

Inconel 718 süper alaşımının farklı gerilme ve sıcaklıklarda yüksek sıcaklık sürünme davranışının incelenmesi

Ergün Subaşı*¹, Eyüp Sabri Kayalı², Murat Baydoğan³

16.06.2015 Geliş/Received, 06.11.2015 Kabul/Accepted

ÖZ

Bu çalışmada, havacılıkta yaygın olarak kullanılan Inconel 718 süper alaşımının sürünme davranışına sıcaklık ve gerilmenin etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar; 750°C, 800°C sıcaklıklarında ve 200-350MPa gerilme aralığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarından, gerilme üssü (n), sürünme hızı ($\dot{\epsilon}$) ve aktivasyon enerjisi (Q) hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlara göre; sürünme hızlarının artan gerilme ile arttığı, ayrıca sıcaklığın artmasıyla birlikte sürünme hızları çok daha fazla artmaktadır. Aynı şekilde, artan gerilme ile birlikte aktivasyon enerjisi artmaktadır. Deneysel sonuçlarından elde edilen gerilme üssü değerlerine göre; etkin deformasyon mekanizmasının dislokasyon sürünmesi olduğu tespit edilmiştir. Inconel 718 süper alaşımının kopma sürünme ömrünü tahmin etmek için, Larson Miller grafiği çizilmiştir. Bu grafikte, Inconel 718'in yüksek sıcaklık sürünme ömürleri hesaplanabilir.

Anahtar Kelimeler: Inconel 718 alaşımı, yüksek sıcaklık sürünme davranışı, sürünme hızı, gerilme üssü, aktivasyon enerjisi

Investigation of the high temperature creep behaviour of inconel 718 superalloy at different temperatures and stresses

ABSTRACT

In this study, Creep behaviour of Inconel 718 superalloy, which is widely used at aviation, has been investigated at different temperatures and stresses to understand the effect of different temperature and stresses. The experiments were performed at 750°C, 800°C temperatures, and stress range of 200-350MPa. The stress exponent (n), creep rate ($\dot{\epsilon}$), and activation energy(Q) were calculated from experimental results. According to the calculated results; creep rates which increase with the increasing of the stress, in addition to; creep rates which increase much more with the increasing of temperature. Likewise, activation energy which increases with the increasing of stress. Active deformation mechanism is dislocation creep, which was determined concerning stress exponent obtaining from experiment results. In order to estimate of the creep rupture life of Inconel 718, Larson-Miller graphic was plotted. High temperature creep lifes of Inconel 718 might be calculated with this graphic.

Keywords: Inconel 718 superalloy, creep behaviour, creep rate, stress exponent, activation energy

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul - subasierg@itu.edu.tr

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul - kayali@itu.edu.tr

3 İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul - baydogan@itu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Süper alaşımların gelişimi, Amerika Birleşik Devletlerinde 1930 yıllarında başladı ve jet motorlarının daha yüksek sıcaklık dayanımlı malzeme ihtiyacı, süper alaşımların gelişimini hızlandırdı. Nikel esaslı süper alaşımlar 1930'dan beri bilinmektedir ve başlıca havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Yaklaşık olarak ikinci dünya savaşının ortalarından başlayarak 30 yıl süresince askeri, ticari uçaklarda ve ayrıca endüstriyel türbinlerde yüksek güç performansı için türbin motorlarına yoğun talep olmuştur, bunun için yeni malzemelerin araştırılmasına yoğunlaşmıştır. Inconel 718 süper alaşımı göreceli olarak 1965'te kullanılmaya başladığında son süper alaşımdı ve çökeltme sertleştirilmesi yapılmış en yaygın kullanılan ve 650°C'ye kadar yeterli sürünme mukavemeti, süneklik ve yorulma direnci gösteren süper alaşımdı. Bu alaşım, nikel-krom esaslı süper alaşım ailesine ait olan geniş bileşim aralığı ve mekanik özellikleri kapsar. Nikel ve krom yüksek sıcaklıklarda korozyon, oksidasyon, karbürlenme ve diğer hasar mekanizmasına karşı direnç sağlar. Inconel alaşımları çok düşük sıcaklıklarda(cryogenic) iyi dayanım gösterirler ve orta sıcaklıklarda yorulma mukavemeti, mekanik mukavemet ve nispi olarak daha iyi sürünme davranışı gösterirler. Genellikle, Inconel alaşımları; mekanik ve korozyon direncini artırmak için Al, Ti, Nb, Co, Cu ve W elementlerle ilave alaşımlandırılır. Demir, 1-20% aralığında Inconel alaşımları içerisinde mevcuttur. Bu süper alaşım uygulamaları, iyi üretilebilirlik ve kaynaklanabilirlik özelliğinden dolayı; gaz türbinlerindeki disk alaşımlarından ve roket motorlarında ısıtım işlem reçeteleri için, türbinler, turbin palleri, havacılık, nükleer güç üniteleri, ekstrüzyon kalıpları, koruma kapları, yüksek sıcaklık dayanımlı vidalar, bağlayıcılar ve uzay araçlarında bileşen olarak yaygın şekilde kullanılırlar. Şimdiye kadar, Inconel 718 süper alaşımının sürünme özelliklerinde azami sürünme servis sıcaklık şartlarına odaklanılmıştır. Diğer yandan çalışmalar, yüksek sıcaklık ortamlarında hızlandırılmış sürünme kopma çalışmalarıyla ilgilidir ve bu alanda biraz ilerleme olmuştur. Uçak motorları, turbin diskleri yük ve yüksek sıcaklık bakımından zor çevresel şartlarda çalışmaları nedeniyle, dövme yöntemiyle üretilirler[1-6].

Bileşenlerin tasarımında, yüksek sıcaklık çalışma şartları nedeniyle, sürünme davranışı birincil olarak düşünülmelidir. Sürünme olayı, genelde gerilme ve yüksek sıcaklığa bağlı olarak zamanla malzemelerin kırılmasını kapsar. Sürünme yüksek sıcaklıkta sabit gerilme altında, bir malzemenin zamanla plastik deformasyona uğramasıdır. Sürünme kırılması, normalde sürünme eğrisinin üçüncü bölgesi ile alakalıdır

ve başlıca boşluk çekirdeklenmesi, boşlukların büyümesi ve ilerlemesi ile ayırtdedir[2].

Gerilme kopma deneyleri yaygın olarak, havacılıkta yüksek sıcaklık malzemelerinin alışılmış sürünme testleri yerine sürünme ömürlerini tahmin etmek için kullanılır. Bu sonuçları elde etmek için uzun zaman gerekmez ve bu malzemelerin sürünme davranışıyla ilgili olarak iyi sonuçlar elde edilir[7].

Bu çalışmanın amacı, Inconel 718 süper alaşımının yüksek sıcaklık sürünme davranışını farklı gerilmeler için incelemektir.

2. MALZEME VE DENEYSEL YÖNTEM(MATERIAL AND EXPERIMENTAL METHOD)

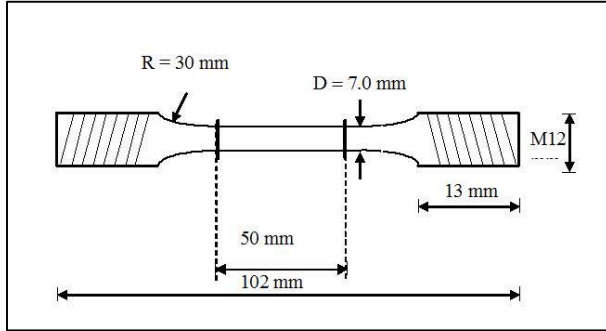
Sürünme test malzemesi; vakum indüksiyon yöntemi ile üretilmiş ve sonra çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıtım işlemi yapılmış ticari ismi AMS 5663 olan, kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen Inconel 718 çubuktur. Alaşımda kayda değer miktarda; Nb+Ta, Al ve kobalt mevcuttur [1].

Tablo 1. Inconel 718 süper alaşımının kimyasal bileşimi(Cheical composition of the Inconel 718 superalloy)

Element	Bileşim(% ağırlık)
Ni	54,20
Cr	17,95
Fe	19,03
Mo	2,89
Ti	1
Co	0,18
C	0,024
S	0,004
Mn	0,07
Si	0,08
Al	0,49
B	0,0040
Nb+Ta	4,04
Cu	0,04

Bu çalışmada, gerçekleştirilen sürünme test sıcaklıkları ve gerilme değerleri Tablo 2'de listelenmiştir. Numuneler, bilgisayar kontrollü bir torna tezgahında işlenmiş olup, öncelikle çatlak kontrolü için, hasarsız malzeme muayenesi teknikleriyle (ultrasonik ve floresan penetrant inceleme) incelenmiştir. Numune ölçüleri Şekil 1'de verilmiştir. Numunenin her iki başında sürünme cihazına bağlamak için Şekil 1'de görüldüğü gibi metrik 12 diş bulunmaktadır. Ayrıca, numunenin ölçü boyunun iki ucunda, numunenin uzamasını hassas

olarak ölçebilmek için uzama sensörünün numuneye bağlanmasını sağlayan iki adet çıkıntı mevcuttur.



Şekil 1. Sürünme numunesinin teknik resmi(Technical drawing of creep test specimen)

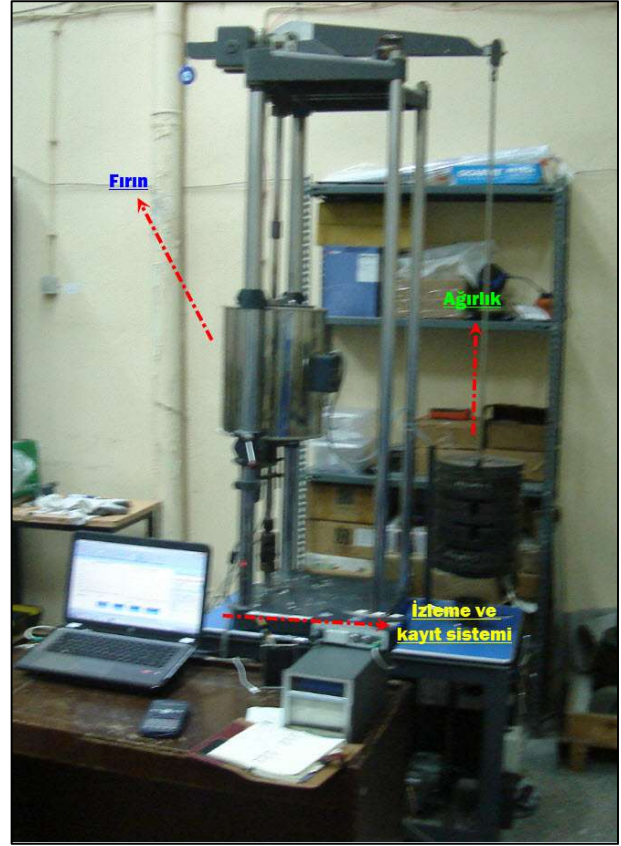
Tablo 2. Sürünme test sıcaklık ve gerilme değerleri(Creep test temperatures and stresses values)

Sıcaklık °C	Gerilme (MPa)
750	200
	250
	300
	350
800	200
	250
	300
	350

Sürünme testleri Şekil 2’de görüldüğü gibi Mayes marka TC-30 model, sabit yükleme şartlarında 15:1 kaldıraç oranında Sürünme Test Cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sürünme test ekipmanının fırını, üç ısıtma bölgesine sahiptir. Fırının, öngörülen ve gerçekleşen sıcaklık değerleri ve numune uzama değerleri sürünme testi sırasında bilgisayar destekli yazılım ile düzenli olarak izlenmiştir. Test sıcaklığı $\pm 3^\circ\text{C}$ toleransla, sıcaklık ölçer sensörü ile sürekli kaydedilmiştir. Sürünme testi sonrası kopmuş bir numune örnek olarak Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3. Sürünme kopma testi sonrası, kopmuş numune(Ruptured specimen after creep rupture test)



Şekil 2. Sürünme test cihazı(Creep test equipment)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA(RESULTS AND DISCUSSION)

3.1 Sürünmede Kararlı Hal Bağlıları (Steady-State Equations at Creep)

Kararlı hal sürünme hızı, sürünme eğrisinin doğrusal bölgesinin eğimidir $\dot{\epsilon}_k = (\Delta \epsilon / \Delta t)$ (1)

Kararlı hal sürünme hızı bağıntısı;

$$\dot{\epsilon}_{\text{kararlı}} = K \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

Burada;

Q = aktivasyon enerjisi; n = gerilme üssü; K = sabit; T mutlak sıcaklık ve R:8,314 J/mol.K gaz sabitidir.

2 numaralı bağıntı yeniden düzenlendiğinde;

$\ln \dot{\epsilon}_{\text{kararlı}} = \ln K + n \ln \sigma - Q/RT$ (3) bağıntısı elde edilir.

Sabit sıcaklık ve değişken gerilmelerde, aşağıda ki 4 nolu bağıntı elde edilir.

$n = \ln \dot{\epsilon}_{\text{kararlı sürünme hızı}} / \ln \sigma$ (4). Bu bağıntıdan, n gerilme üssü hesaplanabilir[2,8].

Sabit gerilme ve değişken sıcaklıkta aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\ln \dot{\epsilon}_{\text{kararlı sürünme hızı}} = -Q/RT \quad (5)$$

5 nolu bağıntı T_1 ve T_2 farklı iki sıcaklık için yeniden düzenlendiğinde, 6 nolu bağıntı elde edilir. Bu bağıntı, aktivasyon enerjisinin sabit gerilmelerde (σ), farklı iki sıcaklık için (T_1, T_2), kararlı hal sürünme hızlarından nasıl hesaplanacağını gösterir.

$$Q = -R \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{\text{kararlı sürünme hızı}}(1)}{\dot{\epsilon}_{\text{kararlı sürünme hızı}}(2)} \right) / \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (6)$$

Aktivasyon enerjisi Q, deneysel olarak doğal logaritma-sıcaklık ($\dot{\epsilon}-1/T$) grafiğinin eğiminden de aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanabilir[2,8].

$$Q = -R \frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \quad (7)$$

3.2 Kopma Zamanı Gerilme İlişkisi (Rupture Time Stress Correlation)

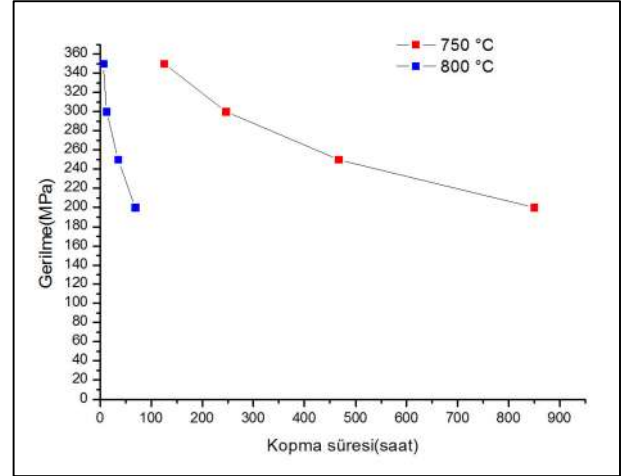
Sürünme kopma testleri; 200-350MPa gerilme aralığında 750°C ve 800°C sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4’de artan gerilme ve sıcaklıkla sürünme kopma ömrünün değişimleri görülmektedir. Şekil 4, Inconel 718 alaşımında gerilmeye bağlı olarak, kopma ömrünün değişimini göstermektedir. Şekil 4’de görüldüğü gibi, gerilme ve sıcaklık artışıyla birlikte, Inconel 718’in kopma ömrü beklendiği gibi azalmaktadır. Özellikle, 800°C’de kopma ömrünün artan gerilme ile hızlı azalışı dikkat çekmektedir.

Tablo 3. Inconel 718 alaşımında uygulanan gerilmelere bağlı olarak 750°C’de sürünme kopma süreleri (Creep rupture times depending on applying stresses at 750°C for Inconel 718)

Sıcaklık 750°C	
Gerilme(MPA)	Kopma Zamanı(Saat)
200	850
250	467
300	246
350	125,18

Tablo 4. Inconel 718 alaşımında uygulanan gerilmelere bağlı olarak 800°C’de sürünme kopma süreleri (Creep rupture times depending on applying stresses at 800°C for Inconel 718)

Sıcaklık 800°C	
Gerilme (MPA)	Kopma Zamanı (Saat)
200	68,61
250	35,4
300	12,25
350	6,13



Şekil 4. Inconel 718’in farklı sıcaklıklarda uygulanan gerilmeye bağlı olarak kopma sürelerinin değişim grafiği (Changing of stress rupture times of Inconel 718 graphic depending on applying stress at different temperatures)

3.3 Larson-Miller Parametresi (Larson-Miller Parameter)

Larson-Miller parametresi (LMP), sürünme kopma zamanını t_{kopma} tahmin etmek için yaygın olarak kullanılır.

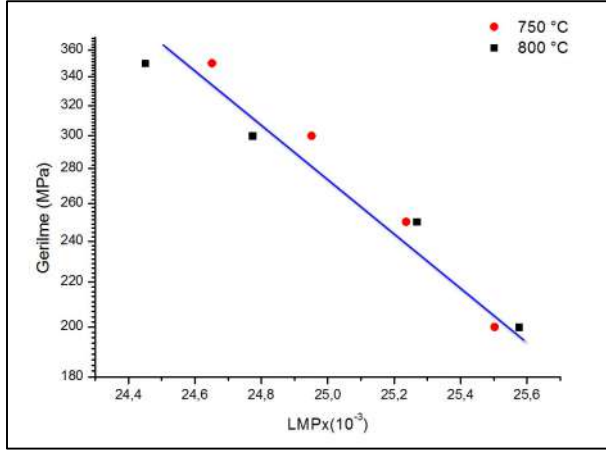
$$LMP = T(C + \log t_{\text{kopma}}) \quad (8)$$

Burada C sabittir ve yaklaşık olarak bu alaşım için 22 dir, t_{kopma} saat olarak kopma zamanı verir, T ise kelvin olarak sıcaklıktır[9,10].

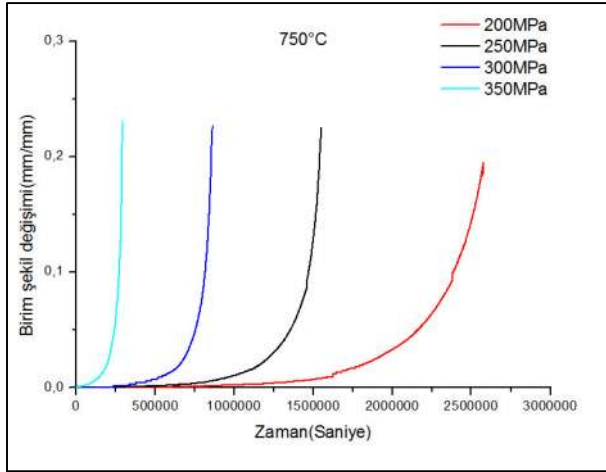
Bu yaklaşımda, 750°C ve 800°C test sıcaklıklarıyla kopma zamanı birlikte kullanılarak Larson-Miller değerleri hesaplanabilir ve Şekil 5’de görüldüğü gibi Inconel 718’de LMP’ye bağlı olarak gerilmenin değişimini veren LM grafiği elde edilir. Inconel 718 için sürünme kopma ömrü, farklı gerilme ve sıcaklıklar için bu grafik kullanılarak elde edilir.

3.4 Sürünme Eğrileri (Creep Curves)

Şekil 6, Inconel 718 ‘in 750°C sıcaklıkta, 200-350 MPa arasındaki farklı gerilmelerde ki birim şekil değişimi-zaman grafiği, sürünme eğrilerini göstermektedir. Şekil dikkatli incelendiğinde; artan gerilme ile birlikte; üçüncül sürünme bölgesinin baskın olduğu ve sürünme-kopma ömrünün artan gerilmeye bağlı olarak kayda değer şekilde azaldığı görülmektedir.



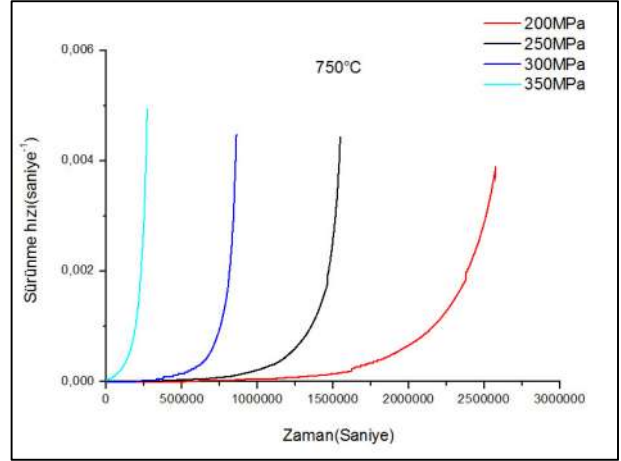
Şekil 5. Inconel 718 alaşımında Gerilme Larson-Miller Parametresi grafiği (Stress vs. Larson-Miller Parameter Graphic at Inconel 718)



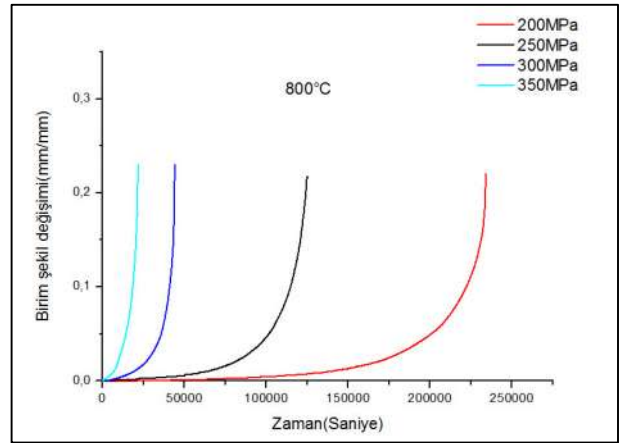
Şekil 6. Inconel 718'in 750°C sıcaklıkta ve 200-350 MPa arasındaki farklı gerilmelerde ki sürünme eğrileri grafiği (Creep curves graphic of the Inconel 718 super alloy between 200-350 MPa at the different stresses and 750°C temperature)

Şekil 7 ise, 750°C sıcaklıkta ve 200-350MPa arasındaki farklı gerilmelerde, Inconel 718'in sürünme eğrilerinin, eğiminden hesaplanan sürünme süresince, sürünme hızının değişimini göstermektedir. Beklendiği gibi, gerilme arttıkça sürünme süresince değişen sürünme hızı, daha kısa sürünme sürelerinde hızla artmaktadır.

Şekil 8 ise, 800°C sıcaklıkta, 200-350 MPa farklı gerilmelerde, Inconel 718'in birim şekil değişimi-zaman grafiği, sürünme eğrilerini göstermektedir. 750°C da olduğu gibi, yine artan gerilme ile sürünme hızı artarak sürünme ömrü azalmaktadır. 750°C daki sürünme eğrisi (Şekil 6) ile 800°C daki sürünme eğrisi (Şekil 8) karşılaştırıldığında; artan sıcaklık ve artan gerilme ile, sürünme kopma ömrünün azaldığı görülmektedir. Burada sıcaklık artışının, gerilme artışına göre sürünme-kopma ömrünü çok daha fazla etkilediği görülmektedir.



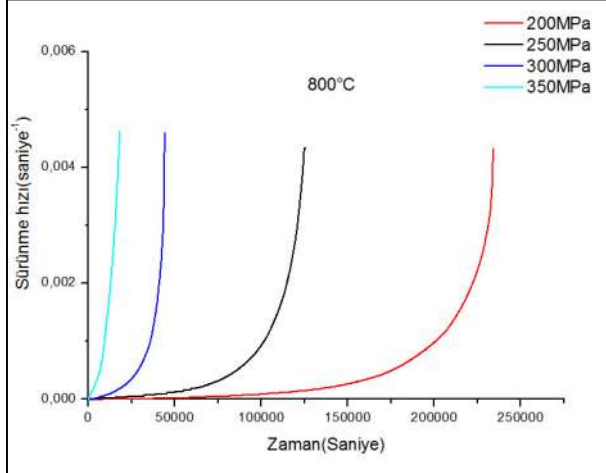
Şekil 7. Inconel 718'de 750°C sıcaklıkta ve 200-350MPa arasındaki farklı gerilmelerde sürünme hızının zamanla değişim grafiği (Creep rate graphic of the Inconel 718 super alloy between 200-350 MPa at the different stresses and 750°C temperature by changing time)



Şekil 8. Inconel 718'de 800°C sıcaklıkta ve 200-350 MPa arasındaki farklı gerilmelerde sürünme eğrileri grafiği (Creep curves graphic of the Inconel 718 super alloy between 200-350 MPa at the different stresses and 800°C temperature)

Şekil 9 ise, Inconel 718'in 800°C sıcaklıkta ve 200-350 MPa arasındaki farklı gerilmelerde, sürünme eğrilerinin eğiminden hesaplanan sürünme hızının zamanla değişimini göstermektedir. 800°C sıcaklıkta da gerilme arttıkça, çok daha kısa sürünme sürelerinde, sürünme hızı hızla artmaktadır. 750°C daki sürünme eğrileri (Şekil 7) ile 800°C daki sürünme hız eğrileri (Şekil 9) karşılaştırıldığında; artan sıcaklık ve artan gerilme ile sürünme hızının daha kısa sürelerde hızla arttığı ve de, sürünme kopma ömrünün azaldığı görülmektedir. Tablo 5'de, 750°C ve 800°C sıcaklıklarda; ikinci bölge kararlı sürünme eğiminden hesaplanan hızlarının değişimi görülmektedir. Buna göre; artan sıcaklıkla birlikte, artan gerilmeye göre,

sürünme hızı, çok daha hızlı bir şekilde artmaktadır. Sıcaklık artışının, gerilme artışına göre sürünme hızında çok daha etkin olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Inconel 718'de 800°C sıcaklıkta ve 200-350 MPa farklı gerilmelerde sürünme hızının zamanla değişim grafiği(Creep rate graphic of the Inconel 718 super alloy between 200-350 MPa at the different stresses and 800°C temperature by changing time)

3.4.1 Sürünmede Birim Şekil Değişiminden Dolayı Gerilme Üssü (Stress Exponent due to Creep Deformation)

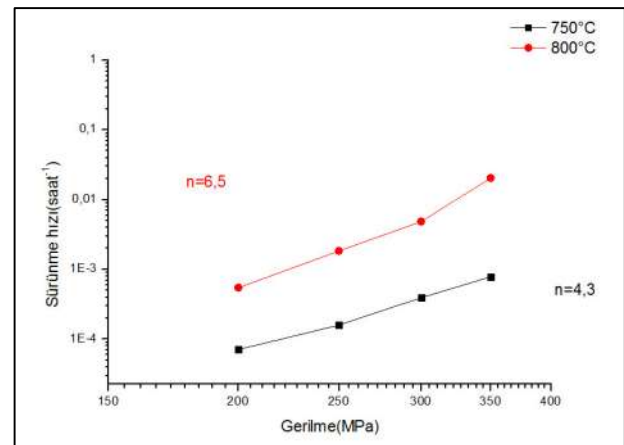
Sürünmede kopma, genellikle ısıyla aktive edilmiş zamana bağımlı plastik şekil değiştirmeye gerçekleşir. Sürünme mekanizmaları; dislokasyon sürünmesi ve yayınma sürünmesi olarak tanımlanır. Dislokasyon sürünmesi, üssel ilişkili ($\dot{\epsilon}_k \propto \sigma^n$) sürünmeye neden olur. Kristalin bir malzemenin kalıcı şekil değişimi için, iç latis direnci ve çeşitli engelleri yenmesi gerekir. Yayınma sürünmesi ise, çok kristalli malzemelerin, deformasyon sıcaklığının malzemenin ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarında gerçekleşir. Sadece yayınma sürünmesinin olması, artan sıcaklığının(T), $T > 0,9 T_{ergime}$ olduğu sıcaklıklarda geçerlidir[11].

Sürünme hız değerleri, sürünme eğrilerinin ikinci bölge eğiminden elde edilir bu hız kararlı sürünme hızı olarak tanımlanır. Tablo5'de 750°C ve 800°C daki farklı gerilme değerlerindeki birim şekil değişimi-zaman grafiğinin kararlı ikincil bölge diye tanımlanan doğrusal grafiğin eğiminden kararlı sürünme hızları hesaplanarak verilmiştir. Gerilme üssü (n) değerleri, 750°C ve 800°C sıcaklıkları için, Şekil 10'da görüldüğü gibi, logaritmik eksenlerde çizilmiş sürünme hızı-gerilme grafiğinin eğiminden hesaplanmıştır. Gerilme üssü değerleri;750°C sıcaklık için 4.3 ve 800°C için 6.5 olarak elde edilmiştir. Han Y., Chaturvedi M.C göre; sürünme hızının gerilme üssü $n=1$ olduğu zaman, sürünmede etkin olan yayınma

mekanizmasıdır. Gerilme üssü $n=3-7$ arasında olduğunda ise sürünmede etkin olan dislokasyon mekanizmasıdır. Hesaplanan sonuçlara göre, sıcaklık ya da gerilme arttığı zaman gerilme üssü artmaktadır. Bu durum sürünme mekanizmasının yayınma sürünme mekanizmasından ya da doğrusal sürünme mekanizmasından, dislokasyonun sürünme mekanizmasına değiştiğini gösteriyor[12,13]. Şekil 10'da hesaplanan gerilme üssü değerlerinden, bu çalışmada Inconel 718 için yapılan sürünme deneylerinde, etkin mekanizmanın dislokasyon sürünmesi olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Han Y., Chaturvedi M.C çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyumludur[12,13].

Tablo 5. Inconel 718'de 750°C ve 800°C sıcaklıklarda farklı gerilmelerdeki kararlı ikinci bölge sürünme hızları (Steady-state secondary creep rates at different stresses and 750°C, 800°C temperatures for Inconel 718)

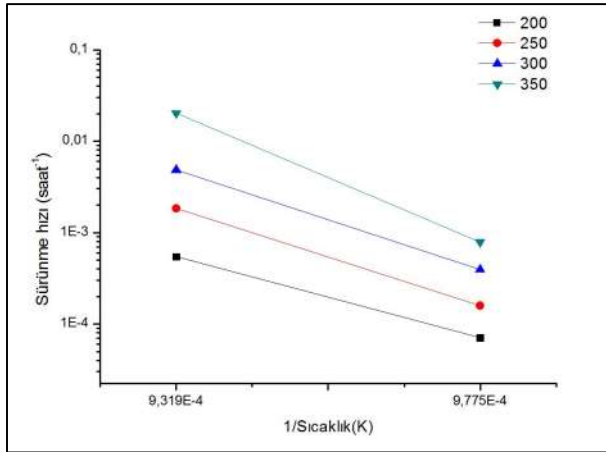
Sıcaklık 750°C	
Gerilme(MPa)	Sürünme Hızı (1/saat)
200	$7,077 \times 10^{-5}$
250	$15,886 \times 10^{-5}$
300	$39,27 \times 10^{-5}$
350	$78,66 \times 10^{-5}$
Sıcaklık 800°C	
Gerilme(MPa)	Sürünme Hızı(1/saat)
200	$54,46 \times 10^{-5}$
250	$184,46 \times 10^{-5}$
300	$486,7 \times 10^{-5}$
350	2034×10^{-5}



Şekil 10. Sürünme hızı-gerilme grafiğinden ($\dot{\epsilon}_k \propto \sigma^n$) bağıntısına göre elde edilen gerilme üssü değerleri(Stress exponent obtaining in accordance with the equation ($\dot{\epsilon}_k \propto \sigma^n$) from the Creep rate vs. Stress)

3.4.2 Sürünme Birim Şekil Değişiminin Aktivasyon Enerjisi (Activation Energy of the Creep Deformation)

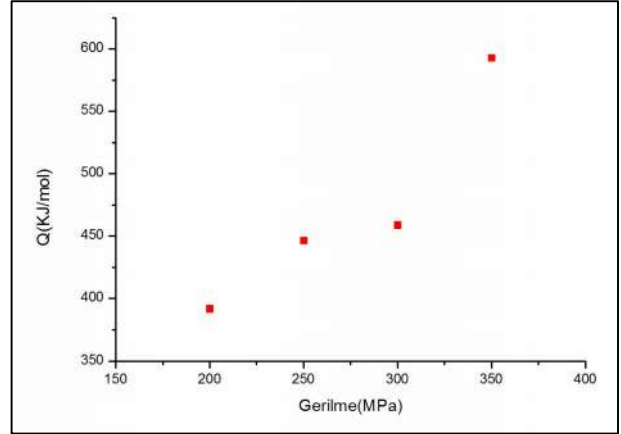
Sürünme deformasyonu, ısıyla aktive edilen bir işlemdir ve aktivasyon enerjisi 5 nolu eşitlik kullanılarak hesaplanabilir. Sürünme hızı $1/T(K)$ yarı logaritmik grafiği Şekil 11'de görüldüğü gibi çizilmiştir, eğrilerin eğimi aktivasyon enerjisini vermektedir. Aktivasyon enerjisi Tablo 5'de verilen gerilme değerleri için elde edilmiştir. Ayrıca, aktivasyon enerjisinin gerilme ile değişimi Tablo 6'daki değerler kullanılarak Şekil 12'de görüldüğü gibi çizilmiştir. Gerilme arttıkça zaman, sürünme aktivasyon enerjisi artmaktadır. Bu durum gerilmenin artmasıyla birlikte dislokasyon yoğunluğunun artmasına bağlı olarak dislokasyon yada atom tırmanmasının gerçekleşmesi için gerekli enerji gereksiniminin artması olarak açıklanabilir. Bu sonuç, artan gerilme ile birlikte sürünme mekanizmasının, yaygın sürünme mekanizmasından ziyade, dislokasyon sürünme mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. Inconel 718 alaşımında kararlı sürünme hızı-1/Sıcaklık(Kelvin) grafiği(Steady-state creep rate vs. temperature (1/T) graphic at Inconel 718)

Tablo 6. 750°C ve 800°C sıcaklıklar için farklı gerilmelerdeki kararlı sürünme hızlarından hesaplanan aktivasyon enerjileri tablosu(Activation energies table calculating from steady-state creep rate at different stresses for 750°C and 800°C temperatures)

Gerilme(MPa)	Aktivasyon enerjisi (KJ/mol)
200	397,546898
250	446,6035645
300	459,0573741
350	593,0333918



Şekil 12. Inconel 718'de sürünme aktivasyon enerjisi gerilme grafiği(Creep activation energy vs. Stress graphic)

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Larson-Miller parametresi, gerçek servis şartları için gerilme kopma testlerinden elde edilen sonuçları kullanarak, yüksek sıcaklıklarda sürünme ömürlerini hesaplayabilmek için kullanılır. Bu amaçla, Inconel 718 için sürünme deneylerinde belirtilen sıcaklık ve gerilmelerden Larson-Miller grafiği elde edilmiştir.

Sıcaklık ve gerilme arttıkça zaman, Inconel 718'in kararlı sürünme hızı artmakta, kopma ömrü azalmaktadır, üçüncül bölge sürünme davranışı baskın olmaktadır. 750°C'de 200-350MPa gerilme aralığında, sürünme hızının; $(7,077-78,66) \times 10^{-5}$ (1/saat) aralığında doğrusal olarak arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, 800°C'de 200-350MPa gerilme aralığında, sürünme hızının; $(54,46-2034,66) \times 10^{-5}$ (1/saat) çok daha hızlı arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç; artan sıcaklığın gerilme artışına göre, sürünme kopma-ömrü ve sürünme hızı üzerindeki etkinliğinin çok daha fazla olduğunu göstermektedir.

Hesaplanan gerilme üssü (n) değerlerinden, 750°C (n=4,3) ve 800°C (n=6,5) sıcaklıklarda etkin deformasyon mekanizmasının dislokasyon sürünmesi olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle, artan sıcaklıkla birlikte sürünme mekanizmasında, gerilme faktörünün etkinliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Sürünme aktivasyon enerjisinin gerilme ile arttığı tespit edilmiştir. 750°C ve 800°C sıcaklıklarında hesaplanan sürünme aktivasyon enerjilerinin 200-350MPa gerilme aralığında, 397,55-593,03 KJ/mol değişerek arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, artan gerilme ile birlikte sürünme mekanizmasının, yaygın sürünme mekanizmasından ziyade, dislokasyon sürünme mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Thomas, M. El-Wahabi and J.M. Cabrera, J.M. Prado, "High temperature deformation of Inconel 718", *Journal of Materials Processing Technology*, 177 ,2006,pp.469–472.
- [2] D.H. Kim, J.H. Kim, J.W. Sa, Y.S. Lee , C.K. Park , S.I. Moon, "Stress rupture characteristics of Inconel 718 alloy for ramjet combustor, *Materials Science and Engineering A* 483–484, 2008, pp.262–265.
- [3] S.H. Fu, J.X. Dong, M.C. Zhang, X.S. Xie, "Alloy design and development of INCONEL718 type alloy", *Materials Science and Engineering A*,499, 2009, pp.215–220.
- [4] K. Prasad, R. Sarkar, P. Ghosal, V. Kumar, "Tensile deformation behaviour of forged disc of IN 718 superalloy at 650°C", *Materials and Design* 31,2010, pp.4502–4507.
- [5] M.L. Nguyen, "High Temperature Creep Behaviour of Inconel 718 Superalloy", A thesis for the master degree,China, 2009.
- [6] T. Sugahara, K. Martinolli, D.A.P. Reis, C. Moura Neto, A.A. Couto, F. Piorino Neto, M.J.R. Barboza, "Creep Behavior of the Inconel 718 Superalloy", *Defect and Diffusion Forum Vols.* 326-328,2012,pp.509-514.
- [7] G. Marahleh., A.R.I Kheder and H.F. Hamad, "Creep-Life Prediction of Service-Exposed Turbine Blades", *Materials Science*, Vol. 42, No. 4, 2006.
- [8] D. William, JR. David, *Materials Science and Engineering an Introduction*, Eight Edition
- [9] M. Baydoğan, E.S. Kayalı, and H. Cimenoglu, "Service Life Estimation for a Reformer Tube against Creep Dominated Failure", *Materials Testing: Vol. 54, No. 1, İ.T.Ü*, 2012, pp. 49-52.
- [10] C. Berger; J. Granacher; A.Thoma., "Creep Rupture Behaviour of Nickel Base Alloys for 700°C - Steam Turbines", *Institut for Materials Technology, Darmstadt University of Technology, The Minerals, Metals&Materials Society*, 2001.
- [11] E.S. Kayalı, *Hasar Analizi Seminer Notları, Sürünme ve Sürünme Hasarı, Metalurji Mühendisleri Odası, İTÜ*, 1997.
- [12] Y. Han, M.C. Chaturvedi, "Steady state creep Rate Equation of Inconel 718 Superalloy", *Chin.J.Met.Sci.Technol.*, Vol.5,(1989).
- [13] Y. Han, M.C. Chaturvedi, "A study of back stress during creep deformation of superalloy inconel 718", *Materials Science and Engineering*, 85,1989,pp.59-65.