



Sıcaklık ve Deformasyon Hızının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Temperature and Strain Rate on Mechanical Properties

Süleyman Kılıç^{1*}, Mehmet Fatih Demirdöğen²

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

²Uygurlar Makina, Organize Sanayi Bölgesi, 40100, Kırşehir, Türkiye

Başvuru/Received: 27/08/2021

Kabul / Accepted: 11/03/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Çekme testi, malzemenin kopana dek tek ekseninde çekildiği ve buradan elde edilen verilerden, malzemeyi tanımamızı sağlayan en temel ve basit testlerden biridir. Malzemeleri tanıırken onların farklı sıcaklık ve deformasyon hızları altındaki davranışları da önem arz etmektedir. Özellikle, imalat sanayinde çok farklı üretim ve şekillendirme yöntemleri vardır ve her birinin kendine has özellikleri mevcuttur. Örneğin, sıcak yapılan çekme deneyleri ile malzemenin mekanik özellikleri belirlenmekte ve buradan elde edilen bilgilerle başarılı sıcak derin çekme işlemleri yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımlarında sıcaklık ve deformasyon hızının çekme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çeliklerde, sıcaklık artışının mukavemeti ve sünekliği düşürücü bir etkisi bulunmaktadır. Yaklaşık 300 °C sıcaklığının üstünde ise süneklik artışı olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında deformasyon hızının etkisi olmazken, yüksek sıcaklıklarda etkisi ortaya çıkmaktadır. Titanyum alaşımlarında sıcaklık, iç yapıda meydana gelen deformasyon mekanizmasını etkilediği için önemli bir parametredir. Alüminyum alaşımlarında, deformasyon hızından ziyade deformasyon sıcaklığının etkili parametre olduğu belirtilmektedir. Nikel alaşımlarında ise sıcaklık ve deformasyon hızı, mukavemeti etkilerken süneklik üzerinde etkili olmadığı görülmektedir. Yapılan incelemelerde, bu malzemeler için sıcaklık ve deformasyon hızının, gerilme ve süneklik üzerinde oldukça etkili oldukları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Deformasyon hızı, Sıcaklık, Çelik, Titanyum, Alüminyum, Nikel alaşımları”

Abstract

The tensile test is one of the most basic and simple tests in which the material is pulled in a single axis until it breaks, and from the data obtained from this, we can identify the material. While recognizing materials, their behavior under different temperatures and deformation rates is also important. In particular, there are many different production and shaping methods in the manufacturing industry, and each has its own characteristics. For example, the mechanical properties of the material are determined by hot tensile tests and with the information obtained from this, successful hot deep drawing operations can be performed. In this study, the effects of temperature and deformation rate on tensile properties have been investigated in steel, titanium, aluminum and nickel alloys. In steels, temperature increase has a decreasing effect on strength and ductility. It is observed that ductility increase occurs above the temperature of approximately 300 °C. While deformation rate has no effect at room temperature, its effect occurs at high temperatures. Temperature in titanium alloys is an important parameter as it affects the deformation mechanism in the internal structure. It is stated that in aluminum alloys, the deformation temperature is the effective parameter rather than the deformation rate. In nickel alloys, it is seen that temperature and deformation rate affect the strength but not the ductility. In the examinations made, it has been seen that the temperature and deformation rate for these materials are quite effective on the stress and ductility.

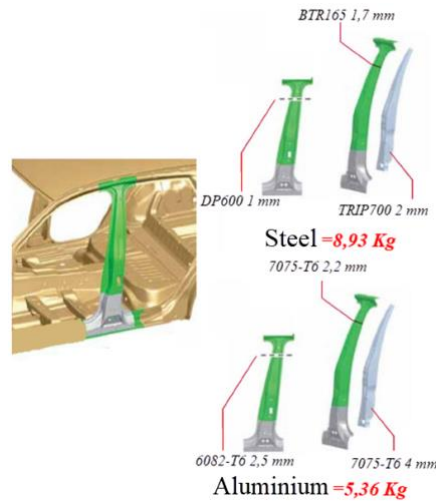
Key Words

“Strain rate, Temperature, Steel, Titanium, Aluminum, Nickel alloys”

1. Giriş

İnsanlık tarihi çağlar aştıkça ihtiyaç duydukları araç gereçleri imal etmek üzere doğadaki malzemelerden faydalanmıştır. İnsan yeryüzündeki çeşitli maden ve hammaddeleri keşfettikçe, zekâ ve kabiliyetini kullanarak yeni araç ve ekipman imalatını gerçekleştirmiştir. Yeri geldiğinde malzemeyi ısıtarak şekil vermiş, yeri geldiğinde daha fazla yük uygulayarak. Bugüne baktığımızda endüstri ve sanayide birçok farklı malzeme kullanılmaktadır. Elbette burada kullanılan malzemeler, yılların birikimi olan araştırma ve tecrübelerle dayanmaktadır. Tasarım aşamasında malzemeyi seçmeden önce malzemeyi tanıyarak, operasyon sırasında vereceği tepki ve göstereceği davranışların bilinerek prosese uygun olup olmadığına karar verilir. Malzeme istenen değerleri vermediğinde, bu değerleri elde etmek için araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Özellikle sıcaklık ve deformasyon hızının malzemenin mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi üzerine birçok çalışma yapılmaktadır.

Geçmişten günümüze otomotiv sektöründe gerek malzeme gerekse yakıt teknolojisinde birçok gelişme olmuştur. Yakıt maliyetlerinin artması sonucu araçlar hafifletilerek hem yakıt maliyeti düşürme hem de çevreye salınan zararlı gazları önlenmesi amaçlanmaktadır. Araç şasesinde yapılan hafifletme çalışmalarında yoğunluğu fazla olan çelik malzemelerden yoğunluğunun az olması sebebiyle alüminyum malzemeye doğru bir geçiş söz konusudur. Özellikle yaşlandırma uygulanan alaşımlarda mekanik özelliklerin iyi değerlendirilmesiyle aynı mukavemet değerinde hafifletme sağlanmaktadır (Şekil 1) (Altan&Long, 2015). Fakat alüminyum alaşımlarına plastik şekil verme işleminde çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Plastik şekil verme yeteneğini geliştirmek üzere sıcaklık artırılarak deneysel çalışmalar yapılmaktadır (Kilic, 2019; Liu et al. , 2020; Simonetto et al. , 2020; Attar et al. , 2021).



Şekil 1. Mekanik özellikleri kullanarak hafifletme sağlanması (Altan&Long, 2015).

Malzemelerin çalışma koşullarına bağlı olarak sahip olmaları istenilen özellikler belirlenmekte ve uygun malzeme seçimiyle birlikte malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Malzemeyi tanımak ve test etmek adına birçok yöntem kullanılmaktadır. İmalat sanayide kullanılan malzemelerden çeliklere baktığımızda demir karbon alaşımı olarak tanımlanır. Çelikler yüklerle karşı dayanıklı ve sertlik değerleri yüksektir. Kimyasal içerikleri açısından alaşımsız ve alaşımlı çelikler olarak ayrılırlar (Borek et al. , 2019). Petrol ve doğalgaz endüstrisinde açılan kuyularda kullanılan malzemeler de yüksek mukavemete ve korozyona dayanıklı olması gerekmektedir. Bu alanda TWIP çeliği hakkında incelemeler yapılmaktadır (Haïtao et al. , 2020). Dünyadaki enerji ihtiyacı giderek artmakla birlikte, bu enerji ihtiyacını karşılamak için yeni enerji santralleri faaliyete geçirilmektedir. Santrallerde kullanılan malzemeler yüksek sıcaklıklarda stabil mekanik özellikler göstermek zorundadırlar. Bu alanda kullanılabilmesi adına G115 çeliği adı verilen 9Cr-3W-3Co çeliği üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Alsagabi et al. , 2018). Havacılık endüstrisinde ise, yeni seri Alüminyum Lityum alaşımları geliştirilmiş ve kullanım alanlarına göre mekanik özellikleri incelenmektedir (Kilic et al. , 2019). Görüleceği üzere ihtiyaçlar neticesinde yeni malzemeler geliştirilmekte ve bunların kullanım alanlarına göre özellikleri araştırılmaktadır.

İmalat sanayinde, özellikle metal şekillendirme işlemlerinde, malzemenin mekanik özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Metal şekillendirme işlemlerinde malzeme plastik olarak deformasyona uğratılmaktadır. Malzemeyi plastik deformasyona uğratabilmek için uygulanan kuvvetin, malzemede akma gerilmesini geçirmesi gerekmektedir. Başarılı ve hatasız bir plastik deformasyon yapılabilmesi için malzemelerin düşük akma mukavemetine sahip olmaları ve özellikle karmaşık parçalar için sünekliğin yüksek olması gerekmektedir. Akma mukavemeti ve süneklik, sıcaklık ve deformasyon hızından oldukça etkilenmektedir (Ozturk et al. , 2009; Ozturk, 2010; Toros et al. , 2011). Genel olarak sıcaklık artışı malzemenin akma mukavemetini düşürürken sünekliğini artırmaktadır. Bunun nedeni ise, yüksek sıcaklıklarda yeniden kristalleşme gerçekleşmesidir. Bunun neticesinde, yeni dislokasyonlar oluşmadığından, dislokasyon yoğunluğu azalarak mukavemeti düşürmektedir. Sıcaklık artışı aynı zamanda malzeme içerisindeki kusurları da artırmaktadır. Sıcaklık azalışı ise, malzemede pekleşme oluşturmakta ve bu nedenle mukavemet artarken, sünekliği azaltmaktadır. Uygulanan kuvvetin etkisiyle yeni dislokasyonların oluşması ve bunların hareketlerinin engellenmesiyle mukavemet artışına pekleşme denilmektedir. Deformasyon hızının artmasıyla beraber, mukavemetin arttığı da yine bilinen bir olgudur. Bu artışın temelinde hızla duyarlı mekanizmalar vardır. Bazı durumlarda dislokasyonlar engellerle karşılaştığında, bunları tırmanma (climb) mekanizması gibi

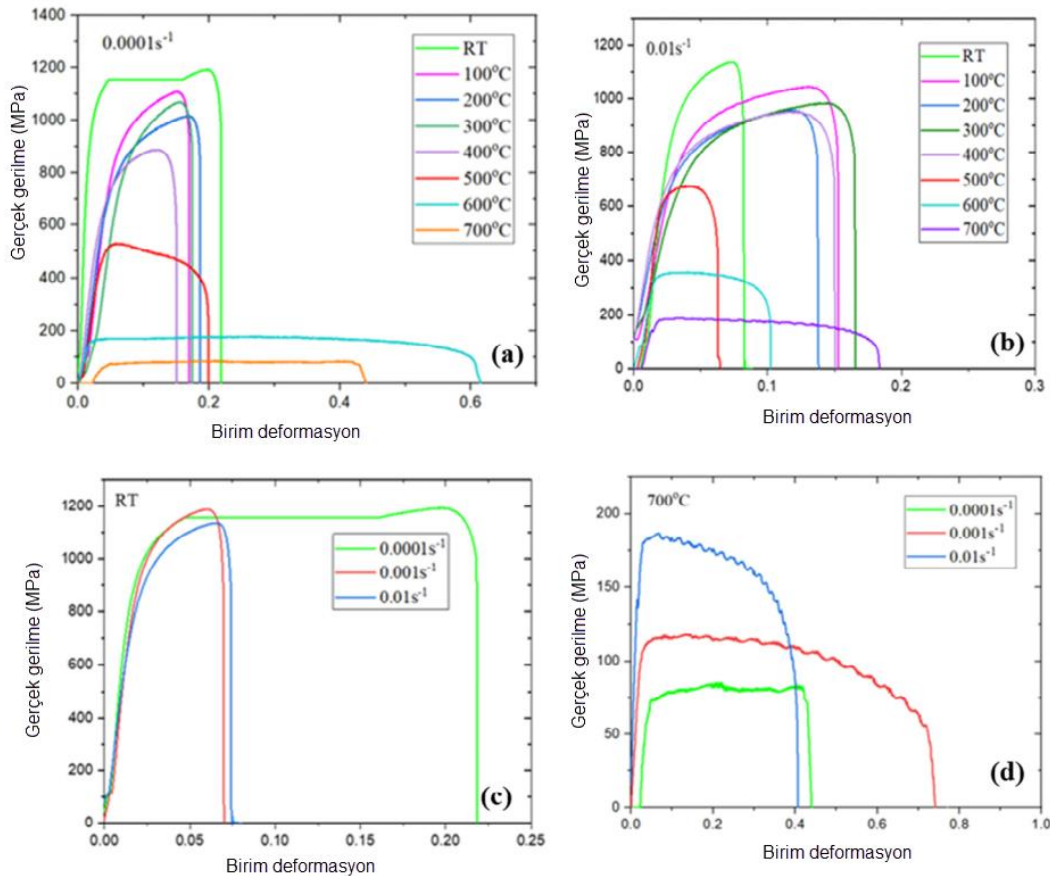
mekanizmalar ile geçmeye çalışırlar. Tırmanma mekanizmasının da gerçekleşebilmesi için zamana ihtiyacı olduğundan eğer yeterli zaman tanınmazsa dislokasyonları geçmeye zorlanacağından mukavemet artmaktadır. Mukavemeti artırmada önemli aktörlerden olan dislokasyon hareketinin kısıtlanması, deformasyon hızında önemli bir rol üstlenmektedir. Bir diğer önemli etkende tane sınır kaymasıdır. Yüksek sıcaklıklarda ve çok düşük deformasyon hızlarında taneler birbiri üzerinde kayarak yer değiştirdiğinden, sünekliğin artmasına neden olurlar.

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi genellikle çekme deneyi yardımıyla yapılmaktadır. Tek eksenli çekme testi, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı malzeme davranışını karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan basit bir yöntemdir. Tek eksenli çekme işleminin yanında gelişmiş deney cihazları ile çift eksenli çekme testleri yapılmaktadır. Bu cihazlarda bulunan termal kabinler sayesinde soğuk ve sıcak deneyler yapılabilmektedir. Örneğin Zwick (Zwick, 2021) marka termal kabinde $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar, Shimadzu (Shimadzu, 2021) marka termal kabinde ise $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar deneyler yapılabilmektedir. Soğutma işleminde sıvı nitrojen kullanılmaktadır. Isıtma işlemi ise, kabin içerisinde yer alan rezistanslar yardımıyla yapılmaktadır. Bu kabinlerin en önemli özelliklerinden birisi de çok kısa süre (yaklaşık 20 dakika) içerisinde sınır sıcaklıklara ulaşabilmeleridir.

Bu çalışmada, imalat sanayinde yaygın olarak kullanılan çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımlarında deformasyon hızı ve sıcaklığın mekanik özelliklerine etkileri ele alınmış olup, üzerinde çalışılan makaleler derlenmiştir. Bu malzemelerin deformasyon sıcaklığına ve hızına karşı göstermiş oldukları davranışlar açıklanmıştır.

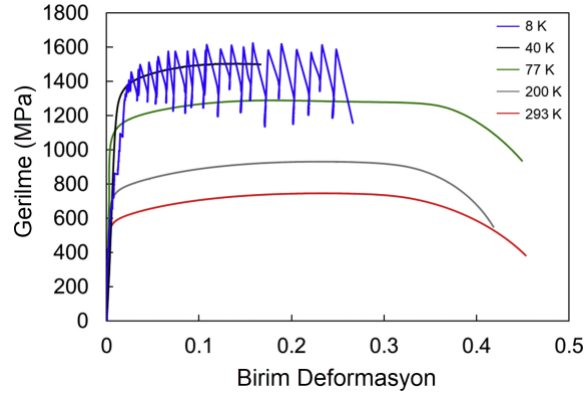
2. Çeliklerde Etkiler

Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan DP590 çeliğinde (Dual Phase: çift fazlı) farklı deformasyon sıcaklığı ve deformasyon hızlarının etkisinin incelendiği bir çalışmada (Pandre et al. , 2019), iç yapıdaki ferrit ve martenzit fazının etkisiyle, akma mukavemetinin sıcaklık ve deformasyon hızından önemli ölçüde etkilendiği ifade edilmiştir (Şekil 2). Oda sıcaklığı ile $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkları arasında yapılan çekme deneylerinde, sıcaklığın artmasıyla her iki deformasyon hızında da akma mukavemetinde önemli oranda azalma meydana gelmiştir. Oda sıcaklığında deformasyon hızının akma mukavemetine etkisi yok denecek kadar azken, yüksek sıcaklıklarda etkisi de artmaktadır. $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ deformasyon sıcaklığının üzerinde iç yapıda meydana gelen etkilerin hızlandığı ve birim deformasyon eğrisinde daha belirgin hale geldiği ifade edilmiştir.



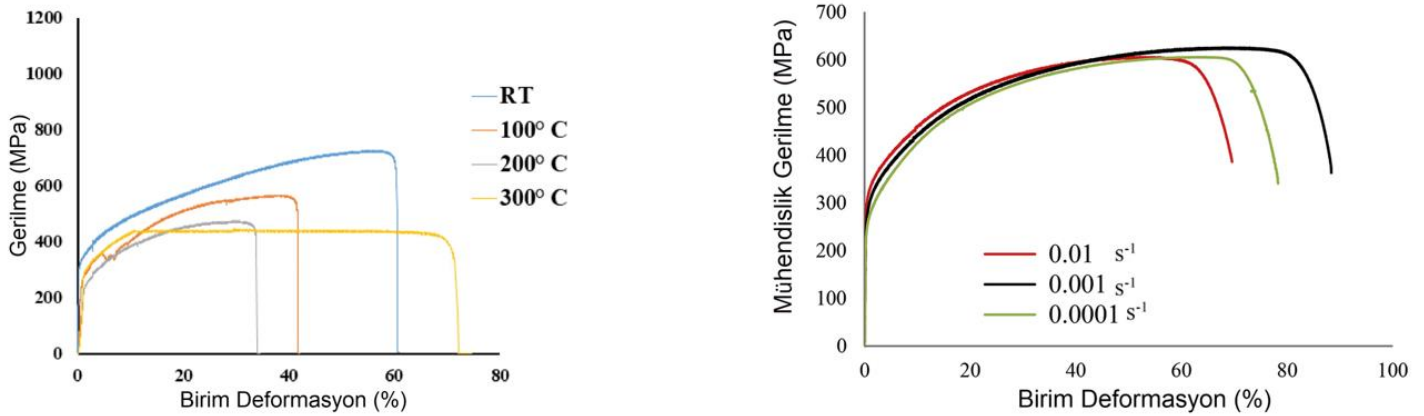
Şekil 2. DP590 çeliğinde deformasyon sıcaklığı ve hızının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Pandre et al. , 2019). Paslanmaz çeliklerin bir ailesi olan dubleks paslanmaz çeliğinde iç yapı, eşit oranda östenit (YMK-FCC) ve ferrit (HMK-BCC) fazından oluşmaktadır. Koga ve arkadaşları da (Koga et al. , 2021), kriyojenik sıcaklıkların dubleks çeliğinin mekanik özelliklerine

etkisini incelemişlerdir. 77 K (-196 °C) ile 293 K (20 °C) arasında yapılan çekme deneylerinde toplam deformasyon miktarı değişmezken, sıcaklık düşüğe oluşun gerilme miktarının arttığı görülmüştür (Şekil 3). Deformasyona bağılı martenzit hacim oranı 77 ve 8 K’ de yüksekken, 40 K da düşük olduğu ve bunun da toplam uzama miktarıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında 40 K’ sıcaklığında gevrek kırılma gerçekleşirken, diğer bütün sıcaklıklarda sünek kırılma tipi meydana gelmiştir. 8 K sıcaklığındaki dikkat çekici tırtık oluşumu ise deformasyon bölgesindeki ani sıcaklık artışından dolayı deformasyona bağılı martenzitin hacminde artışı meydana geldiğini ve bunun da tırtıklı bir yapı oluşturduğunu ifade edilmiştir.



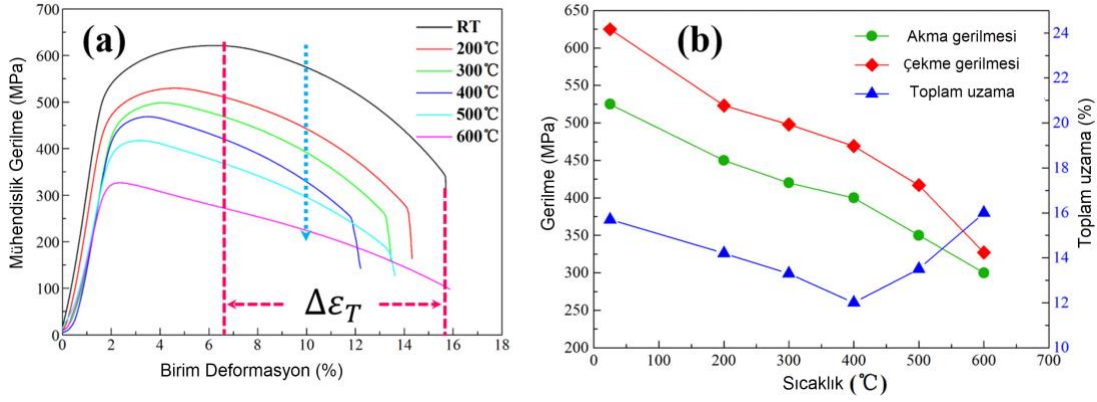
Şekil 3. Farklı sıcaklıklarda dubleks çeliğinin gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Koga et al. , 2021).

Kori ve arkadaşları (Kori et al. , 2020), 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğinin farklı sıcaklıklardaki şekillendirilebilirlik özelliklerini incelemiştir. Sıcaklık arttıkça malzemede gerilmenin düştüğü görülmüştür (Şekil 4.a). Yapılan sıcak deneylerde ise akma gerilmesi değişmezken, sünekliliğin 300 °C oldukça arttığı görülmüştür. 300 °C sıcaklığının malzeme için şekillendirilebilirliğinin daha iyi olduğu vurgulanmıştır. Kundu ve arkadaşları da (Kundu et al. , 2020), deformasyon hızının etkisini incelemişlerdir. Ortalama geometrik dislokasyon yoğunluğu ve deformasyonun neden olduğu martenzit miktarı, artan plastik deformasyonla birlikte beklenenden daha hızlı arttığı gösterilmiştir. Artan deformasyon hızı ile ortalama geometrik dislokasyon yoğunluğunun arttığını göstermişlerdir. Şekil 4.b’de deformasyon hızı artışının mukavemeti çok fazla etkilemese de sünekliliği etkilediği görülmektedir.

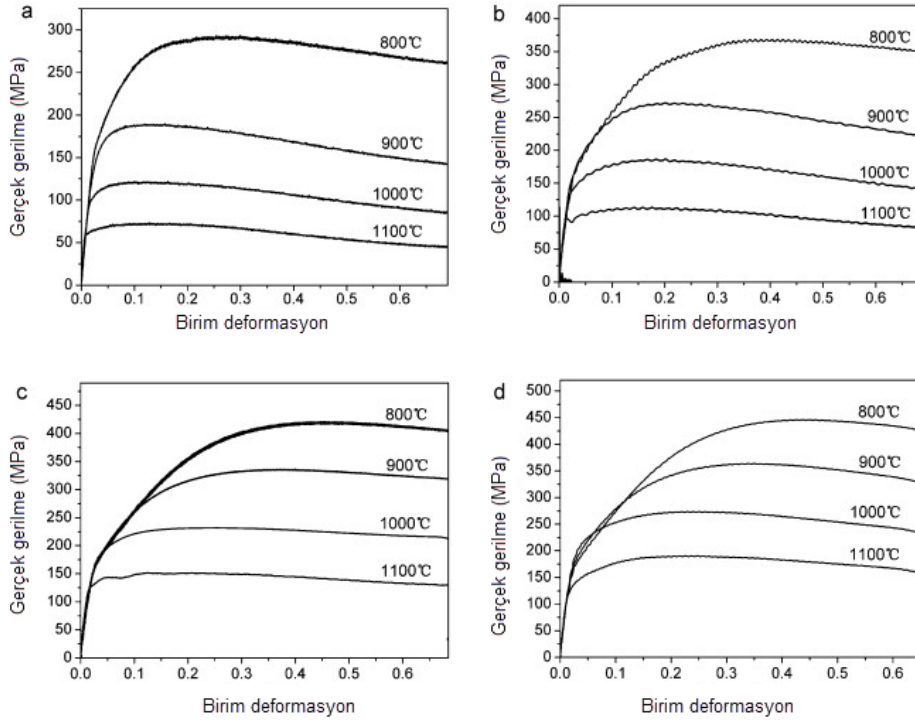


Şekil 4. (a) 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğinin farklı sıcaklıklardaki gerilme birim deformasyon eğrisi (Kori et al. , 2020), (b) 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğinde deformasyon hızının etkisi (Kundu et al. , 2020).

Ferritik-Martenzitik bir çelikte (9Cr-1.7W-0.1C) farklı sıcaklıkların çekme davranışına etkisi incelenen bir çalışmada (Mao et al. , 2018), sıcaklık artışı ile akma ve çekme mukavemetinin düştüğü, sünekliliğin ise 600 °C hariç düştüğü gösterilmiştir (Şekil 5). Ara sıcaklıklarda sünekliliğin azalmasının nedeni olarak çözünen atomlar ve kafes sınırları ile etkileşim mekanizması altında dislokasyon dağılımının değişmesinin ana neden olduğu söylenmiştir. Sıcaklık ve deformasyon hızının, dinamik gerilim yaşlanma olayının çekme deformasyonu davranışı üzerindeki etkileşim yoğunluğunu, kafes sınırlarındaki dislokasyon birikimini değiştirerek etkilediğini vurgulamışlardır.

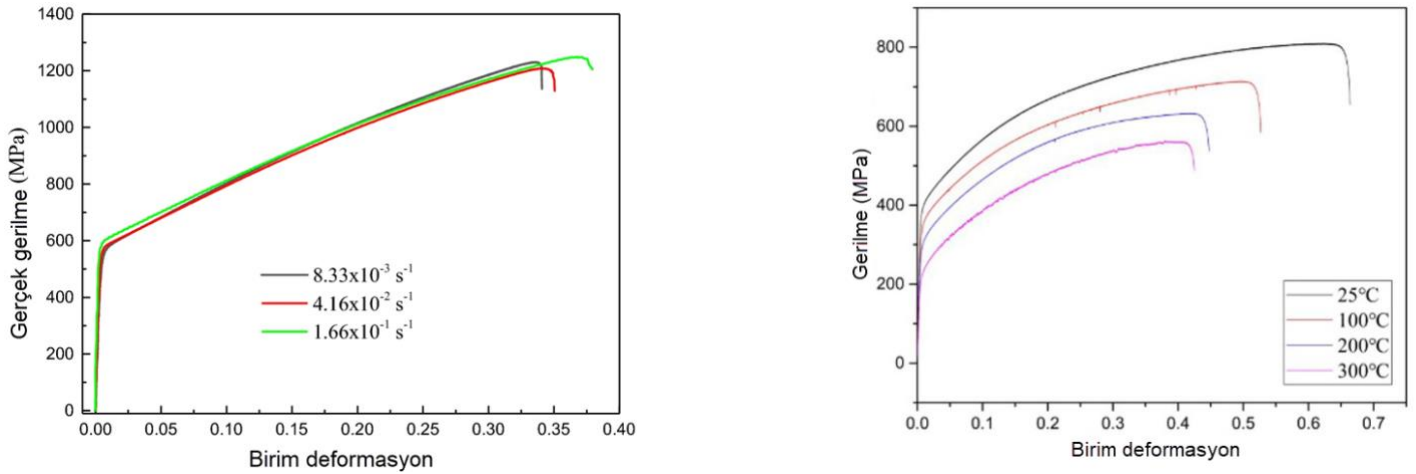


Li ve arkadaşları (Li et al. , 2011), TWIP çeliğinde sıcaklık (800- 1100 °C) ve deformasyon hızının (0,05- 5 s⁻¹) etkilerini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, sıcaklık artışının mukavemeti önemli ölçüde düşürdüğünü, deformasyon hızındaki artışın ise az miktarda mukavemet artışı sağladığı gösterilmiştir (Şekil 7). Sıcaklık artışının dinamik yeniden kristalleşmeyi önemli miktarda etkilediğini ifade etmişlerdir.



Şekil 7. Fe-25Mn-3Si-3Al (TWIP) çeliğinde sıcaklık ve deformasyon hızının etkisi, (a) 0,01 s⁻¹, (b) 0,1 s⁻¹, (c) 1 s⁻¹, (d) 5 s⁻¹ (Li et al. , 2011).

Kılıç ve arkadaşları (Kilic&Ozturk, 2017; Kilic et al. , 2018), farklı deformasyon hızlarında TWIP900 çeliğini çekme testine tabi tutmuşlardır. Deformasyon hızının TWIP900 çeliğinde çok fazla etkisi olmadığını göstermişlerdir (Şekil 6.a). Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan akma eğri fonksiyonlarının TWIP çeliğinde özel olarak seçilmesi gerektiğini göstermişlerdir. Xue ve arkadaşları (Haitao et al. , 2020), TWIP (0.21C; 25Mn; 0.9Si; 1.8Al) çeliğinde sıcaklığın etkilerini incelemişlerdir. Diğer malzemelerin aksine, sıcaklığın artmasıyla akma mukavemeti ve sünekliliğin beraber düştüğünü göstermişlerdir (Şekil 6.b). TWIP çeliğinin deformasyondan önce ve sonra tek fazlı östenit yapısını koruduğunu, deformasyon ikizlerinin artan sıcaklıkla beraber azaldığını, artan sıcaklık nedeniyle istiflenme hata enerjisinin yükselerek ikizlenmeyi engellediği ve dislokasyon kaymasının başlıca deformasyon mekanizması haline geldiğini vurgulamışlardır.



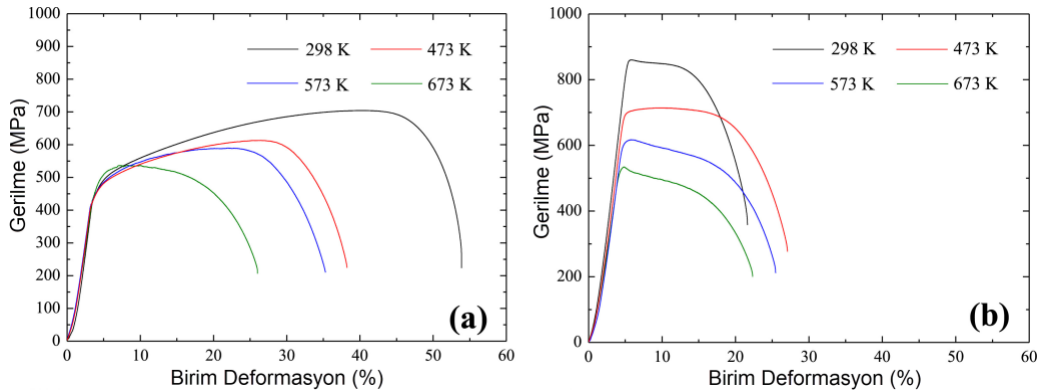
Şekil 6. (a) TWIP900 çeliğinde deformasyon hızının etkisi (Kilic et al. , 2018), (b) TWIP çeliğinde sıcaklığın etkisi (Haitao et al. , 2020).

Çeliklerde, malzemenin iç yapısına bağlı olarak deformasyon hızı ve sıcaklığın etkisi oldukça değişken olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığında deformasyon hızının etkisi olmazken, deformasyon sıcaklığının artışı ile etkisi de artmaktadır. Sıcaklık artışı mukavemeti düşürürken, yaklaşık 300 °C sıcaklığına kadar sünekliği azaltıcı etki göstermektedir. Bunun nedenin çözünen atomlar ve kafes sınırlarıyla etkileşimden dolayı dislokasyon yoğunluğunun değişmesi olduğu söylenmektedir. Deformasyon hızının artmasının da akma mukavemeti üzerinde çok fazla etkili olmadığı görülmüştür.

3. Titanyum Alaşımlarında Etkiler

Titanyum alaşımları, iç yapılarına bağlı olarak sıcak şekillendirme işlemlerinde farklı deformasyon mekanizmalarına sahip olabilmektedirler. Bu nedenle titanyum alaşımları için sıcaklık aralıkları önem arz etmektedir. Literatürde yer alan farklı titanyum alaşımlarında, sıcaklık ve deformasyon hızlarının etkileri araştırılmıştır.

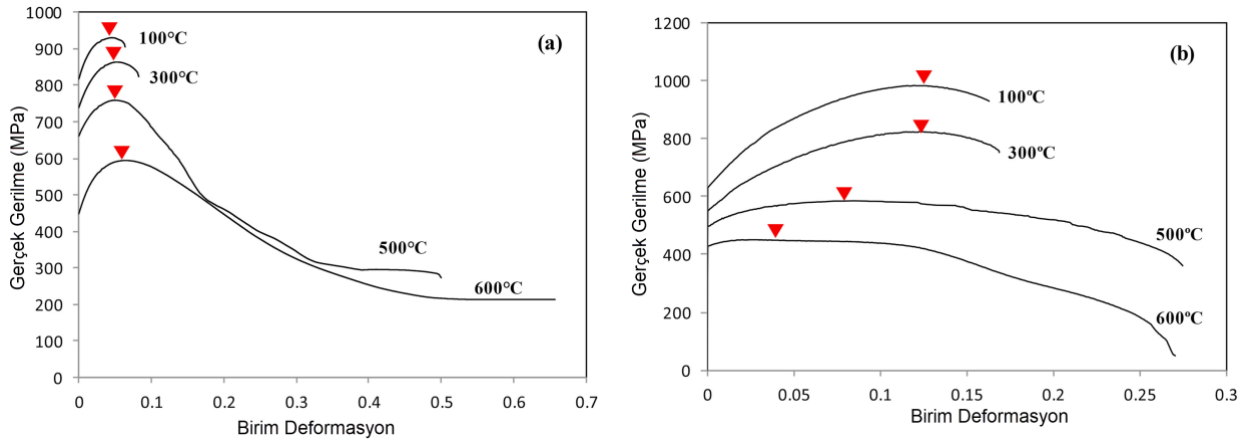
İki farklı titanyum alaşımında (Ti-15Mo ve Ti-15Mo-1Fe) deformasyon sıcaklığının etkileri araştırılan bir çalışmada (Yao et al. , 2019), 298 K (25 °C) ile 673 K (400 °C) sıcaklıkları arasında incelemeler yapılmıştır. Çekme deneyi hızı olarak 0,5 mm/dak hızı kullanılmıştır. Ti-15Mo alaşımında ikizlenme etkisi, Ti-15Mo-1Fe alaşımında ise, kayma dislokasyonu ile deformasyon meydana geldiği belirtilmiştir. Akma dayanımı, Ti-15Mo da nispeten sabit kalırken, Ti-15Mo-1Fe alaşımında ise sıcaklığın artmasıyla beraber akma dayanımının düştüğü görülmüştür (Şekil 8). İyapıdaki ω çökeltisinin β fazını etkilemesiyle, ikizlenme mekanizması ile kayma dislokasyonunun plastik deformasyona etkisinin arttığı; bununda Ti-15Mo alaşımında termal yumuşama etkisinin önüne geçtiği ifade edilmiştir. Bu etkinin bir sonucu olarak da birim deformasyon miktarının artması olarak görmekteyiz. Sıcaklığın, oluşan deformasyon türleri üzerinde de etkili olduğu söylenmiştir.



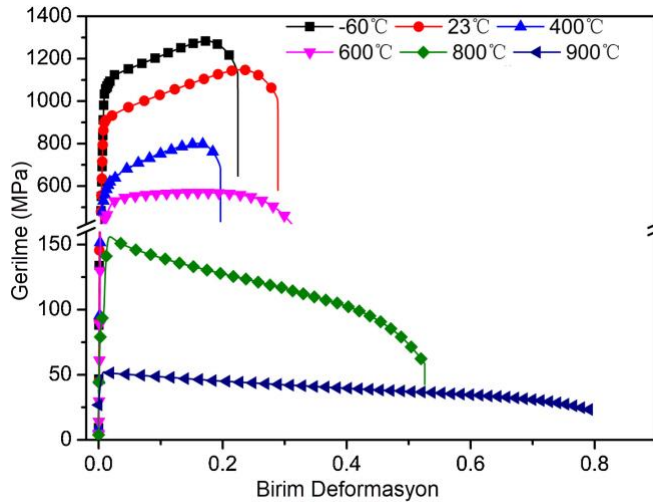
Şekil 8. (a) Ti-15Mo, (b) Ti-15Mo-1Fe alaşımları çekme deneyi sonuçları (Yao et al. , 2019).

Zang ve arkadaşları (Zang et al. , 2021), Ti-15Mo-2Al alaşımında kriyojenik sıcaklıklarda mekanik özelliklerini incelemiştir. Yüksek saflıkta yarı kararlı β -Ti alaşımı, 77 ve 20 K'da yüksek çekme mukavemeti değerlerine sahip olduğu, 77 K sıcaklığında çekme mukavemetinin yaklaşık iki kat artmasına rağmen hala sünekliğini koruduğunu göstermişlerdir. Bunun nedeni deformasyon sırasında oluşan ikizlerin neden olduğu dinamik Hall-Patch etkisinin, sürekli pekleşme sağlamalarından dolayı olduğu ifade edilmiştir. 20 K sıcaklığında ise, düzensiz plastik akış meydana gelmiş ve çok düşük süneklik meydana gelmiştir. Tırtıklı deformasyonun ise, dislokasyon ve ikizlerin aralıklı aktivasyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir.

Paghandeh ve arkadaşları (Paghandeh et al. , 2021), Ti-6Al-4V alaşımında sıcaklığın etkilerini incelemişlerdir. Bu doğrultuda 100, 300, 500, 600 °C sıcaklıklarında 0,001 s⁻¹ deformasyon hızında çekme ve basma deneyleri yapmışlardır. 100 ve 300 °C sıcaklıklarında basma deneyinde erken kırılma tespit edilmiş, bunun nedeni olarak ise; yetersiz kayma sisteminin kaynaklandığı belirtilmiştir. Bunun aksine bu sıcaklıklardaki çekme işleminde ise pekleşme kapasitesi artıp düzgün uzama miktarında etkili olduğu belirtilmiştir. 500 ve 600 °C ise basmada ve çekmede, akma yumuşaması görülmüştür (Şekil 9). Bunun nedeni ise; dinamik toparlanma, yeniden kristalleşme, yumuşama olduğu ifade edilmiştir. Despax ve arkadaşları da (Despax et al. , 2020), 750 ve 920 °C sıcaklıklarındaki mekanik özelliklerin değişimini incelemişlerdir. 750 °C sıcaklıkta yüksek deformasyon hızlarındaki deformasyon özelliği esas olarak iç yapıdaki α fazının dislokasyon aktivitesi etkinken, düşük deformasyon hızlarında α ve β fazlarının dislokasyon aktivitesi etkin olduğu söylenmektedir. Bunun aksine, 920 °C sıcaklıkta tane sınırı kaymasının etkin mekanizma olduğu ifade edilmiştir. Jiang ve arkadaşları (Jiang et al. , 2020), artan sıcaklık ve azalan deformasyon hızı ile birlikte gerilmenin düştüğü gösterilmiştir. Bunun nedeni ise; yüksek sıcaklığın ve düşük deformasyon hızının, kayma dislokasyonu ve enerji birikimi için yeterli kuvvet ve zaman sağlaması olarak ifade etmişlerdir.



Şekil 9. Ti-6Al-4V alaşımında farklı sıcaklıkların gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi. (a) Basma, (b) Çekme (Paghandeh et al. , 2021).



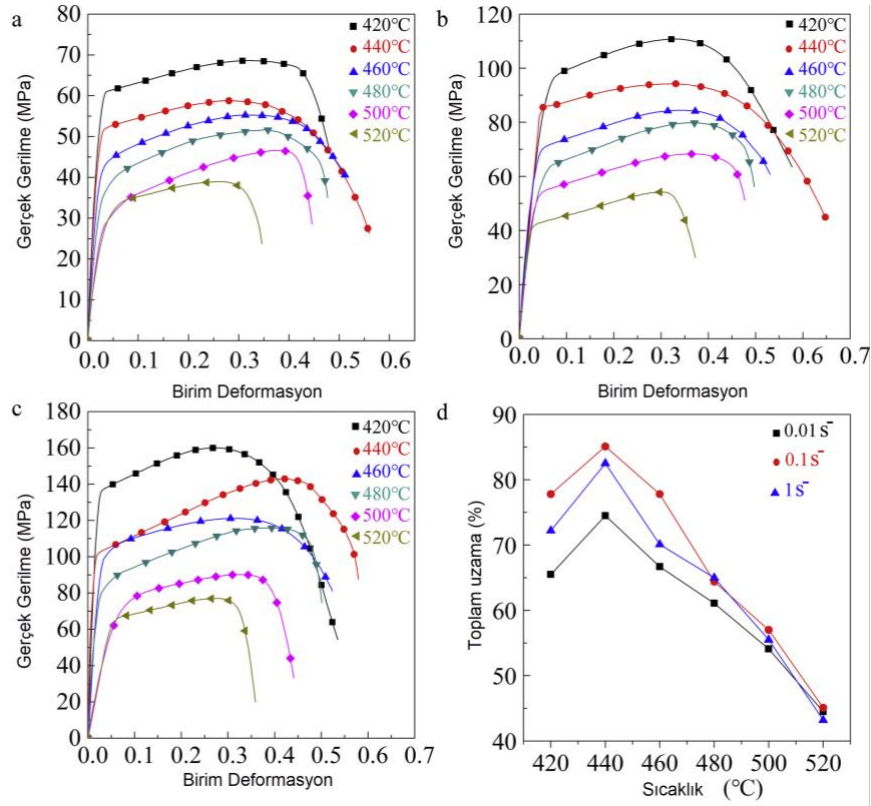
Şekil 10. Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alaşımında sıcaklığın gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Hao et al. , 2020).

Hao ve arkadaşları (Hao et al. , 2020), Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alaşımında -60 °C ile 900 °C sıcaklıkları arasındaki 0,001 s⁻¹ deformasyon hızında mekanik özelliklerin değişimini incelemişlerdir. Uygulanan koşullara göre deformasyon tiplerinin değiştiğini vurgulamışlardır. Düşük sıcaklıklarda (400 °C'ye kadar) kayma dislokasyonu mekanizması yoğunlukta olmakla birlikte ikizlenme mekanizması da tespit edilmiştir. 600 °C den sonra dinamik yeniden kristalleşme ve küreselleşmeyle yumuşamaya neden olduğu tespit edilmiştir. Şekil 10.'da görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla mukavemet düşerken süneklik artmıştır.

Titanyum alaşımları düşük süneklik yüksek mukavemet gösteren malzemelerdir. Bu alaşımlarda sıcaklığın etkisiyle iç yapıda meydana gelen deformasyon mekanizmalarının farklı olmasından dolayı sıcaklık önemli bir faktördür. Sıcaklık artışı malzemenin mukavemetini düşürürken, sünekliğini artırmaktadır. 300 °C sıcaklığı altında yetersiz kayma sisteminin dolayı şekillendirme işlemlerinde problemler ortaya çıkmaktadır. Azalan deformasyon hızı ile mukavemetin düştüğü görülmüştür.

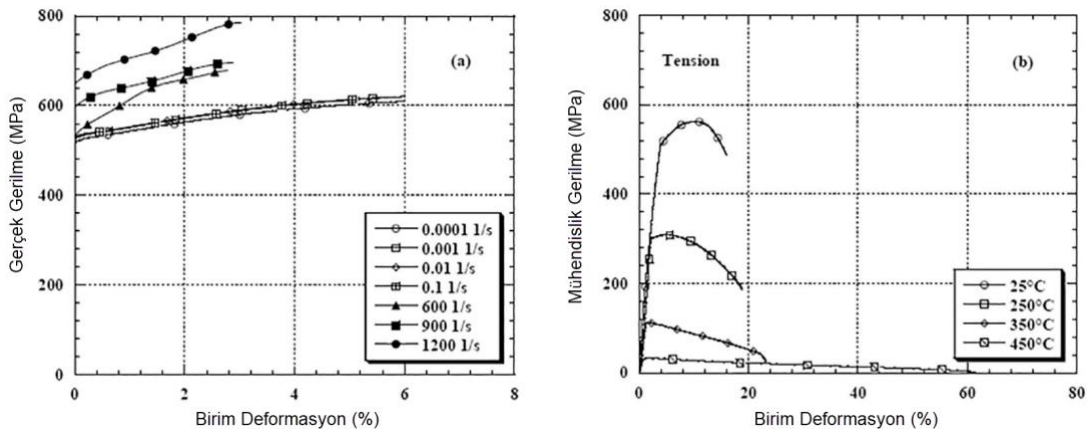
4. Alüminyum Alaşımında Etkiler

Havacılık endüstrisi için yeni olarak geliştirilen AA2195 alüminyum lityum alaşımında farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarında yapılan araştırmada (Li et al. , 2020), azalan sıcaklıkla ve artan deformasyon hızıyla beraber çekme mukavemetinin arttığı gösterilmiştir (Şekil 11). Oluşan deformasyon miktarında deformasyon hızından daha çok deformasyon sıcaklığına bağlı olduğu vurgulanmıştır. Toplam deformasyon miktarları ile kaba tanelerin doğrusal bir ilişkisi olduğu söylenmektedir. Sıcaklığın artmasıyla, dinamik yeniden kristalleşme seviyesi artmaktadır. Buda sünekliliğin iyileşmesine katkıda bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda özellikle de düşük deformasyon hızlarında, hızlı büyüme oranlarından dolayı yeniden kristalize edilmiş taneler daha büyük hale gelmektedir. Bundan dolayı da toplam uzamada bir düşüş meydana geldiği belirtilmiştir. Deformasyon hızının artması ise, akma mukavemetinde oldukça etkili olmuştur.



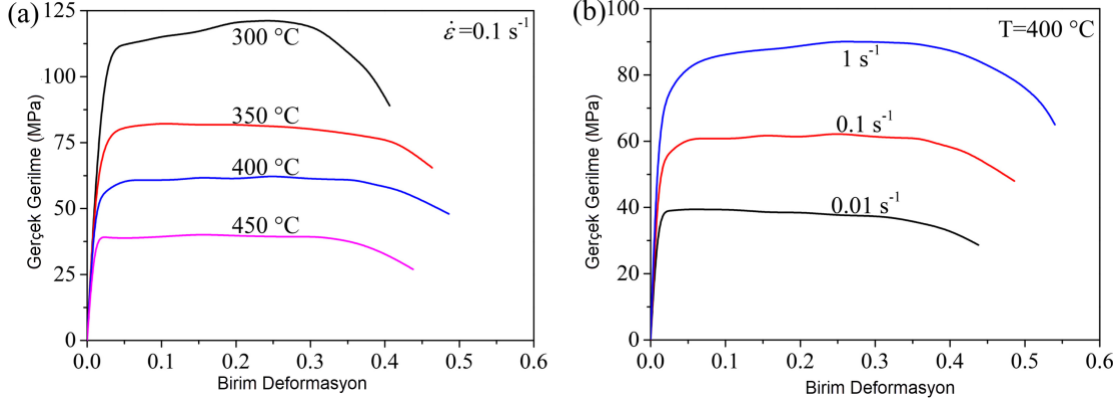
Şekil 11. AA2195 alüminyum lityum alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi, (a) 0,01 s⁻¹, (b) 0,1 s⁻¹, (c) 1 s⁻¹ (Li et al. , 2020).

AA2014-T6 alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızında çekme, basma ve eğilme özellikleri incelenmiştir (Prakash et al. , 2020). Yüksek sıcaklıkların (250, 350 ve 450 °C) süneklilik ve pekleşme üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir. Şekil 12.' De görüleceği üzere deformasyon hızının artması mukavemeti artırırken, sıcaklık artışı mukavemeti düşürmektedir.



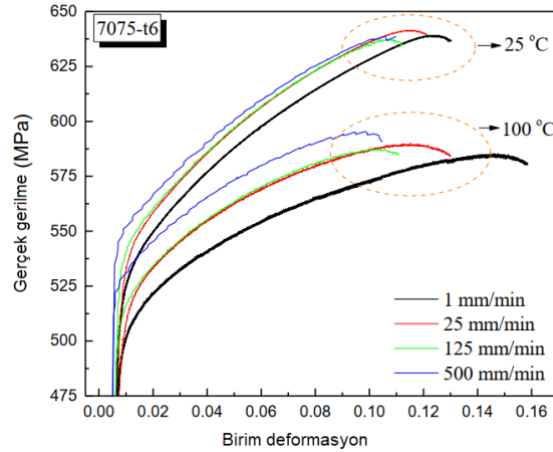
Şekil 12. AA2014-T6 alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Prakash et al. , 2020).

Xu ve arkadaşları (Xu et al. , 2021), AA7075-F alaşımında 673 K (400 °C) sıcaklığında farklı deformasyon hızlarında tek eksenli çekme deneyi yapmışlardır. Geleneksel tek eksenli çekme testi ve verilerin işlenmesinde, deney numunesinin homojen bölgesi (düzgün deforme olmuş kısmı) kullanılır. Xu ve arkadaşları da, bu durumun yüksek sıcaklıklarda hatalı olabileceğini düşünmüşler ve 2B-3B görüntü işleme yöntemlerini kullanarak bu durumu modellemişlerdir. Aynı zamanda, ABAQUS programında bu modeli uygulamışlar ve yüksek sıcaklıklarda uygulanabilir olduğunu vurgulamışlardır. 7075 alüminyum alaşımında farklı sıcaklık ve deformasyon hızının mekanik özelliklere etkisi incelenen diğer çalışmalarda da (Puchi-Cabrera et al. , 2011; Lu et al. , 2018; Xiao et al. , 2018; Kılıc, 2019), sıcaklık artışıyla birlikte akma mukavemeti düşerken, sünekliğin arttığı görülmüştür (Şekil 13-14). Deformasyon hızının artışıyla akma ve çekme mukavemeti artarken, sünekliğin pek fazla değişmediği gösterilmiştir. Buradaki temel etken deformasyon miktarının, sıcaklık ve deformasyon hızının tane büyüklüğünü etkilemesi olarak açıklanmıştır.

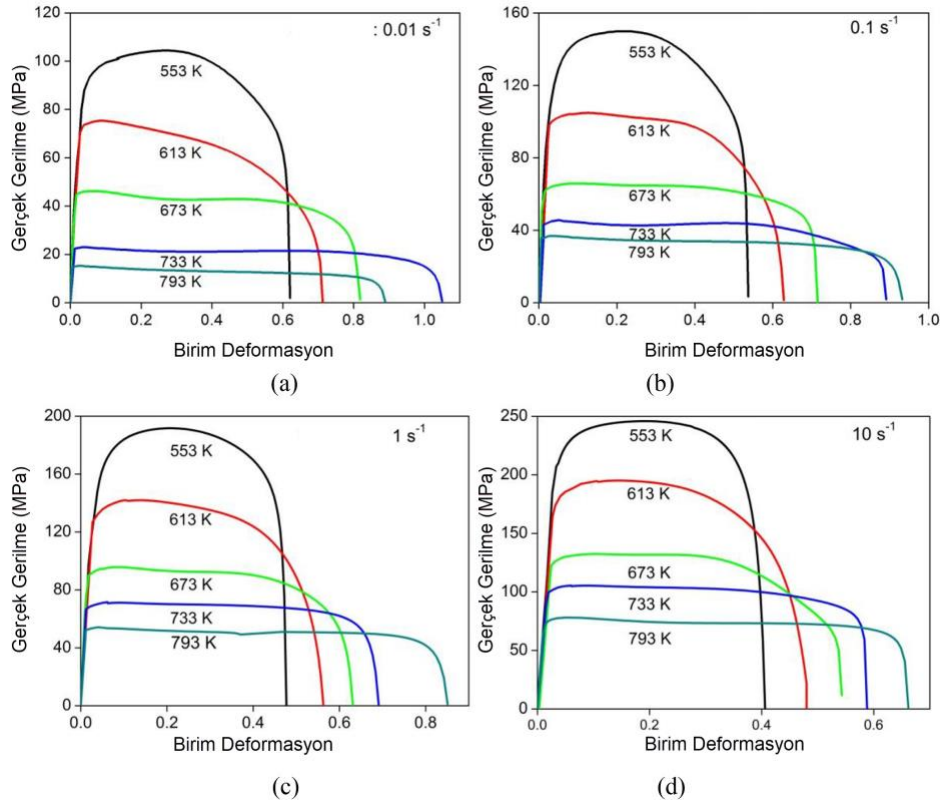


Şekil 13. AA7075 alaşımında farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Xiao et al. , 2018).

Dai ve arkadaşları (Dai et al. , 2019), 5083 alüminyum alaşımında sıcaklığın ve deformasyon hızının mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Sıcaklığın artırılması veya deformasyon hızının azaltılması akma mukavemetini düşürürken, sünekliği artırdığı göstermişlerdir (Şekil 15). Test edilen koşullarda dislokasyon hareketi ve sünek kırılmanın birincil deformasyon mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Sıcaklık ve deformasyon hızının artmasının dinamik yeniden kristalleşmeyi geliştirdiğini göstermişlerdir. 793 K sıcaklığında, tane sınırı kuvvetinin zayıflaması sonucu malzeme sünekliğinin azaldığı vurgulanmıştır.

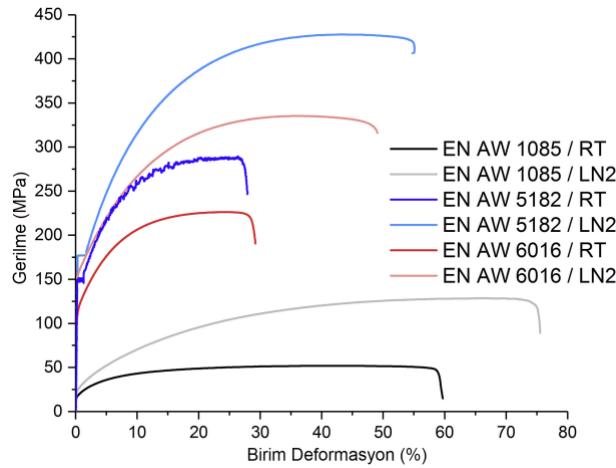


Şekil 14. 7075-t6 alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkisi (Kılıc, 2019).



Şekil 15. 5083 alüminyum alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Dai et al. , 2019).

Su ve Young (Su&Young, 2019), AA6063 ve AA6061 alaşımlarının farklı sıcaklıklardaki (24- 600 °C) çekme davranışını incelemiştir. Sıcaklığın artışıyla akma mukavemetinin önemli oranda düştüğü gösterilmiştir. Prakash ve arkadaşları (Vilamosa et al. , 2016), AA6082 alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkilerini incelemiştir. Sıcaklık arttıkça akma mukavemetinin düştüğü, fakat sünekliğin arttığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda deformasyon hızının akma mukavemetine etkisi yok denecek kadar az iken, yüksek sıcaklıklarda etkili olduğu gösterilmiştir. Gruber ve arkadaşları (Gruber et al. , 2020), alüminyum alaşımlarında düşük sıcaklıklarda oluşan deformasyon mekanizmalarını incelemiştir. 1085, 5182 ve 6016 alüminyum alaşımları üzerinde 296 K ile 77 K sıcaklıklarında çekme deneyleri yapılmış ve iç yapı incelemesi yapmışlardır. Oda sıcaklığı ile soğuk deneyler karşılaştırıldığında akma ve çekme mukavemetleri artarken, sünekliğin de arttığı görülmüştür (Şekil 16). Düşük sıcaklıklardaki oluşan yüksek pekleşme hızlarının etkisinden kaynaklanmaktadır. Dinamik toparlanmanın dislokasyon yoğunluğunu artırdığını vurgulamışlardır. Kriyojenik sıcaklıkta daha yüksek oranda vida dislokasyonu oluştuğunu göstermişlerdir.

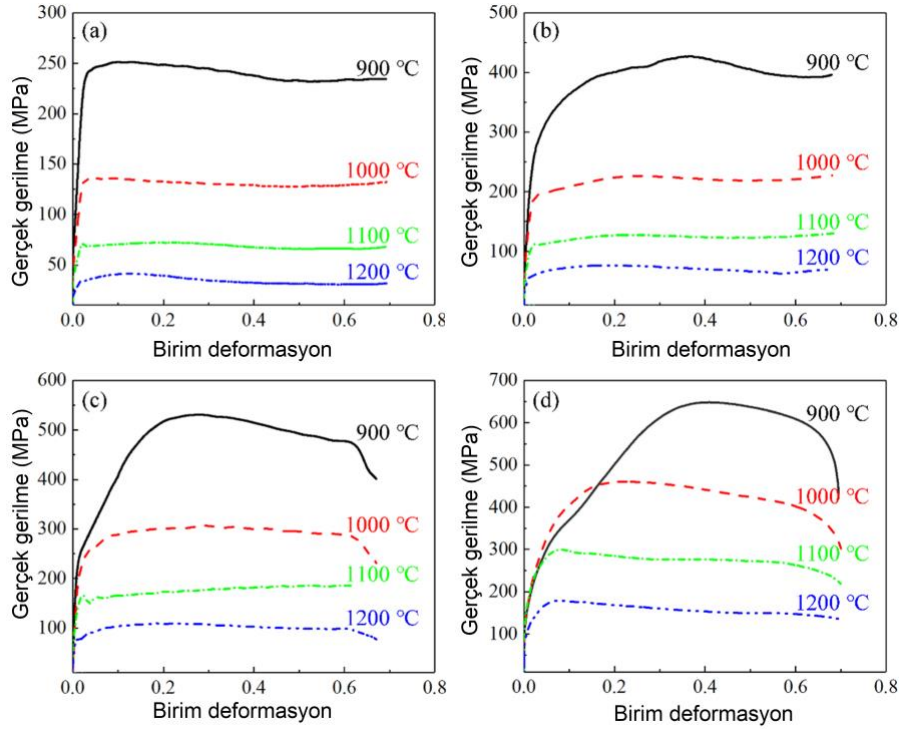


Şekil 16. Farklı seri alüminyum alaşımlarında sıcaklığın gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Gruber et al. , 2020).

Alüminyum alaşımlarında deformasyon hızından ziyade deformasyon sıcaklığının daha etkin bir parametre olduğu söylenmektedir. Deformasyon hızının artmasıyla mukavemet artarken, sıcaklık artışı mukavemeti düşürmektedir. Düşük sıcaklıklarda deformasyon hızının etkisi azken, yüksek sıcaklıklarda artmaktadır.

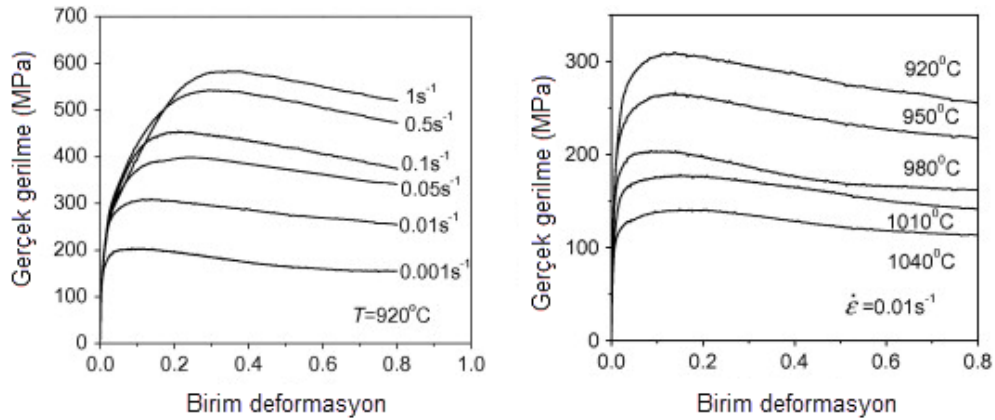
5. Nikel Alaşımalarında Etkiler

Pahalı bir malzeme olan nikel alaşımları, çok zor koşullar altında dahi paslanmazlık ve mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. Süperalaşım veya yüksek performanslı alaşım olarak da bilinmektedir. Nikel alaşımlarına baktığımızda Inconel 625-718-783-600, Incoloy 825-800-925, Nickel 200-201 gibi farklı kalitede alternatifler sunulmaktadır. Tang ve arkadaşları (Tang et al. , 2021), Inconel783 süperalaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkisini araştırmışlardır. Sıcaklık artışıyla mukavemet düşerken, sünekliğin değişmediği görülmüştür. Deformasyon hızının artmasıyla beraber mukavemetin arttığı ve yine sünekliğin değişmemiştir (Şekil 17). Yeniden kristalleşme hızının ve tane boyutunun genellikle sıcaklıkla arttığını, ancak deformasyon hızıyla azaldığını ifade etmişlerdir.



Şekil 17. Inconel783 süperalaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkisi (a) $0,01 \text{ s}^{-1}$, (b) $0,1 \text{ s}^{-1}$, (c) 1 s^{-1} , (d) 10 s^{-1} (Tang et al. , 2021).

Lin ve arkadaşları (Lin et al. , 2015), Inconel718 süperalaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkilerini incelemişlerdir. Deformasyon hızının artmasıyla mukavemet artarken, deformasyon sıcaklığının artmasıyla mukavemetin düştüğü görülmektedir (Şekil 18). Yapılan bu işlemlerin süneklik üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Akma eğrisi için yeni bir model geliştirmişler ve modelin doğruluk derecesinin yüksek olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 18. Inconel718 süperalaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkisi (Lin et al. , 2015).

Zhang ve arkadaşları (Zhang et al. , 2020), Cr-Mn-Si-Ni alaşımı ultra yüksek mukavemetli çeliğin farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarında çekme davranışını incelemişlerdir. Pekleşmenin 4 aşamada gerçekleştiğini vurgulamışlardır. Oda sıcaklığında artan deformasyon hızının, dislokasyon yoğunluğunu artırdığını ve dolayısıyla akma mukavemetini artırdığını söylemişlerdir. Artan

deformasyon hızının, dislokasyon engeli ve pekleşmeyi kısıtladığından dolayı çekme mukavemetinde düşme meydana geldiğini vurgulamışlardır. Oda sıcaklığında yapılan çekme deneyinde dislokasyonlar sırasıyla düşük açılı tane sınırları ve yüksek açılı tane sınırlarına dönüşmüşlerdir. Sıcaklık artışının mukavemeti düşürdüğü ve deformasyon hızındaki artışın mukavemeti artırdığı göstermişlerdir.

Nikel alaşımlarında sıcaklık artışı mukavemeti düşürücü etkiye sahipken süneklik üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür. Deformasyon hızının artması da mukavemeti artırıcı bir etkiye sahiptir.

6. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, imalat sanayinde özellikle şekillendirme işlemlerinde önemli faktörlerden olan deformasyon sıcaklığı ve deformasyon hızının etkileri incelenmiştir. Literatürde yer alan çok sayıda çalışmalardan çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımlarında son yıllardaki yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde deformasyon hızı ve sıcaklığının çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımlarının mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu malzemelerde deformasyon hızı ve sıcaklığının dislokasyon yoğunluğu, tane boyutu, iç yapı, yeniden kristalleşme, deformasyon mekanizması gibi parametreleri etkilemesinden dolayı, mekanik özelliklerde değişimler meydana gelmektedir. Çelik malzemede iç yapıyı oluşturan fazların sıcaklıktan etkilenmelerinden dolayı deformasyon hızından ziyade sıcaklık daha etkili bir parametre olmaktadır. Özellikle sünekliğin önemli olduğu durumlarda yaklaşık 300 °C ve üzerinde işlemler yapılması gerekmektedir. Sıcaklık artışı, deformasyon hızının etkisini artırmaktadır. İncelenen malzemeler içerisinde TWIP çeliğinin deformasyon hızından çok az etkilendiği görülmüştür. Titanyum alaşımlarında sıcaklık, deformasyon mekanizmasını etkilediğinden dolayı önemli bir parametredir. Yaklaşık olarak 300 °C altındaki sıcaklıklarda şekillendirme problemleri ortaya çıkarken, yüksek sıcaklıklarda süneklik artışından dolayı daha az problem ile karşılaşmaktadır. Alüminyum alaşımlarında, sıcaklığın tane yapısına etkisinden dolayı mukavemet üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Düşük sıcaklıklarda deformasyon hızının etkisi azken, yüksek sıcaklıklarda etkisi artmaktadır. Diğer malzemelerin aksine, Nikel alaşımlarında sıcaklık ve deformasyon hızının değişmesinin süneklik üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Genel olarak sıcaklığın, deformasyon hızından daha etkili bir parametre olduğu görülmektedir. Özellikle sünekliği düşük olup yüksek mukavemete sahip malzemelerde şekillendirilmesi zor parçaların sıcaklığın artırılmasıyla daha kolay şekillendirilebilecekleri bilinen bir gerçektir. Yapılan soğuk deneylerde ise pekleşmenin etkisiyle mukavemet artışları olduğu ve malzemelerdeki kritik sıcaklıkların önemli olduğu ve bunların iyi belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

Referanslar

- Alsagabi, S., Alqahtani, M. & Alajlan, A., (2018). The Elevated Temperature Deformation of G115 Steel and the Associated Deformation Mechanism. *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering (IJAMSE)*, 7 (1): 1-7. <https://doi.org/10.14810/ijamse.2018.7101>
- Altan, T. & Long, J., (2015). Forming Aluminum Alloys at Elevated Temperatures, Part 1, How Process Details Change for Warm and Hot Forming. *Stamping Journal*, 1 (1): 1-4.
- Attar, H. R., Li, N. & Foster, A., (2021). A New Design Guideline Development Strategy for Aluminium Alloy Corners Formed through Cold and Hot Stamping Processes. *Materials Design*, 207 (1): 109856. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109856>
- Borek, W., Lis, M., Gołombek, K., Sakiewicz, P. & Piotrowski, K., (2019). Effect of Plastic Deformation Rate at Room Temperature on Structure and Mechanical Properties of High-Mn Austenitic Mn-Al-Si 25-3-3 Type Steel. *Archives of Materials Science and Engineering*, 96 (1): 22-31.
- Dai, Q., Deng, Y., Jiang, H., Tang, J. & Chen, J., (2019). Hot Tensile Deformation Behaviors and a Phenomenological Aa5083 Aluminum Alloy Fracture Damage Model. *Materials Science and Engineering: A*, 766 (1): 138325. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138325>
- Despax, L., Vidal, V., Delagnes, D., Dehmas, M., Matsumoto, H. & Velay, V., (2020). Influence of Strain Rate and Temperature on the Deformation Mechanisms of a Fine-Grained Ti-6al-4v Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 790 (1): 139718. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139718>
- Gruber, B., Weißensteiner, I., Kremmer, T., Grabner, F., Falkinger, G., Schökel, A., Spieckermann, F., Schäublin, R., Uggowitz, P. J. & Pogatscher, S., (2020). Mechanism of Low Temperature Deformation in Aluminium Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 795 (1): 139935. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139935>
- Haitao, X., Dengke, W. & Kaihong, S., (2020). Effect of Deformation Temperature on Mechanical Properties and Microstructure of Twip Steel for Expansion Tube. *High Temperature Materials and Processes*, 39 (1): 63-73. doi:10.1515/htmp-2020-0020

- Hao, F., Xiao, J., Feng, Y., Wang, Y., Ju, J., Du, Y., Wang, K., Xue, L. n., Nie, Z. & Tan, C., (2020). Tensile Deformation Behavior of a near-A Titanium Alloy Ti-6al-2Zr-1mo-1v under a Wide Temperature Range. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (3): 2818-2831. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.016>
- Jiang, Y.-Q., Lin, Y. C., Jiang, X.-Y., He, D.-G., Zhang, X.-Y. & Kotkunde, N., (2020). Hot Tensile Properties, Microstructure Evolution and Fracture Mechanisms of Ti-6al-4v Alloy with Initial Coarse Equiaxed Phases. *Materials Characterization*, 163 (1): 110272. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110272>
- Kilic, S., (2019). Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Different Temperature and Deformation Speeds on Mechanical Properties and Springback Behaviour in Al-Zn-Mg-Cu Alloy. *Mechanics*, 25 (5): 406-412.
- Kilic, S., Kacar, I. & Ozturk, F., (2019). New Trend in Aerospace Industry: Al-Li Based Alloys. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1): 275-296.
- Kilic, S. & Ozturk, F., (2017). Evaluation of Formability under Different Deformation Modes for Twip900 Steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 139 (3): 031001. 10.1115/1.4035621
- Kilic, S., Ozturk, F. & Picu, C. R., (2018). Investigation of the Performance of Flow Models for Twip Steel. *Journal of materials engineering and performance*, 27 (8): 4364-4371. 10.1007/s11665-018-3504-6
- Koga, N., Nameki, T., Umezawa, O., Tschan, V. & Weiss, K.-P., (2021). Tensile Properties and Deformation Behavior of Ferrite and Austenite Duplex Stainless Steel at Cryogenic Temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 801 (1): 140442. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140442>
- Kori, P., Vadavadagi, B. H. & Khatirkar, R. K., (2020). Hot Deformation Characteristics of Ass-304 Austenitic Stainless Steel by Tensile Tests. *Materials Today: Proceedings*, 28 (1): 1895-1898. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.303>
- Kundu, A., Field, D. P. & Chandra Chakraborti, P., (2020). Effect of Strain and Strain Rate on the Development of Deformation Heterogeneity During Tensile Deformation of a Solution Annealed 304 Ln Austenitic Stainless Steel: An Ebsd Study. *Materials Science and Engineering: A*, 773 (1): 138854. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138854>
- Li, D., Feng, Y., Yin, Z., Shangguan, F., Wang, K., Liu, Q. & Hu, F., (2011). Prediction of Hot Deformation Behaviour of Fe-25mn-3si-3al Twip Steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528 (28): 8084-8089. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.073>
- Li, Q., Ning, J., Chen, L., Hu, J. & Liu, Y., (2020). The Mechanical Response and Microstructural Evolution of 2195 Al-Li Alloy During Hot Tensile Deformation. *Journal of Alloys and Compounds*, 848 (1): 156515. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156515>
- Lin, Y. C., Li, K.-K., Li, H.-B., Chen, J., Chen, X.-M. & Wen, D.-X., (2015). New Constitutive Model for High-Temperature Deformation Behavior of Inconel 718 Superalloy. *Materials Design*, 74 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.001>
- Liu, Y., Zhu, B., Wang, Y., Li, S. & Zhang, Y., (2020). Fast Solution Heat Treatment of High Strength Aluminum Alloy Sheets in Radiant Heating Furnace During Hot Stamping. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3 (1): 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.11.004>
- Lu, J., Song, Y., Hua, L., Zheng, K. & Dai, D., (2018). Thermal Deformation Behavior and Processing Maps of 7075 Aluminum Alloy Sheet Based on Isothermal Uniaxial Tensile Tests. *Journal of Alloys and Compounds*, 767 (1): 856-869. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.173>
- Mao, C., Liu, C., Yu, L., Li, H. & Liu, Y., (2018). Mechanical Properties and Tensile Deformation Behavior of a Reduced Activated Ferritic-Martensitic (Rafm) Steel at Elevated Temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 725 (1): 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.119>
- Ozturk, F., Toros, S. & Kilic, S., (2009). Tensile and Spring-Back Behavior of Dp600 Advanced High Strength Steel at Warm Temperatures. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 16 (6): 41-46. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60025-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60025-8)
- Ozturk, F., Toros, S. & Kilic, S. , (2010). Tensile Deformation Behavior of Aa5083-H111 at Cold and Warm Temperatures. *International Journal of Materials Research*, 101 (9): 1172-1179.
- Paghandeh, M., Zarei-Hanzaki, A., Abedi, H. R., Vahidshad, Y., Kawałko, J., Dietrich, D. & lampke, T., (2021). Compressive/Tensile Deformation Behavior and the Correlated Microstructure Evolution of Ti-6al-4v Titanium Alloy at Warm Temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 10 (1): 1291-1300. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.110>

- Pandre, S., Takalkar, P., Kotkunde, N., Kumar Singh, S. & Ul Haq, A., (2019). Influence of Temperatures and Strain Rates on Tensile Deformation Behaviour of Dp 590 Steel. *Materials Today: Proceedings*, 18 (1): 2603-2610. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.119>
- Prakash, G., Singh, N. K. & Gupta, N. K., (2020). Deformation Behaviours of Al2014-T6 at Different Strain Rates and Temperatures. *Structures*, 26 (1): 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.068>
- Puchi-Cabrera, E. S., Staia, M. H., Ochoa-Pérez, E., La Barbera-Sosa, J. G., Villalobos-Gutierrez, C. & Brenlla-Caires, A., (2011). Flow Stress and Ductility of Aa7075-T6 Aluminum Alloy at Low Deformation Temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 528 (3): 895-905. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.002>
- Shimadzu, 2021. Thermostatic Chambe. <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm-system/tce-n300a/index.html> (Erişim Tarihi: 01.07.2021).
- Simonetto, E., Bertolini, R., Ghiotti, A. & Bruschi, S., (2020). Mechanical and Microstructural Behaviour of Aa7075 Aluminium Alloy for Sub-Zero Temperature Sheet Stamping Process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 187 105919. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105919>
- Su, M.-N. & Young, B., (2019). Material Properties of Normal and High Strength Aluminium Alloys at Elevated Temperatures. *Thin-Walled Structures*, 137 (1): 463-471. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.012>
- Tang, K., Zhang, Z., Tian, J., Wu, Y. & Jiang, F., (2021). Hot Deformation Behavior and Microstructural Evolution of Supersaturated Inconel 783 Superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 860 (1): 158541. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158541>
- Toros, S., Kilic, S. & Ozturk, F., (2011). The Effects of Material Thickness and Deformation Speed on Springback Behavior of Dp600 Steel. *Advanced Materials Research*, 264-265 (1): 636-645. [10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.636](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.636)
- Vilamosa, V., Clausen, A. H., Børvik, T., Holmedal, B. & Hopperstad, O. S., (2016). A Physically-Based Constitutive Model Applied to Aa6082 Aluminium Alloy at Large Strains, High Strain Rates and Elevated Temperatures. *Materials Design*, 103 (1): 391-405. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.047>
- Xiao, W., Wang, B., Wu, Y. & Yang, X., (2018). Constitutive Modeling of Flow Behavior and Microstructure Evolution of Aa7075 in Hot Tensile Deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 712 (1): 704-713. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.028>
- Xu, Z., Peng, L., Jain, M. K., Anderson, D. & Carsley, J., (2021). Local and Global Tensile Deformation Behavior of Aa7075 Sheet Material at 673ok and Different Strain Rates. *International Journal of Mechanical Sciences*, 195 (1): 106241. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106241>
- Yao, K., Min, X., Emura, S. & Tsuchiya, K., (2019). Coupling Effect of Deformation Mode and Temperature on Tensile Properties in Twip Type Ti-Mo Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 766 (1): 138363. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138363>
- Zang, M. C., Niu, H. Z., Zhang, H. R., Tan, H. & Zhang, D. L., (2021). Cryogenic Tensile Properties and Deformation Behavior of a Superhigh Strength Metastable Beta Titanium Alloy Ti-15mo-2al. *Materials Science and Engineering: A*, 817 (1): 141344. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141344>
- Zhang, J.-Y., Jiang, P., Zhu, Z.-l., Chen, Q., Zhou, J. & Meng, Y., (2020). Tensile Properties and Strain Hardening Mechanism of Cr-Mn-Si-Ni Alloyed Ultra-Strength Steel at Different Temperatures and Strain Rates. *Journal of Alloys and Compounds*, 842 (1): 155856. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155856>
- Zwick, 2021. Isı Kabinleri. <https://www.zwickroell.com/tr/aksesuar/sicaklik-ve-klima/isi-kabinleri/> (Erişim Tarihi: 01.07.2021).