

Gökhan Çelik
Arş. Gör.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Bilgin Kaftanoğlu
Prof. Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Celalettin Karadoğan
Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Celal Onur Alkaş
İmalat Mühendisi

Som Cıvata Somun
San. Ve Tic. A.Ş.
Ankara

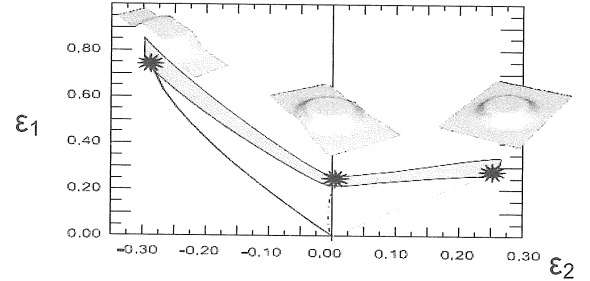
AA2024 Alüminyum Alaşımı için Şekillendirilebilme Sınır Diyagramlarını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi

Sac metal şekillendirme; uzay, havacılık ve otomotiv gibi birçok önemli sanayide kullanılan en önemli teknolojilerden birisidir. Müşteri talepleri, kalite, güvenlik ve pazar rekabeti gibi birçok konuda gereksinimlerin karşılanabilmesi amacıyla; sac metal şekillendirme operasyonları işlem öncesinde iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Bu çalışmada, maliyet ve kalite gibi unsurları da değerlendirerek sac metal operasyonlarının geliştirilmesi için, (SEA) Sonlu Elemanlar Analizi ile mekanik malzeme karakterizasyonunu kombinasyonu kullanılmıştır. Mekanik malzeme karakterizasyonu konusunda, tek yönlü çekme ve hidrolik şişirme testleri yapılmıştır. Deformasyon ölçümleri için, GOM-Aramis optik sistemi kullanılmıştır. Çalışmalar esnasında AA2024 alaşımı seçilmiştir. Şekillendirmeyi etkileyen parametreler olarak, malzeme ilk kalınlığı, yağlayıcılar ve gerinim oranı (zımba hızı) üzerinde çalışılmıştır. SE analizi; deneysel ortamın simule edilmesi ve farklı yağlama koşullarında etki edecek olan sürtünme katsayısının elde edilmesi için kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal simülasyon sonuçlarında iyi bir bağıntı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sac Metal Şekillendirme, Şekillendirilebilirlik Diyagramı, Sonlu Elemanlar Analizi, Optik Ölçüm Sistemleri

GİRİŞ

Günümüz sac metal şekillendirme teknolojisi hala büyük oranda deneme-yanılma prosedürüne dayanmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, operasyonlar sırasında ortaya çıkabilecek hataları mümkün olduğu kadar elimine edebilecek modeller bulmak üzerine odaklanmıştır. Sac metallerin şekillendirilebilirlik sınırlarına karar verilmesi, başarılı bir sac metal şekillendirme operasyonu için anahtar konulardan biridir. İlk şekillendirilebilirlik testleri sadece malzemeleri test etmek için tasarlanmıştır. Kilometre taşı sayılabilecek en önemli çalışma Keeler [1] ve Goodwin [2] tarafından gerçekleştirilen kritik gerinme kavramı üzerine olmuştur. Sınır gerinmelerini kullanarak elde edilen bu diyagram, şekillendirilebilirlik diyagramı (ŞD) olarak adlandırılmış veya daha basit şekliyle Keeler-Goodwin Diyagramı (Şekil 1) olarak bilinmektedir. Birçok araştırmacı son 30 yıl boyunca hem şekillendirilebilirlik diyagramını açıklamak hem de geliştirmek için çalışmıştır. Şekillendirilebilirlik diyagramlarına karar vermek için birçok teorik yöntem geliştirilse de, halen en yaygın olan metotlar deneysel metotlardır.

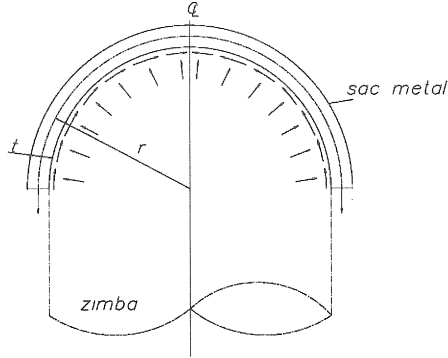


Şekil 1. Goodwin-Keeler şekillendirilebilirlik diyagramı

Şekillendirilebilirlik diyagramlarını sayısal yöntemler yardımıyla elde etmek için birçok araştırmacı çalışmıştır [3-5]. Farklı akma kriterlerinin kullanılmasını da kapsayan birtakım analitik ve sayısal yöntemler de ayrıca yayımlanmıştır. Hill'in akma kriteri [4-6], Karafillis-Boyce'un kriteri [7,8], Gurson'un akma kriteri [9], Golonau-Lebland-Devau(GLD)'un akma [10] kriteri, von Mises [11,12] ve Swift metoduna dayanan analitik modeller tanıtılmıştır ve bunların deneysel sonuçlarla olan iyi bağıntıları gözlemlenmiştir.

Deneysel ŞD belirlenmesinde ise, Nakajima ve Marciniak metotları tüm diğer metotlar arasında harici bir uygunluk göstermektedir. Nakajima

metodunda, yarı küresel zımba kullanılır ve sac metal zımba üzerine giydirilir (Şekil 2). Ölçüm stratejisi genel olarak, gerdirilmiş test numunesine dairesel grid metodu uygulanması ile gerçekleştirilir. Şekillendirilebilme diyagramlarına ihtiyacın artması ile birlikte, ölçüm teknolojileri geliştirilmiş, daha hızlı ve hassas olan optik ölçüm sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Şekillendirilebilme diyagramlarının belirlenmesi amacıyla kullanılmakta olan dijital görüntü işleme teknolojisi üzerinde yoğun olarak birçok araştırmacı çalışmıştır [14-16].



Şekil 2. Yarı küresel zımba ve sac metal

Bu çalışmada, alüminyum alaşımı AA2024'ün oda sıcaklığında farklı test durumlarındaki Şekillendirilebilme diyagramlarının belirlenmesinde yarı küresel bir zımba ile birlikte şekillendirilebilme test düzeneği kullanılmıştır. Alüminyum sacların Şekillendirilebilme diyagramlarını elde etmek ve deformasyonlarını ölçmek amacıyla yüksek hassasiyetli hızlı CCD kameraları kullanılmıştır. Bu çalışma çekme ve hidrolik şişirme test sonuçlarını içermektedir. Sonlu elemanlar çalışması kısmında ise, deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmış ve yaklaşık bir sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Son olarak, tüm bulgular sonuç kısmında özetlenmiştir.

MEKANİK MALZEME KARAKTERİZASYONU

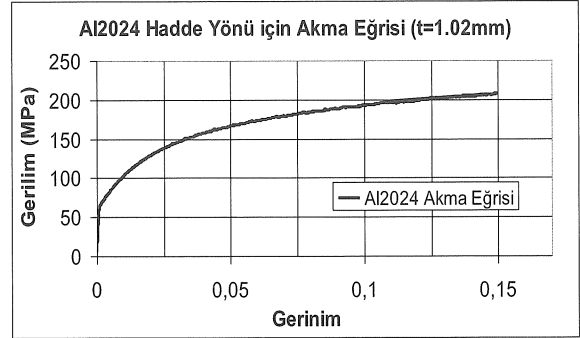
Malzeme karakterizasyonu tüm mühendislik uygulamalarının en önemli aşamasıdır. Ürün kalitesi artırılırken, imalatın maliyetini azaltmak önemli bir zorunluluktur. Malzeme karakterizasyonu, metal şekillendirme işlemlerinin başlangıcında yer alan önemli bir adımdır, fakat operasyonun tüm aşamalarını da etkilemektedir.

Tasarım ve imalatta bilgisayar kullanımı arttıkça, malzeme karakterizasyonu daha büyük önem kazanmaktadır. Başarılı bir tasarım elde etmek için, mühendislerin malzeme davranışını bilmeleri gerekmektedir. Bu çalışmada, mekanik malzeme karakterizasyonu için hem çekme testi hem de HŞT kullanılmıştır.

Çekme testi en yaygın kullanılan ve en kolay uygulanabilen mekanik malzeme karakterizasyonu yöntemidir. Oldukça yaygın ve faydalı olmasına

rağmen, çekme testinde karşılaşılan sınırlamalar yüzünden farklı metotlar geliştirilmiştir. Çekme testleri dâhili uzama ölçerlere sahip olan cihazlara göre daha hassas akma eğrileri elde etmek için, harici uzama ölçerli Zwick/Z300 çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri 250 mm/dk'lık zımba hızı ile oda sıcaklığında yürütülmüştür.

Malzemenin anizotropi özelliklerini tespit etmek için, 3 farklı hadde yönüne göre yapılan testler, her bir parametre için 3 kere tekrarlanarak toplamda 9 test yapılmıştır. Sapmanın %5 olduğu testler iptal edilmiştir ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak anizotropi özellikleri elde edilmiştir. Çekme testi sonuçları Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. AA2024 Akma eğrisi (1,02mm kalınlık için)

Sac malzemeden üretilen çekme testi numuneleri ASTM Standartlarına[17] göre imal edilmiştir ve testler 10^{-3} s⁻¹ gerinim hızında gerçekleştirilmiştir. Gerçek gerilim-gerinim eğrileri Voce denklemi kullanılarak formüle edilmiştir. Bu çalışmada ki çekme testleri SE malzeme girdilerinin elde edilmesi için gerekli olan üç farklı yöndeki akma noktalarını elde etmek için kullanılmıştır.

Hidrolik Şişirme testi (HŞT) ise, basit tek eksenli çekme testinin ortaya çıkardığı dezavantajları elimine ederek sac metal malzemenin özelliklerini elde etmek için kullanılmıştır. Kısacası, tek eksenli çekme testi sadece tek eksenli gerinim durumu için veri sağlamaktadır ancak sac metal operasyonları hem tek eksenli hem de iki eksenli gerinim durumları ile açıklanmaktadır. HŞT ile ekstrapolasyon minimize edilir böylelikle işlem sertleşmesi değişkeninin elde edilmesi oldukça kolaylaşır [18].

Bu gerçeklerin ışığında, iki eksenli çekme testleri daha güvenilir ve hassas malzeme davranışını belirlemek amacıyla mühendisler tarafından geliştirilmek istenmektedir. İki eksenli çekme testleri, standart çekme testinde elde edilen gerinim değerinin en az iki katının elde edilmesi için yapılmaktadır. Bu yüzden, HŞT iki eksenli gerilim durumunda; şekillendirilebilirlik, tedarik edilen sac kalitesi, malzeme sünekliği ve ayrıca akma gerilimi eğrisini elde etmek amacıyla yapılmıştır [19]. Diğer testlerin aksine, HŞT numunesinin hazırlanması daha kolay

olmakla beraber zaman ve maliyet tasarrufu da sağlamaktadır. HŞT işleminde numune rijit olarak sabitlenir ve yırtılma oluşuncaya kadar sıvı basıncı ile gerdirilir. Tek eksenli çekme testlerinde yaklaşık 0,2 gerinim değerleri elde edilirken, HŞT'de 0,7'ye varan yüksek deformasyon koşulları elde edilir [20].

Yukarıda da bahsedildiği üzere, HŞT yüksek gerilim-gerinim değerleri elde etmek için kullanılır böylelikle SE uygulamaları için gerekli olan ekstrapolasyonlar elimine ve/ya minimize edilir.

HŞ testleri boyunca, yüksek hızlı CCD kameraları kullanılmıştır ve gerinim ölçümleri anlık olarak incelenmiştir. Aynı zamanda, zımba kuvveti kayıt altına alınmıştır ve gerilim değerini hesaplamak için basınç elde edilmiştir.

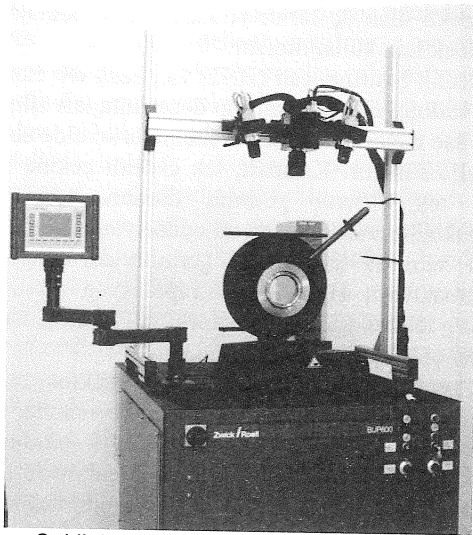
Ayrıca CCD kameralar kullanılarak sac metalin zirve noktasının kalınlığı hesaplanmıştır. Deneysel veriler kullanılarak, yeni geliştirilmiş kod ile gerilim-gerinim diyagramı hesaplanmıştır.

DENEYSEL PROSEDÜR

Sac metal şekillendirilebilirliği açıklamak için kullanılan en iyi yöntem Şekillendirilebilirlik sınır diyagramlarıdır (ŞSD). Bu çalışmada, ŞSD uygulamaları üç ana kategoride altında incelenmiştir. Bunlar;

- Sürtünme Testleri,
- Gerinim hızları,
- Ve kalınlık testleridir.

ŞSD çalışmaları boyunca, ARAMIS optik ölçüm sistemi ile 60 tonluk Zwick/Roell hidrolik presinin kombinasyonu kullanılmıştır.

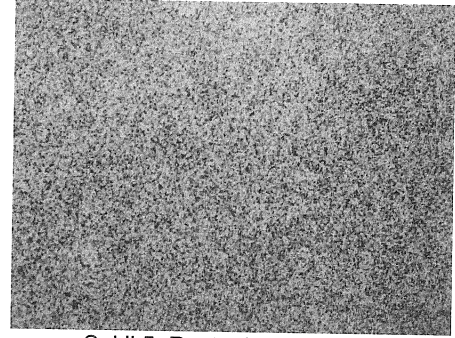


Şekil 4. BUP600 ve GOM-Aramis Sistemi

Tüm deneyler için alüminyum alaşımı AA2024 kullanılmıştır. Mikro çatlak, geometrik ve boyutsal

hataları önlemek amacıyla sac numune istenilen toleranslara su jeti kesme tekniği ile hazırlanmıştır.

Diğer taraftan, dairesel grid metodu gibi konvansiyonel yöntemlerin negatif etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla optik ölçüm sistemleri kullanılmıştır. Optik ölçüm sistemleri sadece hassas değil aynı zamanda hızlı ve güvenilir bir metottur. Sistem her bir deformasyon adımını kayıt altına alır ve önceden kayıt altına alınan bu fotoğrafları rastgele şablon (Şekil 5) yöntemi ile deformasyon ölçümünde kullanır.



Şekil 5. Rastgele şablon

Sürtünme Testleri

Sürtünmenin şekillendirilebilirlik sınırları üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla farklı sürtünme durumları için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu farklı yağlama ortamları PTFE(politetrafloroetilen) ve parafin kullanılarak oluşturulmuştur. Son ortam ise, yarı küresel ve sac parça arasında herhangi bir yağlama kullanılmadan gerçekleştirilen kuru ortamdır.

Kalınlık Testi

İş parçasının işlem öncesi kalınlığının ŞSD üzerindeki etkisini incelemek için kalınlık testleri gerçekleştirilmiştir. Sac metallerin soğuk haddelenmesi ile birlikte anizotropik özellikleri de değişir ve buna bağlı olarak şekillendirilebilirlik sınırları da değişmektedir. Bu bölümde, sac metal kalınlığının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar boyunca, AA2024 alüminyum alaşımı 0,81mm, 1,27mm ve 1,60mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta kullanılmıştır. Testler aynı koşullar altında ifa edilmiştir. Tüm numuneler için Teflon yağlayıcı kullanılmıştır. Test hızı 2,5 mm/dk(150mm/dk) olarak belirlenmiştir.

Gerinim Hızı Testi

Gerinim hızı testleri, şekillendirme hızının şekillendirilebilirlik sınırlarına olan etkisini elde etmek için gerçekleştirilmiştir. Test cihazının kapasitesine bağlı olarak, şekillendirilebilirlik sınır deneyleri 2,5

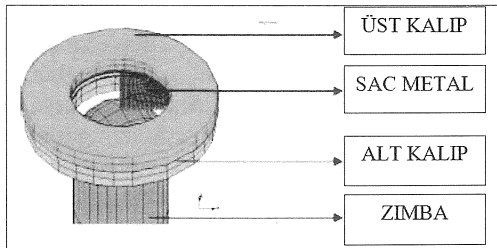
mm/sn'lik zımba hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mühendisler gerçek şekillendirme koşullarına en yakın olan deneysel koşulları elde etmek zorundadırlar. Bu nedenle, şekillendirilebilme sınırları üç farklı zımba hızında yapılmıştır. BUP600 cihazının maksimum zımba hızı 750 mm/dk'dır ve ŞSD elde etmek için kullanılan standart hız 150mm/dk'dır. Testler 150mm/dk, 450mm/dk ve 750 mm/dk'lık zımba hızları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) gerçek mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan güçlü bir araçtır. SE sayısal türev alma çözüm tekniğidir. Metot, karmaşık problemleri daha küçük ve kolay elemanlara böldüğü için yaklaşık sonuçlar vermektedir ancak eleman sayısının artırılmasıyla çözüm kalitesi de artırılabilir.

Bu çalışmadaki, sonlu elemanlar uygulamaları farklı tipteki numunelerin kopma kuvvetlerinin elde edilmesi için ticari bir sonlu elemanlar programı olan Marc-Mentat® yardımıyla yürütülmüştür.

Çeyrek simetri ile 3B mekanik tip modeli kullanılmıştır. 0,25 eleman boyutundaki kabuk elemanlar seçilmiştir. Tek eksenli çekme testinden alınan anizotropi özellikleri ve HŞT sonuçları sac malzemeyi modellemek için kullanılmıştır. Anizotropi için Barlat'ın akma fonksiyonu kullanılmıştır ve parametreler doğrudan deneylerin kullanılması ile hesaplatılmıştır. Bütün takımlar rijit olarak modellenmiş, ancak takım-kalıp deformasyonları sıfır veya ihmal edilebilecek kadar küçük seçilmiştir. ¼ model yaratılmış ve sınır durumları simetri düzlemleri etrafında sabitlenmiş hareket ve rotasyon ile uygulanmıştır.



Şekil 6. Sonlu elemanlar metodu modellemesi

Farklı numunelerden elde edilen kopma kuvvetleri deneysel çalışmalardan alınan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sürtünme katsayıları sayısal olarak belirlenmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMALAR

Şekillendirilebilme sınır diyagramları (FLD), sac metal şekillendirilebilirliğini ifade etmek için en iyi

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

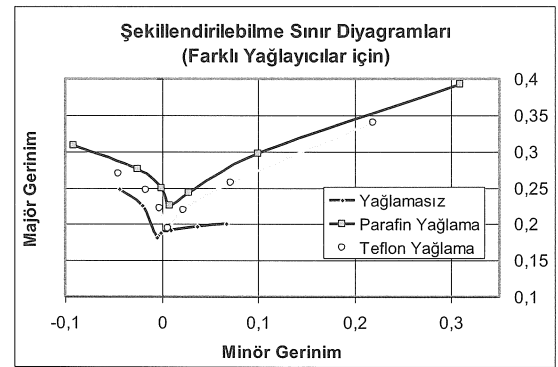
yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada, şekillendirilebilirlik üzerinde etkisi olan birtakım parametreler incelenmiştir. Deneysel olarak, sürtünme durumunun, gerinim hızlarının ve iş parçası kalınlıklarının etkileri üzerine çalışılmıştır. Çalışmalar süresince gerçekleştirilen deneyler, havacılık sanayinde yoğun olarak kullanılan alüminyum AA2024 alaşımı kullanılarak tamamlanmıştır.

Sürtünme çalışmaları, üç farklı ortam araştırması ile gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma için, PTFE (politetrafloroetilen) ve parafin gibi farklı özelliklerdeki yağlayıcılar ile birlikte herhangi bir yağlama tipi içermeyen kuru ortam kullanılarak, bu ortamların karşılaştırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Beklenildiği üzere, alüminyum sac malzemenin şekillendirilebilirlik penceresi diğer durumlardan daha düşük çıkmıştır (Şekil 5). Malzemenin sınır gerinmelerini gösteren Şekillendirilebilme sınır eğrileri (FLC) yağlayıcı kullanıldığı durumlarda artmaktadır.

PTFE,katı ve sürekli yağlayıcılar, sac metal ve zımba arasında düşük sürtünme sağlayarak, kuru ortama göre FL eğrisini arttırmaktadır.

Son olarak, diğer iki ortama mukayesen en yüksek şekillendirilebilme sınırı parafin yağlayıcı kullanılarak elde edilmiştir. Parafin kullanıldığı durumlarda, ince fakat sürekliliği olan yağlama tabakası oluşturulabilmektedir ve böylelikle şekillendirilebilme sınırları artmaktadır.

Şekillendirilebilirlik pencereleri kıyaslanacak olursa; parafin yağlayıcının kullanılması ile birlikte, çift yönlü gerilim durumunda ortaya çıkan sınır gerinmeleri, kuru ortamda gerçekleştirilen proseste ortaya çıkan sınır gerinmelerinin yaklaşık 2 katıdır ve tek eksenli gerinme durumunda bu oran yaklaşık olarak 1,4 katına eşit olmaktadır.

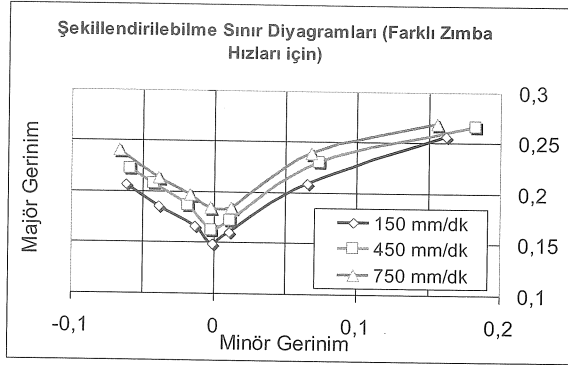


Şekil 7. Farklı yağlayıcıların şekillendirilebilmeye etkisi

Diğer taraftan, PTFE yağlayıcının kullanılması ile birlikte, çift yönlü gerilim durumunda ortaya çıkan sınır gerinmeleri, kuru ortamda gerçekleştirilen proseste ortaya çıkan sınır gerinmelerinin yaklaşık 1,75 katıdır (Şekil 7) ve tek eksenli gerinme

durumunda bu oran yaklaşık olarak 1,2 katına eşit olmaktadır.

Gerinim hızı testleri 2,5 mm/sn, 7,5mm/sn ve 12,5 mm/sn olmak üzere üç farklı gerinim hızında gerçekleştirilmiştir. Bütün gerinim hızı deneyleri PTFE yağlayıcı kullanılarak yürütülmüştür.



Şekil 8. Farklı zımba hızlarının şekillendirilebilmeye etkisi

Şekil zımba hızının şekillendirilebilirlik sınırları üzerindeki etkisini göstermektedir. Zımba hızı 5 kat arttırıldığı zaman FLC sınırları maksimum %10 artmaktadır. Şekillendirilme hızı arttıkça, şekillendirilebilme sınırları da artmaktadır.

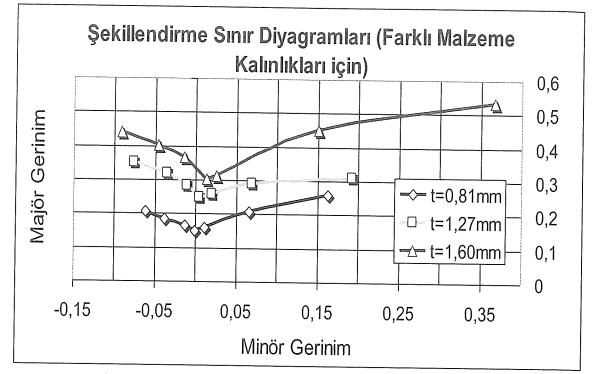
Son testler farklı malzeme kalınlıklarının şekillendirilebilme üzerinde etkisini araştırmak üzere gerçekleştirilmiştir. 0,81 mm, 1,27 mm ve 1,60 mm kalınlıklarında farklı sac kalınlıkları test edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil malzeme sac kalınlığının FLD üzerindeki etkisini göstermektedir. Sac kalınlığı iki katına çıkartıldığında, sınır gerinimleri de iki katına çıkmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışma, sac metal ilk kalınlığı, gerinme hızı ve yağlama gibi parametrelerin AA2024 alüminyum alaşımının şekillendirebilme sınırları üzerindeki etkisini incelemek için deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Testler BUP600 hidrolik presi ve GOM-ARAMIS optik ölçüm cihazı kullanılarak yürütülmüştür.

Bu çalışmada aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir;

Yağlamanın AA2024 alüminyum alaşımının şekillendirilebilme sınırlarının üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Tüm yağlama ortamları karşılaştırıldığında, Parafin yağlama ile en yüksek şekillendirme sınır eğrileri elde edilmiştir. Diğer bir taraftan, PTFE(Teflon®), parafin yağlayıcıya mukayesen en yüksek sürtünme katsayısını vermiştir.



Şekil 9. Farklı malzeme kalınlıklarının şekillendirilebilmeye etkisi

Tablo 1. SE ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Yağlayıcı	Metot	Minör Gerinim	Majör Gerinim	Kuvvet (Sürtünme Katsayısı)
Kuru	Deneysel	0.066	0.062	20634.9 N
	Sayısal	0.068	0.062	20223 N (0.2) 21920 N (0.3)
Parafin Yağlama	Deneysel	0.302	0.389	26.681 N
	Sayısal	0.31	0.342	26708 N (0.04) 26611 N (0.03)
Teflon Yağlama	Deneysel	0.256	0.275	24876 N
	Sayısal	0.233	0.254	24446 N (0.14) 25681 N (0.15)

Gerinim oranı veya zımba hızı da şekillendirilebilme sınırları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Zımba hızı 5 katına çıkartıldığında, şekillendirilebilme sınırları da yaklaşık olarak %10 artmaktadır.

Son olarak, ilk malzeme kalınlığının etkisi araştırılmıştır ve malzeme kalınlığının da şekillendirilebilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sınır gerinimleri, malzeme kalınlığının iki katına çıkartıldığı durumlarda aynı oranda artış göstermektedir. Sınır şekillendirilebilme eğrisi ilk malzeme kalınlığı ile arasında doğru orantılı bir bağıntı bulunmaktadır.

INVESTIGATION OF INFLUENCE PARAMETERS ON FORMING LIMIT DIAGRAMS OF ALUMINUM ALLOY-AA2024

Sheet metal forming that is used in automobile and aerospace industries is an important technology. To fulfill the customer expectations, safety requirements and market competitions, sheet metal forming processes must be well analyzed before

production. In this study, combination of FE (finite element) studies and mechanical material characterization to improve sheet metal forming processes. Uniaxial tensile and biaxial hydraulic bulge tests were performed on mechanical material characterization side of the studies. Deformation measurements were conducted using GOM-Aramis optical measurement system. AA2024 material was used for experimental and numerical studies. Initial material thickness, lubrication and strain rates are the parameters which are investigated in this study. FE studies were performed to predict coefficients of friction of different lubricants. Finally, good correlations were obtained between experimental and numerical studies.

Keywords: Sheet Metal Forming, Forming Limit Diagrams, Finite Element Analysis, Optical Measurement Systems.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, TAI(Turkish Aerospace Industry) ve Som Cıvata Somun San. ve Tic. A.Ş.'ye bu çalışmaya sağladıkları katkılardan dolayı teşekkür etmektedirler.

KAYNAKÇA

1. S.P. Keeler: SAE Paper No. 650535, 1965 S.P. Keeler: SAE Paper No. 650535, 1965
2. G.M. Goodwin: SAE Paper No. 680093, 1968
3. T. Pepelnjak , K. Kuzman, Numerical Determination of the Forming Limit Diagrams, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 20(2007), 375-378.
4. Iordache M., Axinte C., Theoretical And Experimental Studies Regarding the Semi Spherical Punch Process of Steel Sheets A5 Stas 10318-80, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), 2008.
5. Campos H. B., Butuc M. C., Gracio J. J., Rocha J. E., Duarte J. M. F., Theoretical and Experimental Determination of the Forming Limit Diagram for the AISI304 Stainless Steel, Journal of Materials Processing Technology, 179(2006), 56-60.
6. Hiwatashi S., Bael A. V., Houtte P. V., Teodosiu C., Prediction of Forming Limit Strains Under Strain-Path Changes: Application of an Anisotropic Model Based on Texture and Dislocation Structure, International Journal of Plasticity 14(1998), 647-669.
7. Cao J., Yao H., Karafillis A., Boyce M. C., Prediction of Localized Thinning in Sheet Metal Using a General Anisotropic Yield Criterion, International Journal of Plasticity, 16(2009), 1105-1129.
8. Yao H., Cao J., Prediction of Forming Limit Curves Using an Anisotropic Yield Function with Prestrain Induced Back Stress, International Journal of Plasticity, 18(2002), 1013-1038.
9. Chien W. Y., Pan J., Tang S. C., a Combined Necking and Shear Localization Analysis for Aluminum Sheets Under Biaxial Stretching Conditions, International Journal of Plasticity, 20(2004), 1953-1981.
10. Son H. S., Kim Y. S., Prediction of Forming Limits for Anisotropic Sheets Containing Prolate Ellipsoidal Voids, International Journal of Mechanical Sciences, 45(2003), 1625-1643.
11. Avilla A. F., Vieira E. L. S., Proposing a Better Forming Limit Diagram Prediction: A Comparative Study, Journal of Materials Processing Technology, 141(2003), 101-108.
12. Butuc M. C., Gracio J. J., Rocha A. Barata da, A Theoretical Study on Forming Limit Diagrams Prediction, Journal of Materials Processing Technology, 142(2003), 714-724.
13. Holger A., Numerical Analysis of Diffuse and Localized Necking in Orthotropic Sheet Metals, International Journal of Plasticity, 23(2007), 798-840.
14. Hsu Q. -C., Comparison of Different Analysis Models to Measure Plastic Strains on Sheet Metal Forming Parts by Digital Image Processing, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43(2003), 515-521.
15. Konstantin G., 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES/MOLDS 2007.
16. Geiger M., Merklein M., Determination of Forming Limit Diagrams-A New Analysis Method for Characterization of Materials' Formability, Institute for Mechanical Engineering University of Erlangen-Nuremberg.
17. ASTM International Standards, Standards for Tensile Testing, ASTM E8-04, 2004.
18. Gologranc F., Evaluation of the Flow Stress Curve with the Continuous Hydraulic Bulge Test (Beitrag zur Ermittlung von Fließkurven in Kontinuier-Lichen Hydraulischen Tiefungsversuch), Institute for Metal Forming Technology, University of Stuttgart, Germany, 1975.
19. Atkinson M., Accurate Determination of Biaxial Stress-Strain Relationship from Hydraulic Bulge Test of Sheet Metals, International Journal of Material Science, 39(1997), 761-769.
20. [20] Panknin W., The Hydraulic Bulge Test and Determination of the Flow Stress Curves (Der hydraulische Tiefungsversuch und die Ermittlung von Fließkurven), Institute for Metal Forming Technology, University of Stuttgart, Germany, 1959.