

BİÇİMLENEBİLEN MAGNEZYUM ALAŞIMLARDAN KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN YORULMA DAYANIMI DEĞERLENDİRMELERİNDE MİKRO-DESTEK ETKİSİ KONSEPTİNİN UYGULANMASI

Özler Karakaş¹, Christoph Morgenstern², C. Morris Sonsino², Martin Vogt³
Klaus Dilger³, Alper Gülsöz¹

¹ Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü,
Denizli / Türkiye

² Fraunhofer-İşletme Dayanımı ve Sistem Güvenilirliği Enstitüsü LBF,
Darmstadt / Almanya

³ Braunschweig Teknik Üniversitesi, Birleştirme ve Kaynak Tekniği Enstitüsü ifs,
Braunschweig / Almanya

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, magnezyum alaşımlarından kaynaklı birleştirmelerin otomotiv endüstrisinde ve tesis yapılarında uygulanması amacıyla yorulma ömrü tahmini için var olan ölçülendirme konseptlerini geliştirmektir. Kök aralıklı ve kök aralıksız 5.3 mm kalınlığındaki alın kaynaklı birleştirmelerin yorulma ömrünün teorik olarak açıklanması için mikro-destek etkisi konsepti çevrim sayısı bölgesi ($10^4 < N < 10^7$) üzerinde uygulanmıştır. Farklı mikro iç yapılara sahip (esas malzeme, kaynak metal, ısı tesiri altındaki bölge) biçimlenebilen magnezyum AZ31 alaşımından numunelerle konseptin uygulama imkânı ve sınırları gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum alaşımı, kaynaklı birleştirme, yorulma dayanımı, mikro-destek etkisi konsepti, farzedilen eşdeğer yarıçap

APPLICATION OF THE MICRO-SUPPORT CONCEPT FOR ASSESSMENT OF THE FATIGUE STRENGTH OF THE WELDED JOINTS OF THE MAGNESIUM WROUGHT ALLOY AZ31

ABSTRACT

With regard to an application of magnesium welded joints in the automotive industry, the objective of this work was to evaluate existing fatigue design concepts for a fatigue life assessment. In the investigation presented here the micro-support concept was applied for the theoretic calculation of the fatigue strength for butt welds with 5.3 mm thickness with and without internal gap across the whole cycle range of the SN-curve ($10^4 < N < 10^7$). It was possible to highlight the possibilities and limits of the concept for the magnesium wrought alloy AZ31 with different microstructures – parent metal, weld metal and heat affected zone.

1. GİRİŞ

Kaynaklı birleştirmelerin dalgalı dayanımı hakkında güvenli ve doğru olan hükümlere varılabilmesinde, denenmiş güvenilir nominal gerilme konseptini tamamlayıcı veya alternatif olacak şekilde yapısal gerilme konsepti ve lokal (yerel) hesaplama konseptleri ortaya çıkmıştır [1]. Yapısal gerilme konsepti nominal gerilme konsepti karşısında önemli avantajlar sunmakla beraber, kaynak dikiş bölgesinin geometrik oluşumuna bağlı olan tanım değerlerinden dolayı da bir dezavantaj göstermektedir. Ayrıca çeşitli alaşım cinslerinin farklı davranışları da yetersiz olarak dikkate alınmaktadır. Lokal konseptler altında mikro destek etkisini [2] temel alan çentik gerilmesi konsepti [3, 4] kaynaklı birleştirmelerin lokal iç yapı durumlarını dikkate aldığı için en uygun hesaplama konsepti olarak görülmektedir.

Geçtiğimiz yıllarda, yapı çelikleri ve alüminyum alaşımlarından dikişli kaynaklı birleştirmelerinin yorulma dayanımı tahminleri dikiş geçiş bölgesi ve kaynak kökü çentiklerinde, düşük çevrim sayıları bölgesinden yüksek çevrim sayıları bölgesi ($10^4 < N$) aralığında incelenmiş ve endüstride tasarım ve üretimin optimizasyonunda mümkün bir ölçülendirme yolu olarak kullanılan hesapsal yorulma dayanımı analizi için bir yöntem olarak kullanılmıştır [1,3-6]. Bu yöntemin temeli farzedilen yarıçapa bağlı bir mikro desteğin tanımlanmasıdır. Magnezyumdan kaynaklı birleştirmeler için bu yöntemin uygulanabilirliği çok yeni olarak yüksek çevrim sayıları bölgesi ($N > 10^6$) yanında, zaman dayanımı bölgesi ($5.10^4 < N < 10^6$) ve kısa zaman dayanımı bölgesi için de ($N < 5.10^4$) incelenmiştir [7,8]. Bu çalışmada bu araştırma projesi ve doktora tezinden elde edilen bazı sonuçlar sunulmuştur.

Çentik gerilmesi konsepti, yerel kaynak dikiş geometrisini dikkate alarak kaynaklı birleştirmelerde meydana gelen en büyük çentik gerilmelerini değerlendirmektedir. Bunun için yerel gerilmeler hasar açısından en kritik yer için elastisite teorisi esaslarına dayanılarak hesaplanmakta ve yerel olarak dayanılabilecek gerilmelerle karşılaştırılmaktadır. Bu şekilde öncelikli olarak, malzeme değişken dayanımı yardımıyla çentikli yapı elamanlarının ve kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımı tahminine hizmet etmektedir. Çentik gerilmesi konseptinin uygulanması için, dikiş geçiş bölgesinden dolayı meydana gelen yerel gerilme tepelerinin elde edilmesinde farklı tertipler oluşturulmuştur. Bunların içinde özellikle Neuber tarafından formüle edilen mikro yapısal destek etkisi konsepti [2] daha sonraki gelişmelerde Radaj tarafından kullanılmıştır [1,3,4]. Buna göre kaynaklı birleştirmeler için esas olan çentik etkisi sayısı, gerçek çentik yarıçapı ρ yerine daha büyük hayali bir çentik yarıçapı kullanılmak suretiyle elde edilmektedir. Burada mikro yapısal destek etkisi faktörü “s” kullanılan mukavemet hipotezine ve zorlanma şekline bağlıdır. Şekil Değiştirme Enerjisi Hipotezinin uygulanması halinde, çentikli düz çubuklar için çekme ve eğme zorlanmasında $s=2,5$ 'tur. Eşdeğer yapısal uzunluk ρ^* , çentik dibindeki mukavemet etkili gerilmenin hesaplanmasına yaramaktadır. Bu gerilme eşdeğer yapısal uzunluk üzerindeki ortalama gerilmeden elde edilmektedir. Bunun yanında mukayese gerilmesi için içine sokulduğunda, yerel zorlamanın çok eksenselliği de hesaba katılmış olmaktadır [2]. Eşdeğer yapısal uzunluk ρ^* , deneysel olarak elde edilen çentikli çubuk yorulma dayanımından elde edilmektedir. Bu değer (ρ^*), malzemenin yapısına ve bileşimine (örneğin malzeme grubuna ve akma sınırına) bağlı uzunluk boyutlu bir malzeme sabiti olduğundan, bu tanım değeri ile yerel malzeme davranışının etkisi dikkate alınabilir (esas malzeme, ısı tesiri altındaki bölge, kaynak metali).

Eşdeğer yapısal uzunluğun (ρ^*) belirlenmesinde kullanılan farklı yöntemler, Neuber'e göre mikro destek etkisini dikkate alan çentik faktörü K_N 'nin çentik etki sayısı K_f 'ye eşit olduğu esasına dayanmaktadır.

$$K_N = K_f = \frac{\sigma_{a,n}(K_t=1,0)}{\sigma_{a,n}(K_t)1,0} \quad (2)$$

Hesaplamaya mikro yapısal etkiyi dahil etmek için Neuber [2] ve Radaj [1,3,4] aşağıdaki bağıntıyı sunmaktadır.

$$K_N = 1 + (K_t - 1) \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_f}} \quad (3)$$

Eşitlik (1) ve (2) yardımıyla eşdeğer yapısal uzunluk eşitlik (4)'e göre hesaplanmaktadır.

$$\rho^* = \frac{\rho}{s} \left[\frac{(K_t - 1)^2}{(K_f - 1)^2} - 1 \right] \quad (4)$$

2. MALZEME, NUMUNE FORMU VE DENEYLERİN YAPILMASI

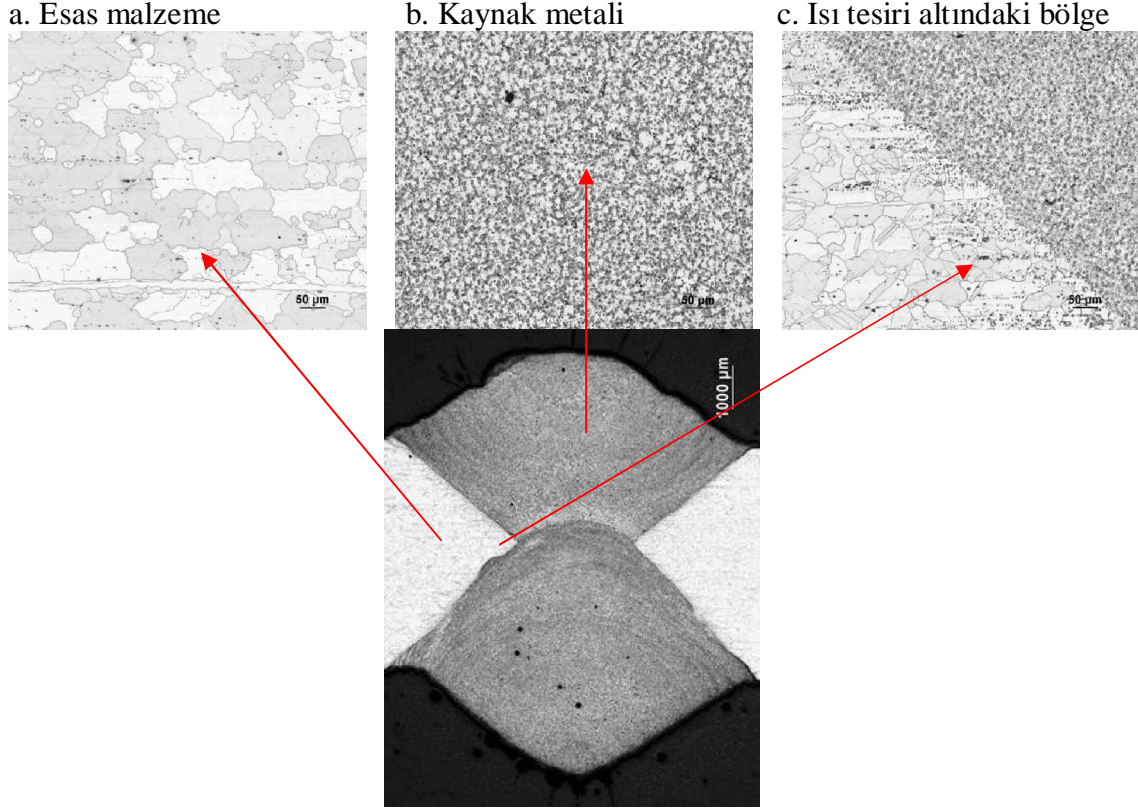
Araştırmada 5,3 mm kalınlığında biçimlenebilen magnezyum alaşımı AZ31 kullanılmıştır. Çizelge 1 ve çizelge 2'de bu malzemeye ait kimyasal bileşim ve mekanik özellikler verilmiştir. Şekil 1'de kök aralıksız bir alın dikişinin mikro yapısı gösterilmektedir.

Çizelge 1. Magnezyum alaşımı AZ31'in kimyasal bileşimi (%'de ağırlık)

Malzeme	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Mg
Magnezyum AZ31	2,850	0,050	0,003	0,001	0,290	0,001	0,950	Gerisi

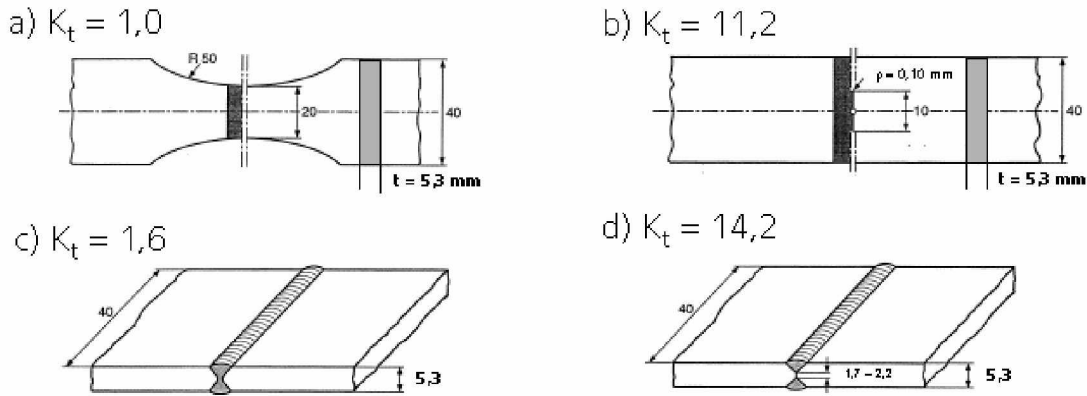
Çizelge 2. Magnezyum alaşımı AZ31'in mekanik özellikleri

Malzeme	Kalınlık d [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Sertlik [0,5HV]		
					EM	KM	ITAB
AZ31 (MgAl3)	5,3	197	247	14,7	55	58	53



Şekil 1. Kök aralıksız alın dikişinde iç yapı dokümantasyonu

Eksenel yorulma dayanımı davranışını elde etmek için değişken zorlamalar altında ($R_\sigma = -1$) esas malzeme, kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgeden çentiksiz ($K_t = 1,0$) ve çentikli ($K_t = 11,2$) düz numunelerle (Şekil 2) gerçekleştirilmiştir. Bu üç malzeme durumuna ait Wöhler eğrilerinden (Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5), Radaj'a [3] göre eşdeğer yapısal uzunluklar ρ^* ve buradan farzedilen çentik yarıçapları elde edilmiştir (Çizelge 3). Zorlama parametresi olarak nominal gerilme genliği ve hasar kriteri olarak çatlak başlangıcı ve kırılma çevrim sayısı alınmıştır.

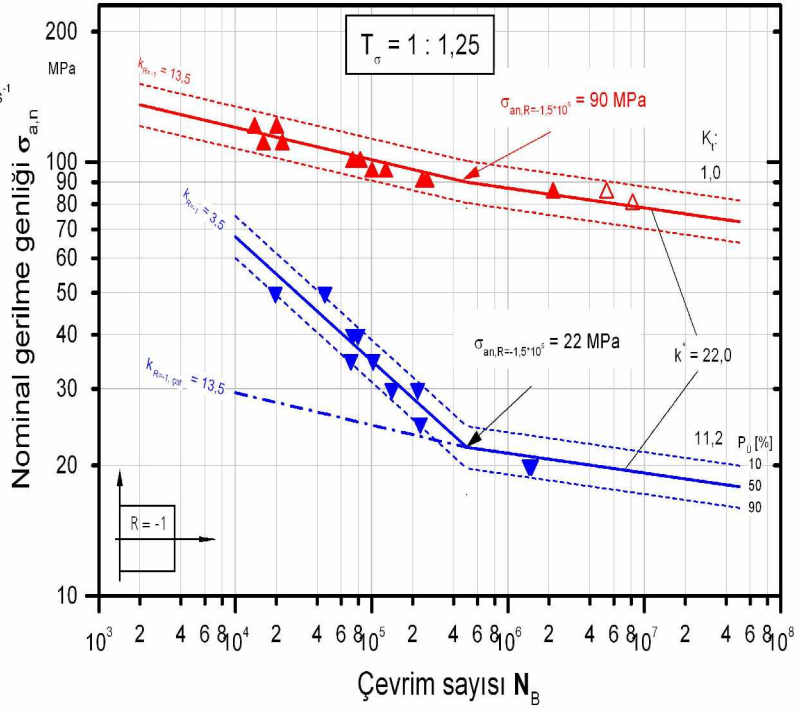


Şekil 2. Yorulma dayanımı deney numuneleri; a) Çentiksiz düz numune ($K_t=1,0$) b) Çatlak şeklinde çentiğe sahip düz numune ($K_t=11,2$) c) Kök aralıksız alın dikişi ($K_t=1,6$) d) Kök aralıklı alın dikişi (keskin çentikli, $K_t=14,2$)

Malzeme: Magnezyum AZ31
Durum: Esas malzeme
Numune formu: Düz numune, t = 5,3 mm
Yükleme: eksenel, yük kontrollü, f=20 s⁻¹
Ortam: Hava, oda sıcaklığı

Formsayısı: $K_t = 1,0$
▲ R = -1, Kırılma
△ R = -1, Kırılmadan kalan

Formsayısı: $K_t = 11,2$
▼ R = -1, Kırılma
▽ R = -1, Kırılmadan kalan

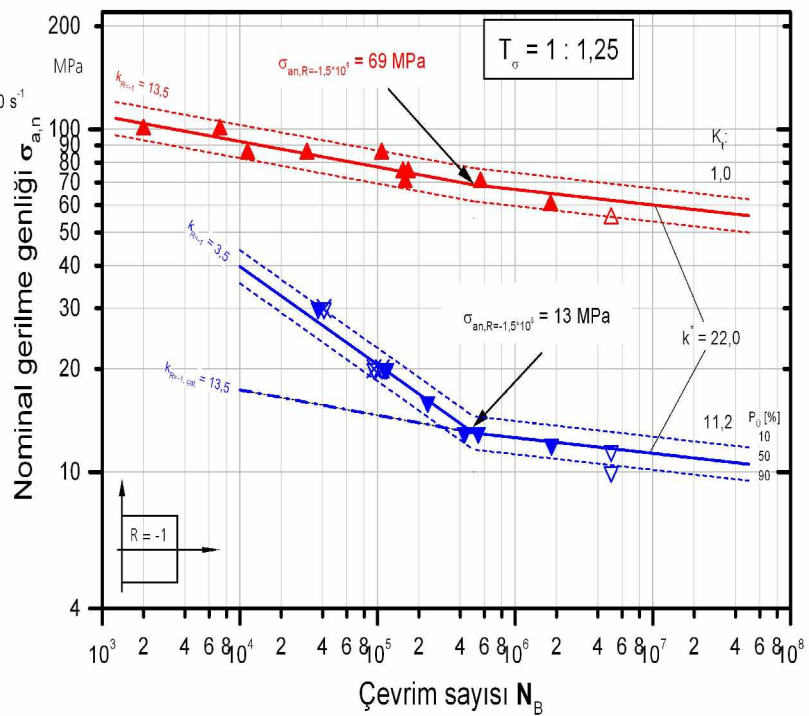


Şekil 3. Esas malzemenin R = -1 için Wöhler (σ - N) diyagramı

Malzeme: Magnezyum AZ31
Durum: Kaynak metali
Numune formu: Düz numune, t = 4,6 mm
Yükleme: eksenel, yük kontrollü, f=20 s⁻¹
Ortam: Hava, oda sıcaklığı

Formsayısı: $K_t = 1,0$
▲ R = -1, Kırılma
△ R = -1, Kırılmadan kalan

Formsayısı: $K_t = 11,2$
▼ R = -1, Kırılma
▽ R = -1, Kırılmadan kalan
⊗ R = -1, Tekrar yüklemeye ile kırılma



Şekil 4. Kaynak metalinin R = -1 için Wöhler (σ - N) diyagramı

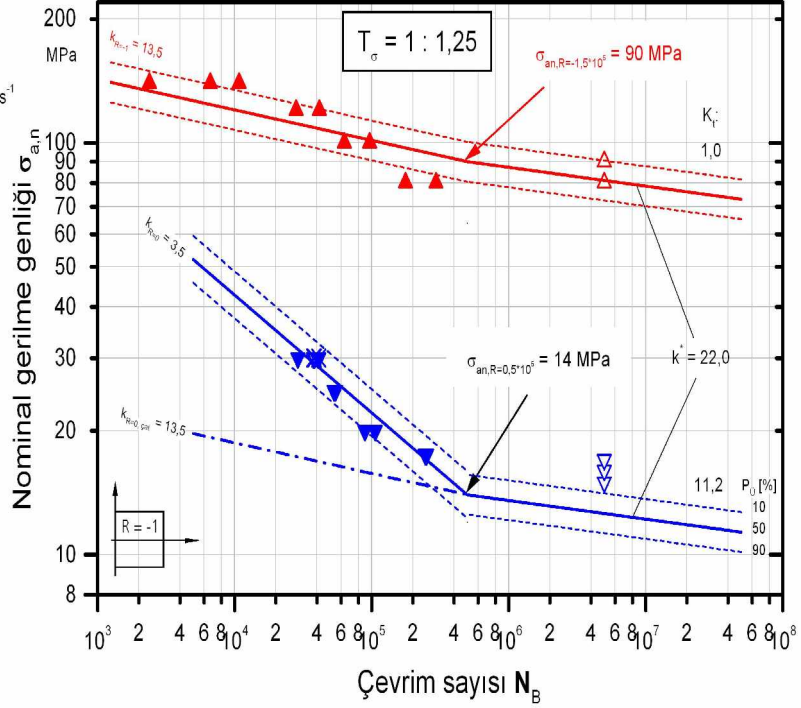
Malzeme: Magnezyum AZ31
 Durum: Isı tesiri altındaki bölge
 Numune formu: Düz numune, t = 4,6 mm
 Yükleme: eksenel, yük kontrollü, f=20 s⁻¹
 Ortam: Hava, oda sıcaklığı

Formsayı: K_t = 1,0

- ▲ R = -1, Kırılma
- △ R = -1, Kırılmadan kalan
- ⊗ R = -1, Tekrar yükleme ile kırılma

Formsayı: K_f = 11,2

- ▼ R = -1, Kırılma
- ▽ R = -1, Kırılmadan kalan
- ⊗ R = -1, Tekrar yükleme ile kırılma

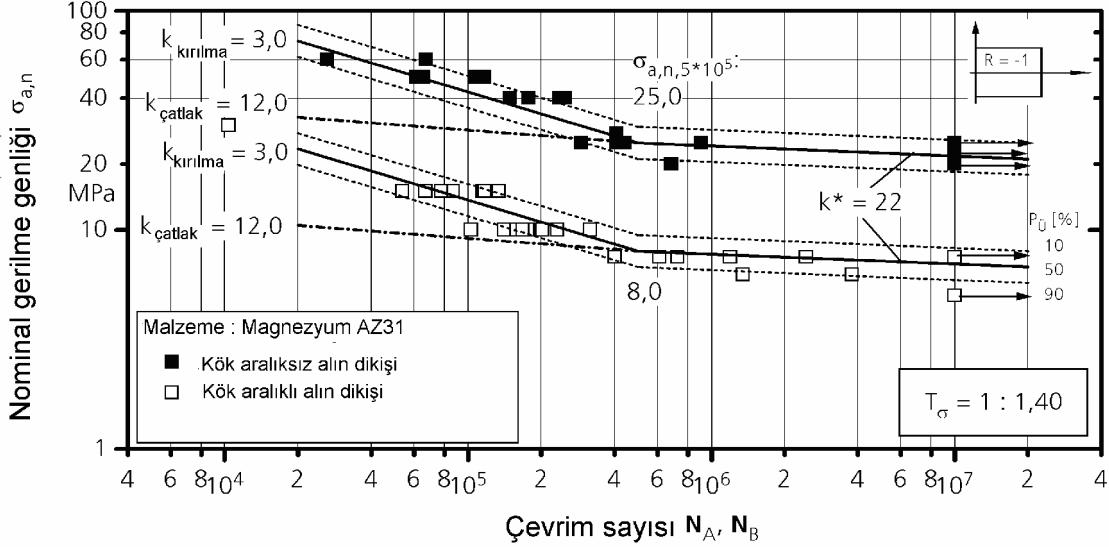


Şekil 5. Isı tesiri altındaki bölgenin R = -1 için Wöhler (σ - N) diyagramı

Çizelge 3. Radaj'a göre eşdeğer yapısal uzunluklar (ρ*) ve farzedilen eşdeğer yarıçaplar (ρf)

					Radaj'a göre	
		ρ [mm]	K _t	K _f	ρ* _{Radaj} [mm]	ρ _{f, Radaj} [mm]
R = -1	Esas malzeme	0,10	11,2	4,09	0,40	1,00
	Isı tesiri altındaki bölge	0,10	11,2	6,43	0,10	0,25
	Kaynak metali	0,10	11,2	5,31	0,18	0,45

Mikro destek etkisi konseptinin uygulanabilirliğini kontrol edebilmek için tek kademeli değişken yüklemeler altında (R_σ = -1) çift taraflı kaynaklanmış farklı çentik şiddetlerindeki birleştirmelerle yorulma dayanımı deneyleri yapılmıştır, Şekil 6. Magnezyum AZ31 (MgAl3) alaşımından kök aralıksız ve enine dikmeli numunelerin kaynaklanması mekanize olarak MIG (Metal-Inert-Gas) ve kök aralıklı alın birleştirmelerin kaynaklanması WIG (Wolfram-Inert-Gas) kaynak yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir [9]. Her iki kaynaklı birleştirme şekline - kök aralıksız ve kök aralıklı alın dikişi- ait çentik form sayıları sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmiştir.



Şekil 6. Değişken yüklemeler altında Magnezyum AZ31 alaşımından kök aralıksız ve kök aralıklı alın kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımı

3. YORULMA DAYANIMI SONUÇLARI

Değişken zorlamalar altında ($R_\sigma = -1$) üç farklı malzeme durumu esas malzeme, kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgeden, çentiksiz ve çatlak şeklinde çentikli ($K_t = 11,2$) düz numunelerle gerçekleştirilen yük kontrollü yorulma dayanım değerlerinin sonuçları Şekil 3, 4 ve 5'te gösterilmiştir. Zorlama parametresi olarak nominal gerilme genliği ve hasar kriteri olarak çatlak başlangıcı ve kırılma çevrim sayısı alınmıştır. Esas malzemenin, kaynak metalinin ve ısı tesiri altındaki bölgeden düz numunelerin Wöhler eğrileri için müşterek bir saçılma bandı $T_\sigma = 1 : 1,25$ alınmıştır. Müşterek saçılma ölçülerinin, bükülme noktalarının ve eğimlerin alınması standartlaştırılmış Wöhler eğrileri yöntemine dayanmakta [10] olup alüminyum ve magnezyumdan kaynaklı birleştirmelerde elde edilen tecrübe değerlerini desteklemektedir. Wöhler diyagramlarının bükülme noktası müştereken $N_k = 5 \cdot 10^5$ olarak belirlenmiştir. Bükülme noktasından sonra da yorulma dayanımındaki %10 düşme mutlaka hesaba alınmalıdır (bükülme noktasından sonra her on dekada, örneğin magnezyum alaşımlarında bükülme noktası olarak belirlenen $5 \cdot 10^5$ çevrim sayısından $5 \cdot 10^6$ çevrim sayısına gidildiğinde). Ancak bu düşme zaman dayanımı bölgesindeki düşmeden daha az olmaktadır. Daha önceleri varsayıldığı gibi, belirgin bir sürekli dayanım (yorulma dayanımı) ne çelik, ne alüminyum ve ne de magnezyum için mevcut değildir [11].

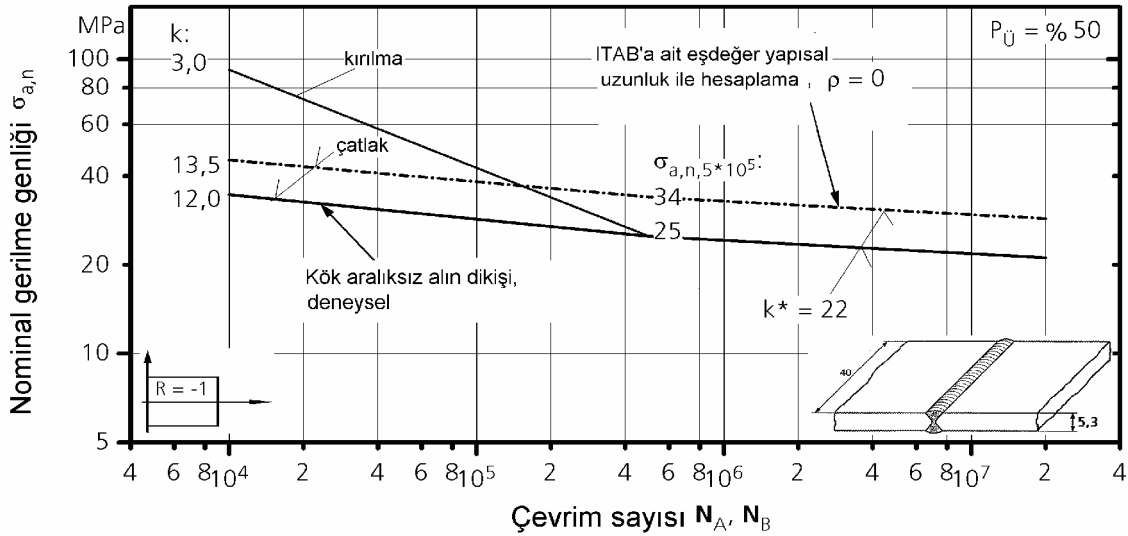
Hem çentiksiz hem çatlak şeklinde çentiklere sahip numunelere ait çatlak başlangıcı Wöhler eğrilerinin eğimleri eşit olduğundan 10^4 ve 10^7 arası çevrim sayıları bölgesinde esas malzeme, kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge için Radaj'a [1] göre ve eşitlik 4'te elde edilen eşdeğer yapısal uzunluklar sabit değerler almaktadır, Şekil 3-5. Eşdeğer yapısal uzunluk (ρ^*) değerleri burada 0,10 mm ve 0,40 mm arasında ve bunlara ait farzedilen yarıçaplar da 0,25 mm ve 1,0 mm arasında ($\rho = 0$ mm ve s (mikro destek etkisi faktörü)=2,5 için) bulunmaktadır, Çizelge 3.

Kök aralıksız alın alın dikişi (çentik şiddeti zayıf) ve kök aralıklı alın dikişi (çentik şiddeti yüksek) kaynaklı birleştirmelerde saçılma bandı $T_\sigma = 1 : 1,40$, eğim sayısı bükülme noktasına kadar $k=3$ olmaktadır. Bükülme noktası $N_k = 5 \cdot 10^5$ çevrim sayısında bulunmakta olup bu noktada kök aralıksız alın dikişi için nominal gerilme genliği $\sigma_{a,n} = 25$ MPa ve kök aralıklı alın dikişi için $\sigma_{a,n} = 8$ MPa değerini vermektedir, Şekil 6. Bükülme noktasından sonra Wöhler eğrileri $k^* = 22,0$ eğimle devam etmektedir.

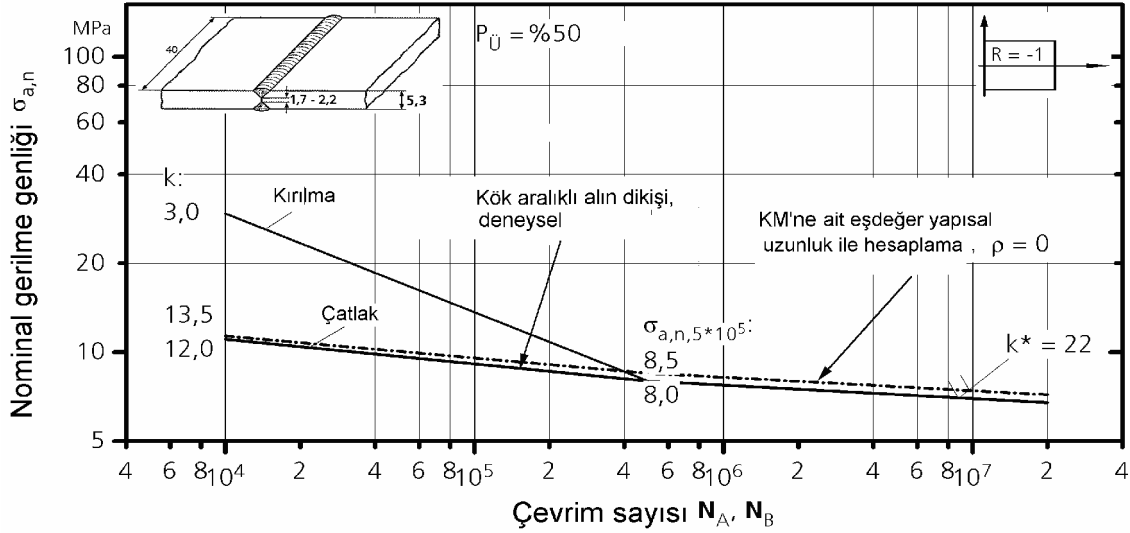
4. MİKRO DESTEK ETKİSİ KONSEPTİNİN UYGULANMASI

Magnezyum alaşımı AZ31 için malzeme iç yapı durumları esas malzeme, kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge düz numunelerinden elde edilen eşdeğer yapısal uzunluklardan kök aralıksız ve kök aralıklı kaynaklı birleştirmeler için Wöhler eğrileri elde edilmiştir. Burada çentik yarıçapı olarak en uygunsuz (kötü) $\rho_r = 0$ mm değeri kabul edilmiştir. Yani çentiğin artık çatlak haline geldiği varsayılmaktadır. Kırılma ve kesit resimlerinin değerlendirilmesi sonucunda kırılma başlangıç yerleri orada mevcut olan malzeme durumlarına (iç yapı durumları) göre düzenlenmektedir. Buna göre kök aralıksız alın birleştirmelerinde kırılma başlangıç yeri ısı tesiri altındaki bölgede (dikiş geçiş bölgesi çentiklerinde) bulunmaktadır. Kök aralıklı alın birleştirmelerinde ise kırılma başlangıç yeri kaynak metalinde (dikiş kökü çentiklerinde) gerçekleşmektedir.

Şekil 7’de şiddetli çentikler içermeyen kök aralıksız alın dikişi için deneysel ve hesapsal yolla elde edilen Wöhler eğrileri mukayese edilmektedir. Bükülme noktası $N_k=5.10^5$ çevrim sayısında ısı tesiri altındaki bölge düz numunelerinden (kök aralıksız alın dikişleri ısı tesiri altındaki bölgeden kırılmaktadır) elde edilen eşdeğer yapısal uzunluk sayesinde hesapsal gerilme genliği $\sigma_{a,n} = 34$ MPa olarak bulunurken, deneysel yolla bulunan değer $\sigma_{a,n} = 25$ MPa olmaktadır. Şekil 8’de keskin çentikler içeren kök aralıklı alın dikişi için mukayese yapılmıştır. Bu çentik durumu için bükülme noktası $N_k=5.10^5$ çevrim sayısında hesapsal gerilme genliği $\sigma_{a,n} = 8,5$ MPa ve deneysel olarak belirlenen değer $\sigma_{a,n} = 8$ MPa olmaktadır.



Şekil 7. Magnezyum AZ31 alaşımı için mikro destek etkisi konseptine göre hesaplanan ve kök aralıksız alın kaynaklı birleştirmelerin deneysel olarak elde edilen Wöhler eğrilerinin mukayese edilmesi



Şekil 8. Magnezyum AZ31 alaşımı için mikro destek etkisi konseptine göre hesaplanan ve kök aralıklı alın kaynaklı birleştirmelerin deneysel olarak elde edilen Wöhler eğrilerinin mukayese edilmesi

Mikro destek etkisi konseptine göre kaynak metalinin tanım değerleriyle hesaplanmış Wöhler eğrileriyle burada incelenen kök aralıklı alın dikişi birleştirmeleri için elde edilen deneysel yorulma dayanımı arasındaki sapmalar kök aralıksız alın birleştirmelerde olduğundan açık olarak daha düşük olmaktadır, Şekil 7. Kök aralıksız alın dikişlerinde ısı tesiri altındaki bölge tanım değerleriyle hesaplanan Wöhler eğrilerinde sapmalar açıkça daha yüksektir, Şekil 8. Sabit genlikli değişken yüklemeler altında kök aralıksız alın dikişli birleştirmelerin dayanılabilir yorulma dayanımı %36'lık bir sapma ile güvenli olmayan tarafta ve kök aralıklı alın dikişlerinde ise %6'lık bir sapma ile daha isabetli olarak tahmin edilmektedir.

5. SONUÇLAR

Kaynak dikişi bölgesinde hasarın ortaya çıktığı ilgili malzeme veya malzeme durumu için doğru eşdeğer yapısal uzunluklar ρ^* biliniyorsa, magnezyum alaşımından kaynaklı birleştirmelerde mikro destek etkisi konseptiyle çentik dibi zorlamasının hesaplanması deneysel sonuçlarla az ya da çok uygunluk göstermektedir. Bu eşdeğer yapısal uzunluklar ρ^* , çentiksiz ve keskin çentikli numunelerle gerçekleştirilen Wöhler deneyleri ile deneysel olarak, mevcut iç yapı durumları için büyük masraflarla elde edilmektedir. İncelenen durumlarda yorulma dayanımı davranışının tahmini için kaynak metalinin tanım değerleri en doğru olmaktadır. Ancak bu incelenen durumlarda, keskin çentikli kaynaklı birleştirmelerin söz konusu olmasıyla ilgilidir. Keskin olmayan çentiğe sahip kaynaklı birleştirmelerde mikro destek konsepti sınırlı olarak uygulanabilmektedir. Bu da, hesaplanan yorulma dayanımı ile deneysel yorulma dayanımı arasında daha büyük sapmalarla kendini göstermektedir.

Bütün malzeme durumları için müşterek bir eşdeğer yapısal uzunluk ρ^* olmadığı için mikro destek etkisi konsepti, magnezyum alaşımlarından kaynaklı birleştirmeler için her zaman geçerli olabilecek bir konsept olarak görülmemektedir. Bu nedenle mikro destek etkisi konseptiyle olduğundan daha kolay değerlendirilebilecek şekilde müşterek bir farzedilen çentik yarıçapının bulunabilmesine çalışılmalıdır [12,13].

TEŞEKKÜR

Araştırmalar ‘Biçimlenebilen Magnezyum Alaşımlarından Kaynaklı Yapı Elemanlarının Yorulma Dayanımı Değerlendirmelerinde Çentik Gerilmesi Yönteminin Pratik Olarak Uygulanması İçin Esasların Elde Edilmesi’ isimli proje [7] kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projemizi destekleyen Alman Kaynak Tekniği Birliğine (Deutscher Verband für Schweisstechnik, DVS-Nr. 9.036) ve Endüstriyel Araştırma Birliği Çalışma Grubu’na (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen ‘Otto von Guericke’ e.V., AiF-Nr. 13.457 N) verdikleri destek için çok teşekkür ederiz. Biçimlenebilen magnezyum alaşımı AZ31’i tedarik ettikleri için Meinerzhagen kentinde bulunan Otto Fuchs Firmasına ve ilave kaynak metali magnezyum alaşımı AZ61 A’yı tedarik ettikleri için Neuenrade kentinde bulunan Elisental Firması’na çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- 1 Radaj, D., Sonsino, C. M.: Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches. Abington Publishing, Cambridge (1998)
- 2 Neuber, H.: Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen. Konstruktion 20 (1968) Nr. 7, S. 245-251
- 3 Radaj, D.: Ermüdungsfestigkeit - Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (1995)
- 4 Radaj, D.: Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures Abington Publishing, Cambridge 1990
- 5 Morgenstern, C.; Sonsino, C. M.; Kotowski, J.; Dilger, K.; Sorbo, F.: Anwendung des Konzeptes der Mikrostützwirkung zur Schwingfestigkeitsbewertung geschweißter Aluminiumverbindungen aus AlMg4,5Mn und AlMgSi1 T6. Schweißen und Schneiden 56 (2004), 10, S. 538-544
- 6 Morgenstern, C.; Sonsino, C. M.; Kotowski, J.; Dilger, K.; Sorbo, F.: Application of the Micro - Support Concept for the Assessment of the Fatigue Strength of Welded Aluminium Joints of AW-5083 (AlMg4.5Mn) and AW-6082 T6 (AlMgSi1 T6). Welding and Cutting 4 (2005), S. 318-322
- 7 Karakaş, Ö., Morgenstern, C., Sonsino, C.M., Hanselka, H., Vogt, H.M., Dilger, K., Grundlagen für die praktische Anwendung des Kerbspannungskonzeptes zur Schwingfestigkeitsbewertung von geschweißten Bauteilen aus Magnesiumknetlegierungen. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt, Bericht Nr. FB-232 (2007). Institut für Füge- und Schweißtechnik ifs, TU Braunschweig, ifs-Schriftenreihe Nr. 17 (2007).
- 8 Karakaş, Ö., Biçimlenebilen Magnezyum Alaşımlarından Kaynaklı Yapı Elemanlarının Yorulma Dayanımı Değerlendirmelerinde Çentik Gerilmesi Yönteminin Uygulanması, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006
- 9 Rethmeier, H.; Wohlfahrt, H.; Schütz, M.; Draugelates, U.: Metallschutzgasschweißen von Leichtmetallwerkstoffen am Beispiel von Magnesiumlegierungen. Institut für Schweißtechnik (ifs), Braunschweig; Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren (ISAF), Clausthal-Zellerfeld. Abschlußbericht, AiF-Nr. 11.656 N, (2001), nicht veröffentlicht
- 10 Haibach, E.: Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. VDI-Verlag, Düsseldorf (1989)
- 11 Sonsino, C.M.: “Dauerfestigkeit“ – Ein Fiktion Konstruktion 4 (2005), S. 87-92
- 12 Olivier, R.; Köttgen, V.B.; Seeger, T.: Schwingfestigkeitsnachweis für Schweißverbindungen auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen - Schweißverbindungen I, Abschlussbericht, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt, Forschungsheft 143 (1989)
- 13 Morgenstern, C.; Sonsino, C. M.; Hobbacher, A.; Sorbo, F.: Fatigue Design of Aluminium Welded Joints by the Local Stress Concept with the Fictitious Notch Radius of $r_f = 1$ mm. International Journal of Fatigue 28 (2006), S. 881 - 890