

# SÜRTÜNME KAYNAKLI ALUMİNYUM-ÇELİK BAĞLANTILARI

M. Yılmaz\*, M. Çöl\*\*

\*) Doç. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü

\*\*\*) Y. Doç. Dr. Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü

## GİRİŞ

Farklı metallerin sürtünme kaynağında oluşan problemler sadece malzemelerin farklı sertlik ve erime noktalarından kaynaklanmamakta, aynı zamanda ara yüzey reaksiyonları ile meydana gelen gevrek intermetalik fazlar, düşük erime noktalı otektikler gibi ürünler de etkili olmaktadır /1/. Farklı metal bağlantısı olan Al-Çelik bağlantılarında alüminyumun yüksek elektriksel iletkenliği, yüksek ısıl iletkenliği ve düşük yoğunluğu çelik tarafının ise yüksek mukavemeti ve aşınma direnci bu bağlantıları cazip kılmaktadır /3/.

Al-çelik bağlantılarında seçilen malzemelere bağlı olarak kaynak bağlantısının ara yüzey oluşumları da fiziksel ve kimyasal açıdan farklılıklar içermektedir. Yapılan çalışmalarda alüminyum olarak saf alüminyum, Al-Mg-Si alaşımları sıkça seçilen malzeme olurken, çelik olarak ta karbonlu çelik ve ostenitik paslanmaz çelik en sık seçilen çelik alaşımlarını oluşturmaktadır /1-8/.

Bağlantı arayüzeyinde yüksek mukavemetlere ulaşmak için sürtünme alın yüzeyleri çok iyi hazırlanmalıdır. Yüzeyler birbirine paralel olmalı ve kaynak öncesi mutlaka temizlenmelidir /3/.

Sürtünme kaynaklı Al-Çelik bağlantılarında en önemli problem kaynağını oluşturan ve kalınlığının mutlaka sınırlanması gereken intermetalik fazın oluşumunu engellemek için son yıllarda kullanılan bir diğer yöntem de ara malzeme kullanımıdır /4,5/. Bu amaçla ara malzeme olarak Sn, Zn ve Ag düşünülmüştür. Ancak Zn nin yüksek buhar basıncı ve Sn nin ise düşük erime sıcaklığı bu malzemelerin kullanımını yok etmiştir. Bu nedenle kullanılacak en elverişli malzeme gümüş olmaktadır. Gümüş kaynaklanacak alın yüzeylere galvano teknik ile kaplanabilir. Kaplama çelik tarafına uygulanmakta ancak bağlantının sağlığı açısından kaplama çok dikkatli yapılmalı ve kaplama çelik arası adhezyon çok iyi olmalıdır /7/. Arayüzeyde iyi yapışma sağlanması için galvanik kaplamada yüksek safiyet gerekmektedir. Bundan başka arayüzeyde önce nikel takiben gümüş kaplama uygulanabilir. Genelde gümüş katman 10-50 m kalınlıklarda ve mat renkte olmalıdır. Ayrıca kaynak öncesi alüminyum tarafı asit ile temizlenerek kir ve yağdan arındırılmalıdır /5/.

## BAĞLANTININ MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

Al-Çelik bağlantılarında oluşan gevrek intermetalik bileşikler ana problem kaynağını oluşturmaktadırlar/1-5/. Bu fazın oluşumu ısı ve iki malzemenin difüzyon hızlarına bağlıdır.



a) Mikrosertlik (Hv)

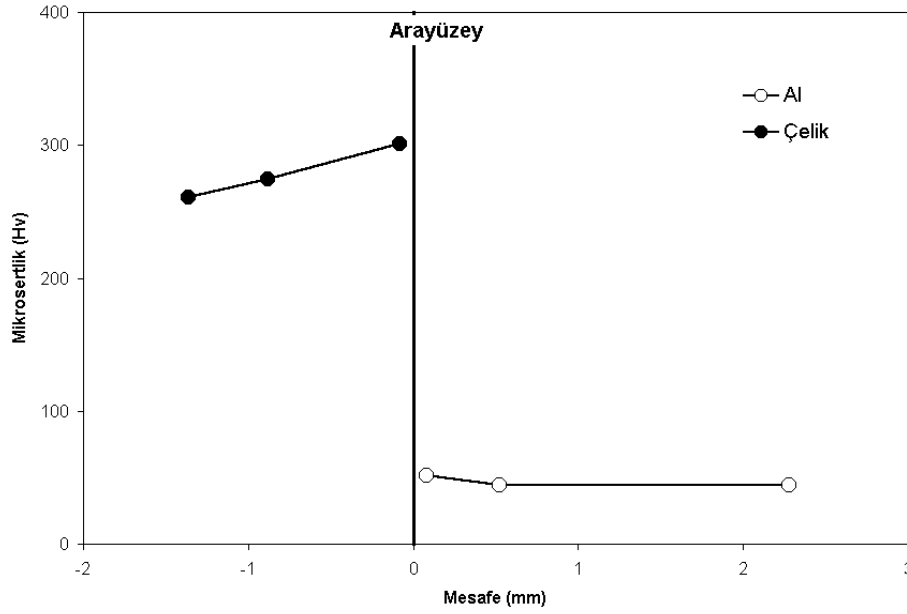
b) Çekme Mukavemeti (MPa)

Bağlantı arayüzeyinin paslanmaz çelik ve karbonlu çelik tarafında bazı araştırmacılar tarafından çok yüksek plastik deformasyon belirlenmiştir. Deformasyon nedeniyle özellikle kaynağın dış bölgelerinde tane yapısı yüksek derecede incelmıştır. Meydana gelen bu deformasyon arayüzeyde sertlik artışlarına neden olmaktadır /2-3/

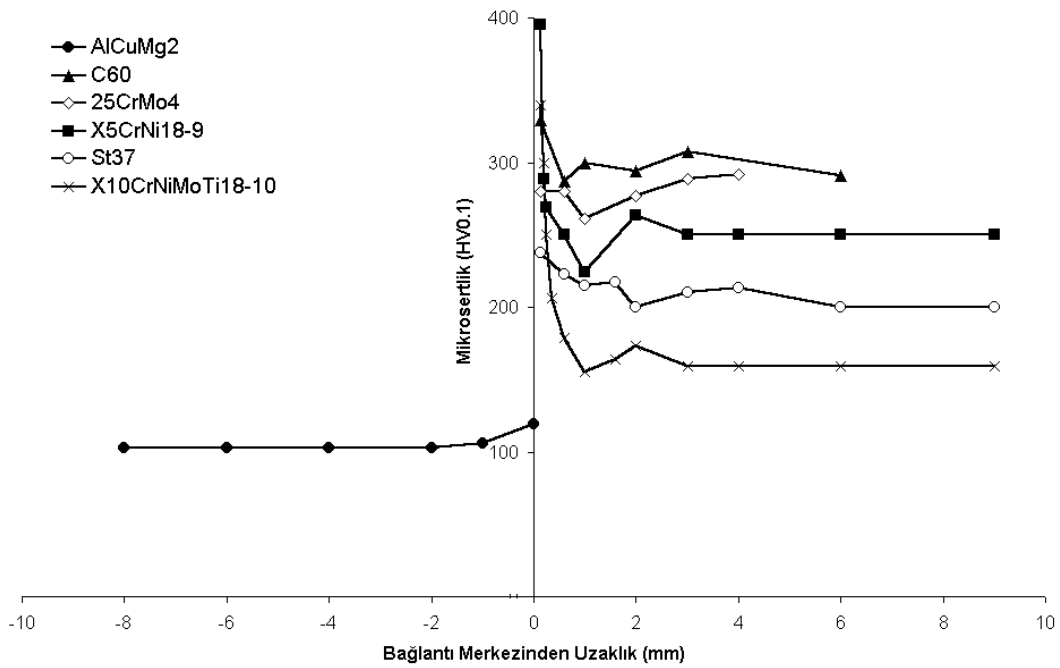
Şekil 3 sürtünme kaynaklı Al-çelik çifti için bağlantı bölgesinde sertlik değişimini göstermektedir. Burada arayüzeyin hem alüminyum ve hem de çelik tarafında sertlikte bir artış meydana gelmiştir/1/. Şekil 4 ve 5 ise iki farklı alüminyum alaşımının ferritik ve ostenitik çeliklerle olan sürtünme kaynaklı bağlantısında arayüzey sertlik değişimini göstermektedir /3/. Bu diyagramlarda 100-200 µ m'luk dar bir bölgede çelik tarafında bir artış gözlenmektedir. Sertlik artışı ostenitik çeliklerde ferritik çeliklere nazaran daha yüksek olmaktadır. Bu durum ostenitik çeliklerin yüksek deformasyon sertleşmesi göstermesine bağlanabilir. Bağlantının alüminyum tarafında AlMgSi1 alaşımı dışında diğer alaşımlarda sertlikte önemli bir değişim gözlenmemektedir. Alüminyum tarafı tüm malzeme kombinasyonları için alüminyum tarafının sıcaklığının kaynak işlemi sırasında rekristalizasyon sıcaklığının üzerine çıktığı ve yığılma basıncının uygulandığı sırada da soğuk pekleştiği söylenebilir. Bu durumda rekristalizasyon ile oluşması gereken sertlik düşüşü rekristalizasyon

sonrası tane boyutunun incelmesi ve yğma basıncının uygulanması ile oluşan soğuk sertleşme

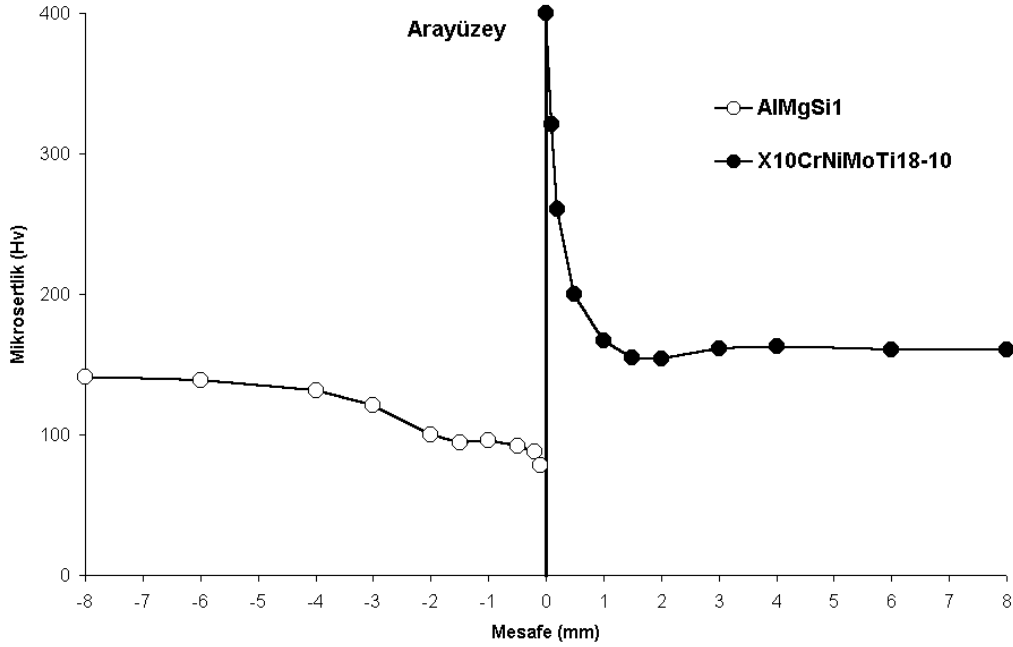
ile  
dengelenmiştir  
ir /3/.



Şekil 3 :  
Çelik  
Aluminyum  
Bağlantılarının  
Mikrosertlik  
Dağılımı  
/1/.



Şekil 4  
:  
AlCuMg2  
ve  
Farklı  
Çelik  
Malzemelerin  
Sürtünme  
Kaynak  
Bağlantılarında  
Mikrosertlik  
Değişimleri /3/.



Şekil 5 : AlMgSi1 ve X10CrNiMoTi18-10 Sürtünme Kaynak Bağlantılarında Mikrosertlik Değişimleri /3/.

Çökelti sertleşen  $AlZn4.4Mg1$ ,  $AlMgSi1$  ve  $AlCuMg2$  alaşımlarında bağlantı bölgesinde çökeltilerin bir kısmının kaynak işlemi sonucu çözünmesi nedeniyle oluşan bir sertlik düşüşü vardır. Soğukta çökelti sertleşen alaşımlarda bu sertlik düşüşü oda sıcaklığında meydana gelen çökelmeler ile dengelenmiştir. Ancak bu dengelenme  $AlMgSi1$  alaşımında gerçekleşmeyip sertlik çok ani bir düşüş göstermiştir (Şekil 5) /3/. Dolayısıyla Al-Mg-Si alaşımlarında Alüminyum tarafında bir yumuşamış bölge oluşmakta bu yumuşamış bölge artan yığılma basıncı ile daralmaktadır /4/.

Sürtünme kaynağı öncesi alüminyum tarafının alın yüzeyinde mevcut alüminyum oksit bağlantı oluşumuna bir bariyer rolü oynamaktadır. Ancak özellikle yüksek sürtünme basınçları ve

yüksek dönme hızlarında oluşan deformasyonla Al yüzeyindeki bu alüminyum oksit kırılmakta ve büyük ölçüde yüzeyden uzaklaştırılarak çıplak yüzeylerin oluşumu sağlanabilmektedir. /1/. Bununla birlikte bu bağlantıların arayüzeyinde yer yer alüminyum oksit tabakaları görmek mümkündür.

## KAYNAK PARAMETRELERİNİN BAĞLANTI ÜZERİNE ETKİSİ

Al-çelik kaynaklı bağlantıları incelendiğinde ara yüzeyde çatlak, por, intermetalik bileşik, bağlantısız bölgeler, ara yüzeyde çok kuvvetli dönmeler gibi hatalara rastlanmakta bunlar bağlantı mukavemetini düşürmektedir. Arayüzeydeki bütün bu olumsuz oluşumlar da kaynak parametreleri ile yakından ilişkilidir. G. Reiners ve H. Kreye tarafından yüksek mukavemetli hatasız kaynaklar veren kaynak parametreleri şöyle önerilmiştir /3/: devir = 1100-1200 d/d, Sürtünme basıncı = 40-70 Mpa, Sürtünme süresi = 0.1-1.1 s, Yiğma basıncı = 65-250 Mpa, Yiğma süresi = 3-4 s. Burada sürtünme süresi literatür ile karşılaştırıldığında (4-7 s /1/ ) çok düşüktür. Önerilen bu çok kısa kaynak süreleri kaynak makinasında sürtünme ve yiğma sürecinde uygulanan basınçların çok hızlı oluşturulabilmesi ile kullanılabilir.

Yapılan çalışmalar ana problem kaynağını oluşturan intermetalik fazın oluşumu için bir kuluçka süresinin gerektiğini, dolayısıyla sağlıklı bir kaynakta bu kuluçka süresinin kaynak süresinden daha uzun olması gerektiğini göstermiştir. Ancak bu kuluçka süresi tartışılır bir değerdir. Bu nedenle kontrol intermetalik fazın kalınlığı üzerinden yapılmalıdır /1/. İntermetalik fazın oluşumu ısı ve iki malzeme arasındaki difüzyon hızına da bağlıdır. Örneğin karbonlu çelik-alüminyum bağlantılarında düşük bir sürtünme hızı seçilirken paslanmaz çelik-Alüminyum bağlantılarında düşük difüzyon hızları nedeni ile yüksek sürtünme hızları seçilmelidir /2/. Kuluçka süresi, ısı ve difüzyon hızı hem birbirleri ile hem de kaynak parametreleri ile bağlantılı değerler olmaktadır.

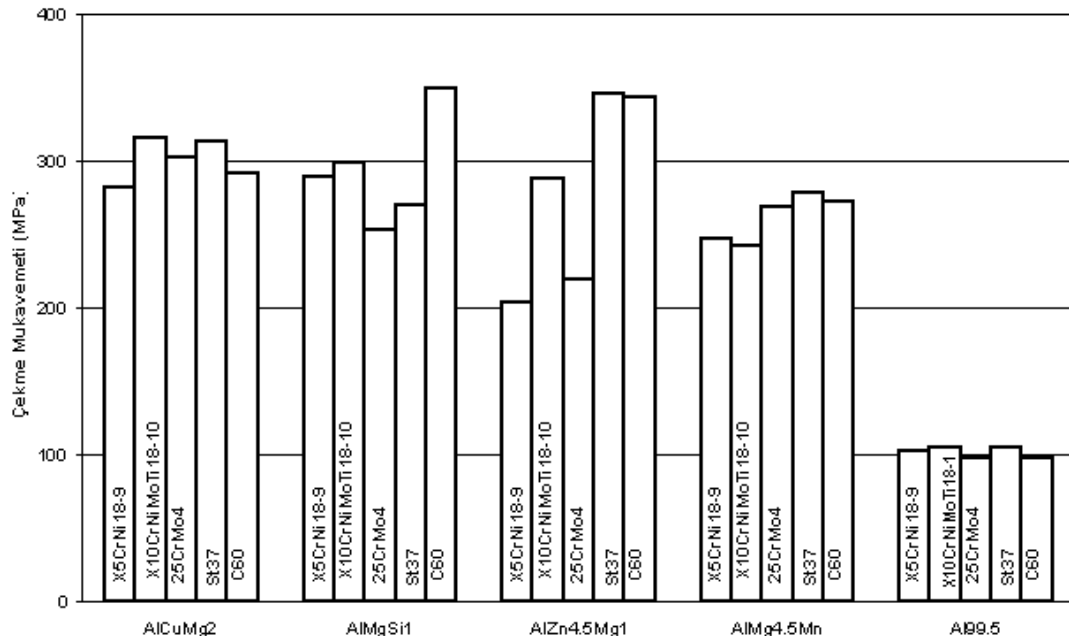
Sürtünme kaynaklı alüminyum-çelik bağlantılar için bazı çalışmalarda metalografi ile intermetalik faz oluşumu kesin olarak kanıtlanamamıştır. Eğer intermetalik faz oluşmuşsa bile muhtemelen yiğma kademesi sırasında dışarı sürülmüştür /2/. Nitekim G. Reiners ve H. Kreye tarafından yapılan çalışmalarda en uygun parametreler ile kaynaklanan bağlantılarda keskin bir bağlantı ara yüzeyi gözlenmiştir ve bu bağlantılar çatlak, por, bağlantısız bölgeler gibi hatalar içermemekte, ayrıca intermetalik faz oluşumu bulunmamaktadır. Mikroyapı üzerinde etkili parametreler, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yiğma basıncı ve yiğma süresidir. Çok uzun sürtünme sürelerinde gevrek intermetalik bileşik içeren difüzyon zonu oluşmaktadır. Çok kısa sürtünme süreleri ile düşük sürtünme ve yiğma basınçlarında ise bağlantı gerçekleşmemektedir. Bu parametrelerde bağlantı bölgesinde por ve lunke oluşumları da görülebilir. Yüksek mukavemet eldesi için kaynak parametrelerinden sürtünme süresi olabildiğince düşük, sürtünme ve yiğma basınçları ise olabildiğince yüksek seçilmelidir. Kısa sürelerde çok küçük bir difüzyon bölgesi oluşur ve bu bölge yiğma basıncının uygulandığı süreçte bağlantı arayüzeyinden basınç etkisi ile uzaklaştırılır /3/. Kısa kaynak sürelerinin bu avantajına rağmen 20 mm den daha büyük çaplı numunelerde yeterli alın yüzeyi sıcaklığına erişebilmek için daha uzun sürtünme süreleri gerekmektedir. 140 mm çaplı Saf Al-C 45 bağlantısı için yapılan çalışmada difüzyon bölgesi kalınlığı kenarda 2 merkezde 5 µ m ye kadar ulaşmıştır. Bu numunelerde de elde edilebilen en iyi kaynak bağlantıları yine mümkün olabilen düşük sürtünme süreleri ile yüksek sürtünme ve yiğma basınçlarına bağlıdır /3/

## BAĞLANTININ MEKANİK ÖZELİKLERİ

Saf Al (A199.5) - çelik bağlantılarının mukavemeti hem ferritik ve hem de ostenitik çeliklerle yapılan bağlantıda A199.5 malzemenin mukavemetinden daha yüksek çıkmıştır. Bu bağlantılarda tüm numuneler ana malzemeden kopmuştur /3/. Daha yüksek mukavemetli alüminyum malzemelerinin kullanıldığı bağlantılarda ölçülen mukavemetler alüminyum alaşımının mukavemetinin altında kalmıştır ve kırılma Al-Mg-Si alaşımları dışında arayüzeyde meydana gelmiştir /3/. Ancak Al-Mg-Si alaşımlarında düşük yığıma basınçlarında kırılma yine arayüzeyde oluşurken daha yüksek yığıma basınçlarında kırılma alüminyum tarafında oluşmuştur /4/. Arayüzeyden de oluşsa kırılma sonrasında her zaman çelik tarafında bir miktar Al tabakası kalmıştır ve Tablo 1 ile karşılaştırıldığında tüm bağlantıların mukavemetleri oldukça yüksektir. Bu bağlantılarda kopma bağlantı bölgesinde ve herhangi bir plastik deformasyon oluşmadan meydana gelmiştir. Bu durum alüminyumun çok farklı mekanik özellikleri ile bağlantı bölgesinde yüksek soğuk sertleşme gösteren çelik malzeme özelliklerine bağlanabilir. Buna bağlı olarak oluşan gevrek kırılma çok eksenli gerilmelerden ve böylece oluşan çentik etkisinden kaynaklanmaktadır. Ulaşılan mukavemetler genelde yumuşak malzemenin akma mukavemetine ya çok yakın yada üzerinde olmaktadır /3/.

Tablo 1- Çeşitli malzemelerin çekme ve akma mukavemetleri

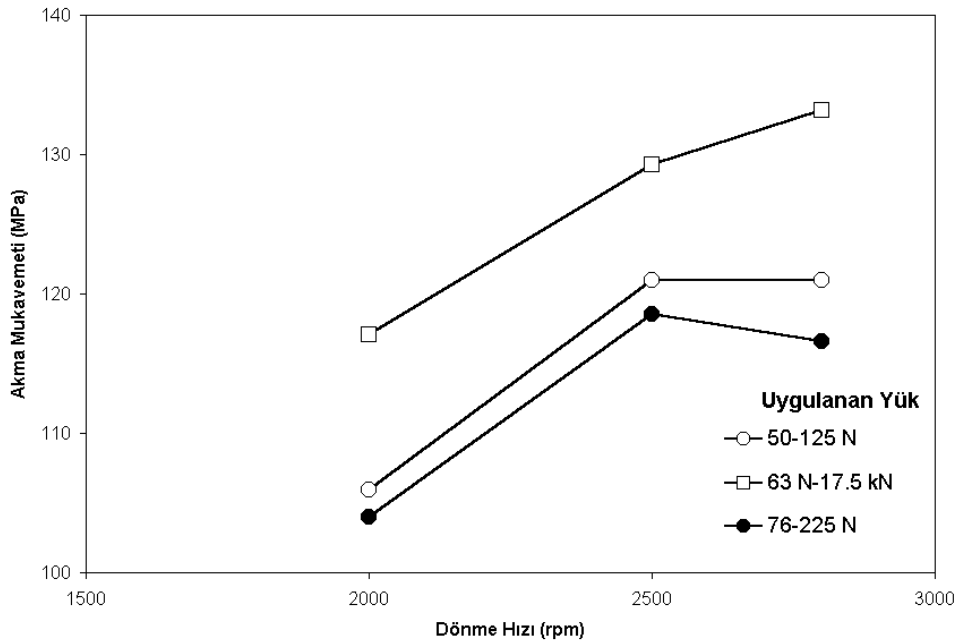
Malzeme	Rm (MPa)	R <sub>0.2</sub> (MPa)	Malzeme	Rm (MPa)	R <sub>0.2</sub> (MPa)
Al99.5F7	65	20	S137-2	360-470	220-240
AlMg4.5MnF27	270	140	C60	700-850	360
AlZn4.5Mg1F35	350	270	25CrMo4	650-1100	420-700
AlMgSi1F31	310	260	X5CrNi189	500-750	230
AlMgCu2F48	480	340	X10CrNiMoTi1810	550-700	200



Şekil 6 : Alüminyum ve Çelik Malzemelerin Sürtün

### me Kaynak Bağlantılarında Çekme Mukavemeti Değişimleri /3/.

Al ve alaşımlarının çelik ile sürtünme kaynağında elverişli mukavemete sahip bağlantılar üretmek mümkündür. Bunun için yukarıda da değinildiği gibi bağlantı ara yüzeyindeki intermetalik bileşiklerin oluştuğu difüzyon bölgesi kalınlığı çok önemli olup bu değerin 1  $\mu$  m nin altında olması gerekir. Uygun seçilen parametrelerle bu sağlanarak Şekil 6 da gösterilen yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Mikro yapı üzerinde en etkili parametreler olan sürtünme süresi, sürtünme basıncı ve yığma basıncının yanısıra dönme hızının da bağlantı mukavemeti üzerinde etkisi bulunmaktadır (Şekil 7) /1/.

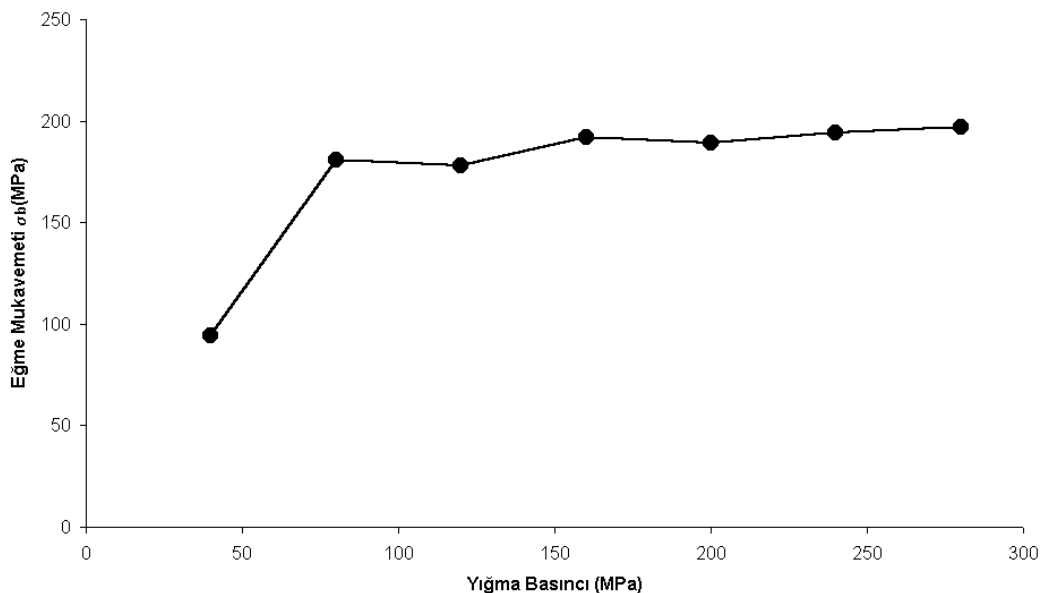


Şekil 7 : Çelik Alüminyum Bağlantılarının Çekme Test Sonuçları /1/.

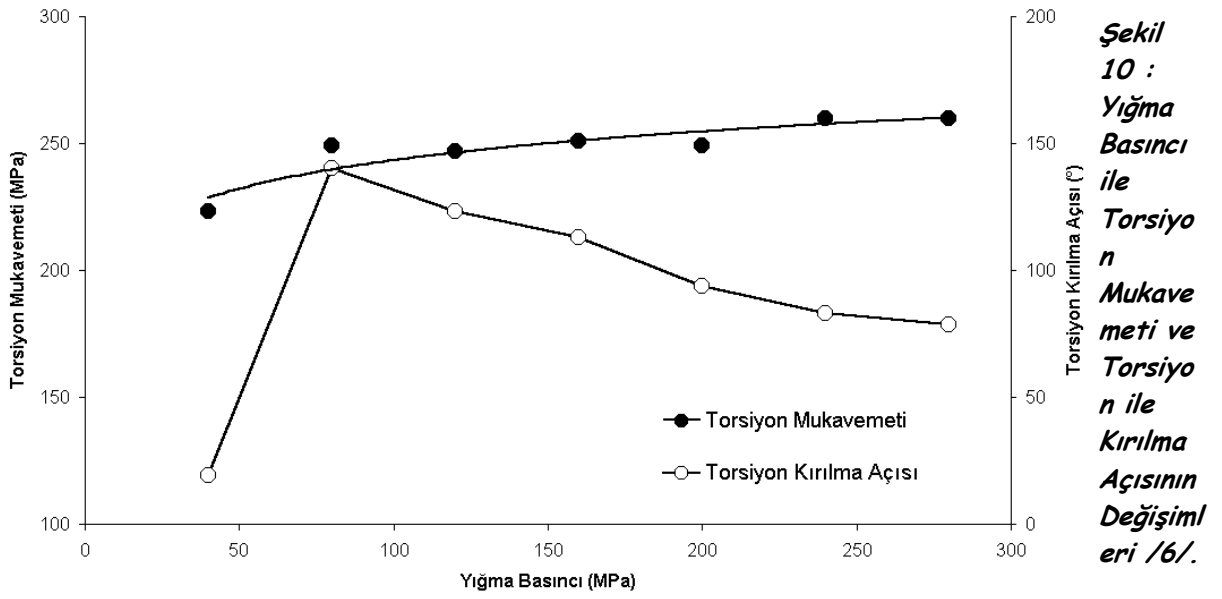


Al-Mg-Si alaşımlarının kullanıldığı alüminyum-çelik bağlantılarında yukarıda sözü edilen kaynak sonrası alüminyum tarafında oluşan yumuşamış bölge de kaynaklı bağlantının mukavemeti üzerinde etkili olmaktadır. Yine yukarıda sözü edildiği gibi artan yığma basıncı bu bölgeyi daralttığından mukavemeti arttırıcı yönde etki yapmaktadır. Nitekim H. Ochi ve arkadaşları tarafından bu numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda artan yığma basıncının çekme mukavemetini, burulma mukavemetini ve daha az etkili olarak eğme mukavemetini giderek azalan oranlarda arttırdığı tesbit edilmiştir (Şekil 8-10). Kaynak sonu uygulanan ısıtma işlemlerinin de yumuşamış bölge genişliği, dolayısıyla bağlantının mukavemeti üzerinde etkisi vardır. Araştırmacılar tarafında kaynak sonu bu numunelere uygulanan T 42 (550 °C de 1 saat), T 62 (550 °C de 1 saat + 175 °C de 1 saat) ve T 62' (175 °C de 8 saat) ısıtma işlemleri yumuşamış bölge üzerinde farklı etkiler yapmıştır. T 42 ısıtma işlemi sonrasında alüminyum tarafı yumuşamış bölge genişleşmiş, kırılma alüminyum tarafında oluşmuş ve çekme mukavemeti düşük çıkmıştır. T 62 ve T 62' ısıtma işlemleri sonrasında çekme mukavemeti artarken en yüksek çekme mukavemeti değeri T 62 ısıtma işlemi sonrası elde edilmiştir. Bu son iki ısıtma işlemi sonrası çekme deneyinde kırılmalar arayüzeyde oluşmuştur /4/.

*Şekil 8 : Yığma Basıncı ile Çekme Mukavemeti ve Ergime Bölgesi Kalınlığının Değişimleri /6/.*



*Şekil 9 : Yığma Basıncı ile Eğme Mukavemetinin Değişimi /9/.*



## SÜRTÜNME KAYNAĞINDA ISI OLUŞUMU

Yukarıda da değinildiği gibi arayüzeyde açığa çıkan ısı ana malzemelere doğru yayınarak intermetalik ve difüzyon bölgeleri üzerinde belirleyici olmaktadır. Ara yüzeyde oluşan ısı ve sıcaklık değerleri termoelement kullanılarak ölçülebileceği gibi sonlu farklar gibi nümerik yöntemler kullanılarak teorik olarak da hesaplanabilir. Kaynak işlemi sırasında oluşup ana malzemeye doğru yayılan ısı akısı sürtünme basıncı (veya sürtünme momenti) ve açısal hız (veya devir sayısı) ile ilişkilidir. Konu ile ilgili araştırma yapan çeşitli araştırmacılar arayüzeyde

ısı akısı ile ilgili benzer bağıntılar geliştirmiştir. Bu araştırmacılar Adolf Sluzalec ve Andrzej Sluzalec isimli araştırmacılar (1) nolu denklemi, Suck-joo Na, Jürgen Ruge ve Karl Thomas isimli araştırmacılar ise (2) ve (3) nolu denklemleri geliştirmişlerdir /7-8/.

$$q = (2/3)P\mu_{fr}\omega\pi r \quad (1)$$

Burada,  $q$ , ısı yayını,  $P$ , basınç,  $\mu_{fr}$ , sürtünme katsayısı,  $\omega$ , açısal hızdır.

$$q = \mu Pn2\pi r \quad (2)$$

Burada  $n$  devri göstermektedir. Basınç yerine sürtünme momenti kullanıldığında ifade (3) nolu denklem haline gelir.

$$q = \frac{3Mnr}{R^3} \quad (3)$$

Burada  $R$  en büyük numune yarıçapıdır.

(1-3) denklemleri ile ifade edilen ve arayüzeyde elde edilen ısı kaynaklanacak alın yüzeylerden ana malzemeye yayılmaktadır. Burada ısı kaynağı noktasal bir kaynak olmayıp tüm alın yüzeyi kapsayan bir kaynaktır. Bu nedenle oluşan bu ısı nedeniyle arayüzeyde meydana gelen sıcaklığın nümerik hesabı için ampirik bir ifade çıkarılması çok zordur. Bu gibi durumlarda sağlıklı bir çözüm için sonlu farklar gibi nümerik metodlardan yararlanır. Dolayısıyla bu formüller kullanılarak arayüzeyde her iki tarafa doğru sıcaklık değişimini veren termal çevrimler elde edilebilir. Suck-joo Na ve arkadaşları (2) ve (3) nolu denklemleri kullanarak paslanmaz çelik-elektrolitik bakır bağlantıları için zamana ve kaynak ekseninden olan mesafeye bağlı olarak termal çevrimleri elde etmişlerdir (Şekil 11,12). Bu araştırmada çelik malzemenin karşısı olarak kullanılan elektrolitik bakır ile saf alüminyum birbirlerine yakın ısıl özelliklere sahip oldukları için elde edilen bu termal çevrimler saf alüminyum-çelik bağlantıları için de bir gösterge olabilecektir. Şekil 11 de aynı kesit mesafelerinden alınan  $a$  ve  $b$  gibi iki farklı termal çevrim arasındaki fark çelik ve bakır malzemelerin ısıl özelliklerinin sıcaklıkla olan bağımlılığı ile ilgilidir.  $a$  şıkında termal özelliklerin oda sıcaklığındaki bir değeri alınırken  $b$  şıkında kaynak sırasında çıkılan sıcaklığa bağlı olarak ortalama bir sıcaklık değerine göre seçilen termal özellikler alınmıştır. Ayrıca diyagram üzerinde herbir sıcaklık anı için o sıcaklıktaki termal özellikler esas alınarak çizilen eğriler de bulunmaktadır. Doğal olarak bu iki eğri arasındaki fark  $a$  şıkında daha fazla olmaktadır. Diyagramların incelenmesinden yüzeye yakın noktalarda ve 500 °C nin altındaki sıcaklıklarda iki eğri arasındaki farkın çok küçük olduğunu görülmektedir.

**Şekil 11 : Sürtünme Kaynağında Alın Yüzey Sıcaklıklarının Değişimi (Modelleme) (X5CrNi18-9 - E-Cu,  $\varnothing = 20$  mm,  $n=3000^{-1}$ ,  $v_R=2.5$ mm/s,  $s_R=4$  mm) /8/.**

**a: Oda Sıcaklığı ile Karşılaştırma**

**b: Ortalama Kaynak Sıcaklığı ile Karşılaştırma**

**Şekil 12 : Sürtünme Kaynağında Eksenel Sıcaklıkların Değişimi (Modelleme) (X5CrNi18-9 - E-Cu,  $\varnothing = 20$  mm,  $n=3000^{-1}$ ,  $s_R=4$  mm) /8/.**

**a:  $v_R=0.5$ mm/s, b:  $v_R=2.5$ mm/s**

## **SONUÇ**

**Aluminyum-çelik bağlantılarının sürtünme kaynağı ile elverişli mukavemet değerlerinde üretilmesi mümkündür. Bağlantının başarısı tamamen arayüzeyde oluşabilecek intermetalik faz ile ilişkilidir. Bu intermetalik faz büyük oranda kaynak parametrelerine bağlıdır ve bu**

fazın arayüzeyde oluşması arzu edilmez. Bu nedenle arayüzeyde intermetalik faz oluşumu 1 mikron gibi çok düşük kalınlık değerleri ile sınırlanmalıdır. Bunun için kaynak parametrelerinin uygun bir korelasyonu kullanılmalıdır. Ayrıca bu oluşumu engellemek için gümüş insert malzemeler kullanmakta yararlı sonuçlar verebilmektedir.

## KAYNAKÇA

1. Yılbaş, B.S., et all, "Friction welding of St-Al and Al-Cu materials", *J. of. Materials Processing Technology*, 49, 431-443, 1995.
2. Achar, D.R.G, Ruge, J., Sundaresan, S., "Verbinden von aluminium mit stahl, besonders durch schweissen", *Aluminium.*, 56, 147-149
3. Reiners, G., Kreye, H., "Mikrostruktur und mechanische eigenschaften von reibschweisverbindungen aus aluminium und stahl", *Schweissen und Schneiden* 40, 123-129, 1988
4. Ochi, H., et all, "Friction welding of aluminum alloy and steel", *Proceeding of the Seventh Int. Offshore and Polar Eng. Conference, Honolulu, USA, 25-30, 1977.*
5. Hartwig, H., Kouptsidis, J., "Schweisverbindungen zwischen AlMgSi0.5 und X5CrNi189 für das Vakuumsystem von Hochenergiebeschleunigern", *Schweissen und Schneiden* 30, 45-47, 1978
6. Ochi, H., et all, "Static strength of friction welded joint of 6061 aluminum alloy to SUS304 stainless steel", *Light metals*, 46,500-504,1996
7. Sluzalec, A., Sluzalec, A., "Solutions of thermal problems in friction welding-comparative study, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36, 1583-1587, 1993
8. Na, S., Ruge, J., Thomas, K., "temperaturermittlung beim reibschweissen ungleichartiger werkstoffe in zylindrischer form-messung und berechnung, *Schweissen und Schneiden* 30, 45-47, 1978