</sup>Arş. Gör., Anadolu Üniversitesi, Porsuk Meslek Yüksekokulu, Eskişehir, yuzunonat@anadolu.edu.tr

<sup>3</sup>Yrd. Doç. Dr., Osmangazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, mkushan@ogu.edu.tr

## GİRİŞ

Yaklaşık olarak 0.6 T<sub>m</sub> sıcaklıklarda kullanılabilen ve buna rağmen oksitleyici ortamlarda çok şiddetli mekanik gerilim ve gerinimlere dayanabilmek için kararlılıklarını kaybetmeyen malzemeler “süperalaşım” olarak adlandırılmaktadır. Genellikle Ni, Fe ve Co esaslı olmak üzere üç grupta incelenirler [1]. Ayrıca belirli oranlarda ve kombinasyonlarda tungsten, molibden, tantal, niyobiyum, titanyum ve alüminyum da içermektedirler. Nikel esaslı süperalaşım üstün malzeme özellikleri nedeniyle, süperalaşımın içinde özel bir yere sahiptirler. Uçak gaz türbin motorlarında kullanılan malzemeler olarak da ayrı bir önem arz etmektedirler. Şekil 1’de bir uçak motorunun resmi ve önemli bölümleri görülmektedir. Bu malzemelerin

mükemmel denilebilecek özellikleri yüksek sıcaklık mekanik mukavemet dayanımından, korozif ortamlardaki yorulma direncinin yüksekliğine kadar büyük bir aralıkta görülmektedir. Söz edilen özelliklerinden dolayı, sadece uçak ve uzay endüstrisinin değil, gemi, tren, petro kimya ve nükleer güç sanayilerinin de uzun yıllar vazgeçemeyeceği malzemeler sınıfında yer almaktadırlar.

Inconel 718, son yıllarda uçak ve uzay endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan Ni esaslı ve çökeltme sertleşmesiyle mukavemetlendirilmiş, en önemli sertleştirme elementi Nb olan bir süperalaşımdır [3]. Fakat başlıca mukavemetlendirme fazının,  $\gamma'$ , orta kararlılıkta olması nedeniyle tipik olarak 650°C'nin üzerindeki sıcaklıklardaki uygulamalarda kullanımı

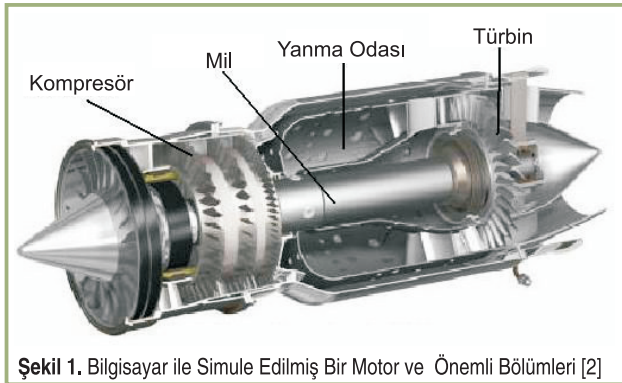
zor olmaktadır. Sonuç olarak, daha yüksek maliyetli ve işlenmesi daha zor olan alaşımlar bu tip uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu alaşımlara güzel bir örnek Waspaloy alaşımıdır. Her ne kadar Waspaloy'un başlıca çökeltme sertleşmesi fazı  $\gamma'$  olsa

da, kaynaklanma ile bağlantılı çatlak oluşumuna hassasiyeti Inconel 718'den daha fazla olmaktadır [4].

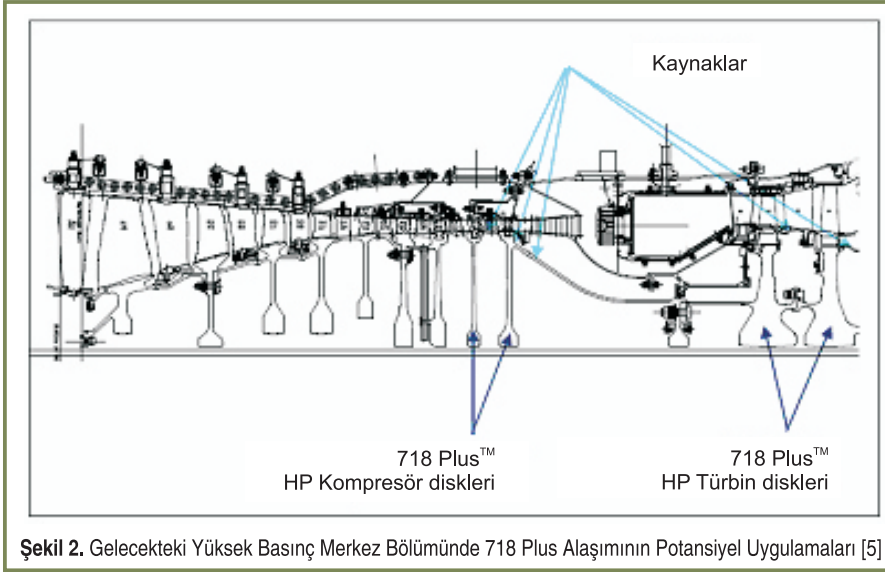
Bu şartlar altında, sahneye yeni bir süperalaşım çıkmaktadır. Çok yakın zamanlarda ATI ALLVAC firması tarafından geliştirilmiş bu alaşım ALLVAC 718 Plus olarak adlandırılmıştır. Küçük YMK ara metalik  $\gamma'$  fazı ile mukavetlendirilmiştir. Son yıllarda uçak gaz türbin motorlarında disk malzemesi olarak kullanımı büyük oranda artmaktadır. Bunun en önemli nedeni; çok yüksek servis sıcaklıklarında, yüksek akma ve çekme mukavemetine, çok iyi korozyon ve oksitlenme ile mükemmel sürünme direncine sahip olmasıdır. Şekil 2' de dövme 718 Plus alaşımının gaz türbinli motorlarda yüksek basınç (HP) kompresör ve türbin diski olarak kullanılabildiği bölümler görülmektedir [5].

## KİMYA

Waspaloy gibi yüksek sıcaklık kapasitesine sahip, gaz türbinli motor parçalarında kullanılabilen birçok dövme alaşım bulunmaktadır. Fakat bunların üretimleri ve son mamül haline getirilmeleri zor olmakta, hem de bu işlemler için gerekli maliyet Inconel 718'den çok daha yüksek olmaktadır [6]. Yani, ALLVAC 718 Plus, Inconel



Şekil 1. Bilgisayar ile Simüle Edilmiş Bir Motor ve Önemli Bölümleri [2]



Şekil 2. Gelecekteki Yüksek Basınç Merkez Bölümünde 718 Plus Alaşımının Potansiyel Uygulamaları [5]

718 ile karşılaştırıldığında, bu yeni modifiye edilmiş süperalaşım daha yüksek Al+Ti içeriğine ve daha yüksek Al/Ti oranına sahiptir. Bu alaşımda Fe içeriği azaltılmış ve yerine W ve Co eklenmiştir [5].

Sonuç olarak, sıcaklık kapasitesi 55°C artmıştır ve çekici bir termal kararlılığa sahip olmuştur [5]. Böylelikle Inconel 718 ile Waspaloy arasındaki açık, Inconel 718'in işlenebilirliği ve kaynaklanabilirliği ile Waspaloy'un sıcaklık kapasitesi kombine edilerek kapatılmıştır [5]. ALLVAC 718, Inconel 718 ve Waspaloy'un kimyasal kompozisyonları Tablo 1'de verilmiştir.

IN-718 tipi alaşımlarda başlıca matris elementleri Fe, Co, Mo ve W'dir. Alaşım elementlerinin mikro yapı, mekanik özellikler, termal kararlılık ve işlenebilirlik karakteristikleri üzerinde çok önemli etkileri bulunmaktadır. Niyobyum, Al ve Ti ile birlikte başlıca

sertleştirme elementlerinden biri olmaktadır. Al/Ti oranında ve Al+Ti içeriğinde yapılan değişiklik alaşımı baskın bir şekilde  $\gamma'$  ile mukavemetlendirilmiş bir alaşıma dönüştürmekte ve böylece alaşım daha iyi termal kararlılığa sahip olmaktadır.

Bununla birlikte, Al ve Ti içeriğindeki modifikasyon alaşımın optimum mekanik özelliklerini geliştirmektedir. Mekanik özellikleri ve termal kararlılığı geliştiren diğer bir önemli faktör Co'nun % 9 oranına kadar artırılabilmesidir. Daha da iyi özellikler % 10 Fe, % 2.8 Mo ve % 1 W ilavesiyle sağlanmaktadır [8]. Çok küçük miktarlarda eklenen P ve B kopma

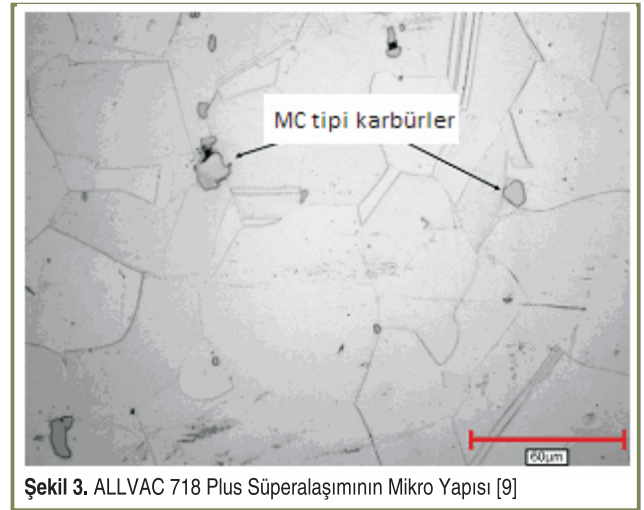
gerilimi ve sürünme dayanımını bir miktar daha arttırabilmektedir.

### MİKRO YAPI

Sıcak dövülmüş 718 Plus'ın mikro yapısı ortalama 50  $\mu\text{m}$  tane büyüklüğüne sahip YMK östenitik matrisden oluşmaktadır. Alaşımın mikro grafiği Şekil 3'te görülmektedir. Bu grafikte görüldüğü üzere yuvarlak görümlü çöktürler mikro yapının içinde rastgele dağılımı olarak bulunmaktadır [9].

Çöktürlerin SEM/EDS analizleri, onların Ti ve C içeren, büyük oranda Nb zengini MC tipi karbürler olduklarını göstermektedir. Dövülmüş Inconel 718 ve 718 Plus tipi alaşımların thermo-mekanik prosesi ve yüksek sıcaklık homojenizasyonu ile Laves fazı elimine edilebildiği için, bu faz burada görülmektedir. Inconel 718'de sıklıkla görülebilen delta fazı ise yine bu grafikte görülmektedir [9].

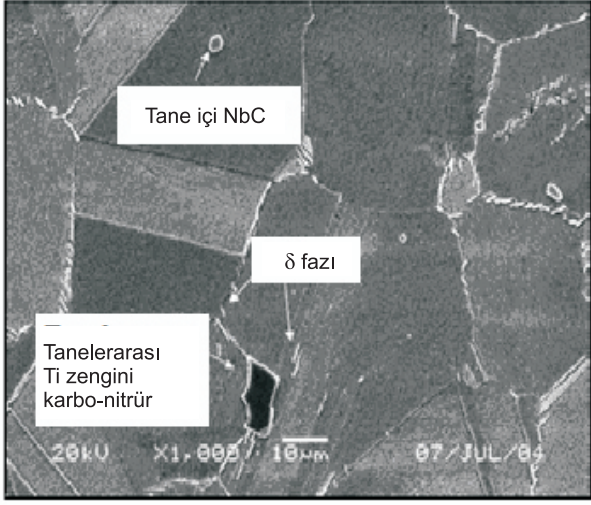
Normal B ve P konsantrasyonlarına sahip, 950°C de bir saat ısıl işlem



Şekil 3. ALLVAC 718 Plus Süperalaşımının Mikro Yapısı [9]

Tablo 1. ALLVAC 718 Plus, Inconel 718 ve Waspaloy'un Nominal Kimyasal Kompozisyonları [7]

Alaşım	Kimya, wt %										
	C	Cr	Mo	W	Co	Fe	Nb	Ti	Al	P	B
718 Plus	0.025	18.0	2.70	1.0	9.0	10.0	5.40	0.70	1.45	0.007	0.004
718	0.025	18.1	2.90	-	-	18.0	5.40	1.00	0.45	0.007	0.004
Waspaloy	0.035	19.4	4.25	-	13.25	-	-	3.00	1.30	0.006	0.006



**Şekil 4.** 950°C de Bir Saat Isıl İşleme Tabi Tutulmuş 718 Plus Alaşımının Mikro Yapısı [10]

görmüş (tane büyüklüğü 54 μm) 718 plus alaşımının mikro yapısı Şekil 4'te verilmiştir. Tane sınırlarında ve ender olarak tane içinde ve ikiz sınırlarında oluşmuş iğnemsî görünümdeki δ fazı açıkça görülmektedir. Ayrıca, daha önceden de üzerinde durulduğu gibi, mikro yapıda yuvarlak ve blok şeklindeki MC tipi karbürler rastgele dağılmış bir şekilde tespit edilmiştir. Ti zengini karbo-nitrür partikülleri de açıkça gözlenmektedir [10]. YMK  $\gamma'$  ve HMT  $\gamma''$  gibi ara metalik fazların bu alaşımda oluşması beklenmekte ise de başlıca sertleşme fazı  $\gamma'$  olmaktadır [8, 10].

## MUKAVEMETLENDİRME MEKANİZMALARI

Daha önceden de bahsedildiği gibi, başlıca sertleşme fazı olan  $\gamma''$  in kısmi hacmi δ fazının miktarına bağlı olarak % 19.7 ile 23.2 arasında değişmektedir. Yüksek sıcaklıklarda Waspaloy ve René 41 gibi  $\gamma'$  ile sertleştirilen alaşımlar, Inconel 718 gibi  $\gamma''$  ile sertleştirilen alaşımlardan daha iyi kararlılığa sahip olmaktadır. Çünkü  $\gamma''$  hızlı bir şekilde oluşmakta ve 650-760°C arası sıcaklıklarda kısmen denge δ fazına çözünmektedir. 718 plus alaşımının  $\gamma'$  fazı ile ilgili yapılan çalışmalarda, bu fazın Nb ve Al içeriğinin yüksek

olduğu gözlenmiştir. Bu durum Waspaloy ve René 41 alaşımlarında bulunan  $\gamma'$  fazından oldukça farklılık göstermektedir. Bu da 718 Plus alaşımının eşsiz çökeltme davranışını ve sertleşme mekanizmalarını açıklamaktadır [11].

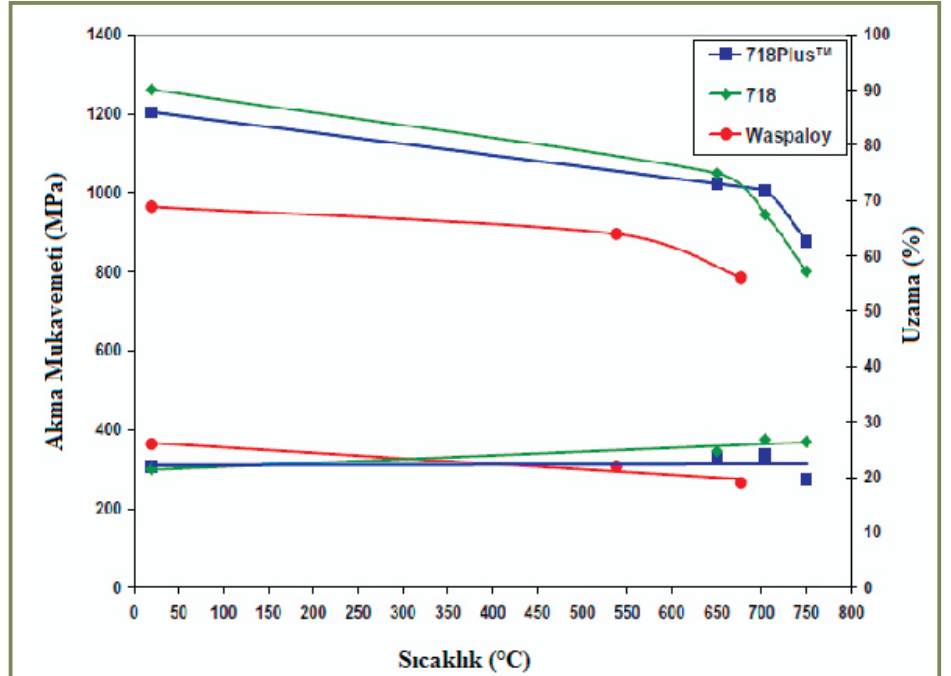
718 Plus alaşımı gerilim kopma çentik sünekliğine ve termomekanik süreçler sırasında mikro yapının kontrol edilmesine fayda

sağlayan δ fazı içermektedir. Fakat δ fazının kısmi hacmi 718 alaşımında bulunandan önemli ölçüde daha düşüktür ve yüksek sıcaklıklarda daha yavaş büyüme hızı ile daha kararlı olmaya eğilim göstermektedir. Ayrıca 718 Plus alaşımında bir miktar  $\gamma''$  da bulunabilmektedir ama daha az miktardadır; yani % 7'den daha azdır [11].

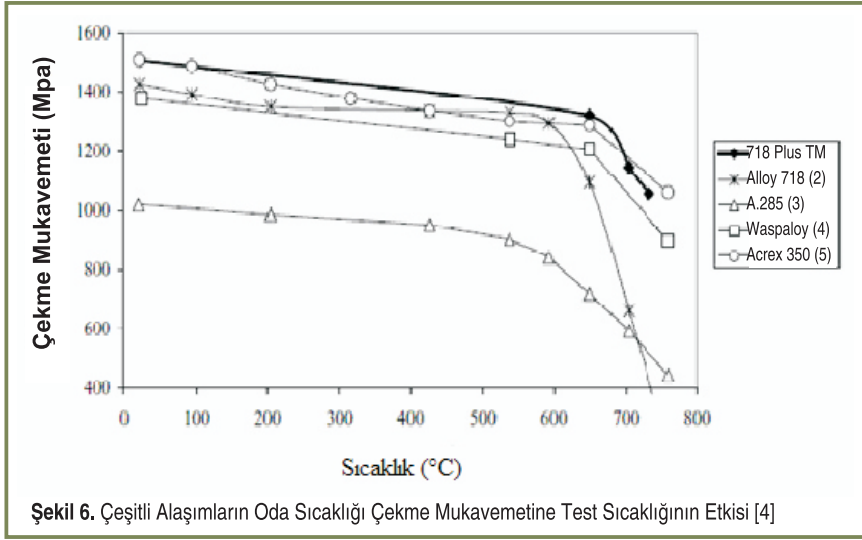
## MEKANİK ÖZELLİKLER

Alaşım 718 Plus™ 650°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda 718 alaşımına ve tüm sıcaklık aralığında Waspaloy ve A286'ya göre önemli oranda mukavemet avantajına sahiptir. Tüm sıcaklık aralığı boyunca 718 Plus alaşımındaki uzama minimum % 18'de olmaktadır (Şekil-5). Bu veriler 718 alaşımı, Waspaloy, A286 ve 718 Plus alaşımının çubuk, silindirik yüzükler, dövülmüş parçalar ve plakalar gibi diğer ürün formlarıyla uygunluk göstermektedir [4]. Şekil 6'da çeşitli alaşımların oda sıcaklığı çekme mukavemetine sıcaklığın etkisi görülmektedir.

Kapsamlı çalışmalar sonucunda 704°C'ye kadar olan sıcaklıklarda 718 Plus alaşımının 718 alaşımına göre üstün çekme ve kopma, Waspaloy ile de kıyaslanabilir özellikler gösterdiği bulunmuştur [13]. Fakat göreceli olarak bu alaşımın yorulma çatlak ilerleme eğilimiyle ilgili verilerin yeterli olmadığı belirtilmiştir. 718 Plus, 718 ve Waspaloy süperalaşımlarının 650°C'de üç saniyelik üçgen yüklemesinde



**Şekil 5.** 718 Plus, 718 ve Waspaloy Alaşımları İçin Sıcaklığa Bağlı Olarak Akma Mukavemetinin ve Uzamanın Değişimi [12]



Şekil 6. Çeşitli Alaşımların Oda Sıcaklığı Çekme Mukavemetine Test Sıcaklığının Etkisi [4]

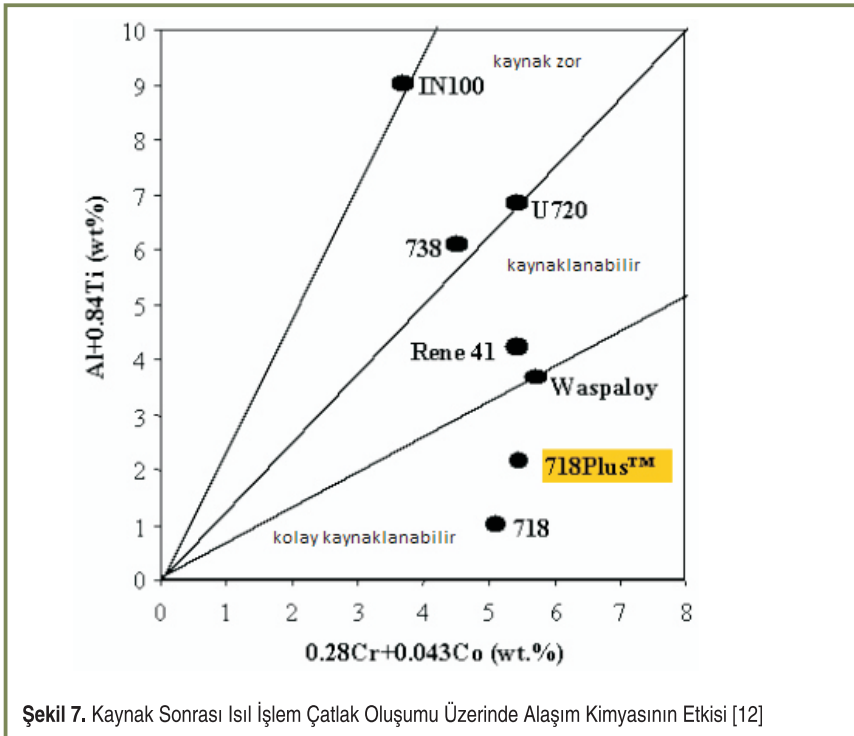
yorulma çatlakları gelişim hızının benzer; fakat 718 Plus alaşımının biraz daha iyi olduğu saptanmıştır. Waspaloy bekleme süreli yorulma durumunda en iyi dayanımı gösterirken, 718 Plus alaşımı 718 alaşımından daha yüksek dayanıma sahip olmaktadır [13].

Yorulma sonucu kırılan yüzeylerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmesi sonucunda, oda sıcaklığında 718 Plus alaşımında çatlak ilerlemesinin taneler içinden oluştuğu

ve striyasyonların bulunduğu gözlenmektedir. 650°C'de ise kırılma modu tane içi ve taneler arasının birlikteliği şeklinde olmaktadır [14].

#### KAYNAKLANABİLİRLİK

718 Plus alaşımı üzerinde sınırlı sayıda kaynaklanabilirlik ile ilgili test yapılmıştır. Fakat sonuçlar cesaret vericidir. Bu alaşımın kaynaklanabilirliğinin oldukça iyi, en azından 718 ile Waspaloy arasında olduğuna inanılmaktadır



Şekil 7. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Çatlak Oluşumu Üzerinde Alaşım Kimyasının Etkisi [12]

[12]. Haafkens ve Mathey tarafından alaşım kimyasına göre oluşturulan grafikte kolay kaynaklanabilir bölümde yer aldığı Şekil 7'de görülmektedir. Her ne kadar EB ve TIG, hatta birkaç MIG kaynağında testler yapılmış olsa da, hâlen yeterli bilgi literatürde mevcut değildir. Bu nedenle, bu konuda daha fazla akademik ve endüstriyel araştırma ve incelemeye ihtiyaç duyulmaktadır.

#### MALİYET VE UYGULAMA ALANLARI

Malzeme üretildikten sonra ilk olarak yüksek sıcaklık işleme uygulamalarında kullanılmasına öncelik verilmiştir. Özellikle sıcak makas bıçağı malzemesi olarak kullanılan Waspaloy'un yerini almasına çalışılmıştır. Diğer uygulamalar ise; hava ve yer türbin diskleri, dövme kompresör bıçakları, bağlama elemanları, motor şaftları, fabrika üretimi plaka komponentlerdir. Haddelenmiş ya da yakma alın kaynaklı segmanlarda (Şekil-8), kapalı kalıp dövme, çubuk, tel, sac, plaka ve döküm vb. ürün formları bulunmaktadır.



Şekil 8. 718 Plus Alaşımı Kaynak Mekanik Segman Numunesi [15]

Maliyet yeni bir alaşımın tasarımında en önemli parametrelerden birini oluşturmaktadır. 718 Plus alaşımından elde edilmiş son ürünlerin maliyetlerinin 718 alaşımı ile Waspaloy'un maliyetlerinin arasında olması beklenmektedir [12]. Maliyet hesaplanırken, alaşımı oluşturan ham

Tablo 2. ALLVAC 718 Plus, Inconel 718 ve Waspaloy'un Göreceli Ham Madde Maliyetleri (beş yıllık ortalama) [12]

718	Waspaloy	718 Plus™
69	100	92

malzemelerin içerikleri ve maliyetleri göz önüne alınmalıdır. 718 Plus, 718 ve Waspaloy alaşımlarının ham madde maliyetleri, Ni, Co, Mo, Fe ve Nb'un son beş yıllık ortalamalarının Waspaloy'unkine oranlanmasıyla hesaplanmış ve Tablo 2'de özetlenmiştir. Tablodan görüldüğü üzere 718 Plus alaşımı Waspaloy'dan % 8 daha ucuzdur [12].

## SONUÇLAR

Inconel 718 süperalaşımının son versiyonu olan, yeni geliştirilmiş ALLVAC 718 Plus alaşımı, çok iyi mekanik özelliklerini, kolay işlenebilirliğini ve düşük maliyetini kombine ederek, uçak ve uzay endüstrilerinin uzun yıllar vazgeçemeyeceği bir alaşım olma yolunda ilerlemektedir.

- 718 Plus alaşımının metalurjisi ve prosesi büyük oranda incelenmiştir. Her ne kadar 718 alaşımıyla olan büyük benzerlikleri kaydedilmiş olsa da alaşımın tüm potansiyeli hakkında daha çalışılması gereken pek çok konu bulunmaktadır.
- 718 Plus alaşımı 718 alaşımına oranla 55°C'lik daha fazla servis sıcaklıklarına dayanabilmekte, bu sıradaki çekme mukavemeti de 718 alaşımıyla kıyaslanabilir oranda olmaktadır. Waspaloy'dan ise 704°C de daha yüksek çekme ve sürünme mukavemeti ile kıyaslanabilir oranda termal kararlılığa sahip olmaktadır. Sahip olduğu iyi proses ve metalurjik esneklik nedeniyle, 718 alaşımı gibi özel prosesler (ince tane yapısı oluşumu, süper plastik şekillendirme, döküm ve dövme vb.) ile işlenebilme olanağı sunmaktadır.
- Waspaloy'dan daha düşük maliyete sahip olabilmektedir ve ayrıca gelişen işleme kabiliyetiyle daha düşük maliyetlere sahip olabileceği düşünülmektedir.

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

- $T_m$  : Malzemenin Kelvin cinsinden ergime sıcaklığı  
 $\gamma'$  : Birincil çökeltme sertleşmesi fazı  
 $\gamma''$  : İkincil çökeltme sertleşmesi fazı  
 YMK : Yüzey merkezli kübik yapı  
 HMT : Hacim merkezli tetragonal yapı  
 EB : Elektron ışın kaynağı  
 TIG : Tungsten inert (soy) gaz kaynağı  
 MIG : Metal soy gaz kaynağı

- Allvac ve 718 Plus ATI Properties şirketinin, ticari markasıdır.
- Waspaloy Pratt & Whitney'nin ticari markasıdır.
- AEREX SPS Technologies şirketinin ticari markasıdır.

## KAYNAKÇA

1. Sims, C.T., Stoloff, N.S., Hagel, W.C. 1987. Superalloys II- High Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power, John Wiley & Sons Inc., New York, NY, USA.
2. Erdem, M. S., Akmandor, İ. S. Uçak Motor ve Elektrojen Gruplarındaki Gaz Türbini Teknolojisindeki İlerlemeler, Malzeme, Yüzey Teknolojileri ve İmalat Süreçlerindeki Gelişmeler (Bölüm 1).
3. Yaman, Y.M., Kushan, M.C. 1998. "Hot Cracking Susceptibilities In the Heat Affected Zone of Electron Beam Welded Inconel 718," Journal of Materials Science Letters 17, 1231-1234.
4. Bond, B.J., Kennedy, R.L. 2005. Evaluation of ALLVAC 718 plus Alloy In the Cold Worked and Heat Treated Condition, Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives.
5. Schreiber, K., Loehnert, K., Singer, R.F. 2006. Opportunities and Challenges for the New Nickel-Based Alloy 718 Plus, II. Symposium on Recent Advantages of Nb-Containing Materials in Europe.
6. Otti, E.A., Grohi, J., Sizek, H. 2005.

Metals Affordability Initiative: Application of Allvac Alloy 718Plus for Aircraft Engine Static Structural Components, Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives.

7. Cao, W. 2005. Solidification and Solid State Phase Transformation of ALLVAC 718 Plus Alloy, Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives 2005, TMS.
8. Cao, W., Kennedy, R. 2004. Role of Chemistry in 718-Type Alloys- Alloy 718 plus Development, Edited by K.A. Green, T.M. Pollock, H. Harada T.E. Howson, R.C. Reed, J.J. Schirra, and S. Walston, Superalloys, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).
9. Vishwakarma, K.R., Richards, N.L., Chaturvedi, M.C. 2007. Microstructural Analysis of Fusion and Heat Affected Zones in Electron Beam Welded ALLVAC® 718PLUSTM superalloy, Materials Science and Engineering A 480 (2008) 517-528.
10. Vishwakarma, K.R., Chaturvedi, M.C. A Study Of Haz Microfissuring In A Newly Developed Allvac® 718 Plus Tm Superalloy.
11. Jeniski, R. A., Jr., Kennedy, R. L. 2006. "Development of ATI Allvac 718Plus Alloy and Applications," II. Symposium on Recent Advantages of Nb-Containing Materials in Europe.
12. Kennedy, R. L. 2005. Allvac® 718plus™, Superalloy For The Next Forty Years, Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives 2005, TMS.
13. Liu, X., Xu, J., Deem, N., Chang, K., Barbero, E., Cao, W., R. Kennedy, L., Carneiro, T. 2005. Effect Of Thermal-Mechanical Treatment On The Fatigue Crack Propagation Behavior Of Newly Developed Allvac 718plus Alloy, Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives 2005, TMS
14. Liu, X., Rangararan, S., Barbero, E., Chang, K., Cao, W. R. Kennedy and T. Carneiro, 2004. Fatigue Crack Propagation Behaviors Of New Developed Allvac 718plus Superalloy, Superalloys 2004, TMS
15. Bayha, T. D., Lu, M., Kloske, K. E. 2005. Investment Casting Of Allvac® 718plus™ Alloy, Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives 2005, TMS