

ELEKTRİK AKIMI İLE ISITMA YÖNTEMİNİN SICAK SAC ŞEKİLLENDİRME UYGULAMALARINDA KULLANIMININ İNCELENMESİ

Remzi Ecmel ECE*, **Fahrettin ÖZTÜRK****

*reece@tai.com.tr TUSAŞ, Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., 06980-ANKARA

**fahrettin@nigde.edu.tr Niğde Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 51245-Niğde

ÖZET

Son yıllarda, hafif malzemelerin şekillendirilmesinde karşılaşılan problemlerin çözümü için sıcak şekillendirme konusuna ilgi artmıştır. Fakat sıcak şekillendirme altyapısının kurulumu yüksek yatırım maliyeti gerektirmekte ve sınırlı sayıda üretim için ekonomik olmamaktadır. Bu yüzden yeni yöntemlerin araştırılmasına hız verilmiştir. Elektrik akımı ile ısıtma yöntemi de bu yeni yöntemlerden birisidir. Sac malzemeden elektrik akımı geçmesi ile oluşan ısıdan faydalanarak sac malzemeler ısıtılmakta ve bu sayede daha kolay şekillendirilebilmektedir. Akımın fazla olması ile çok kısa zamanda çok yüksek sıcaklıklar elde edilebilmektedir. Literatürde bu yöntemin yüksek mukavemetli çeliklerin şekillendirilmesinde kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, elektrik akımı ile ısıtma yönteminin çalışma prensibi, kullanım avantajları ve sınırlamaları incelenmiştir. Ayrıca Ti-6Al-4V sac malzeme için yöntemin uygulanabilirliği test edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Titanyum, Sıcak Şekillendirme, Elektrik Akımı ile Isıtma

ABSTRACT

In recent years, there has been an interest on hot formability in order to overcome the formability problems of lightweight materials. However, the establishment of hot forming infrastructure requires high investment and is not economical for limited parts production. For these reasons, investigations of new methods for hot forming have gradually increased. Electric resistance heating method is one of the new methods. In this method, the sheet is heated by electric current which flow throughout the sheet and the sheet is easily formed. A very high temperature is achieved based on the amount of electric current. It is seen in literature that this new method is successfully used for high strength steels. In the present study, the principal, advantages, and disadvantages of the electric resistance heating method is investigated. Besides the applicability of this new method for Ti-6Al-4V sheet material is tested.

Keywords: Titanium, Hot Forming, Electrical Resistance Heating

1. GİRİŞ

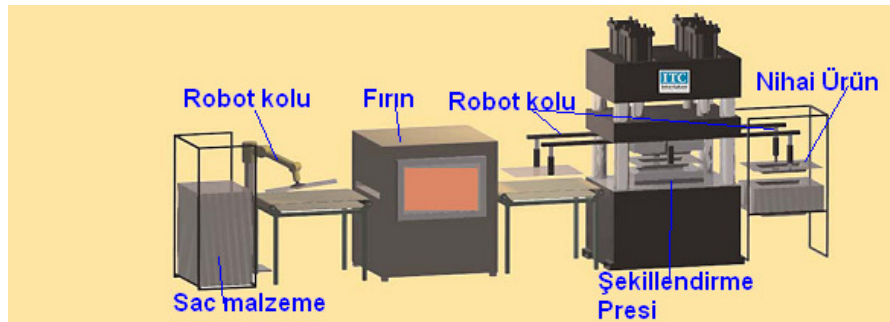
Sac metal malzemeler otomotiv, havacılık, uzay ve beyaz eşya gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. İnce levha formundaki malzemelerin pres ile kalıplarda şekillendirilmesi ile bir çok ürün elde edilmektedir. Havacılık sektöründe titanyum ve alüminyum sac levhalar mukavemet/ağırlık oranlarından dolayı stratejik öneme sahipken; otomotiv sektöründe çelik, alüminyum ve magnezyum alaşımları ön plana çıkmaktadır [1-6]. Sac metallerin şekillendirilmesinde çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Sac levhalarda malzeme özelliklerine bağlı olarak, şekil verme öncesinde sacın üretim şeklinden başlayıp (soğuk-sıcak haddeleme-ekstrüzyon, ...), şekil verme esnasında oluşan yırtılma, kırışma, buruşma; şekillendirildikten sonra ise çarpılma ve geri esneme gibi problemler ile karşılaşmaktadır. Bu problemlerin çözülmesinde en etkili fakat zor ve pahalı olan çözüm yöntemi ise sıcak şekillendirme yöntemidir. Konvansiyonel yöntemler ile oda sıcaklığında şekillendirilen parçalarda oluşan problemler proses parametrelerinin (yağlama, baskı plakası kuvveti, gerdirme, v.s.) değiştirilmesiyle çözülemediği zaman, başvurulması gereken yöntem genellikle sıcak şekillendirme yöntemidir. Sıcak şekillendirmede, soğuk şekillendirmede oluşan kalıntı gerilmeler oluşmamakta ve soğuyan parça olması gereken geometrisini korumaktadır. Ayrıca soğuk şekillendirmede elde edilemeyen karmaşık geometriler sıcak şekillendirme yöntemleri ile elde edilebilmektedir ki bu da daha farklı geometrilerle sahip parça tasarımlarına imkan sağlamaktadır. Literatürde yayımlanmış bir çok çalışma bu bulguları desteklemektedir [7-14].

Bu çalışmada, genel olarak sıcak şekillendirme ve elektrik akımı ile ısıtma yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca Ti-6Al-4V sac malzemesi elektrik akımı ile ısıtılarak mekanik özelliklerindeki değişimler değerlendirilmiştir.

2. SICAK ŞEKİLLENDİRMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Üretim şekline yönelik olarak farklı sıcak şekillendirme yöntemleri mevcuttur. Yönteme bağlı olarak sac uzun ve kısa sürede ısıtılabilir. Genellikle soğuk olarak şekillendirilmesinde sıkıntı yaşanan ve malzeme iç yapısının değiştirilmesinin istendiği durumlarda sıcak şekillendirme yöntemlerine başvurulmaktadır.

Sanayide en çok kullanılan sıcak şekillendirme yöntemi, malzemelerin fırın içerisinde ısıtılması yöntemidir. Bu fırınlar fosil yakıt türevlerinin yakılmasıyla veya fırın içine döşenen ısıtıcı rezistansların elektrik enerjisi kullanılarak ısıtılmasıyla gerçekleşmektedir. Bu sistemlerde ısıtıcı sistem malzemeye doğrudan temas etmemektedir.



Şekil 1. Sıcak şekillendirme prosesi (Interlaken Technology Corp.)

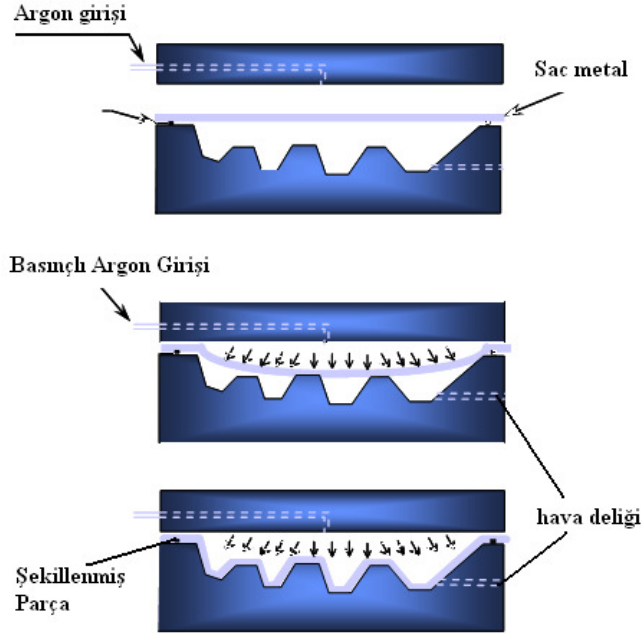
Şekil 1'de Interlaken firmasının uyguladığı bir sıcak şekillendirme prosesi görülmektedir. Fırında ısıtma sistemlerindeki en büyük dezavantaj, sacı ısıtma, prese taşıma ve şekil verme gibi birbirinden bağımsız aşamalardan oluşmasıdır. Bu aşamaların her biri ayrı bir maliyet, zaman kaybı, ekstra işçilik, otomasyon sistemi gereksinimi gibi giderler ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte sistem hacimsel olarak da üretim alanında çok yer işgal etmektedir. Bu tür sistemlerde sıcaklık kontrolünün sağlanamaması, çabuk soğuyan malzemeler için sıkıntılar oluşturmaktadır. Fırından kalıba transfer esnasında yüksek soğuma hızına sahip bazı malzemeler istenen sıcaklıklarda şekillendirilememektedir. Genellikle bu yöntem ile otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılan çelik alaşımları soğuma hızı nispeten düşük olduğu için şekillendirilebilmektedir. Buna karşılık havacılık sektöründe yoğun kullanılan bir malzeme olan titanyum alaşımlarının soğuma hızlarının yüksek olmasından dolayı, bu sistemler ile şekillendirilmelerinde ısı kontrolü konusunda sıkıntılar yaşanmaktadır.

Başka bir yöntem olan indüksiyon ile ısıtma sisteminde de, ısıtma esnasında malzemeye doğrudan temas olmamaktadır. Literatürde bazı çalışmalarda sacı ısıtmak için kullanıldığı görülmüştür [15-16]. Fakat sac şekillendirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmamaktadır. Sistem sanayide çoğunlukla haddeleme ve ekstrüzyon gibi işlemlerde kullanılmaktadır. Ayrıca çubukların yüzey sertleştirme ısı işlemleri de indüksiyon bobinleri kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 2'de indüksiyon ısıtma sistemine bir örnek gösterilmiştir.

Süperplastik şekillendirme olarak adlandırılan bir diğer yöntem de sac metallerin şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde sac malzemeler, kapalı bir sistemde yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp koruyucu gaz atmosfer ortamında belirli basınçta argon gazının sisteme verilmesi ile şekillendirilmektedirler (Şekil 3). Bu yöntem ile oda koşullarında şekillendirilemeyen birçok parça şekillendirilebilmektedir. Malzemeler yüksek sıcaklıklarda şekillendirildiği için süneklikleri oldukça fazladır. Süperplastik şekillendirme işleminde erkek kalıbın olmayışı bir avantaj olsa da şekillendirme işleminin çok yavaş olması sebebiyle yüksek üretim miktarlarında maliyet ve iş gücü kaybı açısından değerlendirildiğinde uygun bir yöntem değildir. Süperplastik şekillendirme sonrası malzemelerde geri esneme gibi problemler ile karşılaşılmamaktadır.



Şekil 2. İndüksiyon ısıtma yöntemi [17]



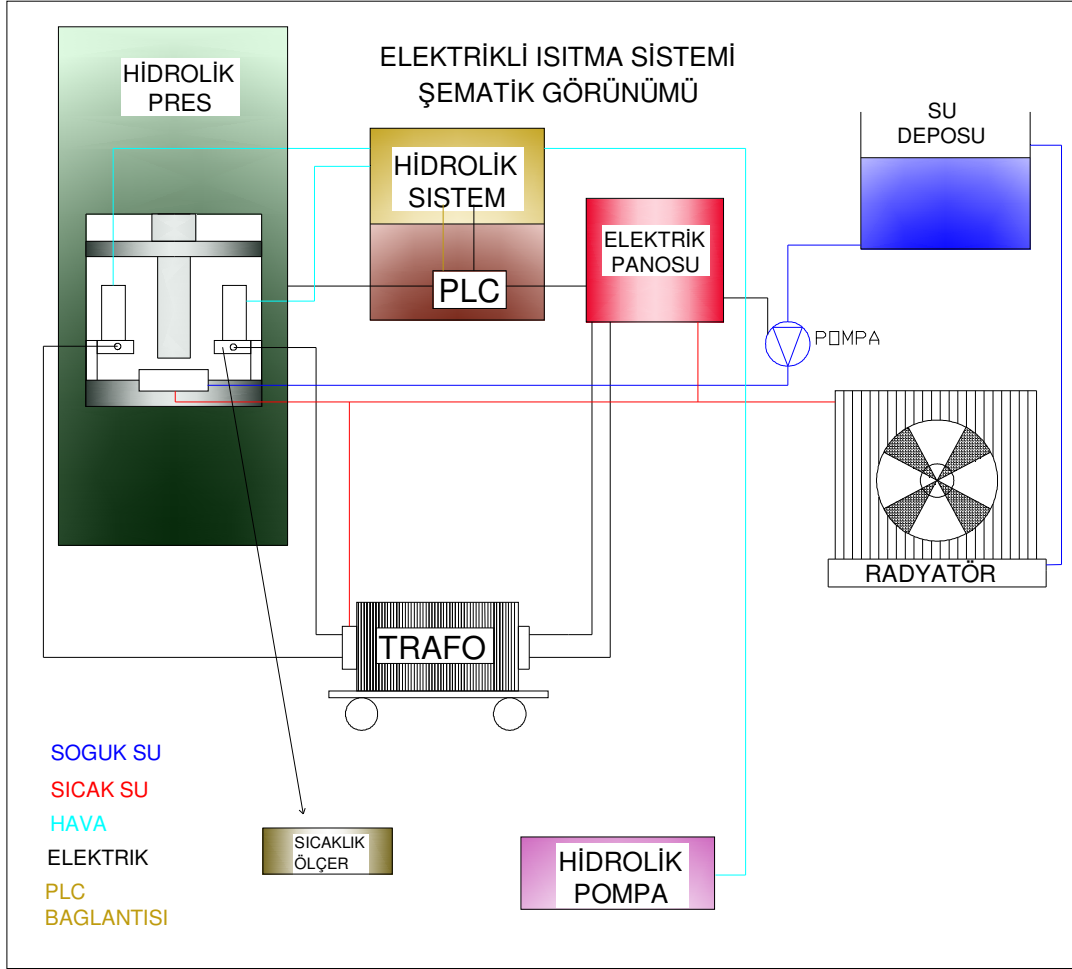
Şekil 3. Süperplastik şekillendirme şeması [18]

2.1 Elektrik Akımı ile Isıtma Yönteminin Tanıtılması

Elektrik akımı ile ısıtma yöntemi (resistance heating), sac malzeme üzerinden elektrik akımının geçirilmesi ile birlikte malzemenin elektrik öz direncine bağlı olarak kısa sürede ısınmasını sağlamaktır. Bu yöntem ile ısıtma yapmak için yüksek elektrik akımı gerekmektedir. Bu akımı sağlamak için kaynak makinelerinde kullanılan sisteme benzer şekilde fakat daha güçlü olan bir trafo kullanılmaktadır. Trafo sayesinde düşük voltajlı fakat yüksek akıma sahip elektrik enerjisi sisteme verildiğinde, sac üzerinde herhangi bir direnç bağlantısı olmadığı için yol olarak sac malzeme üzerinden geçmeye çalışır. Böylece yüksek enerjisinden dolayı da sac malzeme ısınır. Bu işlem çok kısa sürede gerçekleşmektedir. Isıtma işlemi için sistemin sac malzemeyi tutan kısmına çene denmektedir. Çeneler yüksek elektrik iletkenliğinden dolayı bakır malzemelerden yapılmaktadır. Bu çenelerin iki amacı vardır: Birinci amacı, sac malzemeyi iki ucundan sisteme bağlamak, ikinci amacı da sacın elektrik akımıyla ısınmasını sağlamaktır. Bu çeneler bir hidrolik/pnömatik sistem ile kontrol edilerek sacı sıkıştırmaktadır. Sac malzemelerin çeneler arasında düz durması ve temas etmesi çok önemlidir. Sistemde kullanılan hidrolik/pnömatik sistemler, trafodan çıkan akım değeri ve sistemin sıcaklık kontrolü PLC kontrol ünitesi ile hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

Şekil 4'te elektrik akımı ile ısıtma sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Sistem bir hidrolik pres etrafında toplanmaktadır. Şekillendirilecek parçanın geometrisine göre presin uygulayacağı kuvvet ayarlanmaktadır. Malzemenin soğuma hızına göre şekillendirme hızı da çok büyük öneme sahiptir. Bu nedenle pres zımbasının şekillendirme hızı örneğin titanyum malzemeler için en az 15-20 mm/s olmalıdır.

Şekil 4'teki sistemde bir soğutma çevrimi görülmektedir. Bu yöntemle seri imalat yapılması ya da sistemin aşırı ısınması durumuna göre emniyet olması ve ısınmalardan kaynaklanan hataların da giderilmesi için alt kalıba ve trafoya soğutma işlemi uygulanabilmektedir. Ayrıca sistem hava ile de soğutulabilmektedir. Bütün sistemin elektrik bağlantısı bir elektrik panosundan kontrol edilmektedir.



Şekil 4. Elektrik akımı ile ısıtma yönteminin şematik gösterimi [19]

Sıcaklık ve akımın ayarlanmasında güç kaynağı ile entegre olarak çalışan bir kontrol ünitesi bulunmaktadır. Bu sistem, sacın elektrik akımıyla ısıtılması ve yüksek sıcaklığın hassas olarak elde edilmesi için kullanılmaktadır. Yüksek akım ve düşük voltajda sacın ısıtılmasını kontrol eder. Akım ayarı yapılarak farklı sıcaklıklar elde edilmektedir.

Sıcaklığın hassas olarak ölçülmesinde ise pyrometer (yüksek sıcaklık derecelerini ölçme cihazı) kullanılabilir. Sistemin sürekli sıcaklığı ölçülerek bu değer PLC'ye veri olarak girer ve sistem bu veriyi referans alarak çalışır. Sıcaklığın ölçümü için termokupullar ya da infrared termometreler de kullanılabilir. Sac malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımının homojen olup olmadığının ölçülmesi büyük öneme sahiptir.

Literatürde elektrikli ısıtma yöntemi kullanılarak 1970'li yılların başında yapılmış bazı çalışmalara rastlanmıştır. Bu yöntemin teknik avantajları/dezavantajları, sınırlamaları ve ekonomik yönleri ile ilgili olarak o dönemin şartlarına göre sıcak haddeleme yapılan sistemlerde bu sistemin kullanılmasıyla enerji maliyetinin daha fazla olduğu vurgulanmıştır [20-22]. Fakat günümüzde harcanan enerjinin yapılan iş zamanına göre maliyeti değerlendirildiğinde, bu sistemin enerjiden kayıptan çok kazanç sağladığı düşünülmektedir.

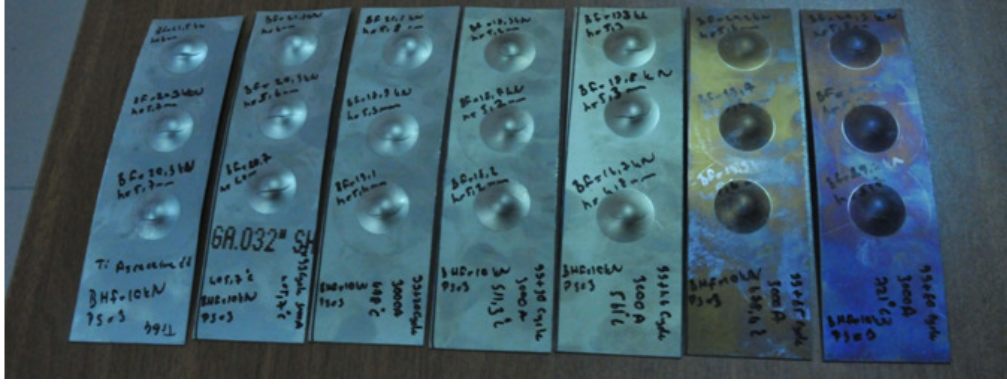
Literatürde elektrik akımı ile ısıtma sistemi kullanılarak sac şekillendirme parametrelerini inceleyen çok fazla çalışma bulunmamaktadır. S. Maki ve arkadaşları [23] yüksek mukavemetli bir çift fazlı çelik türü olan SPFC980Y için akım, ısıtma sıcaklığı, preste iki kalıp arasında malzemeyi soğutarak sertleştirme ve sıcak presleme parametrelerinin şekillendirmeye etkilerini mikroskobik incelemeler, sertlik ölçümleri, çekme testleri ve U kanalda bükme testleri gerçekleştirilerek incelemiştir. Presto sertleştirme ve U kalıpta şekillendirme sonucu malzemelerin çekme mukavemeti ve sertlik değerleri artmış, özellikle 740 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda geri esneme ortadan kalkmıştır. Bir başka çalışmada ise yine aynı malzemenin ılık ve sıcak şartlarda preste zımbalama işleminin kesme yüzeylerindeki yüzey kalitesini incelemiştir [24]. Kesme kalıbı ile sac malzemenin 10 mm çapında dairesel bir boşluk elde etmiştir. Kesme yüzeyindeki kırılma yüzeyi ile kayma yüzeyi arasındaki oranı incelemiştir. Malzemeyi baskı plakası ile sıkıştırıp bakır pimler vasıtasıyla sadece kesme yüzeyine yüksek miktarda akım gelecek şekilde deney düzeneği kurmuşlardır. Sonuçta artan sıcaklıkla beraber kesme işlemi sırasında süneklik arttığı için kırılma gecikmekte böylece kesme kenarındaki parlak yüzey derinliği artmaktadır. K. Mori ve arkadaşları [25] farklı yüksek mukavemetli çelik türlerinin elektrik akımı ile ısıtma yöntemi kullanarak şekillendirilebilirliğini içeren bir başka çalışma daha gerçekleştirmişlerdir. Sıcak şekillendirmenin etkisiyle geri esnemenin azaldığı, şekillendirilebilir kabiliyetinin arttığı kaydedilmiştir. Ayrıca ısıtmadan kaynaklanan oksidasyonun da ısınma/soğuma kısa sürede gerçekleştiği için diğer ısıtma yöntemlerine göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre elektrik akımı ile ısıtma sisteminin (electric resistance heating) sanayide gerçek parça şekillendirme işlemlerinde kullanımının uygun olduğu vurgulanmıştır.

Literatürde elektrikli ısıtma sistemi, sıcak sac şekillendirme dışında, daha önce de bahsedildiği üzere, haddeleme ve ekstrüzyon ve dövme gibi proseslerde de kullanılabilir. Literatürde konuyla ilgili bazı çalışmalar tespit edilmiştir [26, 27].

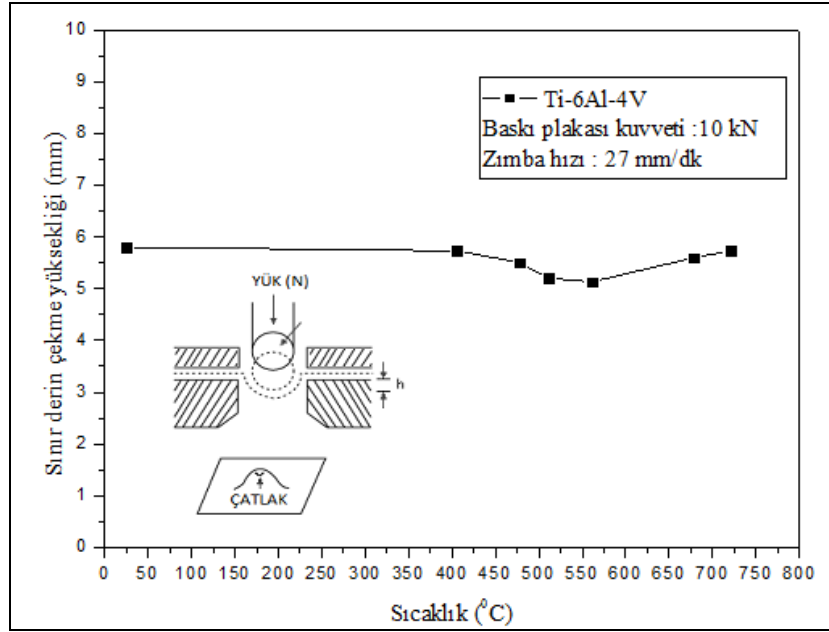
2.2 Örnek Uygulama

Bu çalışmada elektrik akımı ile ısıtma sisteminin incelenmesine ek olarak havacılık sanayinde en çok kullanılan Ti-6Al-4V malzemesinin elektrik akımı ile ısıtılması sonucu mekanik özelliklerinin değişimine ilişkin deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada belirli sıcaklıklara ısıtılan sacların tamamen soğuduktan sonraki sertlik değerlerinin ve Erichsen kap yüksekliği değerinin ne kadar değiştiği incelenmiştir. Erichsen deneyinden malzemelerin LDH (Limited Drawing Height; Sınır derin çekme yüksekliği) değerleri tespit edilmektedir. 0,81 mm kalınlığındaki sac malzemeler önce sabit 3000 Amper akımda farklı sıcaklıklara ısıtılmıştır. Elde edilen sıcaklık değerlerinin kalibrasyonu yapıldığında ± 15 °C hassasiyetinde ölçülebildiği tespit edilmiştir. Erichsen deneyleri üçer kez tekrarlanmış, değerlerin ortalaması alınmıştır. Erichsen deneyinde baskı plakası kuvveti 10 kN, şekillendirme hızı ise sabit 27 mm/dak seçilmiştir (Şekil 5). Sertlik değerleri ise Vickers sertliği cinsinden 30 kgf sabit yük ile ölçülmüş, deneyler dörder kez tekrarlanmıştır.

Şekil 6'dan görüldüğü üzere genel olarak malzemelerin sınır yüksekliklerinin değişiminde önemli değişiklikler olmadığı görülmüştür. Ortalama 5,5 ile 6 mm arasında yüksekliğin değiştiği belirlenmiştir. Bu sonuçlardan malzemelerin süneklik değerlerinin değişiminde de önemli bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Malzemelerde çok çabuk ısınıp soğuma gerçekleştiği için iç yapısal değişiklikler ve atomların birbiri içine difüzyonu için yeterli zamanın olmayışı malzemenin özelliklerini korumasını sağlamıştır.

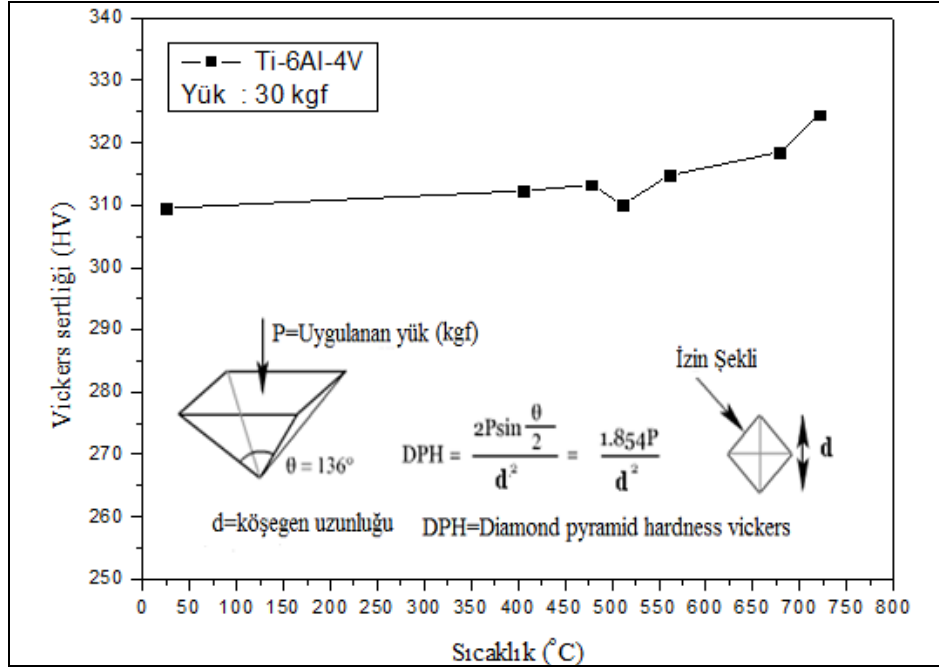


Şekil 5. Erichsen test numuneleri



Şekil 6. LDH'nin sıcaklık ile değişimi

Şekil 7'den sertlik değerlerinin değişimleri incelendiğinde hiç ısıtılmamış malzemeye oranla bir miktar artış gözlemlenmektedir. Fakat Erichsen deneyinden elde edilen sonuçlara göre malzemenin sünekliliği çok değişmediği için sertlikteki bu değişimin de çok önemli olmadığı kanısına varılmıştır.



Şekil 7. Vickers sertlik değerinin sıcaklıkla değişimi

3. DEĞERLENDİRME

Bu araştırma kapsamında sıcak şekillendirmede kullanılan ısıtma yöntemleri ve elektrik akımı ile ısıtma (electric resistance heating) olarak adlandırılan sistemin sac metal malzemelerin şekillendirme işlemlerinde kullanımına ilişkin literatür incelemesi yapılmış ve örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Elektrikli akımı ile ısıtma yöntemi sanayide sac metal şekillendirmede yaygın kullanıma sahip değildir. Yapılan araştırmalar ve ön sonuçlar doğrultusunda sistemin sac şekillendirme işlemlerinde kullanılabileceği belirlenmiştir.
2. Sistemin sac metal şekillendirme dışında, sıcak haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi farklı proseslerde de efektif olarak kullanılabildiği tespit edilmiştir.
3. Sistemin geleneksel ısıtma sistemlerine göre yatırım/kurulum maliyeti oldukça düşüktür. Fırından kalıba parça transferinin olmayışı da ara eleman/robot kolu gibi çevresel ekipman ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.
4. Diğer ısıtma sistemlerinde olduğu gibi bu ısıtma şeklinde de malzeme yüzeyinde korozyon nispeten az da olsa oluşmaktadır. Bu konu ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmelidir.
5. Elektrik akımı ile ısıtılan malzemelerin preste şekillendirildikten sonraki durumlarının mekanik ve metalurjik değişimleri ile ilgili araştırmaların yapılması gerekmektedir.
6. Bu yöntemde malzemelerin çok kısa sürede ısıtılması sıcaklık ölçüm hassasiyetini oldukça etkilemektedir. Bu sistemdeki en önemli parametre olan sıcaklık değişiminin hassas ölçülmesi ile ilgili çalışmaların yapılması zorunludur.
7. Elektrik akımı ile ısıtma sisteminin çelik alaşımlarında olduğu gibi titanyum, alüminyum ve magnezyum gibi otomotiv ve havacılık endüstrileri için önemli olan malzemelerde de kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

4. KAYNAKÇA

- [1] JOSHI V. A., Titanium Alloys: An Atlas of Structure and Fracture Features, CRC Press, Taylor&CRC group, LLC, (2006).
- [2] MOISEYEV N. V., Titanium alloys, Russian Aircraft and Aerospace Applications, Advances in Metallic Alloys, CRC Press, Taylor&CRC group, LLC, (2005).
- [3] The Aluminum Society, **Aluminum Autodesign Review**, , 6, 3, (1998).
- [4] MORDIKE B.L.,EBERT T., Magnesium properties-applications-potential, **Mat Sci. Eng. A**, 302, 37-45, (2001).
- [5] American Society for Testing and Materials-ASM Metal Handbook, **Forming and Forging**, 14, 791-804,9th Edition, (1988).
- [6] America Iron and Steel Institute, An investment in Steel's Future, AISI Market Deveopment 2002-2003, (2003).
- [7] VOLLERTSEN, F., LANGE, K., Enhancement of drawability by local heat treatment, **Annals of the CIRP**, 47/1, 181-184, (1998).
- [8] GROCHE, P., HUBER, R., DOERR, J., SCHMOECKEL, D., Hydromechanical deep-drawing of aluminum alloys at elevated temperatures, **Annals of the CIRP**, 51/1:215-218, (2002).
- [9] SIEGERT, K., JAEGER, S., VULCAN, M., Pneumatic bulging of magnesium AZ31 sheet metals at elevated temperatures, **Annals of the CIRP**, 52/1:241-244, (2003).
- [10] JACOBSON, M., Body Construction Techniques, **Automotive Engineers**, September, 42-52, (1984).
- [11] CORNETTE, D., HOURMAN, T., HUDIN, O., LAURENT, J. P., REYNAERT, A, High-strength steels for automotive safety parts, new sheet steel products and sheet metal stamping, **Society of Automotive Engineers**, (2001).
- [12] GARCIA-ARANDRA, L. CHASTEL, Y. FERNANDEZ-PASCUAL, J. DAL-NEGRO, T., Experiments and simulation of hot stamping of quenchable steels, **7th ICTP Proceedings**, Yokohama, 1135-1140, (2002).
- [13]SCHIESSL, G., POSSEHN, T., HELLER, T., SIKORA, S., 2004, manufacturing a roof frame from ultrahigh-strength steel materials by hot stamping, proceedings, **IDDRG**, Sindelfingen, 158-166, (2004).
- [14] KOLLECK, R., STEINHOEFER, D., FEINDT, J.-A., BRUNEAU,P., HELLER, T., LENZE, F., Manufacturing method for safety and structural body parts for lightweight body design, Proceedings, **IDDRG 2004**, Sindelfingen, 167-173, (2004).

- [15] YANAGIMOTO, J., OYAMADA, K., Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings, **CIRP Annals- Manufacturing Technology**, 49, 1, 209-212, (2000).
- [16] YANAGIMOTO J., OYAMADA K., Mechanism of springback-free bending of high strength steel sheets under warm forming conditions, **CIRP Annals- Manufacturing Technology**, 56, 1, 209-212, (2007).
- [17] http://www.fivesgroup.com/FivesCeles/EN/Expertise/Products/Staticinverters/PublishingImages/induction_principe1.jpg (Eriřim tarihi: 11.05.2010)
- [18] http://triumphfabrications-hotsprings.com/images/SPF_PROCESS.gif (Eriřim tarihi: 11.05.2010)
- [19] KURUMAHMUT, O., 22MnB5 elięinin elektrikli ısıtma ile sıcak şekillendirilmesinin deneysel analizleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2009).
- [20] GERMAIN-BONNE, M., Conduction heating of bars before hot forming, **Metallurgie**, 101, 469, (1969).
- [21] ULLRICH W., Direct resistance heating for economical hot forming, **Werkstatt und Betrieb**, 99, 55, 339, (1969).
- [22] VALANCE D., Productivity through resistance heating, **Metallurgia and Metal Forming**, 369, 1974.
- [23] S., MAKI, A., HAMAMOTO, S., SAITO, K., MORI, Hot stamping and pre quenching of ultrahigh strength steel sheet using resistance heating, **Key Engineering Materials**, 344, 309-316, (2007).
- [24] K., MORI, S., SAITO, S., MAKI, Warm and hot punching of ultra high strength steel sheet, **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 57, 321-324, (2008).
- [25] K., MORI, S., MAKI, Y., TANAKA, Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating, **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 54, 209-212, (2005).
- [26] J., YANAGIMOTO, R., IZUMI, Continuous electric resistance heating—Hot forming system for high-alloy metals with poor workability, **Journal of Materials Processing Technology**, 209, 3060-3068, (2009).
- [27] S., MAKI, Y. HARADA, K. MORI, H. MAKINO, Application of resistance heating technique to mushy state forming of aluminum alloy, **Journal of Materials Processing Technology**, 125-126, 477-482, (2002).