İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CU VE Tİ İLE ALAŞIMLANDIRILMIŞ ÇİNKO LEVHALARIN (TİTANZİNK) KISA DÖNEM TESTLERLE SÜRÜNME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olcay TÜRKOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CU VE Tİ İLE ALAŞIMLANDIRILMIŞ ÇİNKO LEVHALARIN (TİTANZİNK) KISA DÖNEM TESTLERLE SÜRÜNME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olcay TÜRKOĞLU
(503101310)

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet DEMİRKOL

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503101310 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Olcay Türkoğlu**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"Cu ve Ti İle Alaşımlandırılmış Çinko Levhaların (Titanzink) Kısa Dönem Testlerle Sürünme Özelliklerinin Belirlenmesi"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Mehmet DEMİRKOL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Ahmet ARAN** IŞIK Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Mustafa BAKKAL İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **12 Haziran 2013**
Savunma Tarihi : **14 Haziran 2013**

#direngeziparkı

Anne, Baba ve Biraderime;

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın planlanmasından sonuçlanmasına kadar tüm süreçte bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Ahmet ARAN ve Prof. Dr. Mehmet DEMİRKOL'a, kimyasal analizler için Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a, numunelerin hazırlanması ve deneylerin yapılmasında büyük emeği olan Sadettin OZAN'a, eski çalışma arkadaşım Y. Makina Müh. Akcan Akay'a, teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman manevi desteklerini ve güvenlerini hissettirerek bana güç veren aileme sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yanımda olan tüm dostlarıma da teşekkür ederim.

Mayıs 2013

Olcay TÜRKOĞLU
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR ÖZETİ **3**
2.1 Metal Malzemelerde Sürünme Problemi 3
2.1.1 Sürünme eğrileri 3
2.1.1.1 Birincil sürünme safhası 4
2.1.1.2 İkincil sürünme (kararlı sürünme) safhası 4
2.1.1.3 Üçüncül sürünme 5
2.1.2 Metallerde sürünme mekanizmaları 5
2.1.2.1 Dislokasyon sürünmesi 5
Tane sınırı kayması 7
Kayma 7
2.1.2.2 Yayınma sürünmesi 7
2.1.3 Norton üstel bağıntısı 8
2.2 Gerilme Gevşemesi 10
2.3 Sürünme Gerilme Gevşemesi İlişkisi 11
2.4 Malzeme ve Özellikleri 13
2.4.1 Bakır ve titanyum alaşımlı çinko levhalar 14
2.4.2 Kimyasal bileşim 15
2.4.3 İç yapı özellikleri 16
2.4.4 Mekanik özellikleri 18
2.4.5 Saf çinko ve bakır-titanyum katkılı çinko malzemelerin sürünme özellikleri 20
3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE HESAPLAMALAR **23**
3.1 Sürünme Deneyleri 23
3.1.1 Deney standartları 23
3.1.2 Deney koşulları 24
3.1.2.1 Yükleme 24
3.1.2.2 Sıcaklık 24
3.1.3 Deney düzeneği 26
3.1.4 Deney datalarının kaydedilmesi 26
3.2 Gerilme Gevşemesi Deneyleri 27
3.2.1 Deney standartları 27
3.2.2 Deney koşulları 27

3.2.2.1 Ön şekil değişimi verilmesi 27
3.2.2.2 Sıcaklık 27
3.2.3 Deney düzeneği 27
3.2.4 Deney datalarının kaydedilmesi 27
3.3 Hesaplamalar 28
3.3.1 Gerilme ve birim şekil değişiminin hesaplanması 28
3.3.2 Sürünme deneylerinden kararlı sürünme hızlarının hesaplanması 29
3.3.3 Gerilme gevşemesi deneylerinden temsili şekil değişim hızı hesaplanması 29
3.3.4 Norton eğrilerinin uydurulması, Qc değerinin bulunması ve bünye denkleminin oluşturulması 30
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER 31
4.1 Sürünme Deneyi Sonuçları 31
4.1.1 Ticari saflıkta çinko 31
4.1.2 Titanzink 34
4.1.2.1 Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar 34
4.1.2.2 48ºC sıcaklığında gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar 37
4.1.2.3 85ºC sıcaklığında gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar 39
4.1.2.4 Tüm sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneylere ait karşılaştırma 41
4.1.3 Cu-Ti ile alaşımlandırmanın sürünme davranışına etkisi 42
4.2 Gerilme gevşemesi deneyi sonuçları 43
4.2.1 Ticari Saflıkta Çinko 44
4.2.2 Titanzink 44
4.2.3 Cu-Ti ile alaşımlandırmanın gerilme gevşemesi davranışına etkisi 44
4.3 Sürünme gerilme gevşemesi ilişkisi 45
4.4 Sürünme Aktivasyon Enerjisi 49
4.5 Titanzink Malzemeye Ait Bünye Denklemi 50
5. GENEL SONUÇLAR 53
6. ÖNERİLEN ÇALIŞMALAR 55
EKLER 57
KAYNAKLAR 59
ÖZGEÇMİŞ 61

KISALTMALAR

SDH : Sıkı Düzen Hegzagonal
TZ : Titanzink
TS : Ticari Saflıkta
GG : Gerilme Gevşemesi
SRT : Gerilme Gevşemesi
RTD : Direnç Sıcaklık Dedektörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Titanzink malzemesinin özelliklerinin EN 988 14
Çizelge 2.2 : Ticari saflıkta çinko ve Titanzink'e ait kimyasal analiz sonuçları 15
Çizelge 2.3 : Titanzink malzemesinin çekme deneyi sonuçları. [20] 18
Çizelge 2.4 : Ticari saflıkta çinkonun çekme deney sonuçları [20] 19
Çizelge 4.1 : Oda sıcaklığında ticari saflıkta çinko malzemeye ait kararlı sürünme hızları. 33
Çizelge 4.2 : Oda sıcaklığında Titanzink malzemeye ait kararlı sürünme hızları 37
Çizelge 4.3 : 48 ºC sıcaklığında Titanzink malzemeye ait kararlı sürünme hızları ... 38
Çizelge 4.4 : 85 ºC sıcaklığında Titanzink malzemeye ait kararlı sürünme hızları ... 40
Çizelge 4.5 : Gerilme Gevşemesi ve Sürünme deneylerinden elde edilen kararlı sürünme hızları 46
Çizelge 4.6 : Gerilme gevşemesi deneyleri kullanılarak oluşturulan Norton üstel bağıntıları 46
Çizelge 4.7 : Oda Sıcaklığında sürünme verilerinden oluşturulan basitleştirilmiş Norton üstel bağıntıları 46
Çizelge 4.8 : Farklı gerilmeler için bulunan Qc değerleri 50

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Örnek Sürünme Eğrisi 4
Şekil 2.2 : Kayma ile tetiklenen dislokasyon sürünmesi [10] 6
Şekil 2.3 : Tane Sınırı Kayması 7
Şekil 2.4 : Yayınma Sürünmesi 8
Şekil 2.5 : Kararlı sürünme hızı ve gerilme ilişkisi. 9
Şekil 2.6 : Gerilme ve sıcaklığa göre saf bakıra ait gerilme üstelleri [8] 9
Şekil 2.7 : Parçacık ile sertleştirilmiş bazı metallere ait n ve Q_c (kJ/mol) değerleri [8] 10
Şekil 2.8 : Örnek Bir Gerilme Gevşemesi Grafiği [14] 11
Şekil 2.9 : X10CrMoVNbN-9 çeliğine ait sürünme özellikleri [14] 13
Şekil 2.10 :IN738LC Çeliğine ait örnek sürünme özellikleri [15] 13
Şekil 2.11 : Ti-Zn faz diyagramı [23] 16
Şekil 2.12 : Titanzink (500x) [20]**.** 17
Şekil 2.13 : TS (500x) [20]. 17
Şekil 2.14 : Had. yönüyle 0°, 45° ve 90°'lik doğrultulardaki çekme eğrileri (TZ). .. 19
Şekil 2.15 : Had. yönüyle 0°, 45° ve 90°'lik doğrultulardaki çekme eğrileri (TS). .. 20
Şekil 2.16 : Farklı çinko alaşımlarıyla, bakır ve alüminyumun sürünme 21
Şekil 2.17 : Saf Çinkoya ait deformasyon haritası [31] 22
Şekil 3.1 : Örnek bir deney numunesi 23
Şekil 3.2 : Fluke marka direnç sıcaklık detektörü 25
Şekil 3.3 : Farklı sıcaklıklarda yapılan sürünme deneylerine ait düzenek 25
Şekil 3.4 : Deney düzeneği 26
Şekil 3.5 : Örnek ölçüm ve hesap tablosu görünümü 28
Şekil 4.1 : 100 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 31
Şekil 4.2 : 90 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 31
Şekil 4.3 : 80 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 32
Şekil 4.4 : 70 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 32
Şekil 4.5 : 60 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 32
Şekil 4.6 : Farklı gerilmeler altında ticari saflıkta çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 33
Şekil 4.7 : Farklı gerilmeler altında ticari saflıkta çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 34
Şekil 4.8 : 120 MPa gerilme altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 34
Şekil 4.9 : 110 MPa gerilme altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 35

Şekil 4.10 : 100 MPa gerilme altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 35
Şekil 4.11 : 90 MPa gerilme altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 36
Şekil 4.12 : Farklı gerilmeler altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 36
Şekil 4.13 : Farklı gerilmeler altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı 37
Şekil 4.14 : 110 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 48 ºC sıcaklığında sürünme davranışı 37
Şekil 4.15 : 100 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 48 ºC sıcaklığında sürünme davranışı 38
Şekil 4.16 : 90 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 48 ºC sıcaklığında sürünme davranışı 38
Şekil 4.17 : 48^{o} C'de Titanzink malzemeye ait gerilme-kararlı sürünme hızı grafiği 39
Şekil 4.18 : 110 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 85 ºC sıcaklığında sürünme davranışı 39
Şekil 4.19 : 100 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 85 ºC sıcaklığında sürünme davranışı 40
Şekil 4.20 : 85^{o} C'de Titanzink malzemeye ait gerilme-kararlı sürünme hızı grafiği 41
Şekil 4.21 : Aynı gerilme altında farklı sıcaklıklardaki Titanzink malzemeye ait sürünme eğrileri 41
Şekil 4.22 : Aynı gerilme altında farklı sıcaklıklardaki Titanzink malzemeye ait sürünme eğrileri 42
Şekil 4.23 : Aynı gerilme altında farklı sıcaklıklardaki Titanzink malzemeye ait sürünme eğrileri 42
Şekil 4.24 : Aynı gerilme altında ticari saflıkta çinko ve Titanzink'e ait sürünme eğrileri 43
Şekil 4.25 : Aynı gerilme altında ticari saflıkta çinko ve Titanzink'e ait sürünme eğrileri 43
Şekil 4.26 : Saf Çinko levhalara ait gerilme gevşemesi deneyi sonuçları 44
Şekil 4.27 : Titanzink levhalara ait gerilme gevşemesi sonuçları 44
Şekil 4.28 : Aynı ön birim şekil değişimi uygulanmış Titanzink ve ticari saflıkta çinko malzemeye ait karşılaştırma 45
Şekil 4.29 : Saf çinko için $\dot{\varepsilon}_{SS}$ sürünme- $\dot{\varepsilon}_{SS}$gerilme Gevşemesi 47
Şekil 4.30 : Titanzink için $\dot{\varepsilon}_{SS}$ sürünme- $\dot{\varepsilon}_{SS}$ gerilme Gevşemesi 47
Şekil 4.31 : Oda sıcaklığında saf çinko ve Titanzink malzmelere ait sürünme ve gerilme gevşemesi ilişkisi 48
Şekil 4.32 : Titanzink levhalara ait Qc değerinin bulunması 50
Şekil 4.33 : Farklı sıcaklıklar Titanzink levhaya ait sürünme grafikleri 51
Şekil A.1 : Saf çinkoya ait farklı gerilmelerde sürünme deneyleri sırasında sıcaklık-zaman garfikleri 57
Şekil A.2 : Titanzink'e ait farklı gerilmelerde sürünme deneyleri sırasında sıcaklık-zaman garfikleri 58
Şekil A.3 : Her iki malzemenin gerilme gevşemesi deneyleri sırasında sıcaklık-zaman grafikleri 58

CU VE Tİ İLE ALAŞIMLANDIRILMIŞ ÇİNKO LEVHALARIN (TİTANZİNK) KISA DÖNEM TESTLERLE ODA SICAKLIĞINDA SÜRÜNME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Çinko uygulama alanı çok geniş bir malzemedir. Demir, alüminyum ve bakırın ardından en çok kullanılan dördüncü metaldir. Diğer yaygın metallerle karşılaştırıldığında atmosferik şartlarda korozyon dayanımı ve ekonomiklik bakımından ön plana çıkar. Bu nedenle duvar ve çatı kaplamalarında sıkça kullanılır. Ayrıca parlak yüzeyi de dekoratif bir görünüm sağlar.

Ancak düşük ergime sıcaklığı nedeniyle oda sıcaklıklarında 0.4 benzeş sıcaklık mertebelerindedir. Bu nedenle malzeme oda sıcaklığında sürünme (sünme- creep) davranışlarını da göstermektedir. Ayrıca soğuk şekil görmüş malzemede oda sıcaklığı rekristalizasyona sebep olmakta, soğuk şekil değişimi sonucu meydana gelecek olan dayanım artışını engellemektedir.

Saf çinko malzemenin yukarıda bahsedilen özelliklerini geliştirmek için genellikle alüminyum ve/veya bakır ile alaşımlandırıldığı görülmektedir. Son zamanlarda daha gelişmiş ve üstün özellikler için çinko alaşımlarında bakır ve titanyumun da kullanıldığı dikkati çekmektedir. (Ticari olarak bu tür alaşımlara Titanzink adı verilmektedir.) Bu alaşımlar sayesinde olası tane irileşmesinin önüne geçilmekte ve belli bir oranda dayanım artışı sağlanmaktadır.

Genel itibariyle malzemelerin sürünme özelliklerinin belirlenmesi uzun süreler alabilmektedir. Bu durum özellikle çelik esaslı alaşımlar için on binlerce saate varan deneylerin yapılmasını gerektirmektedir. Ancak gerilme gevşemesi deneyleri sayesinde sürünme deneylerinden elde edilebilecek bilgilerin daha kısa sürelerde ortaya çıkarılabildiği de görülmektedir.

Bu çalışmada bakır ve titanyum ile alaşımlandırılan çinko alaşımının oda sıcaklığındaki gerilme gevşemesi ve sürünme özellikleri, saf çinko alaşımlarıyla karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Ayrıca kısa dönem sürünme testleri farklı sıcaklıklarda Titanzink malzemeye uygulanmış ve bu malzemeye ait sürünme verileri elde edilmiştir. Sonuç olarak Titanzink malzemeye ait sürünme aktivasyon enerjisi 23 -85 sıcaklık aralığında belirlenmiş ve bu malzemeye ait sürünme bünye bağıntısı elde edilmiştir.

OBTAINING CREEP BEHAVIOR AND PROPERTIES OF CU-TI ALLOYED ZINC SHEETS BY CONDUCTING SHORT TERM CREEP AND STRESS RELAXATION TESTS

SUMMARY

After iron, aluminum and copper; zinc is one of the most common metals relatively. Especially in roofing and siding applications zinc sheets have an importance for many years. Zinc is a common, an economic material with great atmospheric corrosion resistance. All these properties are reasons of why zinc is preferred for roofing and siding applications.

Although zinc is common, an economic, a corrosion resistive material, some of its properties must be improved. It has lower yield point, very low creep strength, lower melting point among the other metals mentioned above. It can be recrystallized at room temperature and this prevents strain hardening behavior. In order to develop alloys that have superior properties than pure zinc, researchers have been alloyed zinc with different materials. Most common alloying materials for zinc are aluminum, lead, copper and titanium. New trend is alloying zinc with copper and titanium.

A Holland manufacturer has been accomplished to improve new zinc alloy which has 0.08 – 0.17 % Cu and 0.07-0.12 Ti and called it Titanzink. Also there are few manufacturers uses Cu and Ti to alloy Zinc but in different chemical composition ratios. Recent studies showed that Titanzink has improved yield strength, creep strength and recrystallization behavior of pure zinc.

First of all, commercially pure zinc sheets which are rolled to 0.6mm thickness and Cu-Ti addited zinc alloy (Titanzink) sheets which are rolled to 0.8mm thickness were procured by both domestic and international vendors. According to literature, test specimens were prepared from these sheets. All specimens were prepared parallel to roling direction.

In this study, creep behavior of commercially pure zinc and Titanzink are investigated at the room temperature. Because, zinc has relatively lower melting point that let the zinc creep at the room temperature. Also Titanzink can be creep at the room temperature. In addition to this, creep behavior of Titanzink was investigated in other temperatures.

Creep testing of materials is costly and takes a lot of time up to 100000 hours. But in stress relaxation tests, cost and time are reduced. By conducting stress relaxation tests some creep properties of materials like steady state creep strain rates can be determined. In this study, this relation of creep and stress relaxation is observed and compared with others metals. It is seen that there are lots of studies in the literature which shows this relationship.

Mechanical properties of these two materials which are yield point, tensile strength, elasticity modulus were achieved through mechanical tests had taken from literature and former study of a colleague.

Chemical analyses were made to obtain weight percentages of the alloying elements and other additives in commercially pure zinc and Titanzink called Cu-Ti alloyed zinc sheets in Faculty of Chemical and Metallurgical Engineerin of Istanbul Technical University. Also microscopic examinations of these two materials were observed. Grains and phases also observed from these microscopic analyses. Secondary phase of $TiZn_{15}$ that precipitated at grain boundaries of Titanzink was observed. All these chemical and microscopic properties were taken from former study that was conducted by a colleague.

To provide creep properties near the room temperature, creep tests were conducted at the room temperature. Both materials; commercially pure zinc and Titanzink were used in creep tests. At the room temperature these materials tested upon different range of stresses. Creep curves had established. Steady-state creep rates were calculated. Comparison of commercially pure zinc and Titanzink was provided.

Also, stress relaxation tests were conducted to these materials. Stress relaxation tests held on at the room temperature as well. Stress relaxation curves were achieved and settling stresses were obtained for both materials. Comparison of commercially pure zinc and Titanzink was provided.

Effect of alloying zinc with Cu and Ti on creep properties was discussed through creep tests and stress relaxation tests. Enhancements of these mechanical properties are observed. Precipitates of $TiZn_{15}$ in the zinc matrix and their effects to creep were discussed.

Another creep property of the materials is that activation energy for creep of Titanzink was investigated and obtained. To obtain this property, creep tests were conducted at different temperature conditions and different stress loadings. 48°C and 85°C were provided with a chamber that was built in Material Laboratory of IŞIK University for this thesis as well as any other tests that conducted for this study. By using results of these tests Qc value is derived in selected range of stresses and temperatures.

The steady-state creep behaviors of these two materials were investigated. Through the literature researches, Power-Law creep was seen suitable to present this behavior. Simplified Power-Law curves are fitted for both materials and stress exponents are derived for both materials by using test datas. Datas were analyzed by MATLAB and Excel softwares

Another important point of this study was to see a relation of creep and stress relaxation behavior of Titanzink. According to literature same mechanisms takes place both creep and stress relaxation. This relationship was investigated. It hasseen that steady state creep rate can be derived through stress relaxation tests by using numerical differentiation.

To sum up, results of this study can be summarized as follows;

- Titanzink material has higher creep strength at the room temperature than commercially pure zinc thanks to the $TiZn_{15}$ precipitates in the microstructure.

- According to results of stress relaxation tests, Titanzink material has higher settling strength than commercially pure zinc. This shows bolts and nuts joints have better rigidity.
- Activation energy for creep value of Titanzink material can be determined by conducting creep tests at the same stress value and different temperature conditions.
- Simplified Power-Law representation of commercially pure zinc and titanzink material can be derived from creep tests.
- Stress exponents of Power-Law representation for both materials can be derived from creep tests for both materials.
- By conducting creep tests both at different temperature and at different stress conditions, consecutive equation that belongs to Titanzink can be derived at a specific loading range.
- Steady state creep behavior of commercially pure zinc and Titanzink can be derived from stress relaxation test results. This shows that steady state creep strain rates can be predicted by using stress relaxation tests.

1. GİRİŞ

Çinko levhalar uzun yıllardır cephe kaplamaları ve çatı elemanlarında kullanılmıştır. Ayrıca oluk ve boru sistemlerinde de çinko malzemeler tercih edilmektedir. Daha önceleri kullanılan çinko levhalar alaşımsız veya ticari saflıkta kullanılmaktaydı. Ekonomik ve estetik bir görünüme sahip oluşu bu kullanımın en büyük nedenlerindendir. Ayrıca yüksek korozyon dayanımı da bir diğer tercih sebebidir.

Saf çinko malzemelere bakıldığında çelik, bakır ve alüminyum gibi diğer yaygın metallere oranla daha düşük bir dayanıma sahip olduğu görülebilir. Sürünme davranışı ise bu malzemelere kıyasla oldukça kötüdür. Son yıllarda yapılan çalışmalarla çinko malzemelerde dayanım artışı sağlanmaya çalışılmıştır. Özellikle alüminyum, bakır ve magnezyum elementleri kullanılarak alaşımlandırma çalışmaları yapılmış ve bu alaşımlandırma sonucu mekanik özelliklerinde ciddi bir artış gözlemlenmiştir [1].

Günümüzde saf çinko çinko levhalar yerine yukarıda bahsedilen (neredeyse tüm uygulama alanlarında) alaşımlandırılmış çinko levhalar kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada bakır ve titanyum ile alaşımlandırılmış çinko levhalar kullanılmıştır. Bu alaşımlandırma sayesinde yüksek dayanım artışları ve malzemenin mekanik özelliklerinde artış gözlemlenmiştir. Yapı içerisinde düşük çözünürlüğe sahip olan titanyum, çinko ile bir faz oluşturarak tane sınırlarında çökelmekte ve yüksek dayanım artışına sebep olmaktadır [2]. Ayrıca yapı içerisinde bulunan bakır çinko ile birlikte katı faz çözeltisi oluşturarak dayanım artışına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca bu katı faz çözeltisi rekristalizasyon sıcaklığını arttırmaktadır [3].

Kullanım alanlarına bakıldığında çinko levhalar genellikle ortam sıcaklığına maruz kalmaktadır. Kötü sürünme dayanımı nedeniyle, dış cephe kaplamaları, oluk ve boru şeklinde kullanıldığında neredeyse kendi ağırlığıyla sürünmeye maruz kalabilir. Bir diğer durum ise cıvata vb. şekilde sabitlenen bu levhaların gerilme gevşemesi nedeniyle bağlantı noktalarının zayıflamasıdır. Bu iki durum yeni geliştirilen çinko alaşımlarının sürünme ve gerilme gevşemesi özelliklerinin ortaya çıkarılması gerektiğini vurgular. Malzemenin nasıl bir sürünme davranışına sahip olduğu

araştırılmalıdır. Bu çalışmada da ortam sıcaklığında malzemenin sürünme davranışı araştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında ticari saflıkta çinko ve Titanzink malzemelere ait mekanik özellikler ve içyapı araştırmaları yapılmış. Sürünme ve gerilme gevşemesi deneyleri gerçekleştirilmiş. Bu deneyler sonucu malzemelere ait bünye denklemleri oluşturulmuştur. Gerilme üstelleri hesaplanmıştır. Ayrıca farklı sıcaklıklarda yapılan sürünme deneyleri sayesinde oda sıcaklığı civarında titanzink malzemeye ait aktivasyon enerjisi bulunmuştur.

Sürünme deneylerinin uzun zaman ve maliyet gerektirmesi nedeniyle yüksek yükleme şartları ve gerilme gevşemesi deneyleri kullanılarak bu malzemeye ait sürünme davranışı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yapılan araştırmada ticari saflıkta çinko malzeme de kullanılarak bir karşılaştırma yapma imkanı sağlanmıştır. Ayrıca malzemeye ait sürünme bünye denklemleri oluşturulmuş gerilme üstelleri ve sürünme için gerekli olan aktivasyon enerjileri bulunmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Metal Malzemelerde Sürünme Problemi

Sürünme (Sünme-Creep) yüksek sıcaklık ve gerilme altında malzemenin kalıcı olarak şekil değiştirmesi olarak tanımlanmaktadır. [4] Bu tanımda bahsedilen yüksek sıcaklık değerleri benzeş sıcaklığın yaklaşık 0.5 civarı ve üzeri olduğu durumlardır. Benzeş sıcaklık her malzemede farklılık gösteren göreceli bir kavramdır. Kelvin cinsinden çalışma sıcaklığının erime sıcaklığına oranı (T/Tm) olarak kabul edilir. Bazı malzemelerde 0.25 benzeş sıcaklığında sürünme davranışı gözlemlenmiştir. [5]

Sürünme davranışı basit olarak şu şekilde açıklanabilir;

$$\dot{\varepsilon} = f(\sigma, T, t) \qquad \textbf{(2.1)}$$

ε̇: Birim şekil değişim hızı

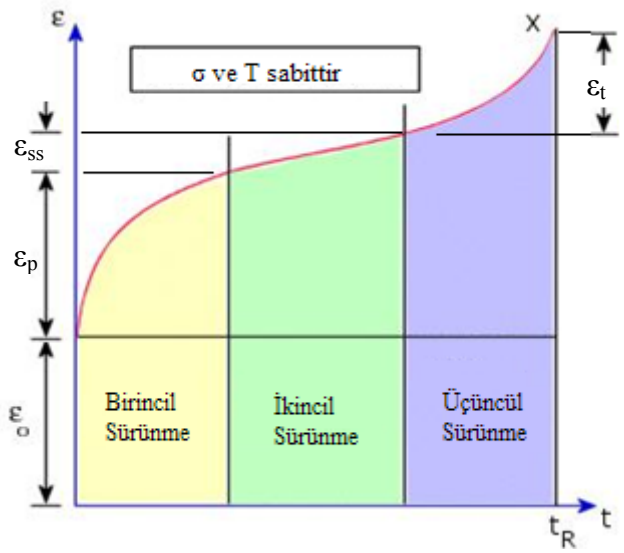
σ: Gerilme

T: Sıcaklık

t: Zaman

2.1.1 Sürünme eğrileri

Malzemelerin yüksek sıcaklık ve gerilme altında gösterdikleri bu davranış sürünme eğrileri ile ifade edilmektedir (Şekil 2.1). Bu eğriler yüksek sıcaklık altında sabit yüke maruz kalan deney numuneleri sayesinde oluşturulmaktadır. Basit bir deney gibi görünmesine rağmen çok uzun süreler (100.000 saate varan) boyunca deney koşullarının sağlanmasını gerektirir. Bu nedenle oldukça zahmetli ve yüksek maliyetlidir. Şekil 2.1de örnek bir sürünme eğrisi gösterilmiştir. [6]



Şekil 2.1 : Örnek Sürünme Eğrisi.

Sürünme eğrisinden de görüldüğü üzere sürünme davranışı 3 ana bölümden oluşur.

Bu eğrideki toplam sürünmeden kaynaklanan toplam sürünme uzaması aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon = \varepsilon_{o+}\ \varepsilon_p + \varepsilon_{ss} + \varepsilon_t \qquad \textbf{(2.2)}$$

ε_o = yükleme esnasında oluşan uzama (ön yükleme)

ε_p = birincil sürünme uzaması (1. bölge)

ε_{ss} = kararlı sürünme uzaması (2. bölge)

ε_t = üçüncül sürünme uzaması (3. bölge)

2.1.1.1 Birincil sürünme safhası

Birincil sürünme bölgesinde birim şekil değişimi zamana bağlı olarak azalan hızda artmaktadır. Diğer bir deyişle bu bölgede malzemenin sürünme davranışına karşı direnci de artmaktadır. Pekleşme (dislokasyon yoğunluğu) etkisi daha belirgin olduğu için sanki dayanım artıyormuş gibi bir etki sağlar. [6]

2.1.1.2 İkincil sürünme (kararlı sürünme) safhası

Bu bölge sürünme hızının (birim şekil değişiminin zamana oranı dε/dt) kararlı duruma ulaştığı safhadır. Literatürde kararlı sürünme bölgesi olarak da

belirtilmektedir [7]. Sürünme ömrü üzerine yapılan hesaplar genelde bu bölgeden elde edilen verilere dayanmaktadır.

Yapılan çalışmalarda sürünmeye en büyük etkenin bu ikincil sürünme yani kararlı sürünme bölgesi olduğu düşünülmektedir [8]. Bu varsayım sürünme davranışını açıklamak için ortaya çıkarılan denklemleri basitleştirmektedir. Bu bölgede $\dot{\varepsilon}_{ss}$, kararlı sürünme hızı, artan zaman ve birim şekil değişimine rağmen sabit kalmaktadır (Sıcaklık ve gerilme şartları değişmemesi koşuluyla.).

Metallerde Sürünme Mekanizmaları başlığı altında ikincil sürünme bölgesinde aktif olan sürünme mekanizmaları tanımlanmaya çalışılmış ve bünye bağıntılarının oluşturulmasıyla ilgili teorik yaklaşımlar açıklanmıştır.

2.1.1.3 Üçüncül sürünme

İkincil bölge sonrası deney numunesinin karasız bir şekilde uzayıp koptuğu bölgedir. Mekanik olarak numunede boyun verme ve yapıda boşlukların oluşması üçüncül sürünme davranışına belirleyici rol oynamaktadır. [7]. İçyapı olarak; yeniden kristalleşme, çökeltilerin aşırı büyümesi ve fazlar arası yayınma da bu bölgede gözlemlenen olaylardandır [6].

2.1.2 Metallerde sürünme mekanizmaları

Metal malzemelerde gözlemlenen başlıca sürünme mekanizmalarının iki grup halinde incelenebildiği görülmektedir. Bunlar, yayınma sürünmesi ve dislokasyon sürünmesidir.

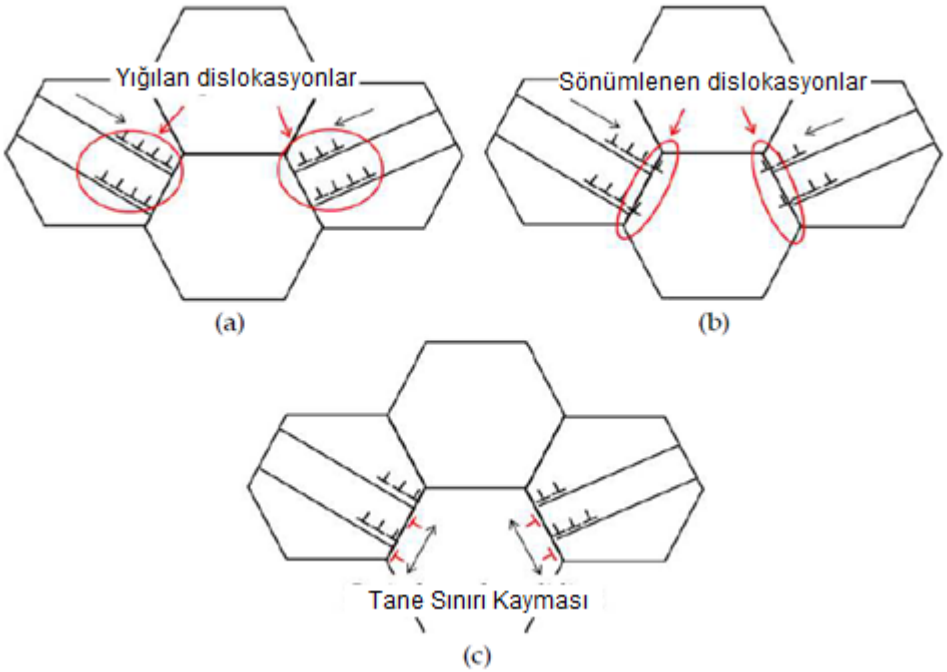
2.1.2.1 Dislokasyon sürünmesi

Kristal yapının, öz yayınma katsayısı kontrolünde tırmanma ve kayma hareketlerinin birbirini takip eden kombinasyonu şeklinde gerçekleşmektedir [9]. Dislokasyon sürünmesi boşluk yayınması yardımıyla dislokasyon tırmanması ve kaymayı sürdürmesi ile modellenebilir [6]. Bu durum Orowan ve Bailey tarafından önerilen bir model ile açıklanabilir. Bu modele göre, kararlı sürünme hızı; deformasyon sertleşmesi (pekleşme) ve ısıl toparlanma arasındaki dengeden oluşmaktadır [9]. Pekleşme mekanizması dislokasyon hareketlerini kısıtlarken ısıl gevşeme mekanizmalarının aktifleşmesi sayesinde dislokasyon hareketleri kolaylaşmakta ve bu denge kararlı bir sürünme hızının oluşmasına sebep olmaktadır. Dislokasyon

sürünmesi nispeten düşük sıcaklıklarda ve uygulanan yüksek gerilmeler altında görülmektedir [6].

Daha önce yapılan bazı çalışmalarda dislokasyon sürünmesi kayma ile tetiklenen tırmanma mekanizması olarak da düşünülmüş kaymanın birim şekil değişimini kontrol ettiği, tırmanma mekanizmasının ise birim şekil değişim hızını kontrol ettiği öne sürülmüştür. Bu çalışmaya göre dislokasyonlar tane sınırlarını geçememektedir ve tane sınırları tarafından sönümlenmektedir. Isıl etki neticesinde gelişen toparlanma sayesinde tane sınırında kayma olmaksızın sürünme davranışı gözlemlenmektedir [9].

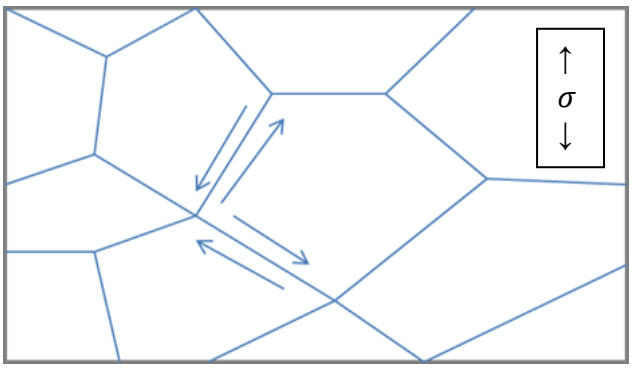
Günümüzde yapılan çalışmalarda sürünme aralığındaki düşük sıcaklıklarda kayma ile tetiklenen tane sınırı kayması modeli ortaya konmuştur [10]. Bu modele göre tane sınırı kayma mekanizmasının ancak yüksek sıcaklıklarda gözlemlenmesine rağmen, Şekil 2.2'te şematik olarak verilen mekanizma sayesinde göreceli bir tane sınırı kayması da gözlemlenebilmiştir. Söz konusu çalışmada dislokasyon sürünmesinin etkisi dikkati çekmektedir. Bahsedilen çalışma saf çinko malzeme ile yapılmış olup SDH yapının sürünme özelliklerini de bir ölçüde belirtmektedir.



Şekil 2.2 : Kayma ile tetiklenen dislokasyon sürünmesi **[10]**.

Tane sınırı kayması

Yüksek sıcaklık ve düşük şekil değişim hızlarında kayma gerilmeleri nedeniyle meydan gelir. Bu tür sürünme davranışında ısıl aktivasyonun etkisiyle tane sınırları gerilme yönünde hareket eder [7]. (Şekil 2.3) Düşük gerilme etkisindeki tanelerin boyutsal değişimi minimaldir [9, 7].



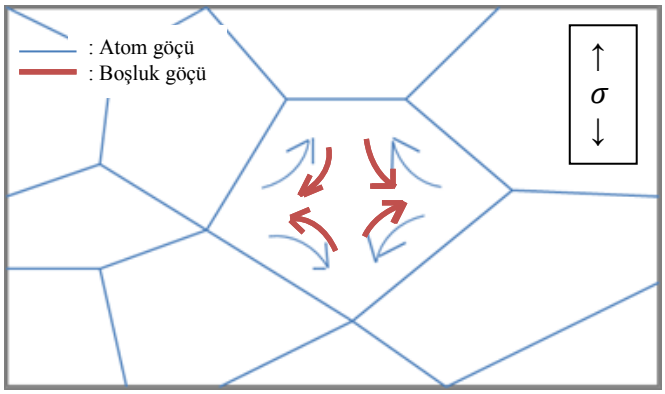
Şekil 2.3 : Tane Sınırı Kayması.

Kayma

Sıcaklığın artmasıyla yeni kayma düzlemlerinin meydana gelerek plastik şekil değişimini kolaylaştırır [6]. Çok yüksek gerilme (göreceli olarak sürünme deneylerinden kullanılan gerilmelerden çok daha yüksek) ve yüksek sıcaklık şartlarında geçerlidir [9]. Sürünme hızları; engeller (çökeltiler, çözünen atomlar ve diğer dislokasyonlar) tarafından hareketi kısıtlanan dislokasyonlar yardımı ile bulunur.

2.1.2.2 Yayınma sürünmesi

Yüksek sıcaklıklarda tane içerisinde bulunan atomların gerilme yönündeki yer değiştirme eğilimi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.4'de şematik olarak bu mekanizma verilmektedir. Bu sürünme davranışı sırasında yüksek sıcaklığın aktivasyonuyla birlikte atomların gerilme yönüne hareketi gözlemlenir ve boşlukların da gerilmenin tersi yönünde hareketi de gözlemlenmektedir [7].



Şekil 2.4 : Yayınma Sürünmesi.

2.1.3 Norton üstel bağıntısı

Kararlı sürünme hızı $\dot{\varepsilon}_{SS}$'nin uygulanan gerilmeyle olan ilişkisi bir bünye denklemi olarak Norton Üstel Bağıntısı şeklinde ifade edilmiştir [8].

Logaritmik olarak çizilen bu diyagramlarda doğrusal karakter, üstel bağıntının geçerli olması sebebiyle elde edilmektedir. Bu durumda kararlı sürünme hızı sabit kalarak ikinci bölgede tek bir değerle ifade edilmektedir. Bu davranış şematik olarak Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

$$\dot{\varepsilon}_{SS} = A\sigma^n \, exp(-Q_c/RT) \qquad \textbf{(2.3)}$$

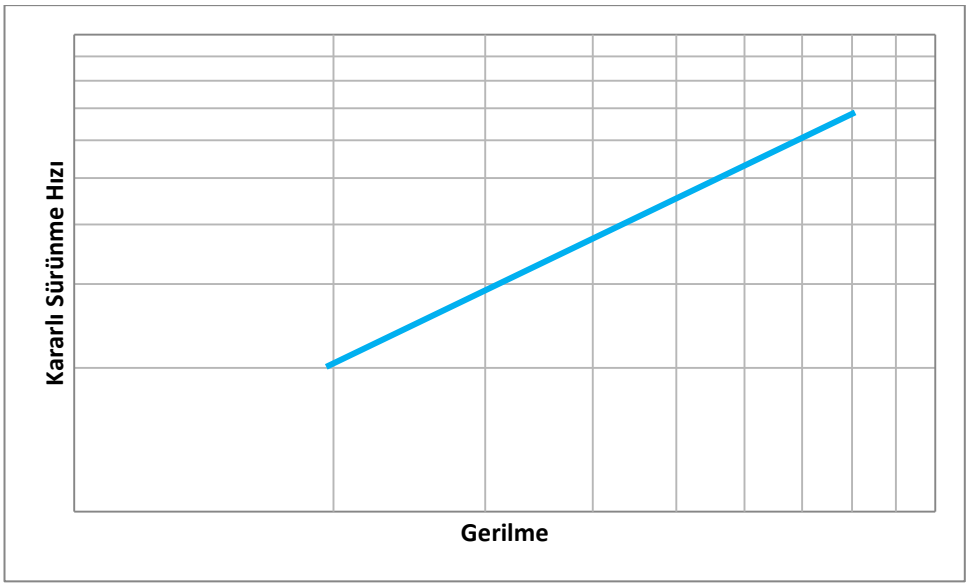
A: Bir malzeme sabiti

n: Gerilme üsteli

Q_c: Sürünme için aktivasyon enerjisi (J/mol)

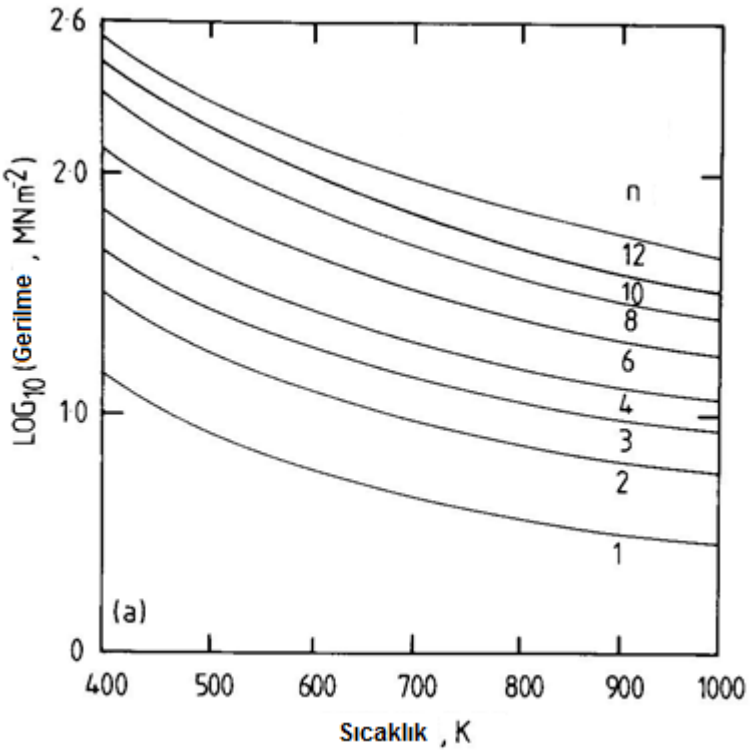
R: Gaz sabiti (8.31J/molK)

T: Kelvin cinsinden sıcaklık



Şekil 2.5 : Kararlı sürünme hızı ve gerilme ilişkisi.

Norton tarafından öne sürülen bu bağıntı literatürde birçok malzemeye ait sürünme davranışının modellenmesinde kullanılmıştır [11, 12, 13, 14, 15]. Bu çalışmada da bu fonksiyon temel alınmıştır. Yayınma sürünmesinin etkin olduğu durumlar için Norton tarafından önerilen bu fonksiyonun düzeltilmiş halleri mevcuttur [8].



Şekil 2.6 : Gerilme ve sıcaklığa göre saf bakıra ait gerilme üstelleri **[8]**.

Parçacık ile Sertleştirilmiş Alaşım	n	Q_c
½Cr½Cr¼V	~12	~600
Nimonic 80A[1]	~8	~410
TD-nickel[2]	~40	~795
SAP[3]	~10	625-1675

Şekil 2.7 : Parçacık ile sertleştirilmiş bazı metallere ait n ve Q_c (kJ/mol) değerleri **[8]**.

Yapılan literatür araştırmalarına göre saf malzemelerin gerilme üstelleri uygulanan düşük gerilme seviyelerinde 1 mertebelerindeyken uygulanan yüksek gerilme seviyelerinde 12'ye kadar çıkabilmektedir [8]. Şekil 2.8'da saf bakıra ait gerilme üsteli değişimini gösteren grafikte yukarıda bahsedilen ilişki gözlemlenmektedir. [8]

Gerilme üsteli n, saf metallerin sürünme mekanizmalarıyla deneysel olarak ilişkilendirilebilir. Yüksek gerilme ve düşük sıcaklık şartlarında n=>5 olması halinde etkin mekanizmanın dislokasyon sürünmesi olduğu düşünülebilir [8].

Ayrıca alaşımlandırma ve parçacık ile sertleştirme de gerilme üstellerinde bir artışa neden olmaktadır. Şekil 2.7'de parçacık ile sertleştirilmiş alaşımlarda gerilme üstellerinde büyük artışlar olduğu gözlemlenmiştir. [8]

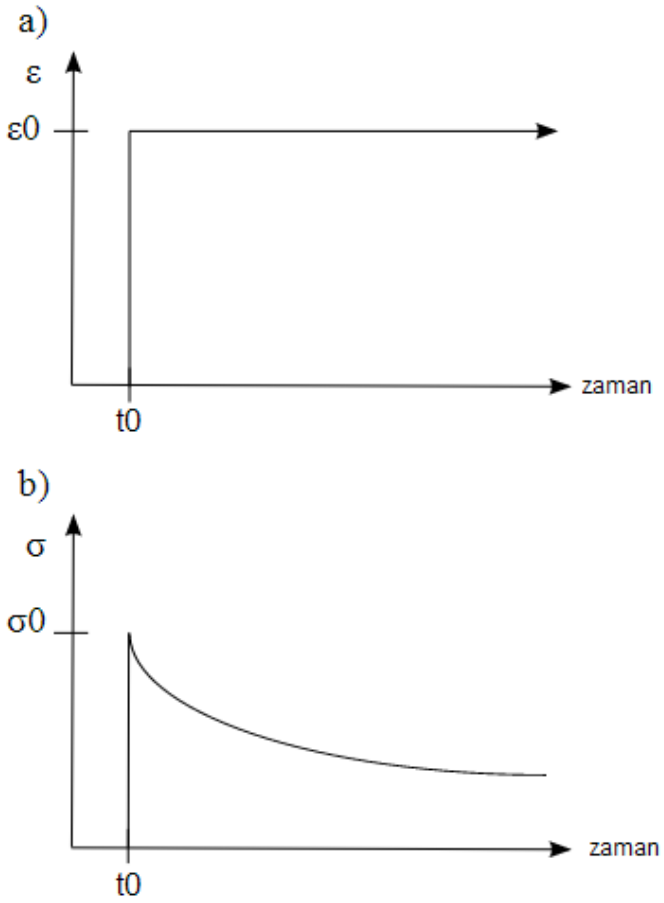
Denklem 2.3 te tanımlandığı üzere sürünme davranışı bir üstel fonksiyon şeklinde ifade edilebilir. Bu fonksiyonunu bir elemanı da Q_c olup sürünme için gerekli olan aktivasyon enerjisini vermektedir [7, 8]. Bu ilişki ayrıca denklem 2.3'ten de türetilebilen $ln\dot{\varepsilon}_{ss} \propto 1/T$ doğrusal ilişkisi ile de tanımlanabilir [11]. Literatürde Q_c değerinin bulunması ile ilgili birçok çalışma mevcuttur [11, 12, 13].

n ve Q_c değerlerinin nasıl bulunacağı bir sonraki bölümde Norton Üstel Bağıntısı başlığında anlatılmıştır.

2.2 Gerilme Gevşemesi

Gerilme gevşemesi davranışı malzemelerin sürünme davranışına benzer bir davranıştır. Yüksek veya nispeten orta sıcaklık koşullarında etkin olmaktadır. Malzeme sabit bir birim şekil değişimine uğratılmış ve o şekilde tutulmuştur. Uygulanan gerilme izlendiğinde, zamana bağlı olarak gerilme düşüşü meydana gelmektedir. Bu mekanizma şu şekilde işlemektedir. Ön birim şekil değişimi verilen

malzemede meydana gelen elastik birim şekil değişimi zamanla plastik şekil değişimine dönmektedir. Bu durumda Hooke bağıntısına ($\sigma = \varepsilon_e E$) göre azalan elastik birim şekil değişimi gerilmenin de azalmasına neden olacaktır. Bu gerilme kaybına gerilme gevşemesi denmektedir [14]. Şekil 2.8'de örnek bir gerilme gevşemesi grafiği görülmektedir. Gerilme gevşemesi oluşturulması 10 saatten az sürmektedir [15, 16].



Şekil 2.8 : Örnek Bir Gerilme Gevşemesi Grafiği **[14]**.

2.3 Sürünme Gerilme Gevşemesi İlişkisi

Gerilme gevşemesi ve sürünme sırasında aynı mekanizmalar rol oynamaktadır. Gerilme gevşemesi verileri kullanılarak temsili birim şekil değişim hızları hesaplanabilmektedir [15]. Gerilme gevşemesi sırasında verilen ön birim şekil değişimi (Denklem 2.4) elastik ve plastik şekil değişimlerinin toplamı olarak yazılabilir ve gerilme gevşemesi deneyi süresince sabittir. Toplam birim şekil değişiminin zamana bağlı değişimi bu durumda sıfır olmaktadır (Denklem 2.5).

Elastik birim şekil değişimi Hooke kanuna (Denklem 2.6) göre yazılacak olursa elastik birim şekil değişiminin zamana bağlı değişimi Denklem 2.7 deki gibi olacaktır. Denklem 2.7, Denklem 2.5 de yerine koyulacak olursa plastik şekil değişiminin zamana bağlı değişimi Denklem 2.8 teki gibi elde edilecektir. Bu ifade temsili kararlı sürünme hızı olarak bilinmektedir. Deney verileri kullanılarak sayısal yöntemler vasıtasıyla gerilmenin zamana bağlı değişimi hesaplanabilmektedir. Önemli olan nokta hesaplanacak temsili kararlı sürünme hızının gerilme gevşemesi deneylerinin ilgili noktalarından elde edilmesidir. Bu noktalar sürünme deneylerinde uygulanan gerilmeye yakın olan noktalardır. Bu çalışmada istenilen gerilme değerinin ± 3 MPa civarında temsili kararlı sürünme hızları hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \tag{2.4}$$

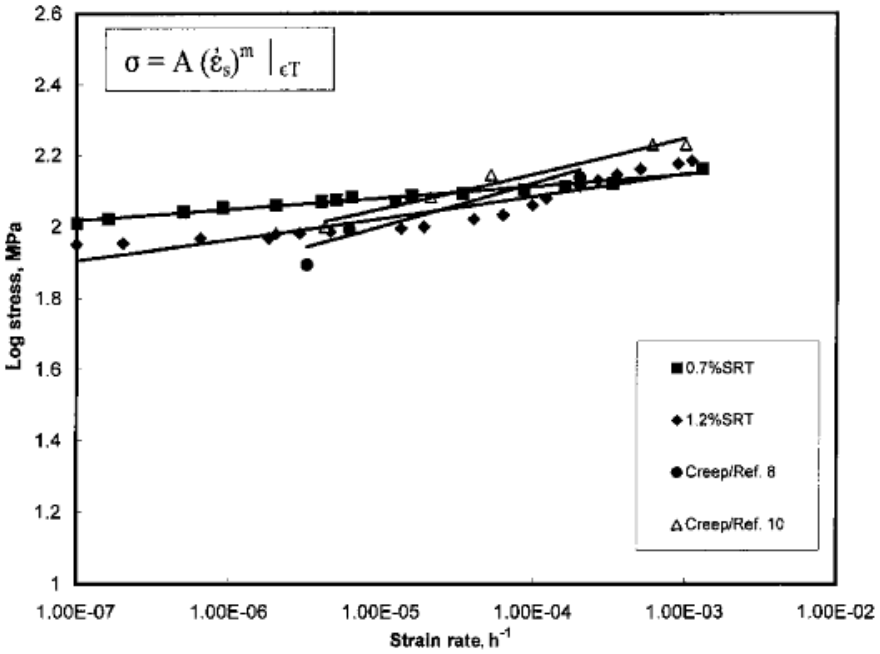
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_e}{dt} + \frac{d\varepsilon_p}{dt} = 0 \tag{2.5}$$

$$\sigma = \varepsilon E \tag{2.6}$$

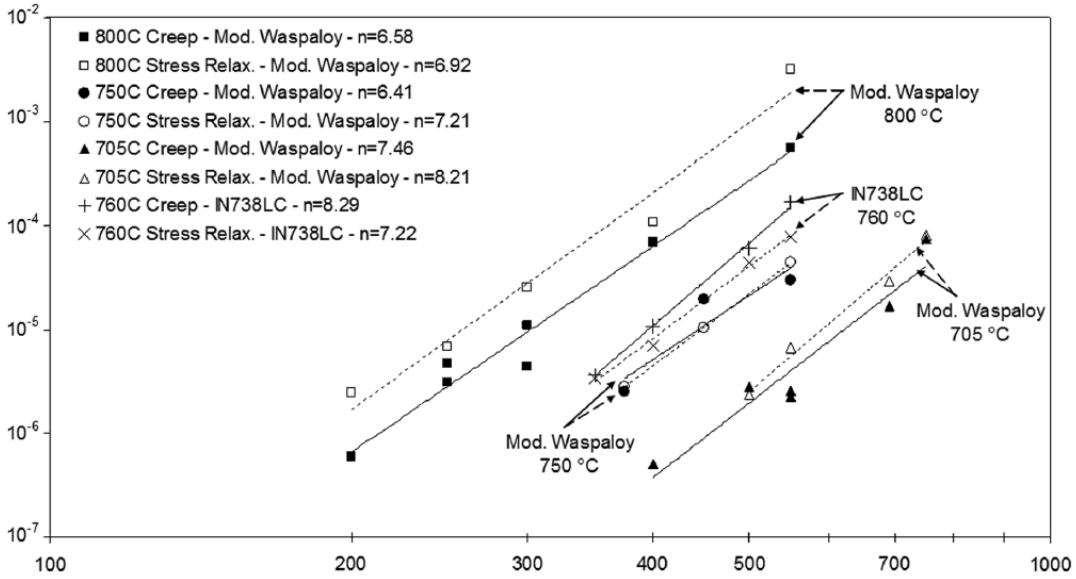
$$\frac{d\varepsilon_e}{dt} = \frac{1}{E}\frac{d\sigma}{dt} \tag{2.7}$$

$$\frac{d\varepsilon_p}{dt} = -\frac{1}{E}\frac{d\sigma}{dt} \tag{2.8}$$

Literatürde bu yöntemle yapılan birçok çalışma mevcuttur [14, 15, 17- 19] . Şekil 2.9 de bu yöntemle X10CrMoVNbN-9 çeliğine ait sürünme özellikleri ortaya çıkarılmış ve sürünme testleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca aynı yöntem farklı türdeki çelik alaşımları için de kullanılmıştır.(Şekil 2.10). Farklı sıcaklıkta farklı alaşımların sürünme-gerilme gevşemesi ilişkileri ortaya çıkarılmıştır. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'de görüldüğü üzere aynı sıcaklık şartlarında malzemelerin gerilme gevşemesi ve sürünme davranışları benzerlik, kararlı sürünme hızları ve temsili sürünme hızlarının karşılaştırılması olarak verilmiştir. Bir sonraki bölümde bu grafiklerin nasıl ortaya çıkarılacağı anlatılmıştır.



Şekil 2.9 : X10CrMoVNbN-9 çeliğine ait sürünme özellikleri [14].



Şekil 2.10 :IN738LC Çeliğine ait örnek sürünme özellikleri [15].

2.4 Malzeme ve Özellikleri

Bu çalışmada bakır ve titanyum alaşımlı çinko levhalar kullanılmış; alaşımlandırmanın sürünme özelliklerine etkisi, kısa dönem deneylerle sürünme davranışının belirlenmesi ve sürünme-gerilme gevşemesi ilişkisi gözlemlenmesi için

saf çinko ve bakır-titanyum katkılı çinko levhaların oda sıcaklığında sürünme ve gerilme gevşemesi deneyleri yapılmıştır.

2.4.1 Bakır ve titanyum alaşımlı çinko levhalar

Günümüzde yeni geliştirilen alaşımlarda amaç tane irileşmesinin önüne geçmek, deformasyonla dayanım artışı (pekleşme) sağlamak ve sürünme dayanımını iyileştirmektir. Bu amaçla çinkoya bakır, mangan, magnezyum, alüminyum, krom ve titanyum gibi alaşım elementleri katılmaktadır. Ancak en yaygın olarak kullanılan çinko levhalar bakır ve titanyum alaşımlı olanlardır [1]. Geliştirilen bu malzemenin (titanzink) alaşımsız ya da ticari saflıkta çinkodan farkları şu şekilde özetlenebilir:

- Yüksek sıcaklıklarda dahi tane irileşmesine karşı dirençli olması
- Daha yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olması
- Daha yüksek sertliğe sahip olması
- Daha yüksek sürünme dayanımına sahip olması

Binaların cephe kaplamasında kullanılan bakır ve titanyum alaşımlı levhalar EN 988 standardına göre imal edilmektedir. Bu çalışmada incelenen malzemeye ilişkin üretici firma tarafından garanti edilen ve EN 988 standardında beklenen özellikler Çizelge 2.2'de gösterilmiştir [20].

Çizelge 2.1 : Titanzink malzemesinin özelliklerinin EN 988 standardıyla karşılaştırılması [20-22].

Kimyasal Bileşim	**NedZink**	**EN 988**
Çinko	Zn %99,995 saflıkta	EN 1179 standardına göre Z1 kalitesinde çinko (min. %99.995 saflık)
Bakır	Cu %0.08 – 0.17	Cu %0.08 – 1.0
Titanyum	Ti %0.07 – 0.12	Ti %0.06 – 0.2
Alüminyum	Al ≤ %0.015	Al ≤ %0.015
Boyut Toleransları	**NedZink**	**EN 988**
Kalınlık	± 0.025 mm	± 0.3 mm
Genişlik	+2 / -0 mm	+2 / -0 mm
Uzunluk	+2 / -0 mm	+10 / -0 mm

Çizelge 2.2 (devam) : Titanzink malzemesinin özelliklerinin EN 988 standardıyla karşılaştırılması [20- 22].

Mekanik Özellikler	NedZink	EN 988
Akma dayanımı	min. 110 Mpa	min. 100 MPa
Çekme dayanımı	min. 150 Mpa	min. 150 MPa
Kopma uzaması	min. %40 (had. yönünde)	min. %35 (had. yönünde)
Sertlik	min 40 HV	-
Katlama testi	Kendi üzerine katlandığında çatlak tipi hasar oluşmaz.	Kendi üzerine katlandığında hasar oluşmamalı
Sürünme testi	50 MPa altında 60 dk'da max %0.1 kalıcı şek. değ.	50 MPa altında 60 dk'da max %0.1 kalıcı şek. değ.

2.4.2 Kimyasal bileşim

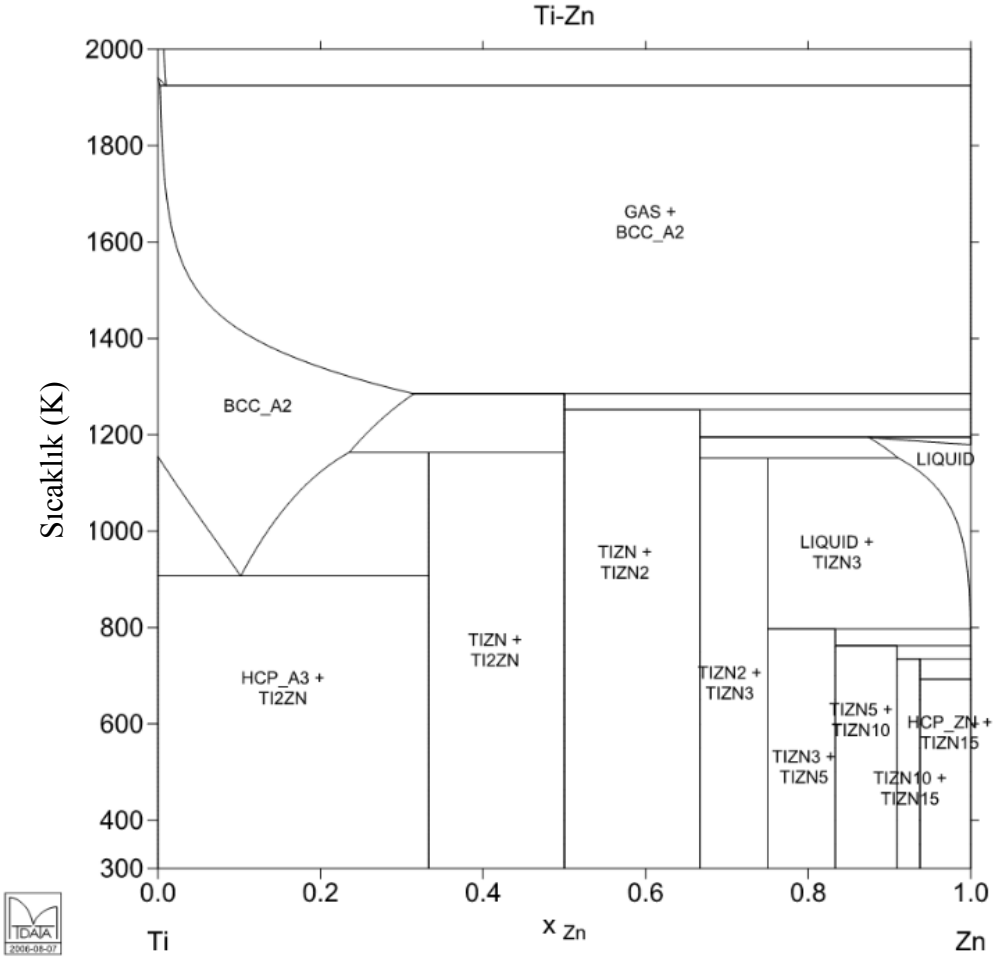
Bu çalışmada sürünme ve gerilme gevşemesi özellikleri incelecek olan bakır-titanyum alaşımlı çinko levhalar NedZink (Hollanda) firmasından satın alınmıştır. Kullanılan diğer malzeme, ticari saflıkta çinko levha, Türkiye'den temin edilmiştir. Malzemelerin kimyasal bileşimine ilişkin üreticilerden alınan ve İTÜ Kimya ve Metalurji Fakültesi Yaş Analiz Laboratuvarı'nda yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2.2'de verilmektedir [20].

Çizelge 2.3 : Ticari saflıkta çinko ve Titanzink'e ait kimyasal analiz sonuçları.

	Ticari saflıkta çinko (TS)		Titanzink (TZ)	
	Üreticiden alınan değerler	**Kimyasal analiz sonuçları**	**Üreticiden alınan değerler**	**Kimyasal analiz sonuçları**
Cu	0.035 max	0.0048	0.08 – 0.17	0.11
Fe	0.0019 max	0.0063	-	0.0032
Mg	0.0002 max	0.0038	-	0.0013
Sn	0.0011 max	Eser	-	Eser
Si	-	0.018	-	0.013
Cd	0.0001 max	0.00078	-	0.00029
Pb	0.0028	0.031	-	0.0029
Al	-	Eser	0.015 max	Eser
Ti	-	Eser	0.07 – 0.12	0.11
Mn	-	Eser	-	0.0004
Zn	Geri kalan	99.52	Geri kalan	99.67

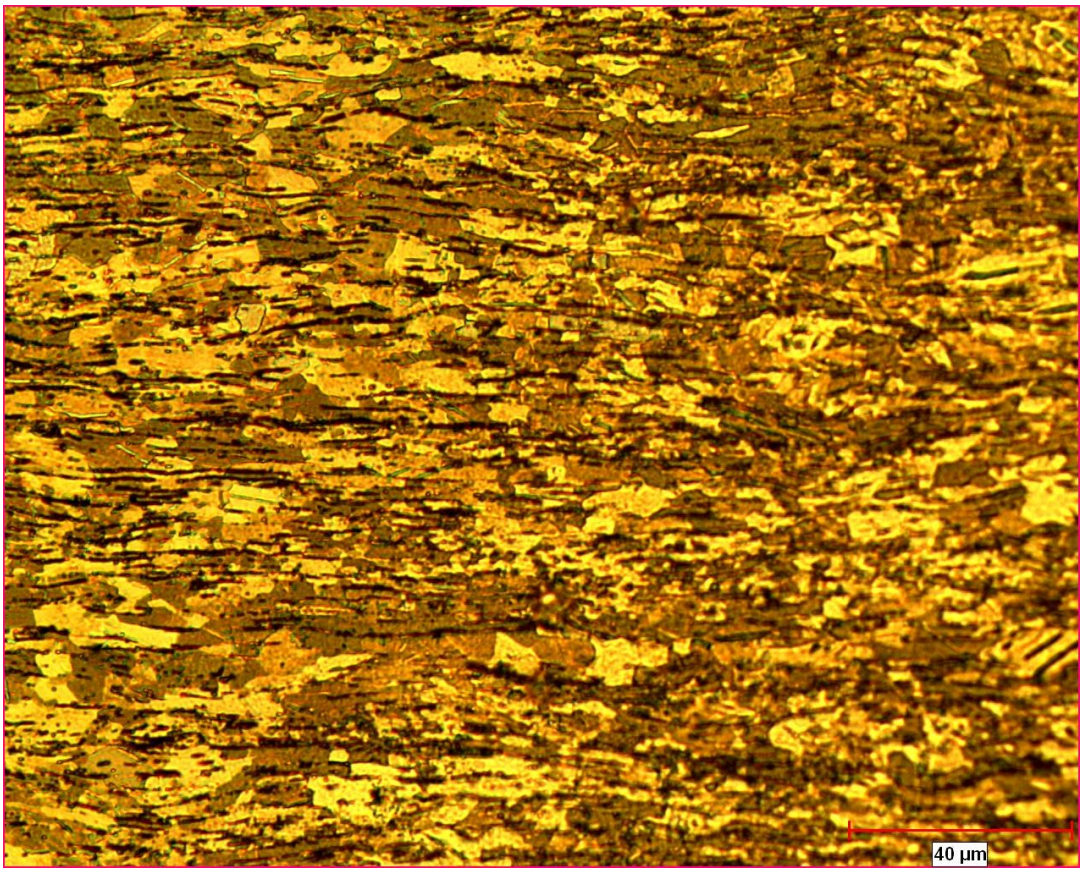
2.4.3 İç yapı özellikleri

Literatürde yapılan araştırmalarda bahsedilen malzemelere ait içyapı özellikleri elde edilmiştir. Farklı büyütmelerde içyapı görüntüleri çekilmiştir [20]. Ayrıca bu malzemeye ait faz diyagramı da Şekil 2.11'de gözlemlenmektedir.

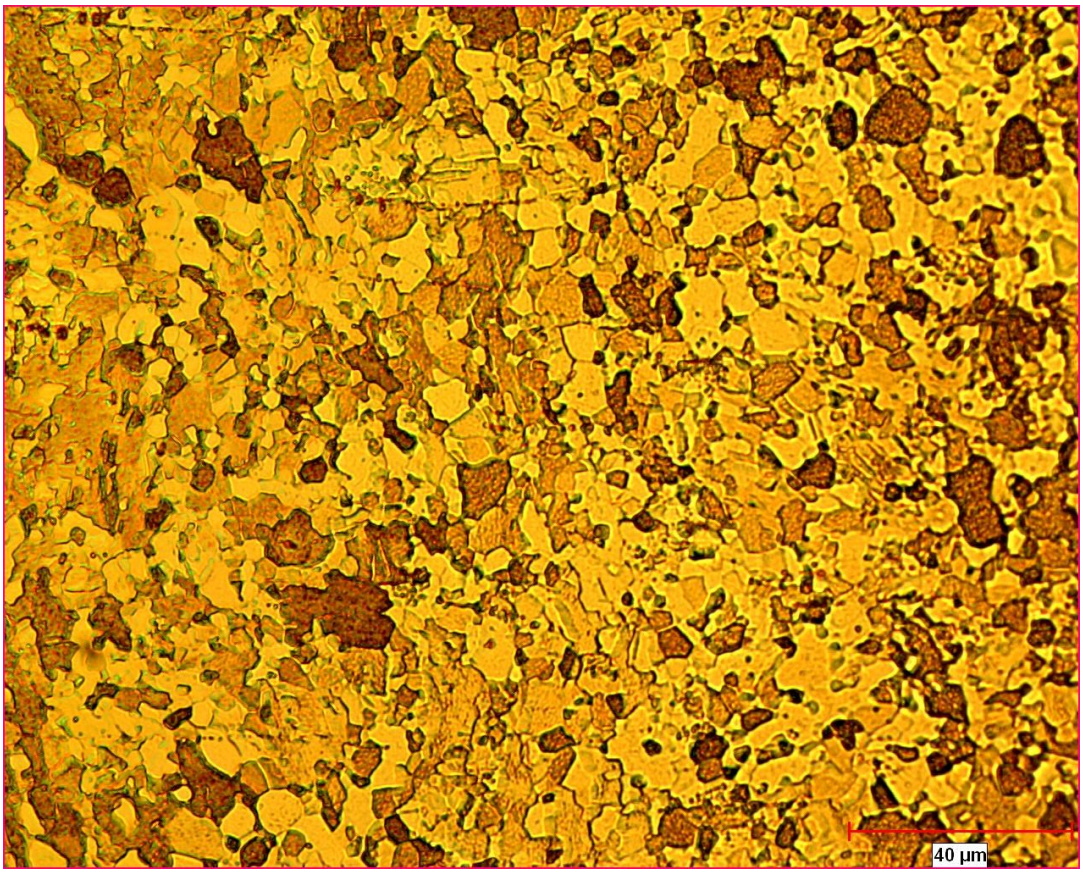


Şekil 2.11 : Ti-Zn faz diyagramı [23].

Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'da Oda sıcaklığındaki TS ve TZ malzemelerinin iç yapıları görülmektedir.



Şekil 2.12 : Titanzink (500x) [20].



Şekil 2.13 : TS (500x) **[20]**.

Piyasada bulunan bakır ve titanyum alaşımlı çinko levhalardaki bakır ve titanyum oranının yaklaşık %0.1-0.2 aralığında olduğu düşünülürse, yapıda tamamen çözünen bakır yer alan katı çözeltisi oluşturmaktadır. Yapıda çözünebilecek miktardan fazla olan titanyum ise çinkoyla $TiZn_{15}$ (Şekil 2.12 koyu renkli bölgeler) olarak adlandırılan metaller arası bir bileşik yapmakta ve yapıda ikinci bir faz olarak çökelmektedir. Çökelme sertleşmesinde neden olan bu bileşikten birçok çalışmada bahsedilmiştir [2, 3, 20, 24-28].

Zn-Cu-Ti alaşımlarıda ayrıca $CuZn_4$ ikincil fazına da rastlanılmıştır. $TiZn_{15}$ ve $CuZn_4$ fazları tane sınırlarında çökelerek dayanım artışı sağlamaktadır [29].

2.4.4 Mekanik özellikleri

Saf Çinko ve Titanzink malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek üzere çekme deneyleri yapılmıştır. Bu sayede malzemelerin akma dayanımları, çekme dayanımları, elastisite modulleri, pekleşme üstelleri, dayanım sabitleri ve toplam birim şekil değişimleri değerlerine ulaşılmıştır. [20]

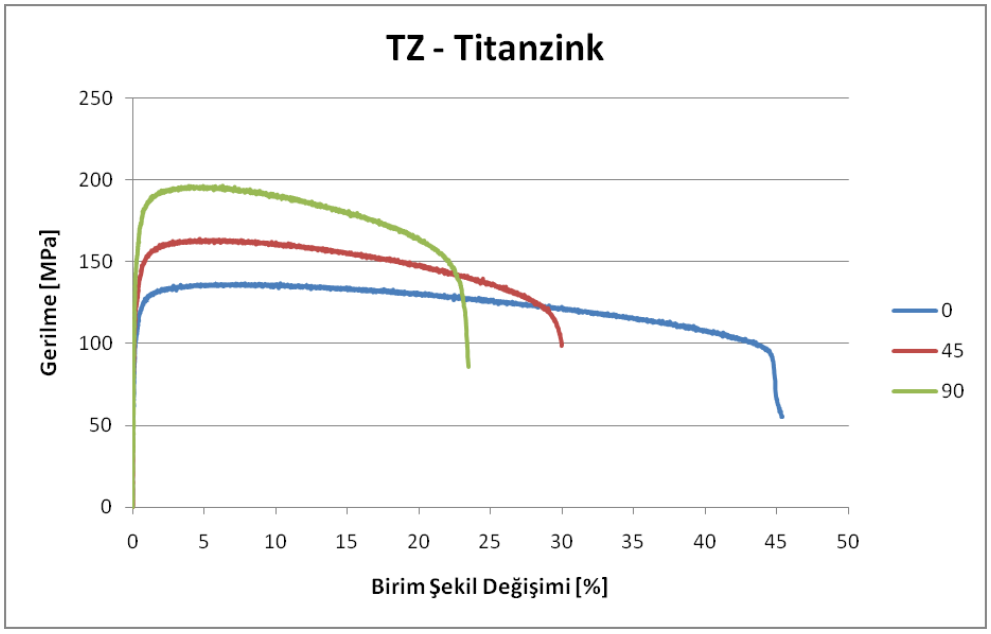
Literatürden alınan bu çalışmaya göre çekme deneyi sonuçları ve eğrileri şu şekildedir.

Çizelge 2.4 : Titanzink malzemesinin çekme deneyi sonuçları [20].

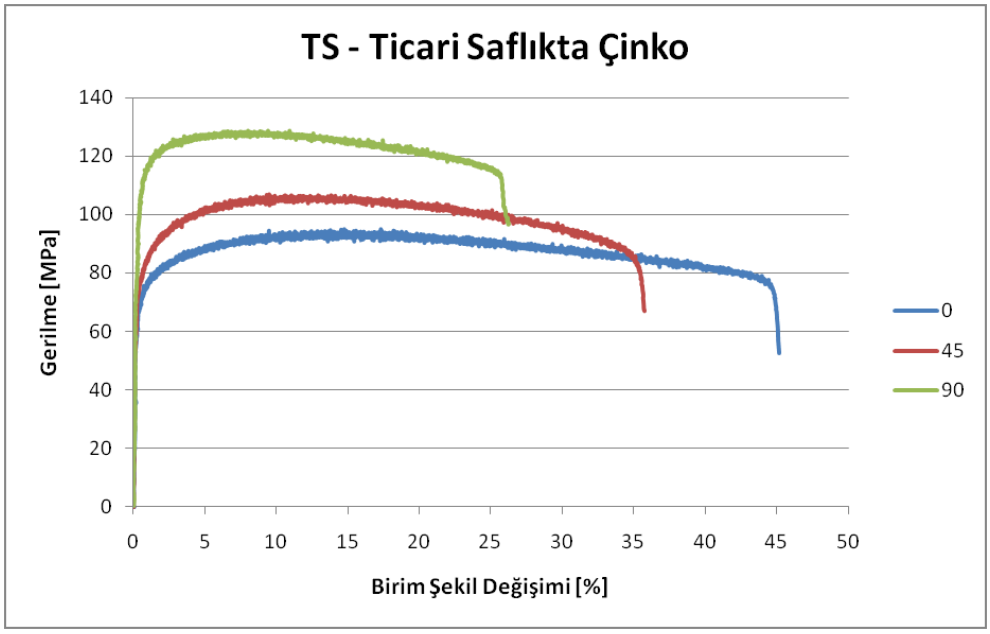
TZ	σ_{ak} [Mpa]	$\sigma_{çek}$ [Mpa]	δ_{kop} %	K	n
0°	100	137	45	187	0.09
45°	118	164	30	250	0.11
90°	136	196	23	327	0.13
Ort.	118	166	33	255	0.11

Çizelge 2.5 : Ticari saflıkta çinkonun çekme deney sonuçları [20].

TS	σ_{ak} [Mpa]	$\sigma_{çek}$ [Mpa]	δ_{kop} %	K	n
0°	57	95	45	137	0.13
45°	61	107	36	161	0.14
90°	75	128	26	236	0.17
Ort.	64	110	36	178	0.14



Şekil 2.14 : Had. yönüyle 0°, 45° ve 90°'lik doğrultulardaki çekme eğrileri (TZ).

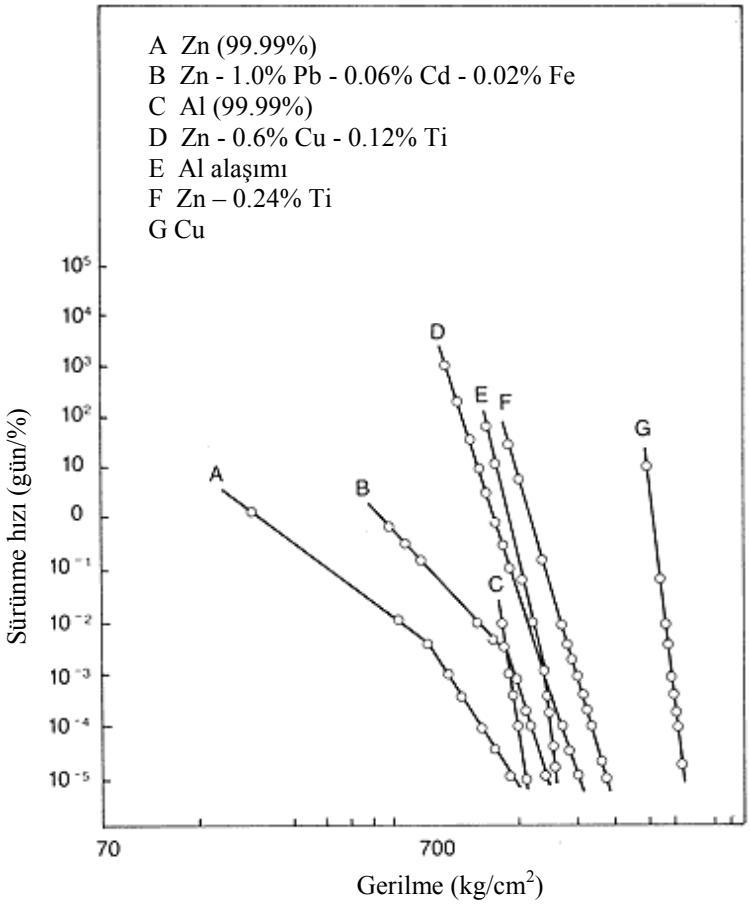


Şekil 2.15 : Had. yönüyle 0°, 45° ve 90°'lik doğrultulardaki çekme eğrileri (TS).

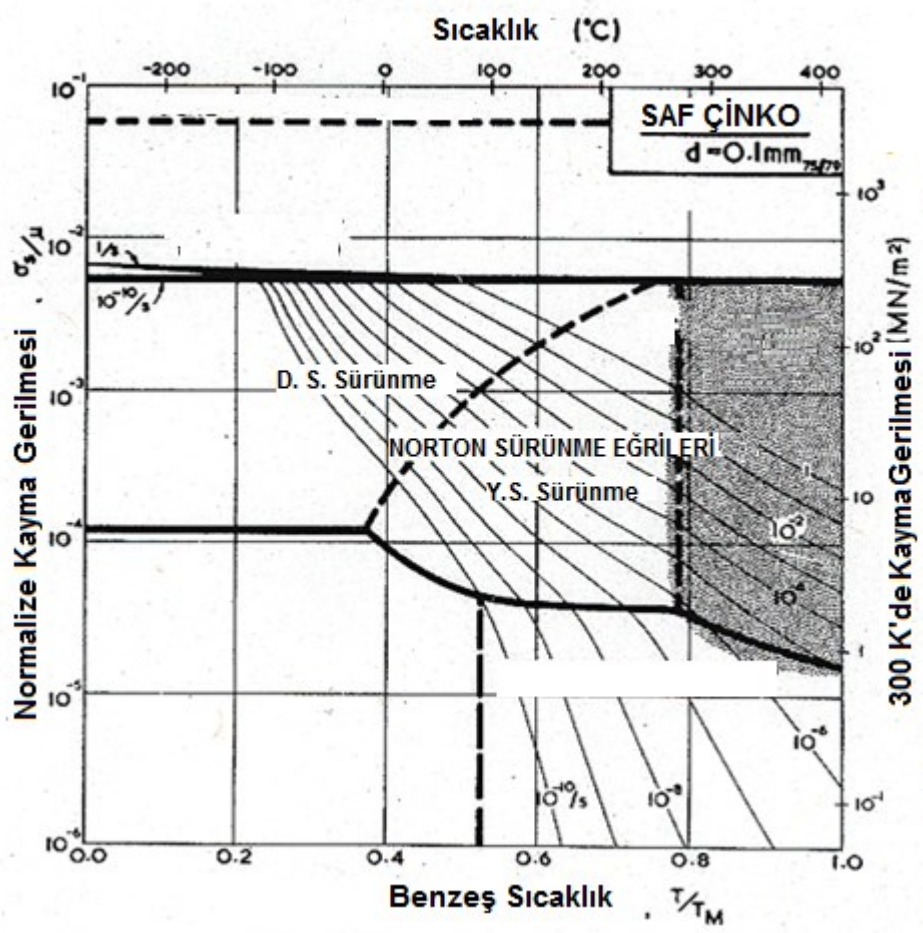
2.4.5 Saf çinko ve bakır-titanyum katkılı çinko malzemelerin sürünme özellikleri

Bilindiği üzere çinko sıkı düzen hekzagonal yapıya sahip bir malzemedir. Yapılan çalışmalarda bu tür malzemelerin düşük benzeş sıcaklıklarda da (0.3-0.4 T_b) sürünme davranışı gösterdiği görülmüştür [30].

Literatüre bakıldığında birçok farklı saf çinko ve çinko alaşımının sürünme deneyleri yapılmış ve sürünme özellikleri belirlenmiştir (Şekil 2.16). Ayrıca saf çinko malzemelere ait deformasyon haritaları oluşturulmuş ve farklı sıcaklık ve yükleme koşullarında ne tarz bir sürünme davranışı ortaya koyacağı belirlenmiştir. Şekil 2.17'e bakıldığında saf çinkoya ait örnek bir deformasyon haritası görülmektedir. Bu haritaya göre oda sıcaklığında ve yüksek gerilme altında saf çinko malzeme Norton üstel bağıntısına uygun olarak sürünme davranışı gösterir[1].



Şekil 2.16 : : Farklı çinko alaşımlarıyla, bakır ve alüminyumun sürünme özelliklerinin karşılaştırılması [1].



Şekil 2.17 : Saf çinkoya ait deformasyon haritası [31]**.**

Bakır ve titanyumla alaşımlandırılmış çinko levhalara bakıldığında; literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır. Deformasyon haritaları henüz oluşturulmamıştır. Buna rağmen farklı koşullarda bakır ve titanyum ile alaşımlandırılmış çinko malzemelerde sürünme deneyleri gerçekleştirilmiştir [29]. Yapılan deneylerde sürünme dayanımının artışı dislokasyon kaymasını ve tane sınır kaymasını sınırladığı ve bu şekilde sürünme dayanımında artış yarattığı sonucuna varılmıştır [29].

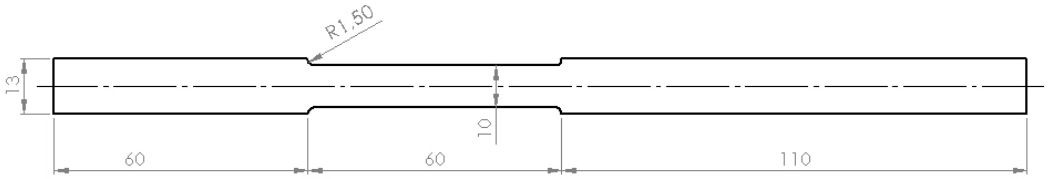
3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE HESAPLAMALAR

Bu çalışmada, saf çinko levhaların yanı sıra bakır ve titanyumla alaşımlandırılmış çinko levhalar kullanılmış; yapılan mikro alaşımlandırmanın sürünme özelliklerine etkisi, sürünme-gerilme gevşemesi ilişkisinin gözlemlenmesi ve kısa dönem deneylerle sürünme davranışının belirlenmesi için saf çinko ve bakır-titanyum katkılı çinko levhaların sürünme ve gerilme gevşemesi deneyleri yapılmıştır. Yapılan tüm deneyler Işık Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'ndaki imkanlarla gerçekleştirilmiştir.

3.1 Sürünme Deneyleri

3.1.1 Deney standartları

Ticari saflıktaki çinko ve Titanzink malzemelerinin sürünme davranışları ve özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bu deneyler yapılmıştır. Deneyler ASTM E139-11 standardına göre gerçekleştirilmiş olup kullanılan numuneler ASTM E08.11 ve ASTM E139-11 standardına göre hazırlanmıştır [32, 33]. Kullanılan sac numunelerin maksimum büyüklük ve genişlikteki örneği Şekil 3.1de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Örnek bir deney numunesi.

Deneyler sırasında uzama miktarları mekanik ekstansometre yardımıyla zamana bağlı olarak kaydedilmiş ve sürünme eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca deney sırasında şekil değişimi (ekstansometre yardımı ile), yük, zaman ve sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak kararlı sürünme hızları hesaplanmıştır.

3.1.2 Deney koşulları

3.1.2.1 Yükleme

ASTM E139 standardına göre belirtilen şekilde mümkün olduğunca eksenel bir yükleme yapılmış en az 4 farklı yük değerleri kullanılarak farklı gerilme değerlerinde ölçümler alınmıştır [32]. Deneyler sabit yük altında yapılmıştır. Ayrıca yük mümkün olan en kısa sürede yüklenmiştir. Birim şekil değişimi değerleri mekanik bir ekstansometre yardımı ile 10^{-4}mm mertebesinde kaydedilmiştir.

3.1.2.2 Sıcaklık

Sıcaklık sürünme deneyleri açısından en önemli etkenlerden biridir. Deney esnasında sıcaklık sürekli kontrol edilmeli ve ölçülmelidir. Deneyler sırasında yapılan sıcaklık ölçümleri ASTM E139 standardında belirtilen şekilde yapılmıştır. Deney sırasında oda sıcaklığı koşulları oda iklimlendirme sistemi ile sağlanmıştır. Sıcaklık dataları 60 saniyede bir Fluke marka RTD (Direnç Sıcaklık Detektörü) ile +- 0.001 C çözünürlükle kaydedilmiştir. (Şekil 3.2). RTD probu havadan ölçüm alacak şekilde numuneye mümkün olan en yakın yere yerleştirilmiştir.

48 ºC ve 85 ºC yapılan deneyler Şekil 3.3'de görülen düzenek sayesinde yapılmıştır. Düzeneğe göre sıcaklık sabit debili bir fan tarafından istenilen değerde tutulmuş. Isı kayıplarının önlenmesi amacıyla bir sıcak oda içerisinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Numunenin ölçü boyunun üst ve alt kısımlarına bağlanan termokupllar sayesinde sürekli sıcaklık ölçümleri alınmış. Ölçü boyu üzerinde istenilen şekilde bir sıcaklık gradyeni oluşturulmuştur.



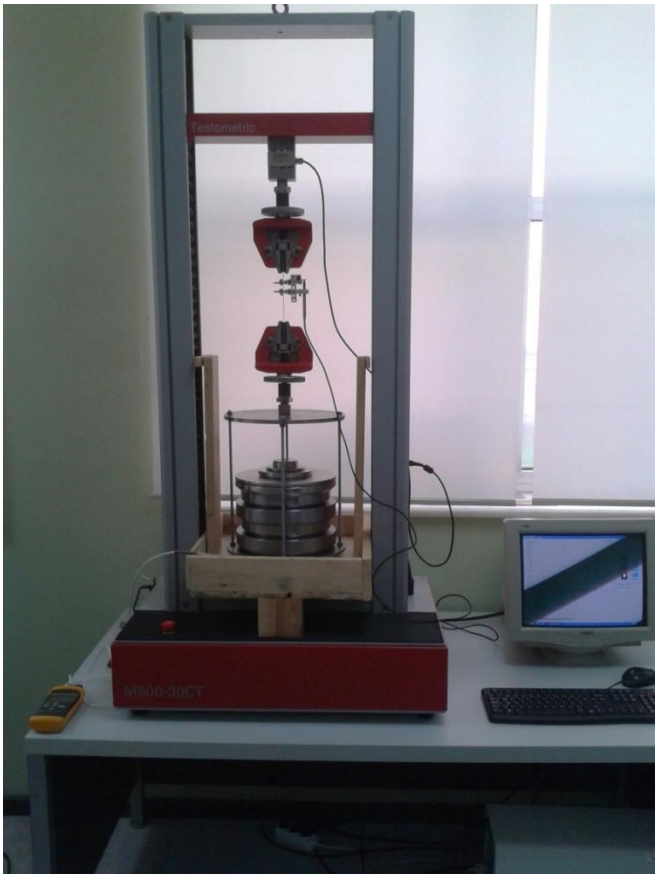
Şekil 3.2 : Fluke marka direnç sıcaklık detektörü.



Şekil 3.3 : Farklı sıcaklıkta yapılan sürünme deneylerine ait düzenek.

3.1.3 Deney düzeneği

Deneyde bilgisayar kontrollü Testometric marka 3KN'luk üniversal çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme cihazına bir aparat tasarlanarak cihaz sabit yüklemeye uygun hale getirilmiştir. Bu aparat sayesinde ağırlığı bilinen yükler istenilen gerilmeyi oluşturacak şekilde cihaza yerleştirilmiş ve deneyler yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4 : Deney düzeneği.

3.1.4 Deney datalarının kaydedilmesi

Deney dataları ASTM E139 standardında belirtilen şekilde kaydedilmiştir.. Kullanılan bilgisayar kontrollü Testometric marka 3kN'luk çekme cihazı ve mekanik ekstansometre ile periyodik olarak (5 sn) yük, uzama ve zaman dataları kaydedilmiştir. Deneyin başlatılması ile birlikte Fluke marka RTD kullanılarak periyodik olarak (60 sn) sıcaklık dataları kaydedilmiştir.

3.2 Gerilme Gevşemesi Deneyleri

3.2.1 Deney standartları

Ticari saflıktaki çinko ve Titanzink malzemelerinin sürünme davranışları ve özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bu deneyler yapılmıştır. Deneyler ASTM E328 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [34]. ASTM E08.11 ve ASTME E139 standardına göre hazırlanmıştır. Kullanılan sac numunelerin maksimum büyüklük ve genişlikteki örneği Şekil 3.1de verilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda numunelere ait gevşeme eğrileri çıkarılmıştır. Bu eğriler ve kaydedilen ham datalar kullanılarak temsili şekil değişim hızları hesaplanmıştır.

3.2.2 Deney koşulları

3.2.2.1 Ön şekil değişimi verilmesi

ASTME E328 standardında belirtildiği üzere, yapılan gerilme gevşemesi deneylerinde numuneye sabit bir gerilme vermek yerine sabit bir birim şekil değişimi verilmiş ve o pozisyonda tutulmuşlardır.

3.2.2.2 Sıcaklık

Sıcaklık sürünme deneyleri açısından en önemli etkenlerden biridir. Deney esnasında sıcaklık sürekli kontrol edilmeli ve ölçülmelidir. Deneyler sırasında yapılan sıcaklık ölçümleri ASTM E328 standardında belirtilen şekilde yapılmıştır. Deney sırasında oda sıcaklığı koşulları oda iklimlendirme sistemi ile sağlanmıştır. Sıcaklık dataları 60 saniyede bir Fluke marka RTD (Direnç Sıcaklık Dedektörü) ile +- 0.001 C çözünürlükle kaydedilmiştir. (Şekil 3.2). RTD probu havadan ölçüm alacak şekilde numuneye mümkün olan en yakın yere yerleştirilmiştir.

3.2.3 Deney düzeneği

3.2.4 Deney datalarının kaydedilmesi

Deney dataları ASTM E139 standardında belirtilen şekilde yapılmıştır. Kullanılan bilgisayar kontrollü Testometric marka 3kN'luk çekme cihazı ve mekanik ekstansometre ile periyodik olarak (5 sn) yük, uzama ve zaman dataları kaydedilmiştir. Deneyin başlatılması ile birlikte Fluke marka RTD kullanılarak periyodik olarak (60 sn) sıcaklık dataları kaydedilmiştir.

3.3 Hesaplamalar

3.3.1 Gerilme ve birim şekil değişiminin hesaplanması

Çekme cihazından alınan ham datalar (yük (kg), yer değiştirme (mm), zaman(saniye)) kullanılmıştır. Bu datalar bir tablo düzenlenme programı vasıtasıyla bilgisayar ortamına alınmıştır. Gerilme değerleri olarak mühendislik gerilmesi hesaplanmıştır. Bu amaçla numunenin yükleme öncesi kesit alanı (kalınlık ve genişlik 0.01 hassasiyetli bir kumpas kullanılarak ölçülmüştür) hesaplanmıştır. Uygulanan yük kesit alanına bölünmüş ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Her 5 saniyede bir alınan dataların hepsi için bu işlem tekrar edilmiştir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.1}$$

Birim şekil değişimi hesaplamaları aynı Excel programı sayesinde yapılmıştır. Ekstansometreden alınan uzama dataları ölçü boyuna bölünerek mühendislik birim şekil değişim değerleri hesaplanmıştır. Her 5 saniyede bir alınan dataların hepsi için bu işlem tekrar edilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{3.2}$$

Örnek bir ölçüm ve hesap tablosu görünümü Şekil 3.5de verilmiştir.

	A	B	C	D	E	F
1	yük N	uzama mm	Gerilme Mpa	birim şekil değişimi	süre (saniye)	süre (saat)
2	149	5,00E-07	17,04025618	0,00000002347	0	0
3	712,2000122	0,0141	81,45013863	0,00066197184	5,074909687	0,001409697
4	937,5999756	0,035	107,2278106	0,00164319250	10,15474129	0,002820761
5	962,4000244	0,043000001	110,0640467	0,00201877941	15,23798943	0,004232775
6	962,4000244	0,0484	110,0640467	0,00227230046	20,35499573	0,005654165
7	962,0999756	0,0526	110,0297319	0,00246948357	25,42860794	0,007063502
8	962	0,0559	110,0182983	0,00262441315	30,52842331	0,008480118
9	962,2000122	0,058900002	110,0411725	0,00276525833	35,63821793	0,009899505
10	962,4000244	0,0616	110,0640467	0,00289201876	40,75469971	0,01132075
11	962,4000244	0,064100005	110,0640467	0,00300938989	45,76287842	0,012711911
12	962	0,066300005	110,0182983	0,00311267628	50,88718796	0,01413533
13	962,2000122	0,068800002	110,0411725	0,00323004706	55,97882462	0,015549674
14	962	0,070600003	110,0182983	0,00331455413	61,07366562	0,016964907
15	962,2000122	0,072700001	110,0411725	0,00341314560	66,17377472	0,018381604
16	962,2000122	0,074600004	110,0411725	0,00350234759	71,29199982	0,019803333

Şekil 3.5 : Örnek ölçüm ve hesap tablosu görünümü

3.3.2 Sürünme deneylerinden kararlı sürünme hızlarının hesaplanması

Sürünme deneyleri sonucunda elde edilen birim şekil değişimi-zaman grafikleri kullanılarak kararlı sürünme hızları hesaplanmıştır. Sürünme eğrisinin lineer davrandığı (İkincil sürünme bölgesi) kararlı sürünme bölgesinin eğimi analitik olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada Excel programının eğri uydurma özellikleri kullanılmıştır.

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = \frac{d\varepsilon_{ss}}{dt} \tag{3.3}$$

3.3.3 Gerilme gevşemesi deneylerinden temsili şekil değişim hızı hesaplanması

Literatür özetinde de bahsedildiği üzere gerilme gevşemesi ve kararlı sürünme hızı arasında bir ilişki mevcuttur. Bu ilişki Denklem 3.3'de tanımlanmıştır. Gerilme gevşemesi sonucu elde edilen gerilme ve zaman dataları kullanılarak temsili şekil değişimi hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar sayısal türev formülleri kullanılmıştır. Hassasiyeti arttırmak için 7 noktalı sayısal türev fonksiyonu (Denklem 3.5) kullanılmıştır [35].

$$\frac{d\varepsilon_p}{dt} = -\frac{1}{E}\frac{d\sigma}{dt} \tag{3.4}$$

$$f_3^{(1)} = \frac{(f_6 - 9f_5 + 45f_4 - 45f_2 + 9f_1 - f_0)}{60h} \tag{3.5}$$

Denklem fn olarak gösterilen noktalar türevin hesaplanmak istendiği noktalara komşu noktalardır. $f_3^{(1)}$ olarak gösterilen nokta ise türevin alındığı noktadır. h ise iki nokta arasındaki periyodik adımdır. Yapılan deneylerde gerilme dataları her 5 saniyede bir kaydedildiği için adım 5 saniyedir.

Yapılan işlem basit olarak şu şekilde tanımlanabilir. Temsili şekil değişimi hızının bulunması istenen noktada $\partial\sigma/\partial t$ değerleri hesaplanmış ve -1/E değeri ile çarpılmıştır. Elastiklik modülü literatürden alınmıştır. Bu sayede malzemeye ait temsili şekil değişim değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler kullanılarak gerilme ve birim şekil değişini veren eğrileri uydurulmuştur.

3.3.4 Norton eğrilerinin uydurulması, Qc değerinin bulunması ve bünye denkleminin oluşturulması

Norton eğrilerinin oluşturulmasında MATLAB programı kullanılmıştır. MATLAB programında bulunan eğri uydurma araç kutusu sayesinde eğriler uydurulmuş, malzemelere ait n değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar içerisinde regresyon analizi de bulunmaktadır. Elde edilen R^2, belirleme katsayısı (regresyon uyumluluğunun bir göstergesi) değerleri de sonuçlar kısmında sunulmuştur.

Sürünme deneyi sonucu elde edilen birim şekil değişimi ve zaman verileri kullanılarak sürünme davranışına ait Norton eğrileri oluşturulmuştur.

Aynı şekilde gerilme gevşemesi deneylerinden elde edilen gerilme ve zaman dataları kullanılarak önce temsili şekil değişim hızı verileri elde edilmiş, sonra bu veriler kullanılarak gerilme Norton eğrilerinin basit halleri (Denklem 3.6) oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eğriler sabit sıcaklıkta n değerlerinin farklı gerilmelerde basitçe hesaplanmasını sağlamıştır.

$$\dot{\varepsilon}_{SS} = B\sigma^n \tag{3.6}$$

Bünye denkleminin tamamının çıkarılması ise n değerleri elde edildikten sonra gerçekleştirilmiştir. Denklem 3.7'in doğal logaritması alındığında Denklem 3.8'ye ulaşılabilir. Bu ifade eş gerilmeler altında düşünüldüğünde gerilme, gerilme üsteli ve sabit A katsayısına bağlı terimler tek bir sabit haline gelir. Denklem 3.9'deki ilişki sayesinde Q_c değeri basitçe hesaplanabilir(Denklem 3.10).

$$\dot{\varepsilon}_{SS} = A\sigma^n \exp(-\frac{Q_c}{RT}) \tag{3.7}$$

$$\ln(\dot{\varepsilon}_{SS}) = lnA + nln\sigma - Q_c/RT \tag{3.8}$$

$$ln\dot{\varepsilon}_{ss} \propto 1/T \tag{3.9}$$

$$Q_c = K' \frac{(ln\dot{\varepsilon}_{ss})}{1/T} \tag{3.10}$$

Q_c değeri hesaplandıktan sonra bünye denkleminin oluşturulması için, A katsayı bünye denklemine diğer bilinenler koyularak bulunabilir.

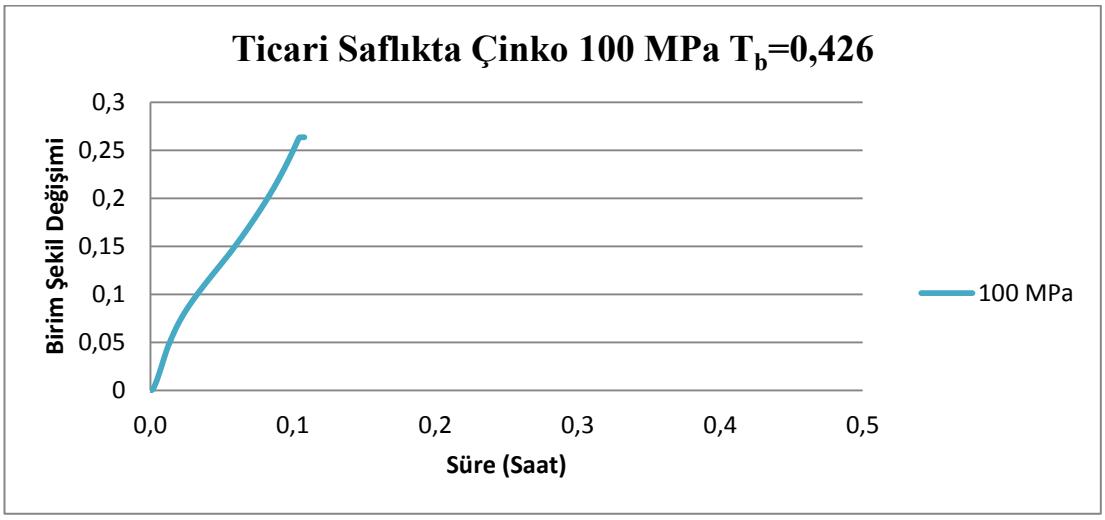
Gerekli işlemler Excel programı ve MATLAB programı kullanılarak yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

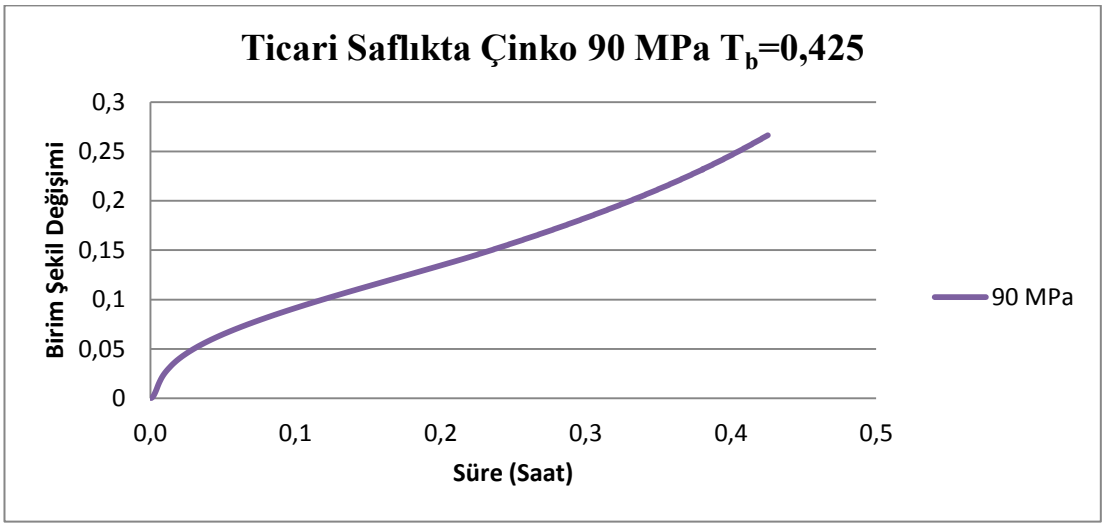
4.1 Sürünme Deneyi Sonuçları

4.1.1 Ticari saflıkta çinko

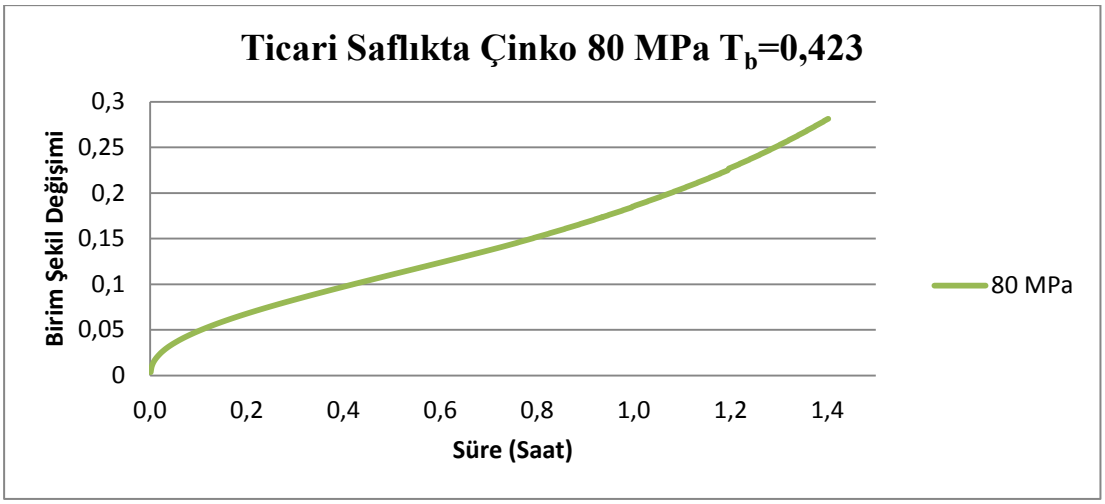
Yapılan farklı gerilmede sürünme deneyleri sonrasında ticari saflıktaki çinko malzemeye ait sürünme eğrileri Şekil 4.1-Şekil 4.5 aralığındaki şekillerde verilmiştir. Deney sırasında yapılan sıcaklık ölçümlerine ait sonuçlar Ek A'da verilmiştir.



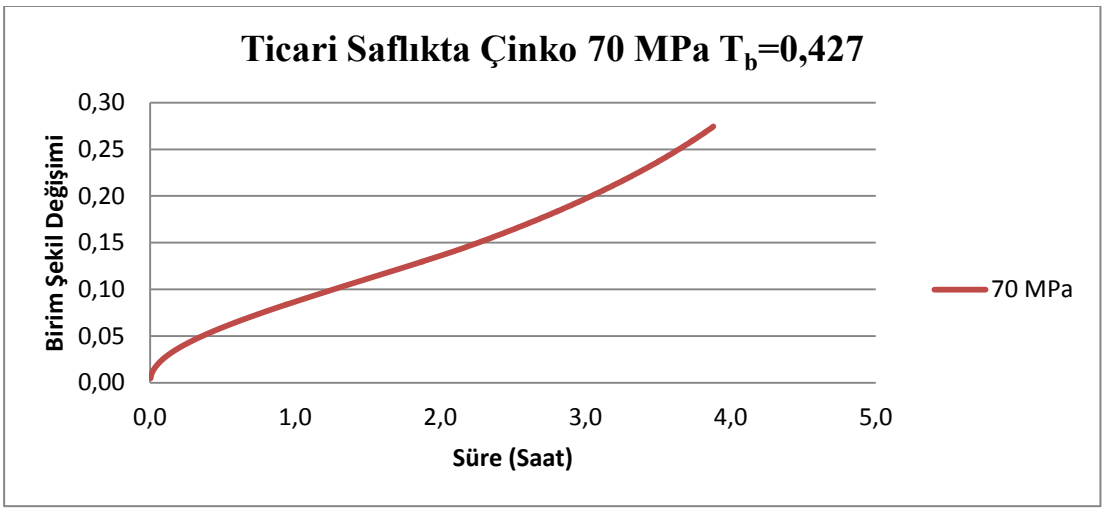
Şekil 4.1 : 100 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı



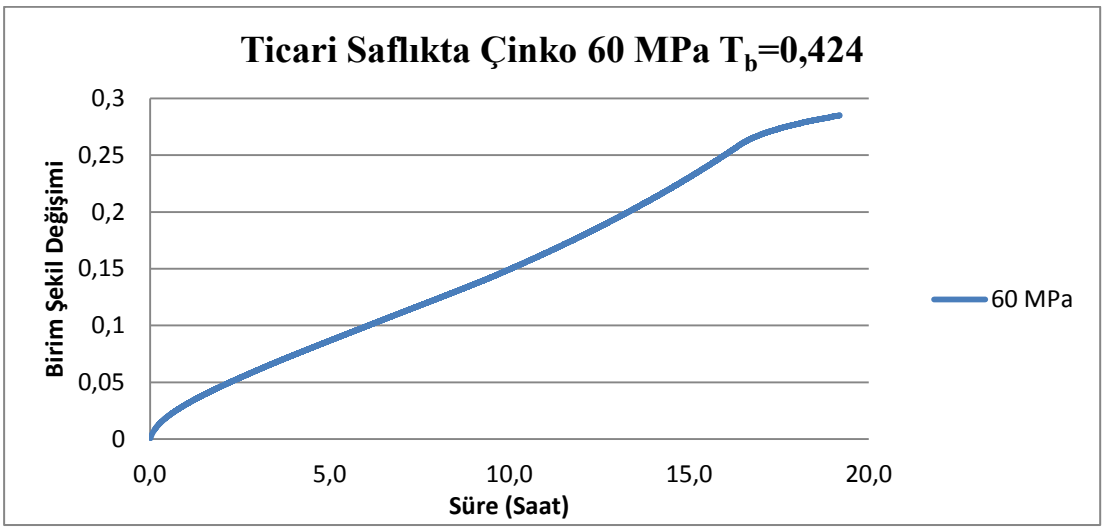
Şekil 4.2 : 90 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı



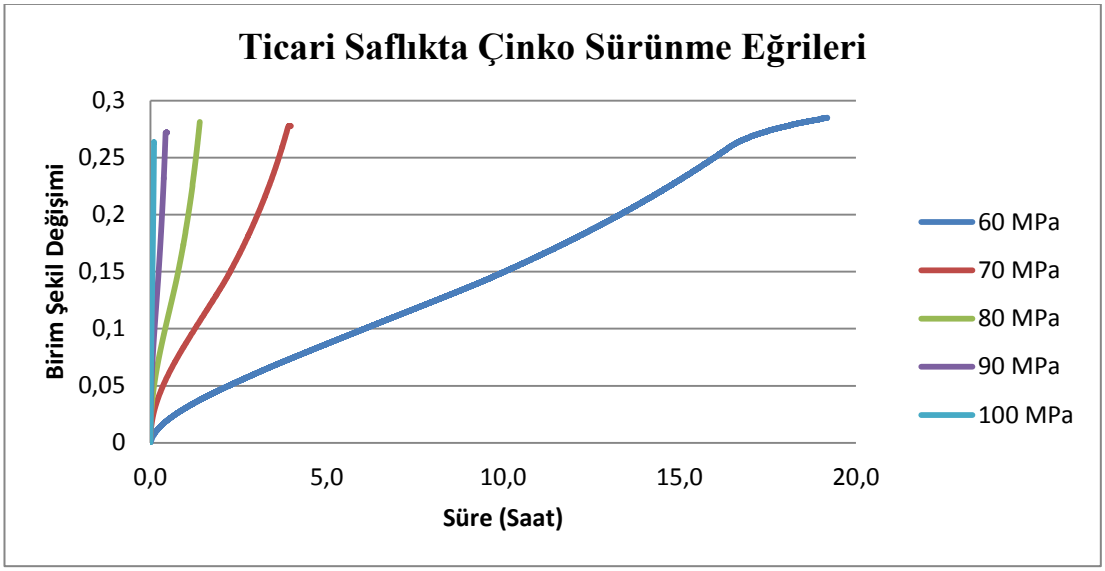
Şekil 4.3 : 80 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı



Şekil 4.4 : 70 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı



Şekil 4.5 : 60 MPa gerilme altında Ticari saflıktaki çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı



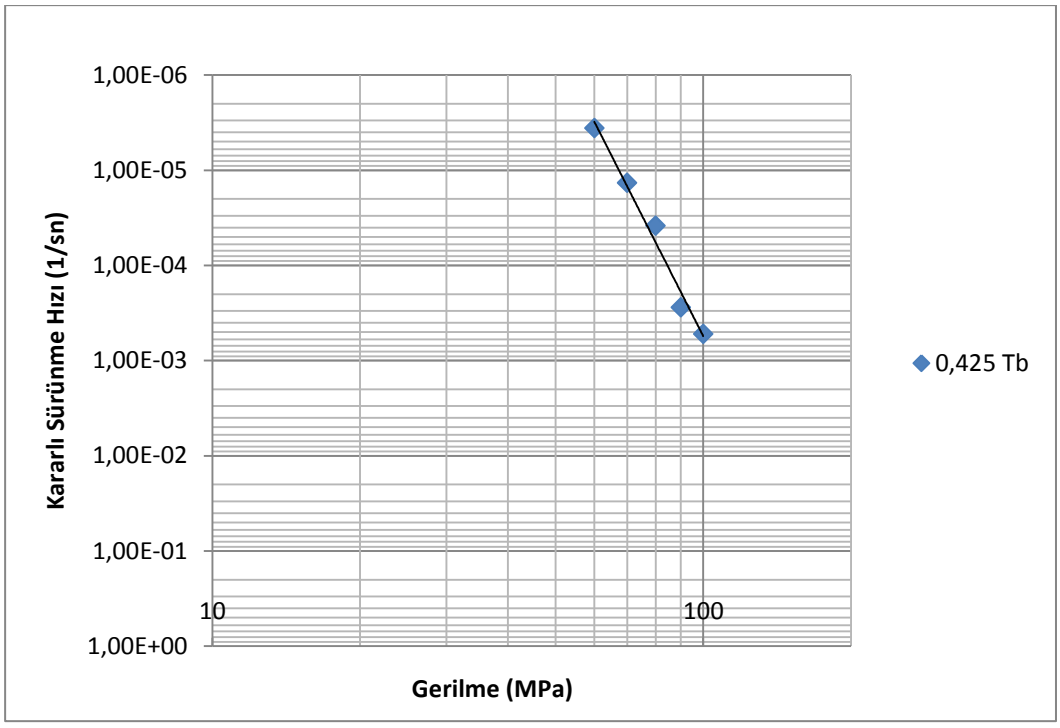
Şekil 4.6 : Farklı gerilmeler altında ticari saflıkta çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı

Şekil 4.6'da farklı gerilmelerde yükelenen ticari saflıkta çinko numunelerin sürünme eğrileri görülmektedir.

Yapılan deneyler sonrası elde edilen sürünme eğrileri kullanılarak oda sıcaklığında farklı gerilmeye maruz kalmış numunelere ait kararlı sürünme hızları bulunmuştur. Literatürde belirtildiği üzere ikincil sürünme bölgesinin eğimi hesaplanarak kararlı sürünme hızları bulunmuştur. Hesaplanan sürünme hızları Çizelge 4.1 ve Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Deneylerde ortalama benzeş sıcaklık ortalama 0.425 mertebelerindedir.

Çizelge 4.1 : Oda sıcaklığında ticari saflıkta çinko malzemeye ait kararlı sürünme hızları.

Gerilme (MPa)	Kararlı Sürünme Hızı (s^{-1})
100	5,25E-04
90	2,77E-04
80	3,83E-05
70	1,36E-05
60	3,61E-06

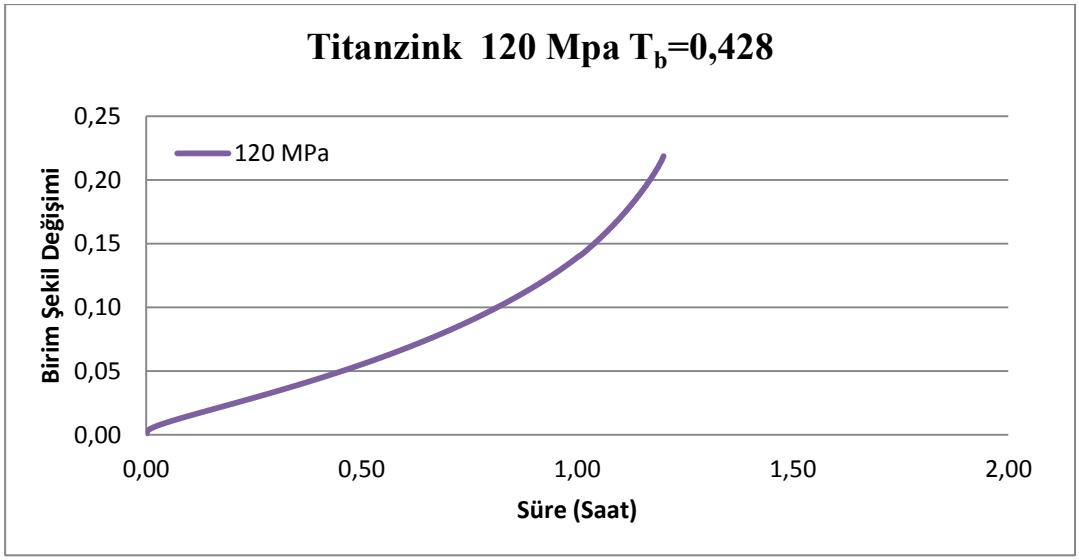


Şekil 4.7 : Farklı gerilmeler altında ticari saflıkta çinko levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı

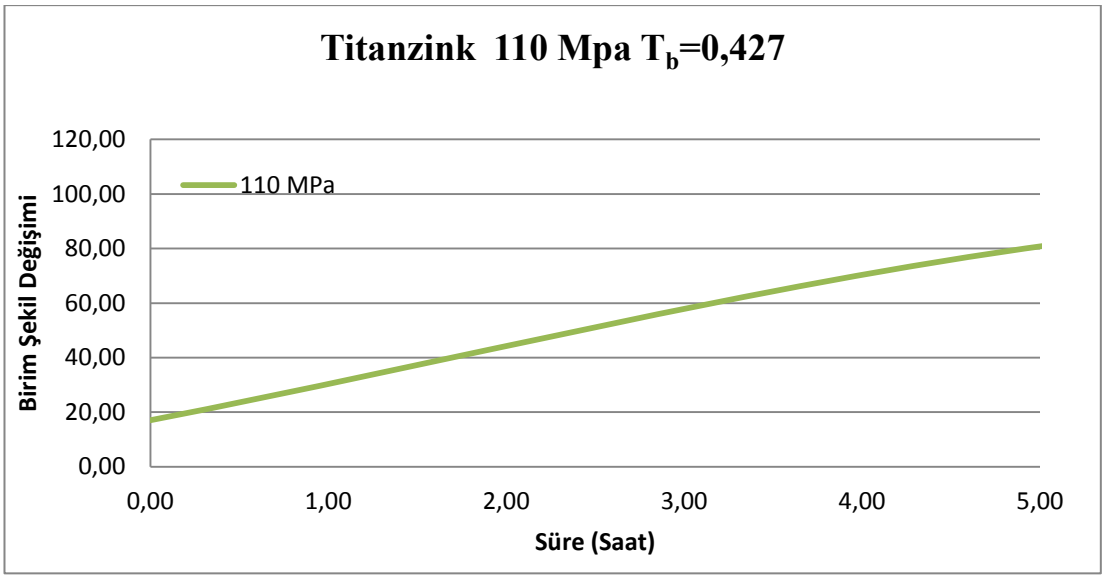
4.1.2 Titanzink

4.1.2.1 Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar

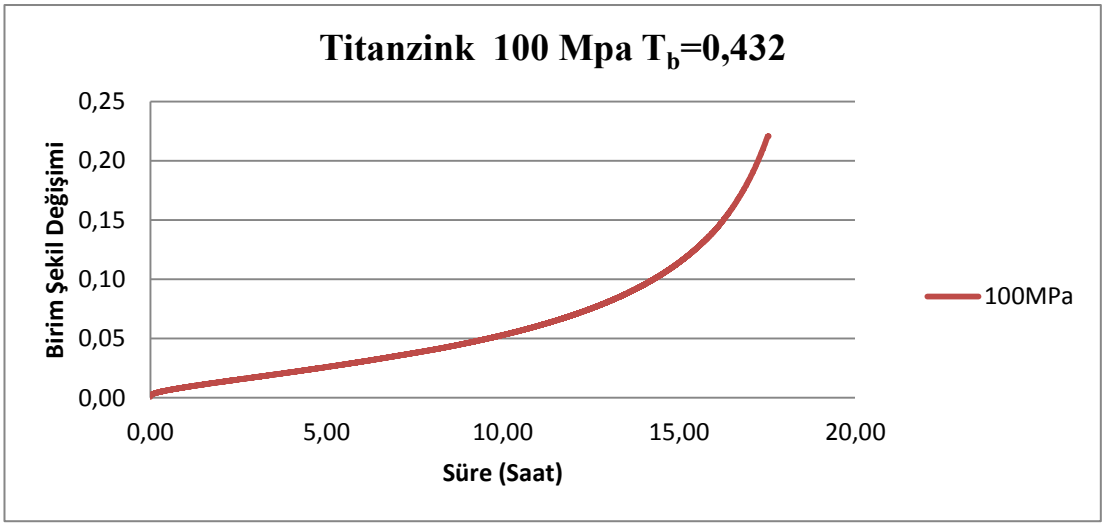
Deneylere ait sonuçlar Şekil 4.8-Şekil 4.11 aralığındaki şekillerde gösterilmiştir.



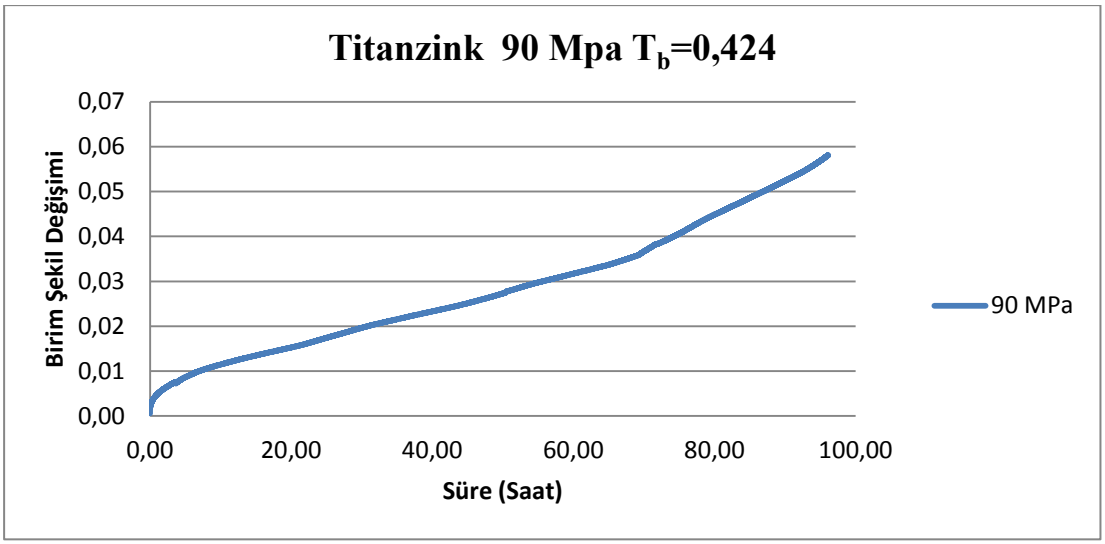
Şekil 4.8 : 120 MPa gerilme altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı



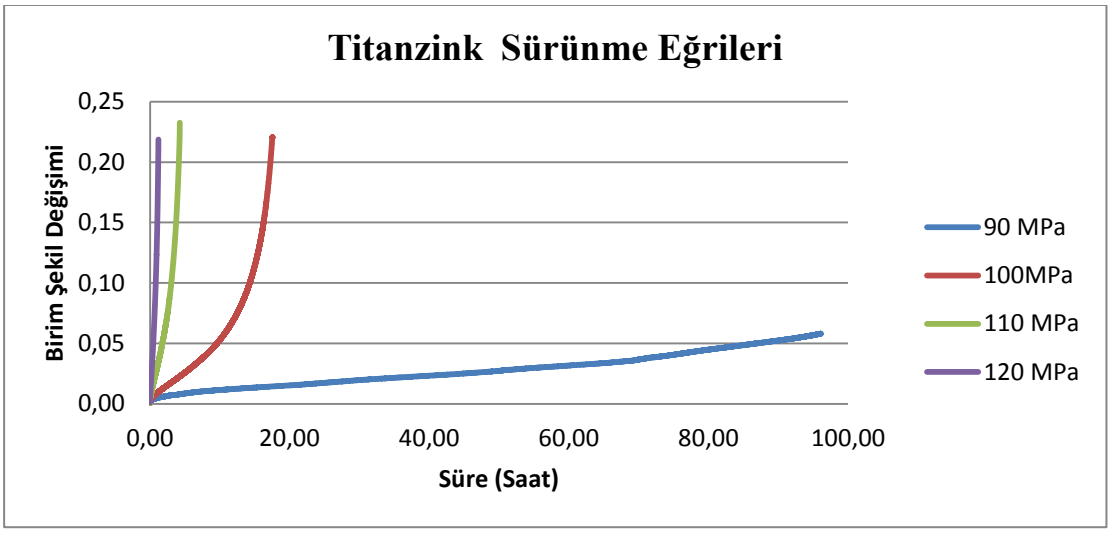
Şekil 4.9 : 110 MPa gerilme altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı



Şekil 4.10 : 100 MPa gerilme altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı



Şekil 4.11 : 90 MPa gerilme altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı



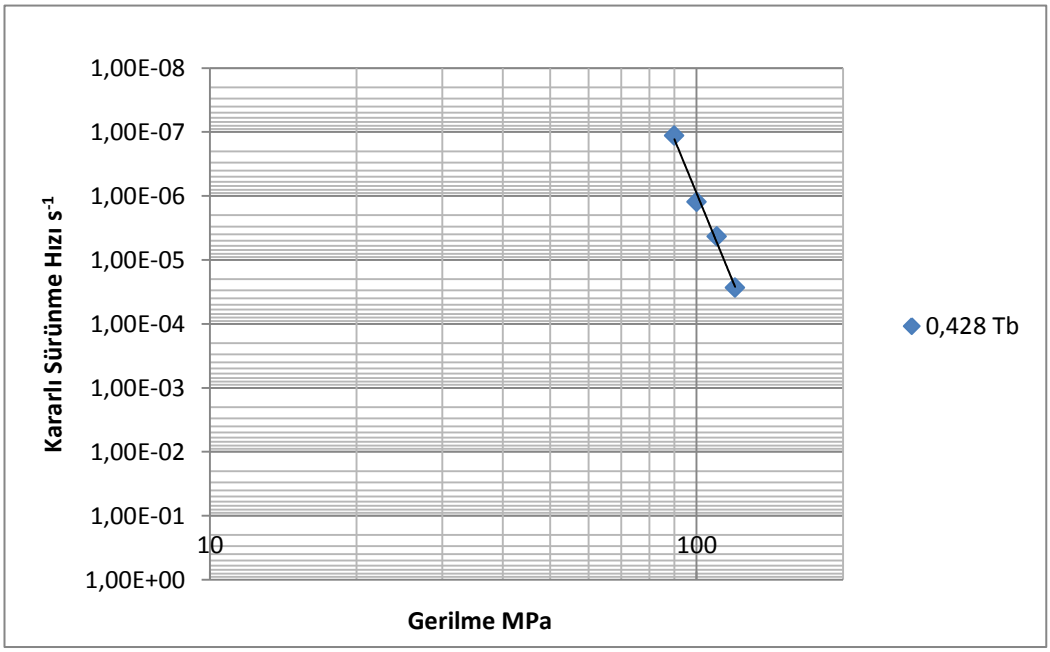
Şekil 4.12 : Farklı gerilmeler altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı

Şekil 4.12'de farklı gerilmelerde yükelenen Titanzink çinko numunelerin sürünme eğrileri görülmektedir.

Yapılan deneyler sonrası elde edilen sürünme eğrileri kullanılarak oda sıcaklığında farklı gerilmeye maruz kalmış numunelere ait kararlı sürünme hızları bulunmuştur. Literatürde belirtildiği üzere ikincil sürünme bölgesinin eğimi hesaplanarak kararlı sürünme hızları bulunmuştur. Hesaplanan sürünme hızları Çizelge 4.1 ve Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Deneylerde ortalama benzeş sıcaklık ortalama 0.428 mertebelerindedir.

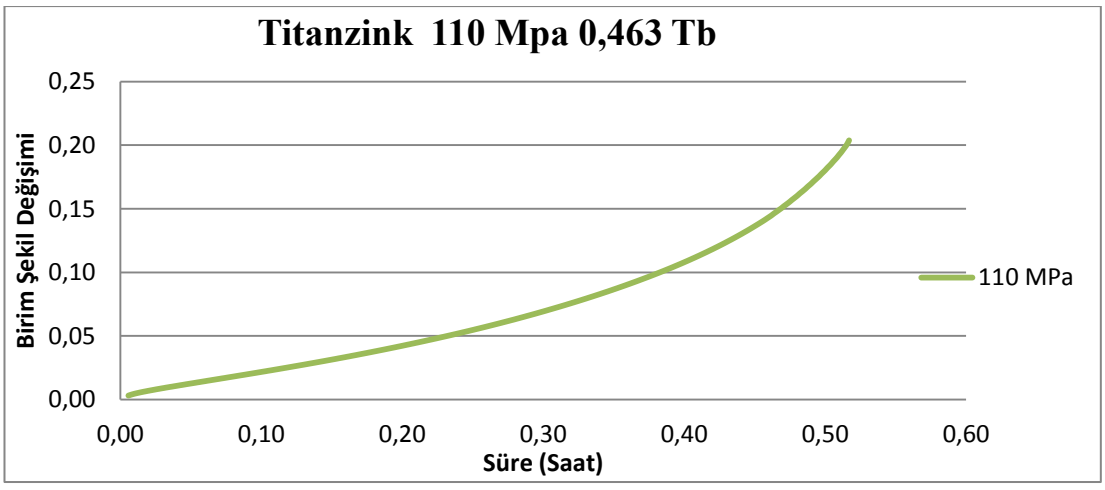
Çizelge 4.2 : Oda sıcaklığında Titanzink malzemeye ait kararlı sürünme hızları

Gerilme (MPa)	Kararlı Sürünme Hızı (s^{-1})
120	2,72E-05
110	4,31E-06
100	1,23E-06
90	1,13E-07

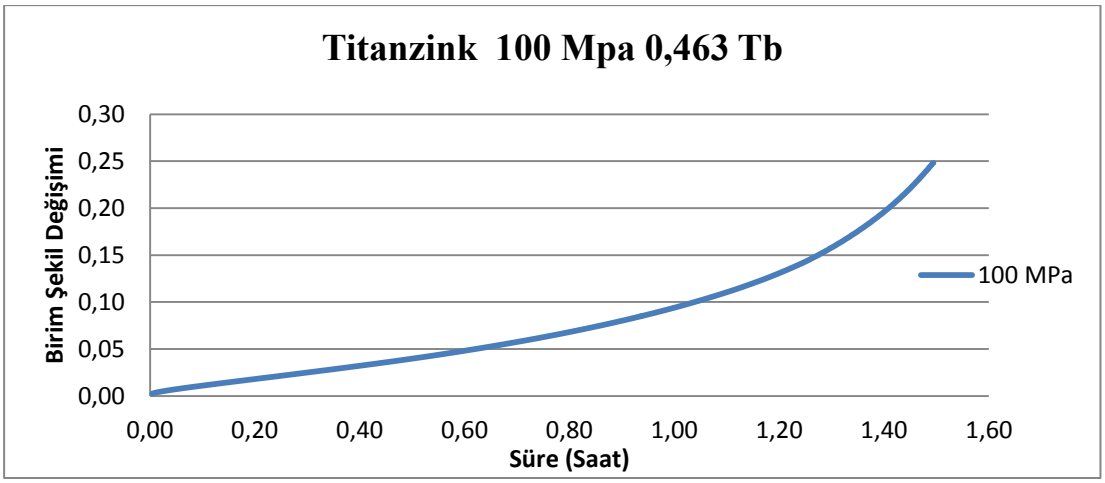


Şekil 4.13 : Farklı gerilmeler altında Titanzink levhanın oda sıcaklığında sürünme davranışı

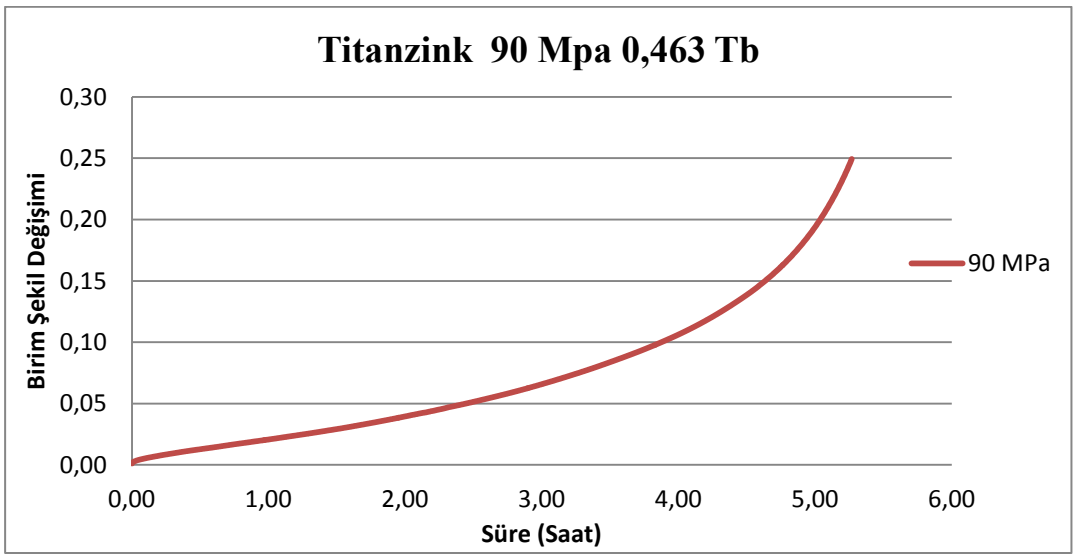
4.1.2.2 48ºC sıcaklığında gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar



Şekil 4.14 : 110 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 48 ºC sıcaklığında sürünme davranışı



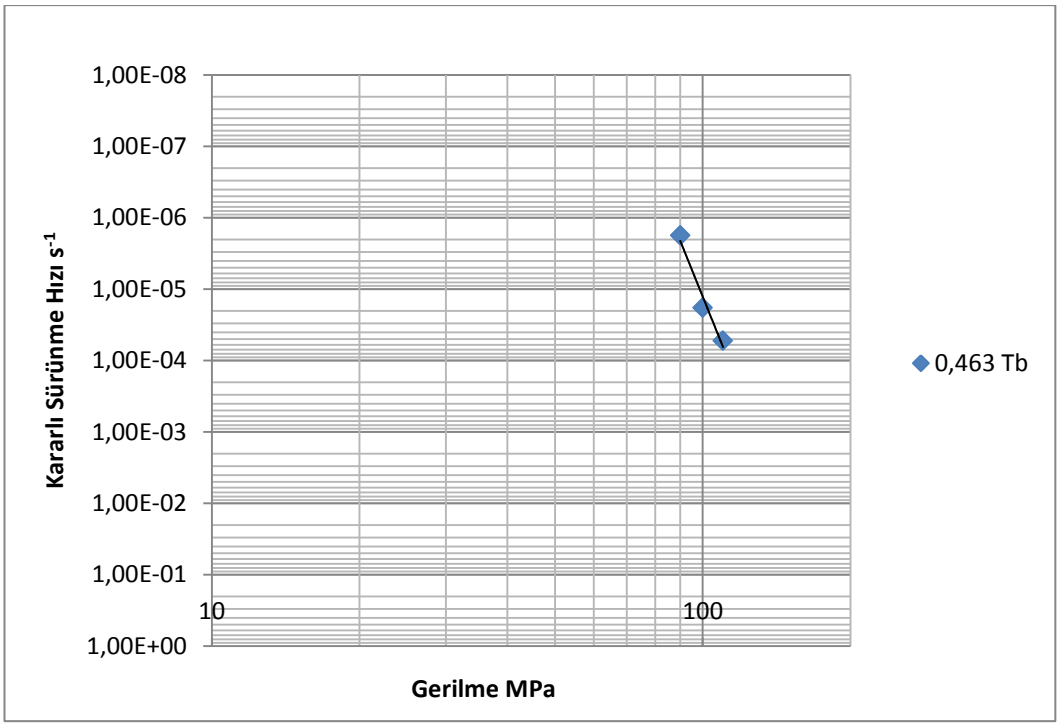
Şekil 4.15 : 100 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 48 ºC sıcaklığında sürünme davranışı



Şekil 4.16 : 90 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 48 ºC sıcaklığında sürünme davranışı

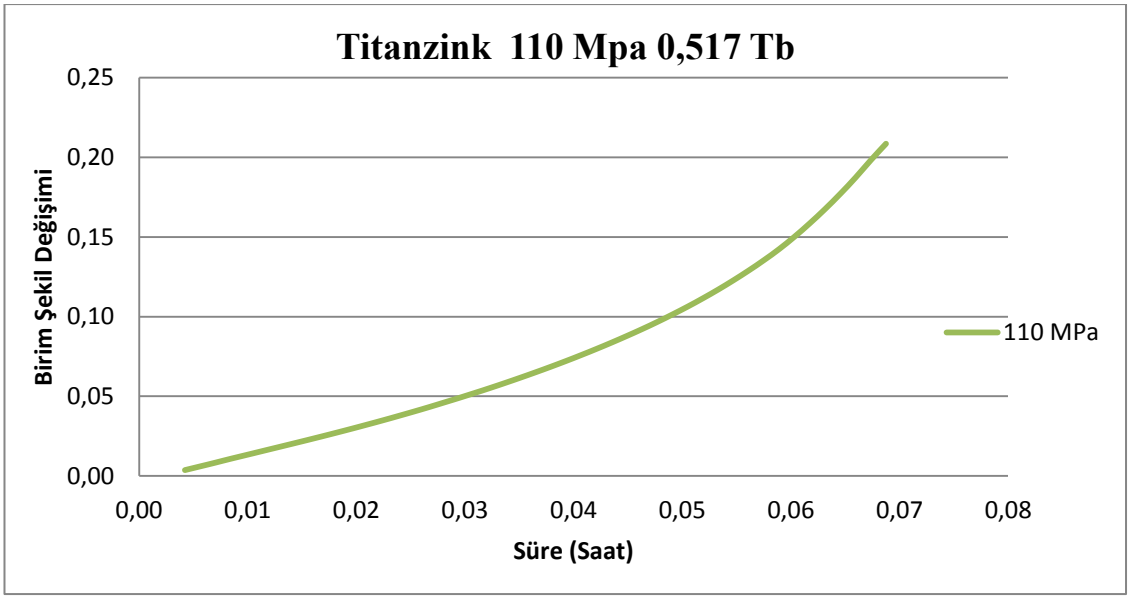
Çizelge 4.3 : 48 ºC sıcaklığında Titanzink malzemeye ait kararlı sürünme hızları

Gerilme (MPa)	Kararlı Sürünme Hızı (s^{-1})
110	5,30E-05
100	1,82E-05
90	1,76E-06

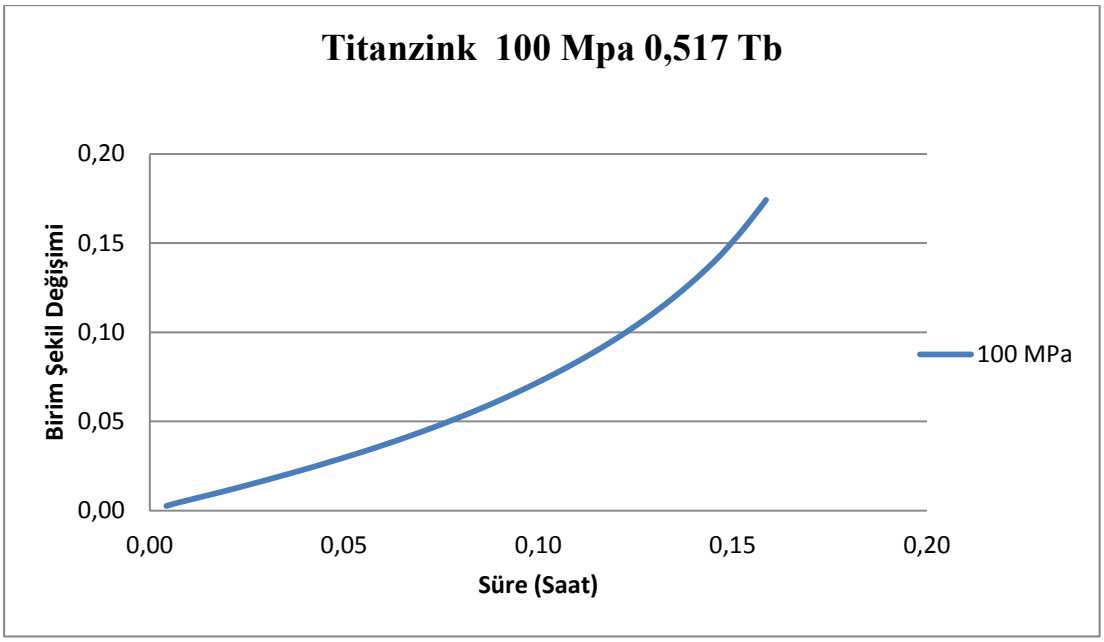


Şekil 4.17 : 48^{o} C'de Titanzink malzemeye ait gerilme-kararlı sürünme hızı grafiği

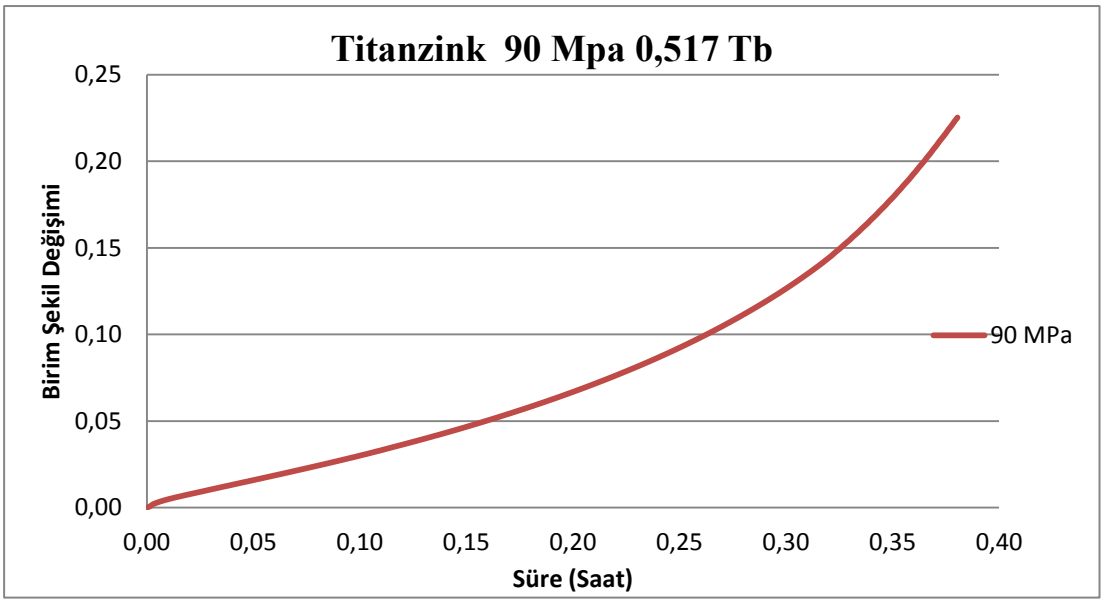
4.1.2.3 85ºC sıcaklığında gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar



Şekil 4.18 : 110 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 85 ºC sıcaklığında sürünme davranışı



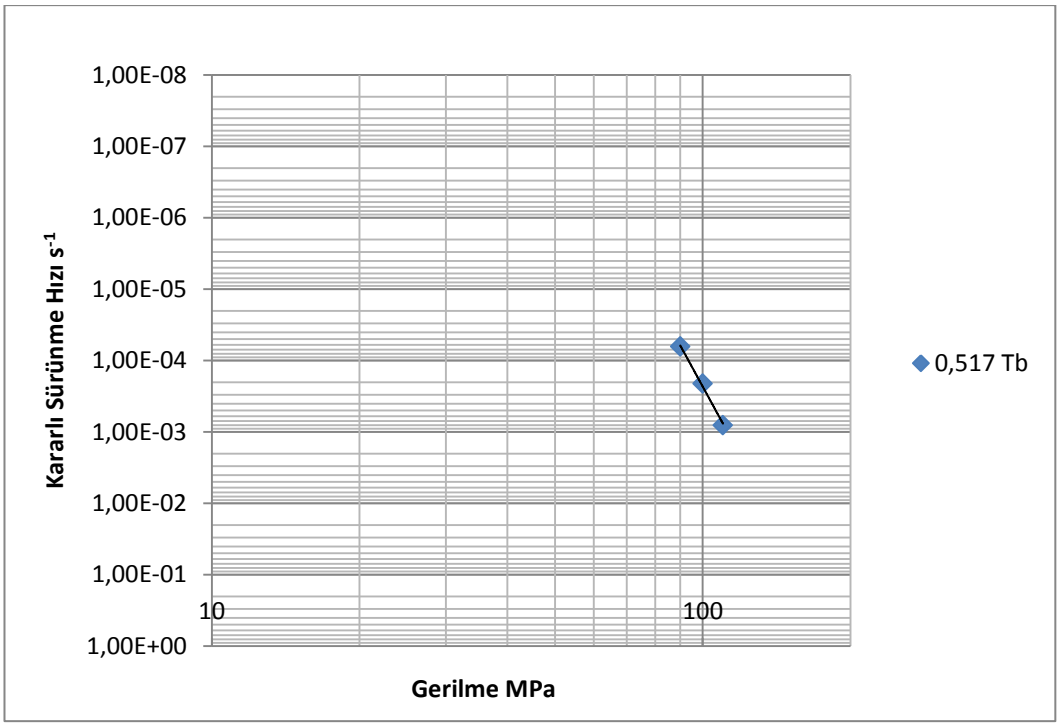
Şekil 4.19 : 100 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 85 ºC sıcaklığında sürünme davranışı



Şekil 4.20 : 90 MPa gerilme altında Titanzink levhanın 85 ºC sıcaklığında sürünme davranışı

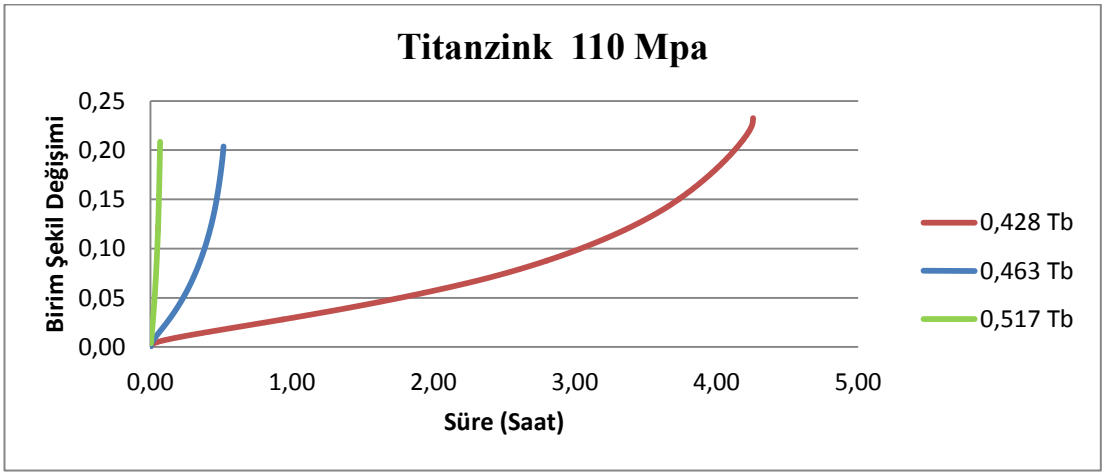
Çizelge 4.4 : 85 ºC sıcaklığında Titanzink malzemeye ait kararlı sürünme hızları

Gerilme (MPa)	Kararlı Sürünme Hızı (s^{-1})
110	8,02E-04
100	2,10E-04
90	6,38E-05

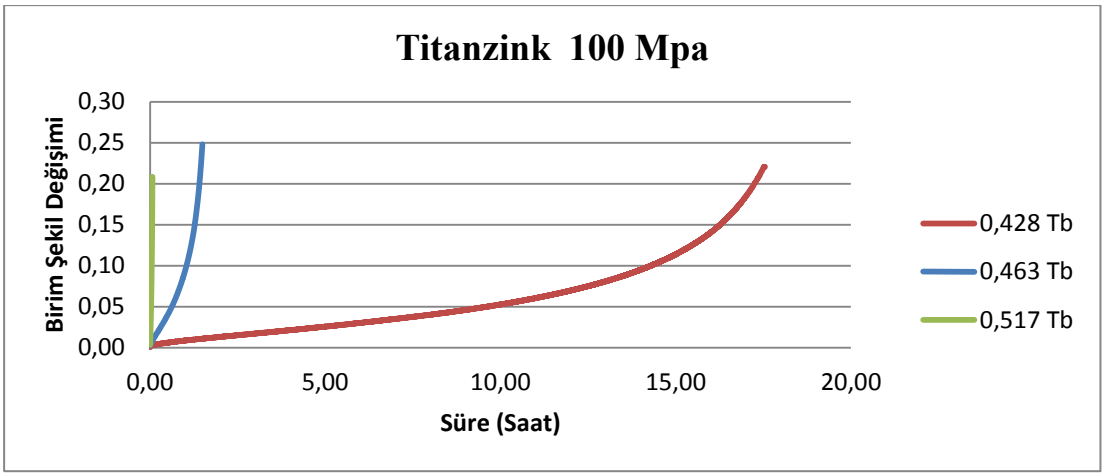


Şekil 4.21 : 85^{o} C'de Titanzink malzemeye ait Gerilme-Kararlı Sürünme Hızı grafiği

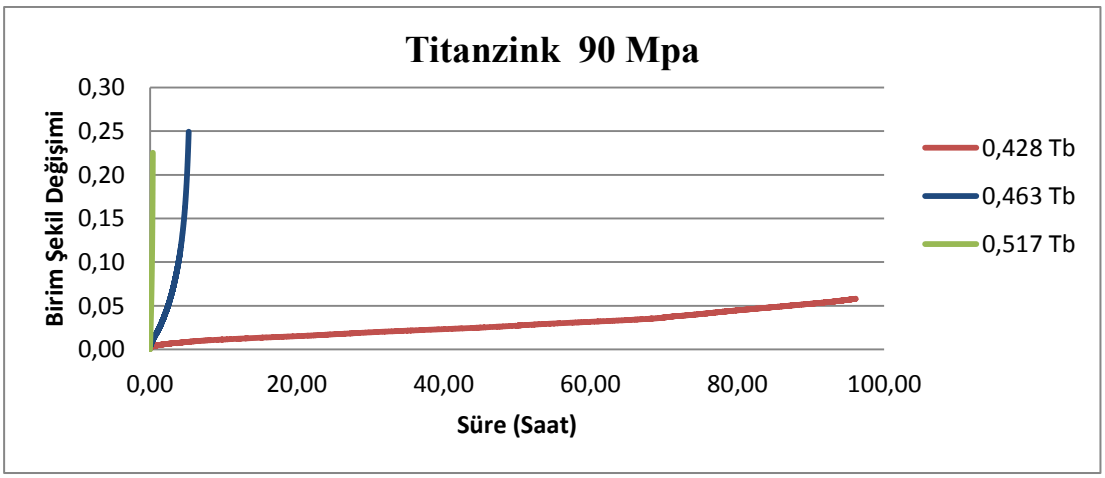
4.1.2.4 Tüm sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneylere ait karşılaştırma



Şekil 4.22 : Aynı gerilme altında farklı sıcaklıklardaki Titanzink malzemeye ait sürünme eğrileri



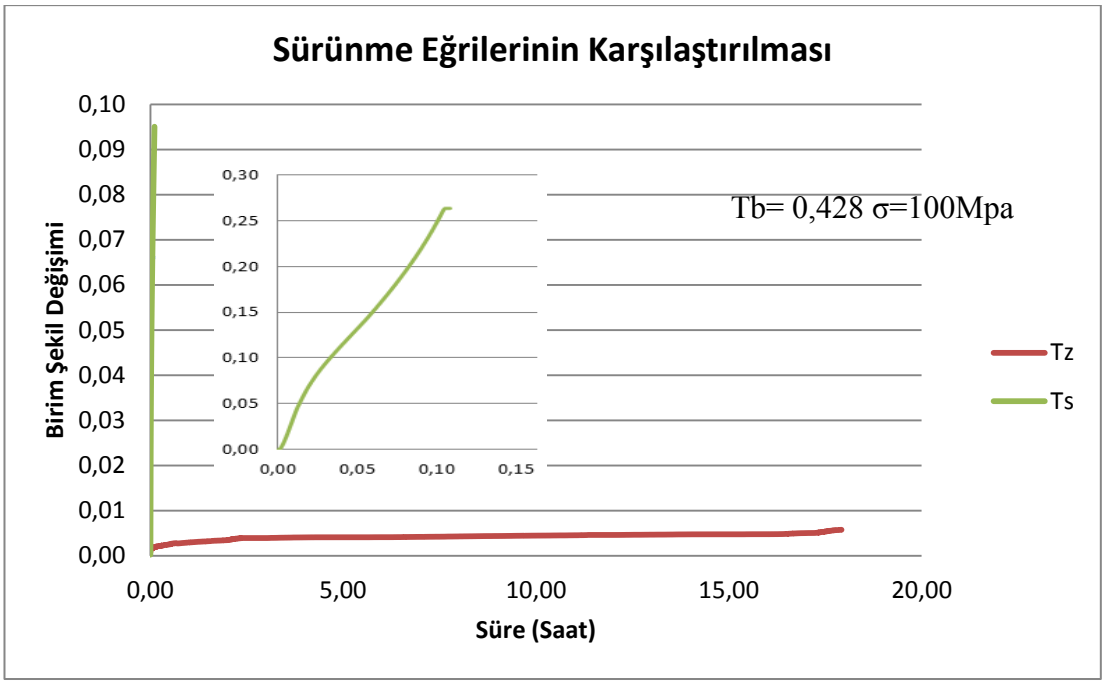
Şekil 4.23 : Aynı gerilme altında farklı sıcaklıklardaki Titanzink malzemeye ait sürünme eğrileri



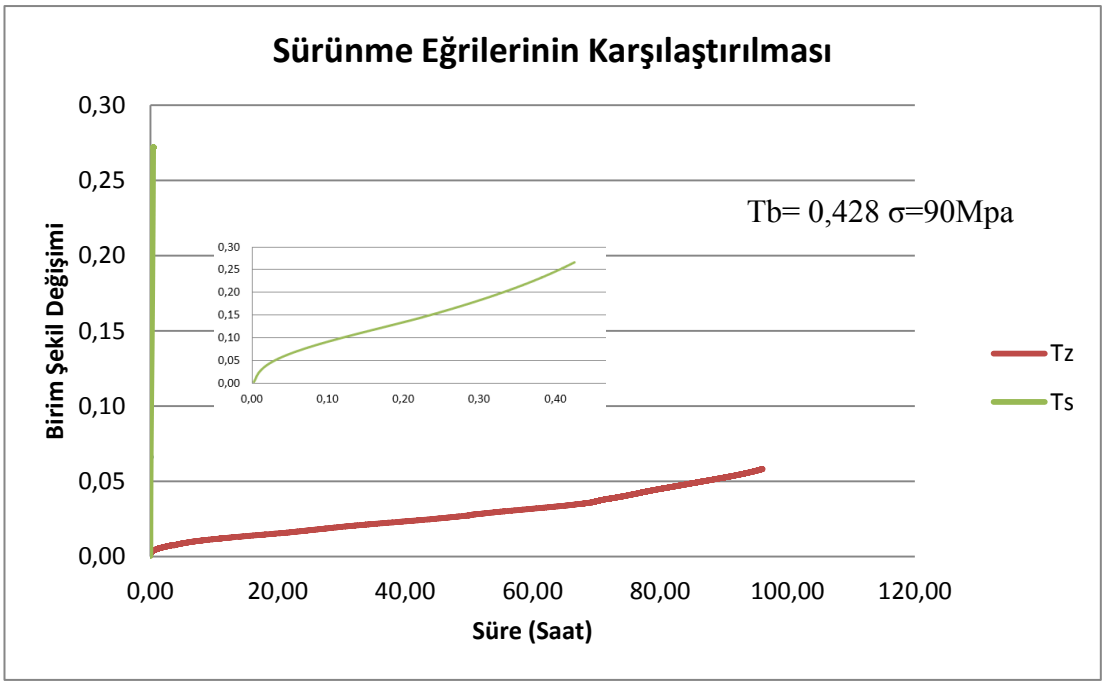
Şekil 4.24 : Aynı gerilme altında farklı sıcaklıklardaki Titanzink malzemeye ait sürünme eğrileri

4.1.3 Cu-Ti ile alaşımlandırmanın sürünme davranışına etkisi

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'de görüldüğü üzere oda sıcaklığında aynı gerilme uygulanan saf çinko ve titanzink malzemelerine ait sürünme eğrileri gösterilmiştir. Eğrilerden görüldüğü üzere bakır ve titanyum ile alaşımlandırılan çinko malzemenin, saf çinko malzemeye göre oldukça üstün olduğu görülmektedir. Yani bakır ve titanyum ile alaşımlandırma çinko malzemelerin sürünme özelliklerini geliştirmektedir.



Şekil 4.25 : Aynı gerilme altında ticari saflıkta çinko ve Titanzink'e ait sürünme eğrileri

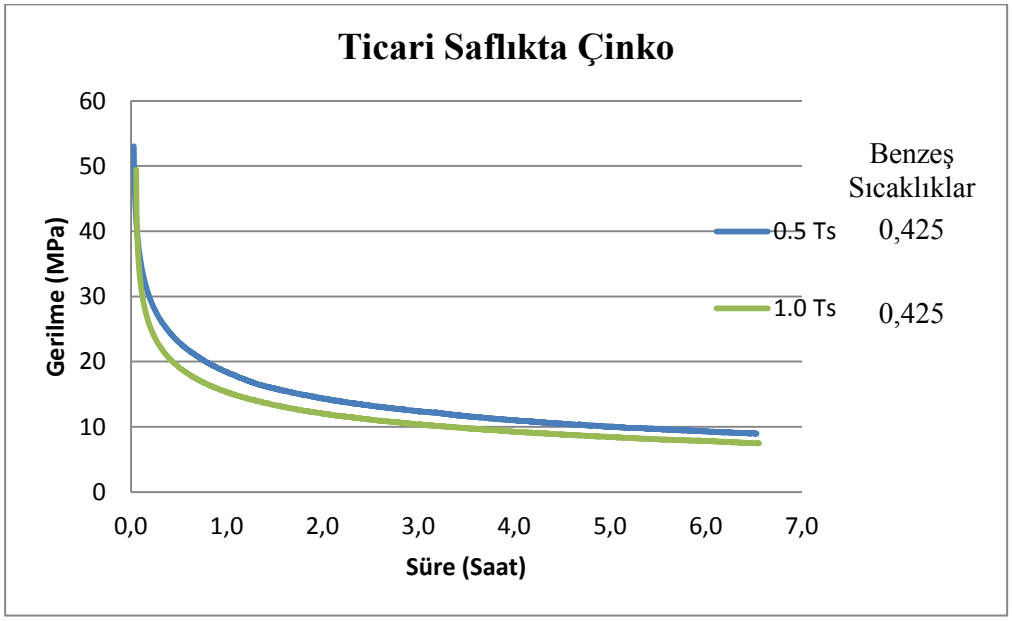


Şekil 4.26 : Aynı gerilme altında ticari saflıkta çinko ve Titanzink'e ait sürünme eğrileri

4.2 Gerilme gevşemesi deneyi sonuçları

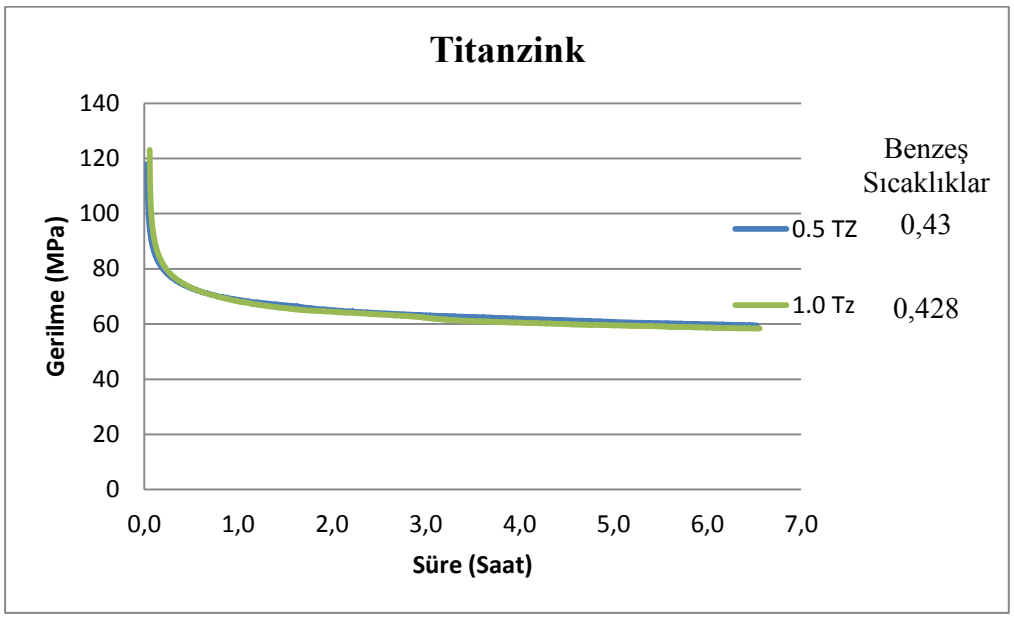
Gerçekleştirilen gerilme gevşemesi deneylerine göre ticari saflıkta çinko ve Titanzik levhalara ait sürünme deneylerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

4.2.1 Ticari Saflıkta Çinko



Şekil 4.27 : Saf Çinko levhalara ait gerilme gevşemesi deneyi sonuçları

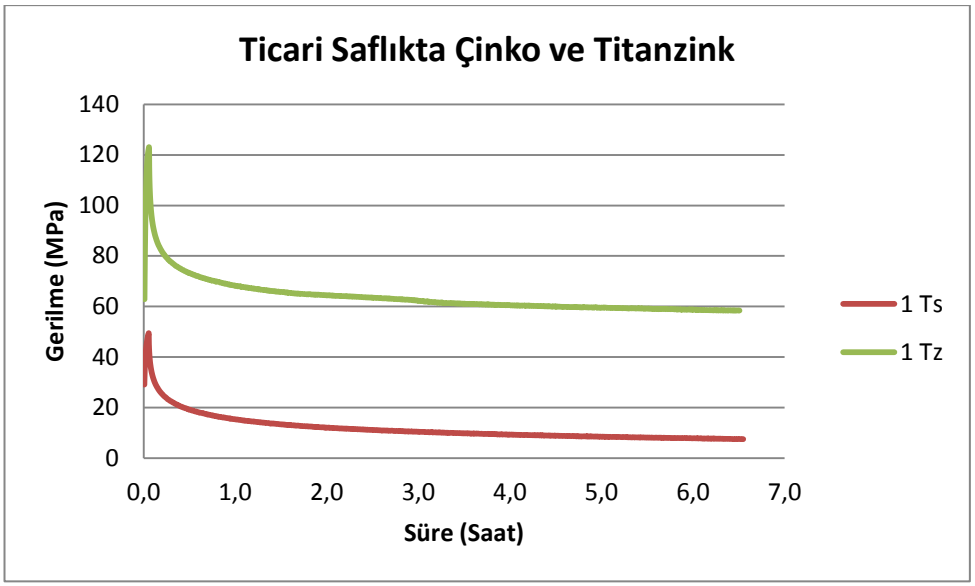
4.2.2 Titanzink



Şekil 4.28 : Titanzink levhalara ait gerilme gevşemesi sonuçları

4.2.3 Cu-Ti ile alaşımlandırmanın gerilme gevşemesi davranışına etkisi

Yapılan deneyler sonucu aynı ön-birim şekil değişimine maruz bırakılan saf çinko ve titanzink malzemelerin sürünme eğrileri bir arada çizilmiştir. Şekil 4.29'de görüldüğü üzere Saf çinkoya ait gerilme gevşemesi davranışı Cu-Ti ile alaşımlandırma ile geliştirilmiştir. Bu durumdan saf çinkoya ait sürünme dayanımının Cu-Ti ile alaşımlandırmayla artacağı çıkarılabilir.



Şekil 4.29 : Aynı ön birim şekil değişimi uygulanmış Titanzink ve ticari saflıkta çinko malzemeye ait karşılaştırma

4.3 Sürünme gerilme gevşemesi ilişkisi

Literatürde bahsedildiği üzere sürünme ve gerilme gevşemesi sırasında aynı mekanizmalar rol oynamaktadır. Bu nedenle iki davranış arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Gerilme gevşemesi deneyleri sonucu elde edilen veriler yardımıyla hesaplanan temsili şekil değişim hızları kararlı sürünme hızları ile benzerlik göstermektedir. Hesaplamalar kısmında bahsedilen yöntemle temsili şekil değişim hızını veren fonksiyonlar (Çizelge 4.3) elde edilmiş ve istenilen gerilme durumuna göre extrapole edilmiştir.

Çizelge 4.5 : Gerilme Gevşemesi ve Sürünme deneylerinden elde edilen kararlı sürünme hızları

	Farklı Ön Birim Şekil Değişimine Karşılık Gelen Temsili Birim Şekil Değişim Hızları		Sürünme Deneyleri Kararlı Sürünme Hızları (1/s)
Titanzink	%0,5 Ön Ş.D (1/s)	%1 Ön Ş.D (1/s)	
120	4,12E-05	2,96E-05	2,72E-05
110	7,83E-06	6,08E-06	6,97E-06
100	1,27E-06	1,07E-06	1,23E-06
90	1,70E-07	1,57E-07	1,13E-07
Saf Çinko			
100	2,130E-03	3,96E-04	5,25E-04
90	8,039E-04	1,87E-04	2,77E-04
80	2,704E-04	4,76E-05	3,83E-05
70	7,863E-05	2,16E-05	1,36E-05
60	1,889E-05	4,28E-06	3,61E-06

Çizelge 4.6 : Gerilme gevşemesi deneyleri kullanılarak oluşturulan Norton üstel bağıntıları

Ön Şekil Değişimi	Saf Çinko	Titanzink
%1	$\dot{\varepsilon}_{SS} = 3{,}65\text{x}10^{-22}\sigma^{9{,}22}$ R^2=0.91	$\dot{\varepsilon}_{SS} = 4{,}08\text{x}10^{-43}\sigma^{18{,}21}$ R^2=0.93
%0,5	$\dot{\varepsilon}_{SS} = 8{,}39\text{x}10^{-22}\sigma^{9{,}25}$ R^2=0.91	$\dot{\varepsilon}_{SS} = 8{,}39\text{x}10^{-45}\sigma^{19{,}09}$ R^2=0.92

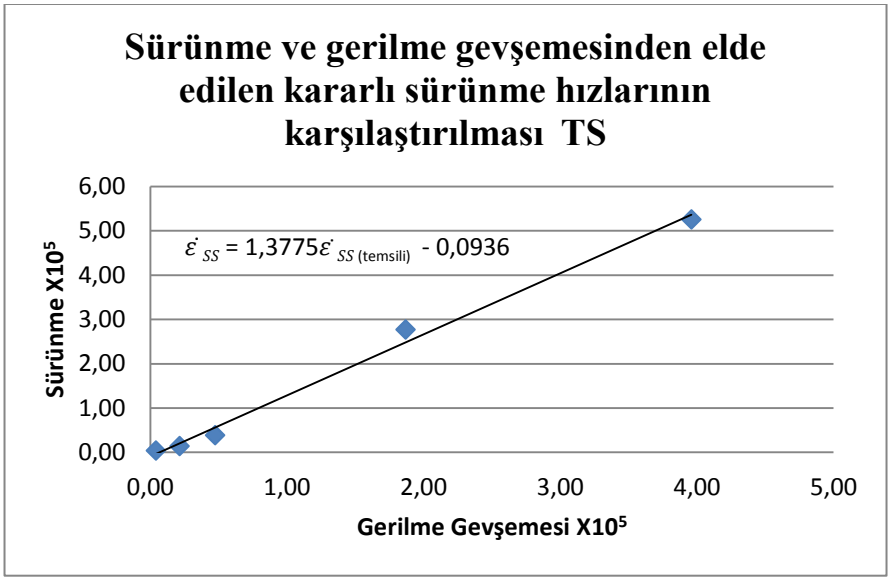
Sürünme deneylerinde, farklı gerilme değerleri ve hesaplanan kararlı sürünme hızları grafiğe taşınmış ve üstel fonksiyonlar Excel programı sayesinde oluşturulmuştur. Sürünme davranışına ait bu fonksiyonlar Çizelge 4.4 de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Oda Sıcaklığında sürünme verilerinden oluşturulan basitleştirilmiş Norton üstel bağıntıları

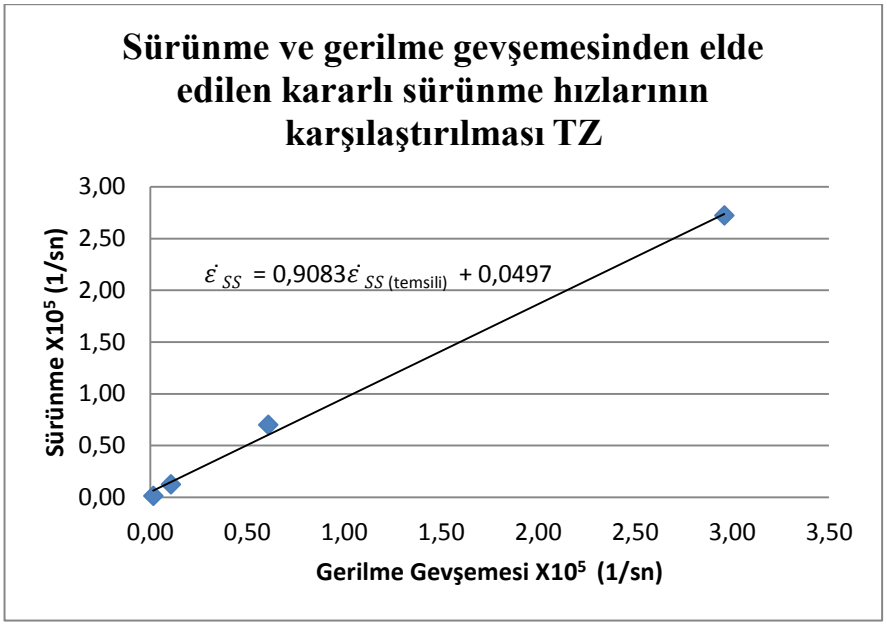
Malzeme	Kararlı Sürünme Hızı (1/s)
Saf Çinko	$\dot{\varepsilon}_{SS} = 3\text{x}10^{-24}\sigma^{10{,}15}$
Titanzink	$\dot{\varepsilon}_{SS} = 4\text{x}10^{-43}\sigma^{18{,}21}$

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de görüldüğü üzere gerilme gevşemesi sürünme deneyleri sonucu hesaplanan kararlı sürünme hızlarına ait Norton üstel bağıntıları birbirleriyle benzerlik göstermektedir.

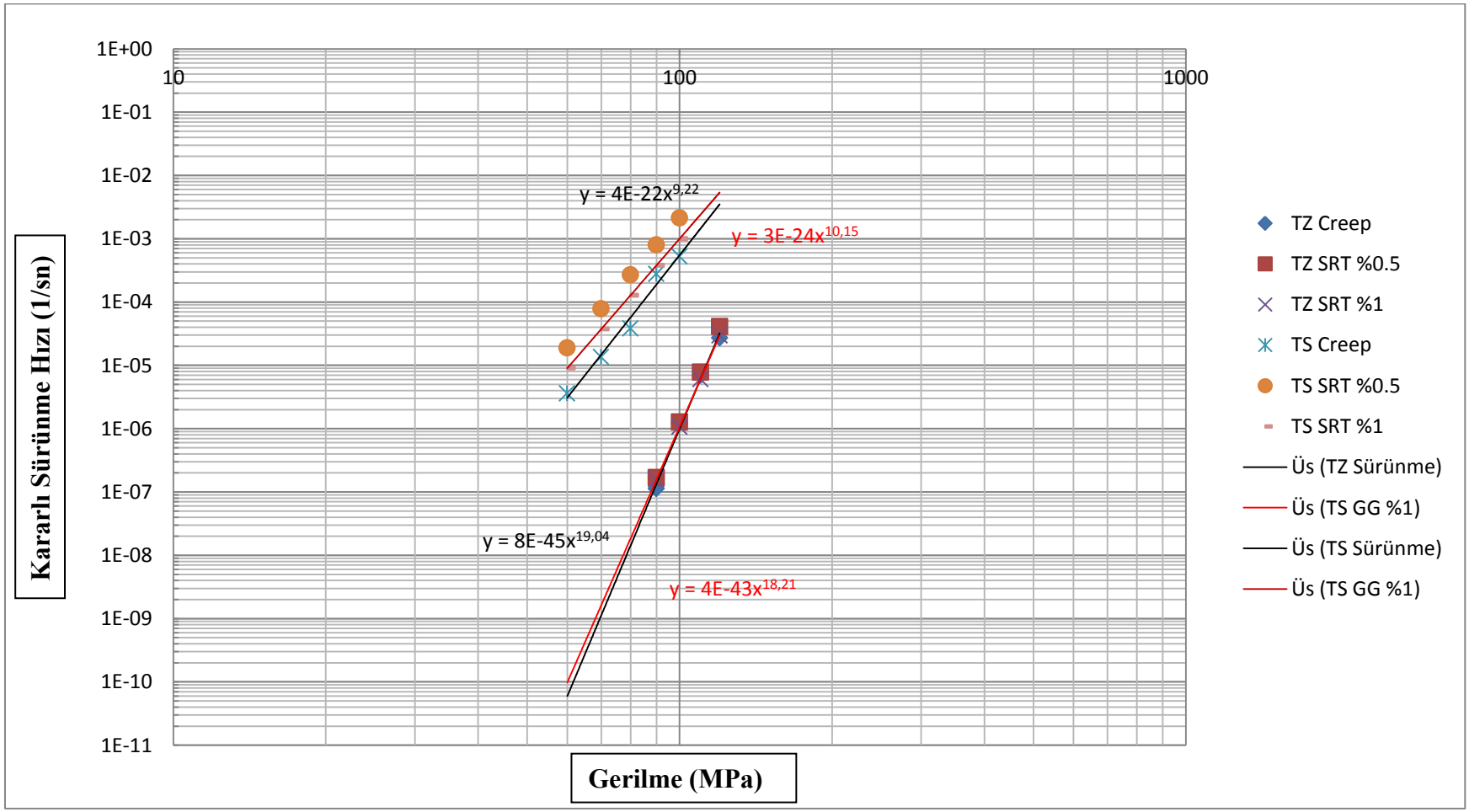
Ayrıca gerilme gevşemesi deneyleri sonucu elde edilen Norton üstel bağıntıları fonksiyonlarına sürünme deneyi koşullarındaki gerilmeler uygulandığında Çizelge 4.6'daki gibi bir benzerlik elde edilmektedir. Ayrıca elde edilen kararlı sürünme hızları her iki malzeme için Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.30 : Saf çinko için $\dot{\varepsilon}_{SS}$ sürünme- $\dot{\varepsilon}_{SS}$ gerilme gevşemesi



Şekil 4.31 : Titanzink için $\dot{\varepsilon}_{SS}$ sürünme- $\dot{\varepsilon}_{SS}$ gerilme gevşemesi



Şekil 4.32 : Oda sıcaklığında saf çinko ve Titanzink malzemelere ait sürünme ve gerilme gevşemesi ilişkisi

Şekil 4.32'de görüldüğü üzere saf çinko numunelerin gerilme gevşemesi ve sürünme deneyleri sonucu elde edilen davranışları benzerlik göstermektedir. Norton üstel bağıntısı eğrilerine ait n katsayıları saf çinko için yaklaşık 9-10 civarında olarak bulunmaktadır. Literatüre bakıldığında saf metaller için gerilme üsteli 12'ye kadar çıkmaktadır [8]. Ayrıca çinko malzeme için benzer sıcaklıkta gerilme üstelinin 9 ve üzeri olarak bulunduğu çalışmalar da mevcuttur [31].

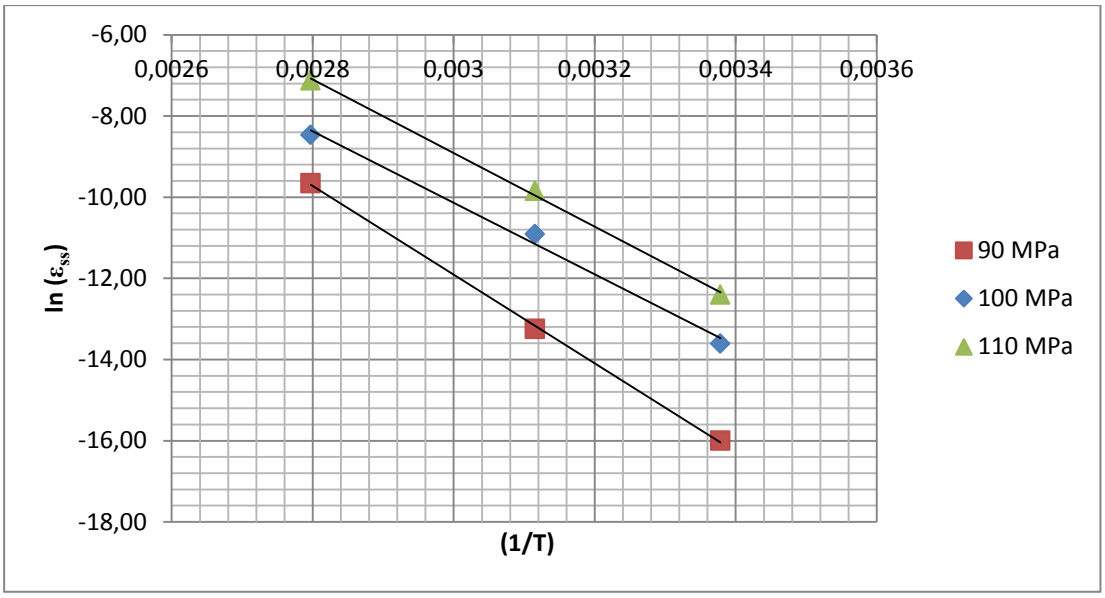
Aynı şekilde Titanzink levhaya bakıldığında n üsteli 18-19 arasında bulunmaktadır. Deneylerde elde edilen veriler bir araya getirilince gerilme gevşemesi ve sürünme arasındaki ilişki ortaya çıkmaktadır. Literatüre bakıldığında parçacık ile sertleştirmenin gerilme üstelinde önemli bir artışa yol açabileceği görülmüştür [8]. Bu durumda çinko ve titanyum ile alaşımlandırma sonucu oluşan ara fazların tane sınırlarında çökelmesi gerilme üstelindeki bu artışa neden olmuştur.

Her iki malzemede de sürünme ve gerilme gevşemesi davranışlarında benzerlik görülmüştür. Bu benzerlik sayesinde çok uzun süreler alan sürünme deneyleri yerine gerilme gevşemesi deneyleri kullanılarak malzemenin sürünme davranışı tahmin edilebilir hale gelmiştir.

Şekil 4.29 üzerinde bulunan denklemler sayesinde Titanzink malzemede 90-120 MPa gerilme aralığında kararlı sürünme hızları hesaplanabilir. Ayrıca ticari saflıktaki çinko için 60-100 MPa aralığında karalı sürünme hızları hesaplanabilir.

4.4 Sürünme Aktivasyon Enerjisi

Denklem 3.9 belirtilen ilişkiye göre Q_c değerleri birim şekil değişim hızının doğal logaritması alınıp 1/T ile orantılandığında sürünme aktivasyon enerjilerine ulaşılabilir. Şekil 4.30'da yukarıda bahsedilen ilişkiye ait grafik verilmiştir. Üç farklı sıcaklık değerinde ve üç farklı gerilme değerinde elde edilen datalar görülmektedir.



Şekil 4.33 : Titanzink levhalara ait Q_c değerinin bulunması

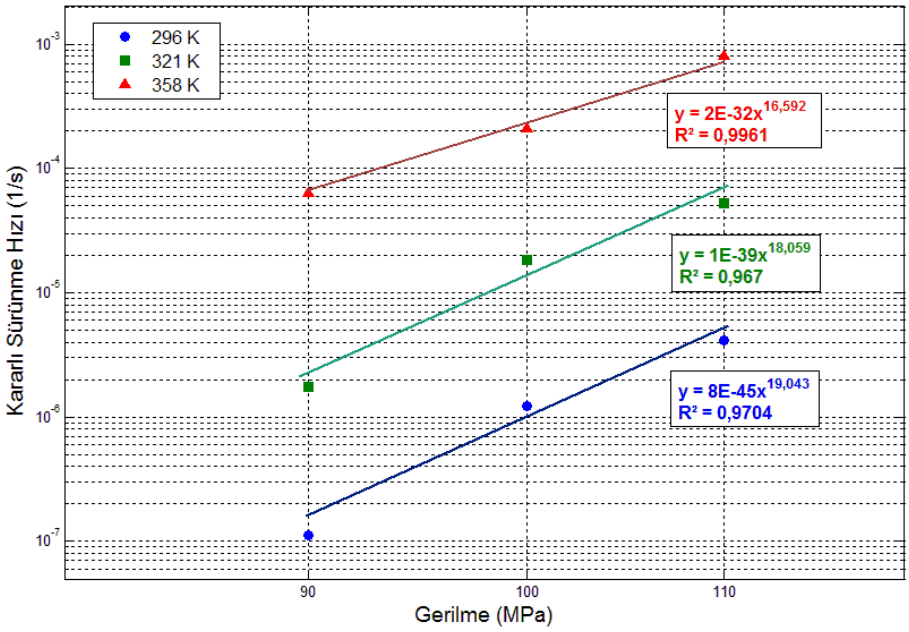
Şekil 4.30'daki eğrilerin eğimleri hesaplanıp Q_c değerleri şu şekilde bulunmuştur.

Çizelge 4.8 : Farklı gerilmeler için bulunan $Q_c$değerleri

	90 MPa	100 MPa	110 MPa
Q_c	~81 kJ/molK	~85 kJ/molK	~86 kJ/molK

4.5 Titanzink Malzemeye Ait Bünye Denklemi

Şekil 4.34'de ilişkilerden malzememenin her iki sıcaklıkta da aynı gerilme üsteline sahip olduğu görülmektedir. Ancak benzeş sıcaklık 0,52 (358 K) mertebelerindeyken gerilme üstelinde bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Literatürde Norton üstel eğrilerinin kırılması olarak geçen bu fenomen gerilme aralığı veya sıcaklıkta meydana gelen değişiklikler ile açıklanmaktadır [31]. Gerilme üstelindeki bu azalma sıcaklığın artmasıyla ilişkiledirilebilir. Qc değerinin 90 MPa için diğer değerlerden küçük olması bu kırılmanın varlığı ile ilişkilidir.



Şekil 4.34 : Farklı sıcaklıklar Titanzink levhaya ait sürünme grafikleri

Ayrıca malzemeye ait kararlı sürünme hızılarının doğal logaritması ve 1/T değerinin doğal logaritması arasında bir ilişki olduğu gözlemlenmektedir. Bu ilişki sayesinde malzemeye ait Qc değeri, (deneylerin yapıldığı sıcaklık ve gerilme altında) yaklaşık olarak 84 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Litertüre bakıldığında çok daha düşük gerilme ve benzer sıcaklık şartlarında yapılan deneylerde saf çinko malzemeye ait sürünme aktivasyon enerjisinin 92 kJ/mol olduğu görülmüştür [31]. Aradaki farkın uygulanan gerilmeden kayanklandığı düşünülebilir.

Literatürde bahsedilen Norton bağıntılarında n ve Qc değerleri dışında son olarak bir de A sabit kalmaktadır. n ve Qc değerleri bilindiği için bu değer basitçe hesaplanabilir. Bu durumda A değeri $2.2\text{x}10^{-28}$ olarak bulunmuştur.

O halde bünye bağıntısı şu hale gelmektedir.

$$\dot{\varepsilon}_{SS} = 2.2x10^{-28}\sigma^{18}\, exp\left(-\frac{84000}{RT}\right) \qquad \textbf{(4.1)}$$

5. GENEL SONUÇLAR

Ticari saflıkta çinko ve Titanzink levhalarla ilgili yapılan bu deneysel çalışmalardan çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir.

- Yapılan literatür araştırması ve yapılan deneyler sonucu sürünme ve gerilme gevşemesi davranışlarında benzerlik görülmüştür. Saf çinko ve Titanzink malzemede bu benzerlikler gözlemleniştir.
- Kararlı sürünme hızına ulaşmak için zorluk derecesi daha yüksek olan sürünme deneyleri yerine Saf çinko ve Titanzink malzemeler için gerilme gevşemesi deneyleri gerçekleştirilebileceği anlaşılmıştır.
- Saf çinko malzeme için temsili kararlı sürünme hızlarının gerçek sürünme hızlarından 1,3 kat yüksek olarak bulunması, temsili sürünme hızının tasarımda kullanılabileceğini göstermektedir.
- Titanzink malzeme için temsili kararlı sürünme hızlarının gerçek sürünme hızları ile hemen hemen aynı olması, temsili sürünme hızlarının tasarımda da kullanılabileceğini göstermektedir.
- Gerilme üsteli n değerinin saf çinko için 9 mertebelerinde elde edilmesi literatürdeki veriler göz önüne alındığında etkin sürünme mekanizmasının dislokasyon sürünmesi olduğunu ortaya koymaktadır.
- Benzer şekilde Titanzink malzeme için elde edilen gerilme üsteli n değeri 18 mertebelerinde olup aynı miktarda kararlı sürünme hızlarının elde edilebilmesi için daha yüksek gerilme seviyelerinin uygulanması gerektiğini ortaya koymaktadır.
- Bu malzemede oluşan $TiZn_{15}$ ve $CuZn_4$ çökeltilerinin söz konusu sürünme dayanım artışına neden olduğunu söylemek mümkündür.
- Bu malzemede dislokasyon sürünmesiyle birlikte tane sınırı kayma mekanizmasının oluşan çökeltiler nedeniyle kısıtlanmış olmasının söz konusu dayanım artışını meydana getirdiği söylenebilir.

- Bu çalışma sonunda Titanzink malzeme için sürünme aktivasyon enerjisi değeri ile sürünme bünye bağıntısı aşağıdaki gibi tespit edilmiştir.

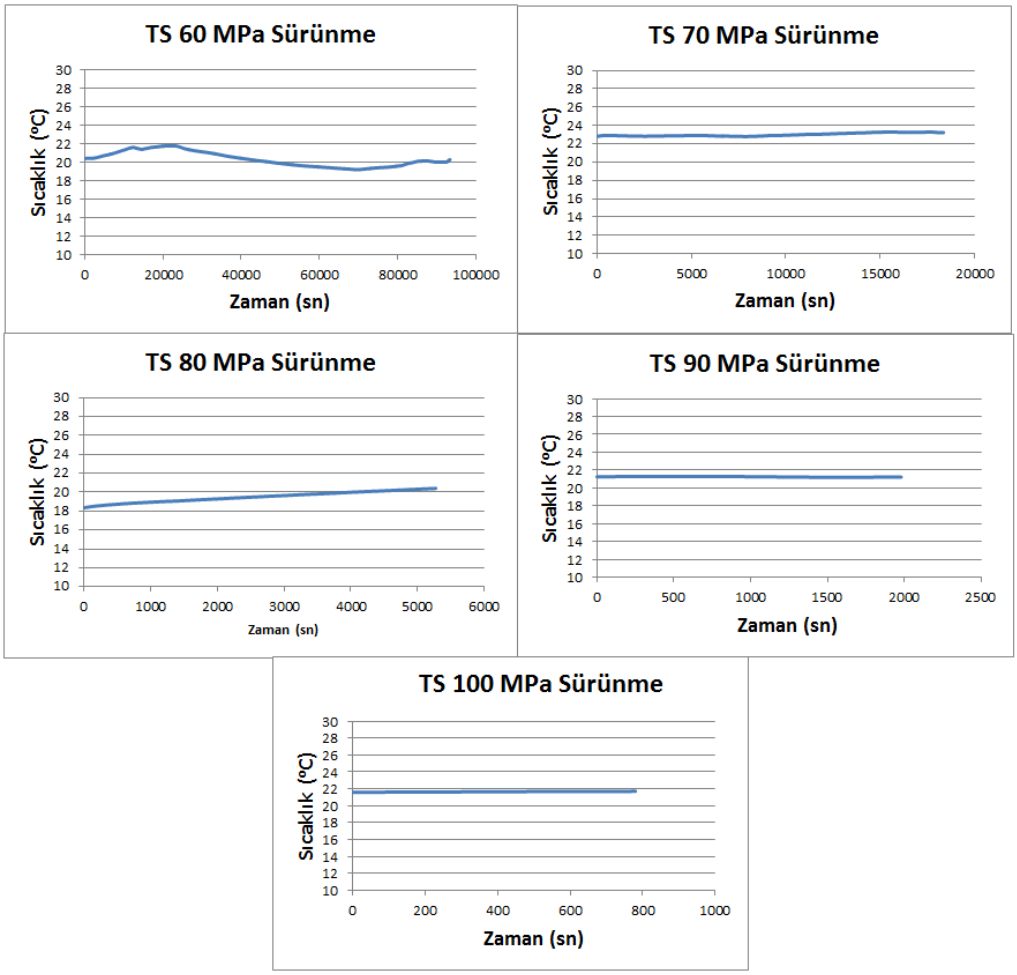
$$\dot{\varepsilon}_{SS} = 2.2x10^{-28}\sigma^{18}\, exp(-84000/RT)$$

6. ÖNERİLEN ÇALIŞMALAR

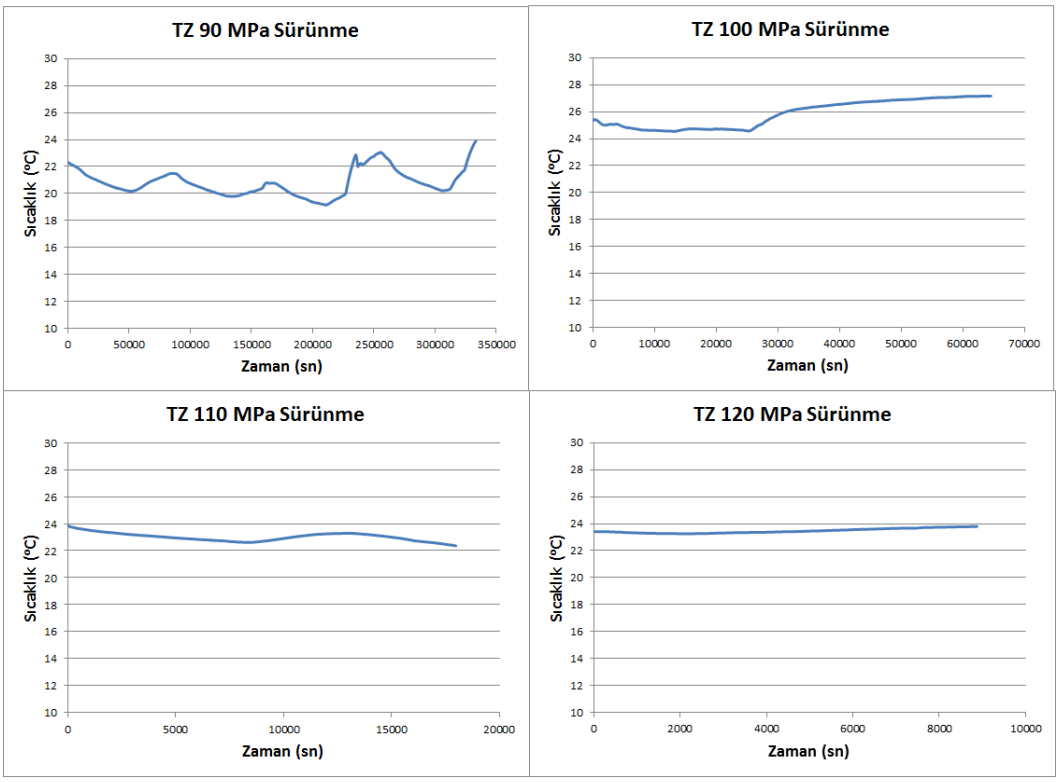
- Gerilme gevşemesi deneyleri daha basit olarak basma modunda yapılarak sürünme ile ilişkisi belirlenebilir.
- Titanzink malzemenin daha kapsamlı bir çalışma yapılarak sürünme deformasyon mekanizma haritasını oluşturacak bir çalışma yapılabilir.
- Titanzink malzeme için sürünme hasar mekanizmaları SEM ve TEM yardımıyla daha detaylı incelenebilir.

EKLER

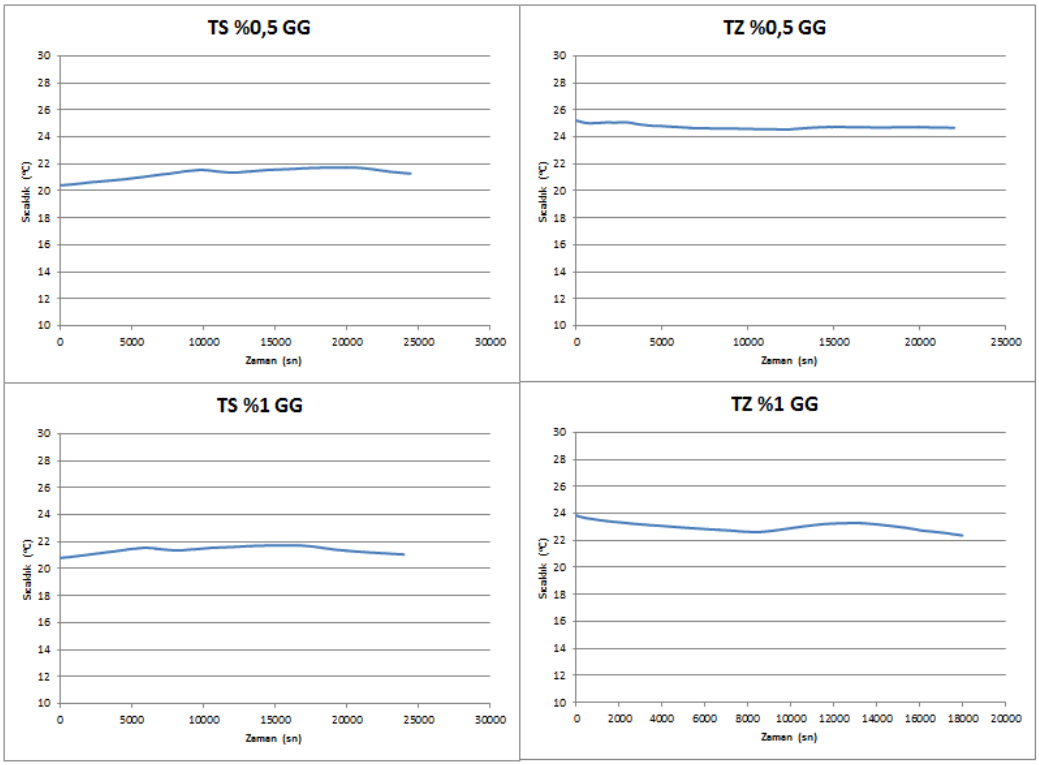
EK A : Sürünme ve gerilme gevşemesi deneylerine ait sıcaklık-zaman grafikleri



Şekil A.1 : Saf çinkoya ait farklı gerilmelerde sürünme deneyleri sırasında sıcaklık-zaman garfikleri



Şekil A.2 : Titanzink'e ait farklı gerilmelerde sürünme deneyleri sırasında sıcaklık-zaman garfikleri



Şekil A.3 : Her iki malzemenin gerilme gevşemesi deneyleri sırasında sıcaklık-zaman grafikleri

KAYNAKLAR

[1] **F. Porter** (1991). Zinc Handbook : Properties, Processing, and Use in Design Mechanical Engineering, CRC Press,

[2] **J. Fundenberger, M. Philippea, F. Wagnera ve C. Eslinga** (1997). Modelling and prediction of mechanical properties for materials with hexagonal symmetry (zinc, titanium and zirconium alloys), *Acta Materialia,* cilt 45, 4041-4055,

[3] **T. H. Muster, W. D. Ganther ve I. S. Cole** (2007). The influence of microstructure on surface phenomena: Rolled zinc, *Corrosion Science,* p. 2037–2058,

[4] **A. Aran** (2008). *Malzeme Bilgisi 2007-2008 Ders Notları,* İstanbul,.

[5] **American Society of Metals (**1987) ASM Metals Handbook, Volume 8,

[6] **M. Demirkol** (2007). *Malzemelerin Mekanik Davranışı, Ders Notları,* 2007.

[7] **N. E. Dowling** (1993). Mechanical Behaviour of Metarials,.

[8] **R. W. Evans ve B. Wilshire** (1993). Introduction to Creep,.

[9] **G. E. Dieter** (1988). Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill,.

[10] **T. Matsunaga ve E. Sato** (2012). Estimation of Grain Boundary Sliding During Ambient-Temperature Creep in Hexagonal Close-Packed Metals Using Atomic Force Microscope, *Prop. Char. at Nanoscale,*.

[11] **J. Ciulik ve E. Taleff** (2007). Power-law creep of powder-metallurgy grade molybdenum sheet, *Materials Science and Engineering A,* no. 463, pp. 197-202,.

[12] **F. Dobes ve K. Milicka** (2002) Analysis of creep in long range ordered CuZn in terms of thermally activated overcoming of barriers, *Materials Science and Engineering A,* no. 324, pp. 73-76

[13] **J. Gobien, K. Murty, R. Scattergood, F. Goodwin ve C. Koch** (2010). Creep behavior of ultra-fine grained Zn–4.5Al, *Materials Science and Engineering A,* no. 527, pp. 7382-7386,

[14] **S. C. Bose, K. Singh, J. Swaminathan ve D. S. Sarma** (2004). Prediction of creep life of X10CrMoVNbN-91 (P-91) steel through short term stress relaxation test methodology, *Materials Science and Technology,* cilt 20, pp. 1290-1296,.

[15] **J. Beddoes** (2011). Prediction of creep properties for two nickel-base superalloys from stress relaxation testing, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design,* cilt 46, p. 416,

[16] **Z. Zhan ve J. Tong** (2003). Determination of creep curves from multiple hardening-relaxation testing., *J. Strain Analysis,* cilt 38, pp. 277-280,

[17] **J. A. Daleo, K. A. Ellison ve D. A. Woodford** (1999). Application of stress relaxation testing in metallurmetallurgical life assessment evaluation of GTD111 alloy turbine buckets., *Trans. ASME J. Engng. Gas Turbines Power,* cilt 121,

[18] **S. C. Bose, K. Singh ve G. Jayaraman** (2003). Application of stress relaxation test methodology for predicting creep life of a large steam turbine rotor steel

(1CrMoV)., *J. Test. Evaluation,* no. 31,

[19] **D. A. Woodford** (1997). Creep analysis of directionally solidified GTD111 based on stress relaxation testing., *Materials at High Temperatures,* no. 14,

[20] **A. Akay** (2012). *Cu Ve Ti İle Alaşımlandırılmış Çinko Levhalarda (Titanzink) İç Yapının Şekillendirilebilirlik Özelliklerine Etkisi,* (İTÜ, Yüksek Lisans Tezi),

[21] **URL-1 <**http://www.nedzink.nl/product_description.html> alındığı tarih: 22.08.2011

[22] **European** Committee for Standardization, Zinc and zinc alloys: Spesifications for rolled flat products for building, 1996.

[23] **URL-2** <http://mtdatasoftware.tech.officelive.com/phdiagrams/tizn.htm> alındığı tarih: 09.09.2011.

[24] **G. Boczkal, B. Mikulowski, I. Hünsche, C. G. Oertel ve W. Skrotzki** (2008). Precipitation of intermetallic phase in Zn-Ti alloy single crystals, *Crystal Research and Technology,* pp. 135-140,

[25] **M. Arenas ve J. d. Damborenea** (2005). Protection of Zn–Ti–Cu alloy by cerium trichloride as corrosion inhibitor, *Surface & Coatings Technology,* p. 2085– 2091,

[26] **C. v. d. Bos, H. Schnitger, X. Zhang, A. Hovestad, H. Terryn ve J. d. Wit** (2006). Influence of alloying elements on the corrosion resistance of rolled zinc sheet, *Corrosion Science,* p. 1483–1499,

[27] **G. Pantazopoulos ve A. Sampani** (2007). Analysis of a weld failure of a rolled Zn-alloy strip – A case study, *Engineering Failure Analysis,* pp. 642-651,

[28] **F. Zhang, G. Vincent, Y. Sha, L. Zuo, J. Fundenberger ve C. Esling** (2004). Experimental and simulation textures in an asymmetrically rolled zinc alloy sheet, *Scripta Materialia,* pp. 1011-1015,

[29] **T. Matsunaga, T. Kameyama, K. Takahashi ve E. Sato** (2009). Constitutive Relation for Ambient-Temperature Creep in Hexagonal Close-Packed Metals, *Materials Transactions,* no. 50,

[30] **URL-3, Harold J Frost,** <http://engineering.dartmouth.edu/defmech/chapter_6.htm#Zinc> alındığı tarih: 10 04 2013

[31] **X. Lairong, Z. Ximin ve W. Yan** (2011). High Temperature Creep Behaviour of Zn-1.0Cu-2.0Ti Alloy, *Advanced Materials Research ,* no. 287,

[32] **ASTM E139-11** (2011). *Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials,* ASTM International,

[33] **ASTM E8-11** (2011). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,* ASTM International,

[34] **ASTM E328-02** (2008) *Standard Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures,* ASTM International,

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Olcay Türkoğlu

Doğum Yeri ve Tarihi: Akhisar / 03.02.1987

E-posta: olcay.turkoglu@gmail.com

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi