


Sıcak daldırma galvanizleme işleminin ıslah edilmiş ve edilmemiş AISI 4340 çeliğinin yorulma dayanımına etkisi

The effect of hot dip galvanizing process on the fatigue properties of hot rolled and quenched-tempered AISI 4340 steel

Şule Yıldız ŞİRİN* 

¹Makine Bölümü, Asım Kocabıyık Meslek Yüksekokulu, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
fksirin@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.06.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 27.12.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.30633

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada ıslah edilmemiş ve ıslah edilmiş AISI 4340 çeliğine uygulanan sıcak daldırma galvanizleme işleminin yorulma dayanımına etkisi incelenmiştir. Ayrıca galvaniz kaplamanın faz yapısı, fazların kalınlıkları ile yüzey sertlik ve pürüzlülük değerleri de çalışılmıştır. Galvanizleme sonrası, sıvı çinkonun yüksek yüzey gerilimi nedeniyle parçanın yüzey pürüzlülüğü azalması olumlu etki iken, çinkonun düşük sertliği nedeniyle yüzey sertliğinin azalması ve yorulma dayanımındaki düşüş olumsuz etkileridir. AISI 4340 çeliğine galvanizleme öncesi görmüş olduğu ıslah işlemlerinden bağımsız olarak, her iki grupta elde edilen yüzey sertlik, yüzey pürüzlülük, kaplama kalınlıkları ve kaplamayı oluşturan fazlar benzerdir. Galvanizleme sonrası yorulma dayanımındaki düşüş ıslah edilmiş, yüksek dayanımlı çelikte daha yüksek olsa da ıslah işleminin yorulma dayanımına olumlu katkısı halen devam etmektedir.

Anahtar kelimeler: Sıcak daldırma galvanizleme, Yorulma dayanımı, Galvaniz kaplama yapısı

Abstract

In this study, the effects of hot dip galvanizing treatment on the fatigue strength of the hot rolled and quenched-tempered AISI 4340 steel were examined. The phase structure, phase thicknesses, surface hardness and roughness values of the galvanized coating were also examined. While the reduction in surface roughness of the part due to the high surface tension of the liquid zinc after galvanization has a positive effect, the decrease in the surface hardness due to the low hardness of the zinc and the decrease in the fatigue resistance are adversely affected. The surface hardness, surface roughness, coating thicknesses and the morphologies of constituent phases of coating obtained in both groups are similar, irrespective of the treatments seen before galvanizing the AISI 4340 steel. Although the decrease in fatigue strength after galvanization is higher in QT steel, the positive contribution to fatigue resistance of the quenched and tempered process still continues.

Keywords: Hot dip galvanizing, Fatigue strength, Coating structure

1 Giriş

Sıcak daldırma galvanizleme, çelik malzemenin ergimemiş çinko banyosuna (445 °C-460 °C) daldırılması ile malzeme yüzeyinde çinko ve çinko alaşımlarından korozyona karşı koruyucu kaplama elde edilen kimyasal işlem olup 200 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır [1],[2]. Sıcak daldırma galvanizleme difüzyon kontrollü bir işlem olup malzeme ergimemiş çinko banyosuna daldırıldığında, malzeme sıcaklığı önce ergimemiş çinko banyo sıcaklığına erişir ve daha sonra difüzyon reaksiyonu ile bir dizi intermetalik Fe-Zn alaşım fazı oluşur [3]. Başlangıçta çok hızlı gerçekleşen bu reaksiyon daha sonra azalan bir hızla devam eder [1],[4]. Zn ve Fe'nin kimyasal bileşimi olan Fe-Zn alaşım fazlarının varlığı ve dağılımı ürünün özelliklerini belirlemekte [5] olup banyo ve altlık malzemenin kimyasal bileşimine, banyo ve altlık malzemenin sıcaklığına, daldırma süresine, soğutma hızına, altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğüne ve banyodan çekme hızına bağlıdır [1],[4]-[17].

Sıcak daldırma galvanizleme işleminde elde edilen çinko kaplama, kaplama yüzeyinden altlık malzemeye doğru Fe bakımından gittikçe zenginleşen ve farklı kalınlık ve özelliklere sahip bir dizi Fe-Zn intermetalik fazlardan oluşur [18]. Çinko kaplama; en dış yüzeyde saf çinko olarak adlandırılan eta (η -%0.03 Fe) ve sırasıyla, Fe içeriği artış gösteren intermetalik Fe-Zn bileşikleri olan zeta (ζ - %6-7 Fe), delta (δ - %8-13 Fe) ve gama (Γ - %18-31 Fe) fazlarından

oluşmaktadır [10],[11],[19]. Bu Fe-Zn fazlarının oluşumu ξ fazı ile başlamakta olup akabinde δ fazı ve sonrasında da Γ fazının oluşumu ile devam eder [1],[10]. Bu nedenle 450 °C'de, 300 sn.'den kısa sürelerde yapılan galvanizleme işleminde ξ fazının oluşumu kaplama yapısında baskın iken, daha uzun süreli işlemlerde δ fazı daha baskındır [1]. Fe-Zn fazlarının yapısal heterojenliği nedeniyle mekanik özellikleri de birbirinden büyük ölçüde farklıdır [3],[20],[21]. Fe-Zn alaşım tabakaları oldukça sert ve kırılgan olup mekanik olarak şekil alma (eğilme, bükülme vb.) kabiliyetleri oldukça sınırlı iken saf çinko tabakası ise alaşım tabakalarına göre daha yumuşak olup bu tip mekanik zorlanmalara karşı daha dayanıklıdır. Ayrıca galvanizleme işlemi sırasında ve sonrasında soğutma sırasında önemli çekme ya da basma artık gerilmeleri oluşur [5]. Galvanizleme sırasında oluşan η , ξ , δ ve Γ gibi fazların, farklı demir içeriği nedeniyle, molar hacmindeki değişim artık gerilmelerin artışına neden olur. Galvanizleme sonrası, soğutma sırasında, altlık malzeme ile Fe-Zn alaşım tabakalarının farklı termal genleşme katsayıları nedeniyle oluşan çekme artık gerilmelerinin şiddeti daha da büyük olup [3],[22], çinko kaplamanın katmanlarından en sert ve şekil alma kabiliyeti en düşük olan δ fazında ön-çatlakların oluşumuna neden olur [23]. Bu çatlaklar α/δ ara yüzeyine dik olarak ilerlerler [20].

Galvanizleme yüzey işlemi ürün imalatının son aşaması olduğundan, daha önce optimize edilmiş olan mekanik özellikleri değiştirmemelidir. Çinko kaplama sonrası, artan

akma dayanımı dışında çeliğin mekanik [4],[5],[20],[21] ve tokluk [2] özellikleri büyük ölçüde etkilenmemekte olup değişimin nedeni olarak 450 °C civarında uygulanan galvanizleme banyo sıcaklığının olumlu temperleme etkisini gösteren çalışmalar mevcuttur [2],[21]. Sıvı çinkonun yüzey gerilimi yüksek olduğu için galvanizleme sonrası parçanın yüzey pürüzlülüğü de azalır [4],[24].

Galvanizli çelikler; kaplama yüzey kristallerinin görünümü, üstün korozyon direnci, şekillendirilebilirliği, pullanmaya karşı direnci ve altlık malzemeye yapışması ile karakterize edilmekte olup bu özellikler kaplamanın kalınlığına, mikroyapısına ve yüzey kalitesine bağlıdır [4],[9]. Çinko kaplamanın korozyona karşı korunması üç farklı şekilde olup bunlar; çinko tabakasının ortama karşı bariyer etkisi, zamanla oluşan çinko korozyon ürünlerinin ikincil bariyer etkisi ve kaplamada bir süreksizlik olduğunda kendini kurban ederek çeliği katodik olarak korunmasıdır [4],[7],[25],[26]. Korozyona karşı koruma tabakanın toplam kalınlığı ile orantılı olup saf çinko ve Fe-Zn intermetalik fazların korozyon direnci ayrıdır [4]. Sıcak daldırma galvaniz kaplama çeliklerin korozyona karşı korunması için en verimli ve en ucuz yöntemlerden biri olduğundan otomobil, elektrikli ev aletleri ve inşaat gibi endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Otomotiv sektöründe kullanılan galvanizli çelikler sadece mükemmel korozyon direnci değil, aynı zamanda şekil alabilme, kaynaklanabilme, fosfatlanabilme ve boyanabilme gibi özellikleri de karşılamalıdır [8]. Galvanizlemenin otomotiv sektöründe tipik uygulaması arka aks taşıyıcı gibi şasi parçaları da olduğundan, yorulma dayanımı da belirleyici bir tasarım kriteridir [4],[27].

Galvanizleme nedeniyle, çevrimsel yük altındaki çeliklerin yorulma dayanımı azalır [4]-[6],[19]-[21],[27]. Yorulma dayanımındaki azalmanın nedeni olarak bazı araştırmacılar çinko kaplama ve altlık malzemenin soğuma sırasında farklı ısıl kendini çekme sonucu δ -tabakasında oluşan ön-çatlakların çinko kaplama boyunca ilerleyerek altlık malzemeye ulaşması ve çatlak ilerlemesinin daha düşük gerilmelerde olduğu belirtirken [19],[27],[28], bazı araştırmacılar da yorulma çevrimi sırasında oluşan çatlaklar nedeniyle olduğu belirtilmiştir [3],[21]. Yorulma çatlakları, genellikle yüzeyde başladığından yorulma dayanımı kaplama kalınlığı ve kaplamadaki fazların morfolojisine bağlıdır [3],[21]. Galvaniz kaplama kalınlığının yorulma dayanımına etkisi araştırılmış olup kaplama kalınlığı için bir eşik değerin olduğu, bunun aşılması ile yorulma dayanımının azaldığı ve kaplama kalınlığının artması ile yorulma dayanımındaki düşüşün arttığı, bunun nedeninin de kaplamadaki çatlak yoğunluğunun artması olduğu belirtilmiştir [20],[27]. Yapılan çalışmaların bir kısmında da kaplama kalınlığı ve onu oluşturan intermetalik fazların kalınlığı ile yorulma dayanımı arasında belirgin bir ilişki olmadığı belirtilmiştir [5]. Galvanizli çeliklerde, çeliklerin mekanik dayanımı ile yorulma dayanımı arasında bir ilişki olup olmadığı hakkında yapılan pek çok çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmalarda galvanizleme sonrası düşük ve orta alaşımlı çeliklerin yorulma dayanımında belirgin bir düşüş olmaz iken yüksek dayanımlı çeliklerin yorulma dayanımında büyük düşüş olduğu belirtilmiştir [5],[27]. Galvanizleme sonrası yorulma dayanımındaki düşüşün nedeninin işlem sırasında uygulanan galvaniz banyo sıcaklığından olmadığı, aksine galvaniz banyo sıcaklığında uygulanan ısıl işlem ile yorulma dayanımında bir miktar artış olduğu gözlenmiştir [21]. Esas olarak yüzey temizleme ve çinko kaplama işlemlerinden oluşan galvanizlemede, yüzey hazırlık

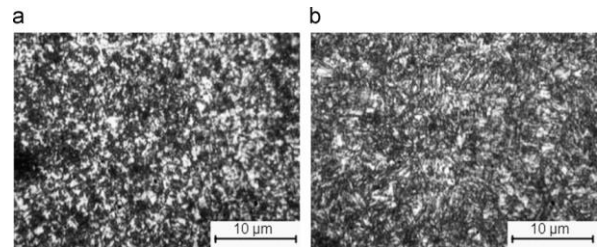
işlemlerinde asitleme yerine kum püskürtme yapılması durumunda galvanizleme sonrası yorulma dayanımındaki düşüş daha sınırlı olduğu Hedman tarafından yapılan çalışma ile ortaya konmuştur [5]. Cruz ve Ericsson [19], Swanger ve France tarafından ıslah edilmiş, sertleştirilmiş ve tavlama çeliklerde asitleme işleminin galvanizleme sonrası yorulma dayanımına etkisinin araştırıldığı ve yorulma dayanımındaki düşüşün en çok sertleştirilmiş çeliklerde, en az da tavlama çeliklerde olduğu belirtilmiştir.

Çevrimsel zorlanmalara maruz kalan parçalarda, yorulma dayanımında azalmaya neden olduğundan, uygulanması pek tercih edilmeyen galvanizlemenin korozyonlu-yorulma dayanımını arttırdığı belirlenmiştir [19],[23],[25]. Galvanizli çeliğinin havada ve deniz suyu ortamında yapılan yorulma deney sonuçları göstermiştir ki; havada yorulma dayanımı azalır iken, deniz suyu ortamında korozyonlu-yorulma dayanımı yüksek oranda artmıştır [19]. Ayrıca, 106 çevrime kadarki tüm çevrimlerde galvanizleme uygulanmış numunenin korozyonlu-yorulma dayanımının galvanizleme uygulanmamış numunenin havadaki yorulma dayanımından daha yüksek olduğu gözlenmiştir [19]. Diğer yüzey işlemleri olan iyon nitürleme ve lazer yüzey sertleştirme işlemleri ile karşılaştırıldığında ise galvanizli numunenin havadaki yorulma dayanımının en düşük, korozyonlu-yorulma dayanımı en yüksek olduğunu gözlemlenmiştir [19]. Bununla birlikte galvanizli saçlara yorulma öncesi uygulanan deformasyon sonucu artan çekme dayanımı ile ilişkili olarak havadaki yorulma dayanımı artarken [28] oluşan çatlakların etkisi ile korozyonlu-yorulma dayanımı azalmıştır [23]. Benzer şekilde galvaniz tabakasının kaldırılması ile havadaki yorulma dayanımı artar iken [28] korozyonlu-yorulma dayanımı galvaniz tabakanın yokluğundan dolayı belirgin olarak azalmıştır [23].

Bu çalışmada ıslah edilmemiş (HR) ve ıslah edilmiş (QT) AISI 4340 çeliğine uygulanan sıcak daldırma galvanizleme (HDG) işleminin yorulma dayanımına etkisi araştırılmış olup galvaniz kaplamanın faz yapısı, fazların dağılımı ile yüzey sertlik ve pürüzlülük değerleri de incelenmiştir.

2 Deneysel çalışma

Bu çalışmada aynı şarjın ürünü olan düşük alaşımlı AISI 4340 (34CrNiMo6) çeliği kullanılmış olup kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Sıcak haddelenmiş koşullardaki 22 mm çaplı AISI 4340 çeliğinin bir kısmına herhangi bir ısıl işlem uygulanmamış olup HR olarak kodlanmıştır. Malzemenin diğer kısmına ise 840 °C'de 30 dk. süre ile ostentleme işlemi uygulanmış, 65 °C sıcaklığındaki yağ banyosunda soğutulduktan sonra 600 °C'de 2 sa. süre ile temperlenerek ıslah edilmiş ve QT olarak kodlanmıştır (Tablo 2). HR ve QT koşullarına sahip AISI 4340 çeliğinin mikroyapıları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: Mikroyapı görüntüleri. (a): HR AISI 4340 (x1000), (b): QT AISI 4340 (x1000).

Tablo 1: Deneilerde kullanılan AISI 4340 (34CrNiMo6) çeliğinin kimyasal bileşimi.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N
0.38	0.26	0.69	0.016	0.004	0.80	0.22	1.69	0.023	0.19	0.007

Tablo 2: Farklı ön ısıtım işlem koşuluna sahip HR ve QT numunelerinin ön ısıtım işlem koşulları.

Grup	Isıl işlem adı	Isıl işlem koşulları
HR	Yumuşatma Tavı	Asil Çelik koşullarında yumuşatılmış
QT	Sertleştirilmiş	840 °C'de 30 dk. ısıtım işlem + yağda soğutma + 600 °C'de 2 sa. temperlenmiş

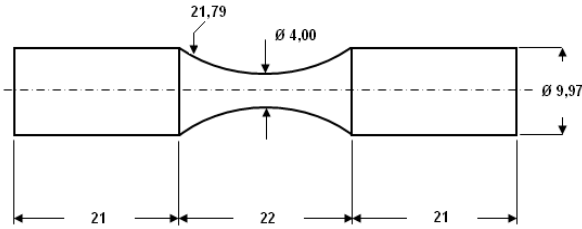
İki farklı ön ısıtım işlem koşuluna sahip HR ve QT AISI 4340 malzeme grubu oluşturarak, malzeme mikroyapı özelliklerinin galvanizleme öncesi ve sonrasında yorulma davranışına ve kaplama yapısına etkisinin incelenmesine olanak sağlanmıştır.

QT ve HR AISI 4340 çeliğine ait çekme deneyi numuneleri EN10002 standardına göre hazırlanmış olup elde edilen akma dayanımı ($R_{p0.2}$), çekme dayanımının (R_{pm}) ve % kesit daralması değeri (A) Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Farklı ön ısıtım işlem koşuluna sahip HR ve QT AISI 4340 çeliğine ait çekme deneyi ve sertlik ölçüm sonuçları.

Grup	Yüzey Sertliği Hv _{0.2}	Çekme Testi Sonuçları		
		$R_{p0.2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	A (%)
HR	210	412	636	23
QT	350	901	1008	14

Tüm yorulma deney parçaları, yüzey hatalarının getireceği olumsuz etkilerini gidermek amacıyla CNC torna tezgâhında, DIN 50113 standardına göre yüksek boyut ve yüzey hassasiyetinde hazırlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: Yorulma deney parçasının boyutları.

Galvanizleme esas olarak, yüzey temizleme ve çinko kaplama işlemlerinden oluşur. Metal yüzeyindeki tufal, pas, boya ve yağ gibi yabancı maddelerin varlığı, çinko ile çelik yüzey reaksiyonunu engellediğinden, numune yüzeylerinin galvanizleme öncesi kimyasal olarak temizlenmesi gerekir. %10 derişiklikte Galvasol adlı asitik yağ alma banyosunda, ortam sıcaklığında 3 dk. yağ alma işlemi uygulanan numuneler su banyosunda durulandıktan sonra tufal, pas gibi yabancı maddeleri gidermek için asitlenmiştir. Asitleme işlemi ortam sıcaklığında, %15 derişiklikteki HCl çözeltisinde 3 dk. süre ile uygulanmıştır. Asit banyosundan sonra su banyosunda durulama işlemleri yapılarak, ortam sıcaklığında 1 dk. ZnCl₂.NH₄Cl çözeltisinde fluxlama ve kurutma fırınında 450 °C, 3 dk. kurutma işlemi yapılmıştır. 451 °C, 1 dk. galvanizleme işlemi uygulanan numuneler, artık ısı nedeniyle devam eden ve saf çinko tabakasının alaşım tabakasına dönüşerek mat kaplama oluşumuna neden olan Fe-Zn reaksiyonunun sonlandırmak amacıyla 60 °C'deki su banyosunda soğutulmuştur. Uygulanan galvanizleme işlemi kısaca HDG olarak, numuneler ise HR+HDG ve QT+HDG olarak kodlanmıştır.

Galvanizleme sonrası galvaniz kaplama yapısını incelemek için numunelerin kesitleri bakalite alınmış ve sırası ile 500, 1200, 2400'lük zımpara ile zımparalanmış ve 3 µm, 0.25 µm elmas pasta ile parlatılmıştır. Numuneler %2'lik Nital ile dağlanmış ve inceleme Oxford EDS analizine bağlı Jeol-jsm-5600 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. SEM yardımıyla yorulma numunelerinin kırılma yüzeyleri de incelenmiştir.

Yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoya SJ-201 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ISO 4287:1997 standardına göre yapılmıştır. Galvanizleme öncesi ve sonrasında, her bir malzeme grubundan beş adet numuneye, beş noktadan ölçüm yapılmış olup ortalaması alınmıştır. Yüzey hazırlama aşamasında uygulanan kimyasal banyo işlemlerinin tümünün yüzey pürüzlülüğüne etkisini gözlemlemek amacıyla; her iki malzeme grubundan, galvanizleme yapılmış beş adet numuneye asit banyosunda soyma işlemi yapılmış, her bir numunenin beş noktasından yüzey pürüzlülük ölçümü yapılarak ortalaması alınmıştır (Tablo 4).

Galvaniz kaplama kalınlığı ölçümü Elcometer 456 cihazıyla, elektromanyetik indüksiyonla kullanılarak ISO 2178 standardına göre yapılmıştır. Her bir galvaniz kaplanmış malzeme grubundaki on yedi numunenin her birinden yedişer adet ölçüm yapılmış olup ortalaması alınmıştır. Her bir malzeme grubuna ait galvaniz kaplama kalınlıkları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: Galvanizleme öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri.

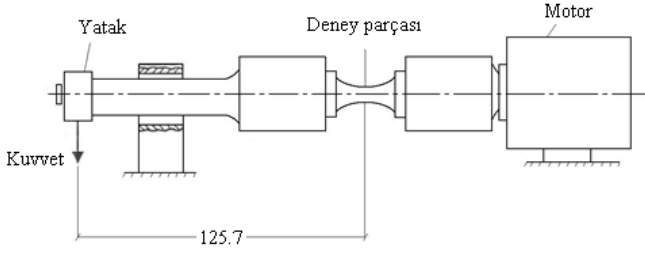
Grup	Koşul	Yüzey Pürüzlü (µm)		Galvaniz Kaplama Kalınlığı (µm)
		Rz	Ra	
HR	Galvanizleme öncesi	7.50	1.90	-
	Galvanizleme sonrası	1.00	0.18	72
	Galvanizleme+Asitle soyma sonrası	7.60	1.90	-
QT	Galvanizleme öncesi	6.30	1.70	-
	Galvanizleme sonrası	1.00	0.16	71.5
	Galvanizleme+Asitle soyma sonrası	5.70	1.60	-

Yüzey sertlik ölçümleri Future Tech/Japan model cihaz yardımı ile 200 gramlık yük uygulanarak, ASTM E384-99 standardına göre yapılmıştır. Her bir malzeme grubundan beş adet numuneye galvanizleme öncesi ve sonrası, üç noktada yüzey sertlik ölçümü yapılarak ortalaması alınmıştır (Tablo 5).

Yorulma dayanımı döner-eğmeli yorulma makinesi kullanılarak, yükleme oranı R=-1 ve 95 Hz (5700 rpm) frekansında sinüzoidal yük ile laboratuvar koşullarında yapılmıştır. Yorulma deney cihazı şematik olarak Şekil 3'te verilmiştir.

Tablo 5: Yorulma deney numunelerine ait yüzey sertliği, S-N denklemi, %95'lik güvenilirlik için yorulma dayanım aralığı ve 10^6 çevrim için yorulma dayanım değerleri.

Deney Parçası	Yüzey Sertliği Hv _{0.2}	S-N Eğrisinin Denklemi	Yorulma Dayanımı (MPa)	Galvanizleme Sonrası Yorulma Dayan. Düşüş (%)
HR	210	$\log N = 48.33154 - (16.83494 \times \log S)$	327	-
QT	350	$\log N = 26.09402 - (7.60044 \times \log S)$	440	-
HR+HDG	65	$\log N = 23.27151 - (7.45659 \times \log S)$	207	36.7
QT+HDG	60	$\log N = 17.68432 - (4.91407 \times \log S)$	239	45.7



Şekil 3: Yorulma deney cihazı (şematik).

Her bir malzeme grubunun yorulma dayanımını belirlemek için dört ya da beş gerilme değeri ve bu gerilme değerlerinin her birinde en az iki adet numune olmak üzere toplam 14-17 numune kullanılmıştır. Her bir yorulma numunesi için uygulanan yük sonrası oluşan kırılmaya karşılık gelen çevrim sayısı kaydedilmiş olup, 10^6 çevrimden sonra herhangi bir kırılma oluşmadığında testler sonlandırılmıştır. Sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilip yorulma mukavemetinin belirlenmesi için ASTM E739-91 standardı kullanılmıştır. Tüm yorulma deney koşullarına ait S-N denklemi ve %95'lik güvenilirlik için yorulma dayanım aralığı ve 10^6 çevrim için yorulma dayanım değeri Tablo 5'te verilmiştir. Çelikler için sonsuz yorulma ömrü olarak kabul edilen 10^6 çevrimden sonra her on dekada (örneğin 10^7 'de) yorulma dayanımında %5'lik azalma olduğu bilinmektedir [29]-[32].

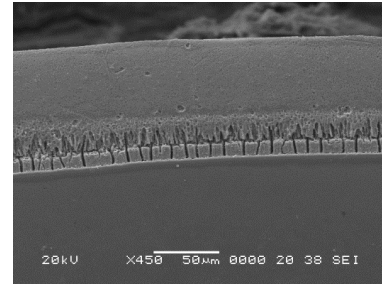
3 Tartışma

Galvanizleme öncesi, HR numuneye uygulanan ıslah işlemi sonrası (QT) akma dayanımı %118 artış ile 412 N/mm^2 den 901 N/mm^2 ye, çekme dayanımı %58'lik artış ile 636 N/mm^2 den 1008 N/mm^2 ye ulaşırken, % kesit daralması değeri %23'ten %14'e düşmüştür. Uygulanan ıslah işlemi sonrası yüzey sertlik değeri 210 Hv'den 350 Hv değerine çıkarken galvanizleme sonrası bu değerler sırası ile 65 Hv ve 60 Hv değerlerine düşmüştür. Çinkonun düşük sertlik özelliği nedeniyle yüzey sertliğindeki bu düşüş kaçınılmaz olup yüksek sertliğe sahip QT altlığın herhangi bir etkisi kalmamıştır. Galvanizleme öncesi uygulanan ıslah işlemi nedeniyle QT numunenin yüzey sertliğinde HR numuneye göre %66'lık artış olmuş iken, galvanizleme sonrası yüzey sertliklerindeki düşüş sonucu HR ve QT numunelerinin yüzey sertlik farkı ihmal edilebilir.

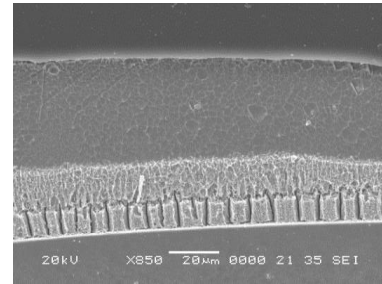
CNC torna tezgâhında işlendikten sonra herhangi yüzey parlatma işlemi uygulanmayan HR ve QT numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri birbirine yakın olup, galvanizleme sonrası sıvı çinkonun yüksek yüzey gerilimi nedeniyle yüzey pürüzlülükleri azalmıştır. HR ve QT numuneleri için galvanizleme öncesi Ra yüzey pürüzlülük değerleri sırası ile $1.90 \mu\text{m}$ ve $1.70 \mu\text{m}$ iken galvanizleme sonrası bu değerler sırası ile $0.18 \mu\text{m}$ ve $0.16 \mu\text{m}$ değerlerine düşmüştür. Yüzey pürüzlülüğündeki azalma, çentik etkisinin azalması nedeniyle yorulma dayanımında artış olarak beklense de bu

gerçekleşmemiştir. Galvanizleme öncesi, kimyasal yüzey hazırlama aşamasında, yüzey pürüzlülüğündeki artışın asitleme nedeniyle daha sınırlı iken fluxlama sonrası daha belirgin olduğu bilinmekte olup bunun nedeni de galvanizlemenin galvaniz banyosunda önce, fluxlama işlemi sırasında ince Zn tabakasının oluşumu ile başlamasıdır [2]. Tüm yüzey hazırlık ve galvanizleme işlemi uygulanmış numunelerin bir kısmına asit banyosunda çinko soyma işlemi yapılarak, kimyasal yüzey hazırlama aşamasında uygulanan işlemlerin tamamının yüzey pürüzlülüğüne etkisini gözlemlenmiştir. Galvaniz kaplaması asit banyosunda soyulmuş HR ve QT numuneleri için Ra yüzey pürüzlülük değerleri sırası ile $1.90 \mu\text{m}$ ve $1.60 \mu\text{m}$ olup işlem görmemiş numuneler ile benzerdir.

Kaplama öncesi yüzey oksitlerinin ve kaplama sonrası galvaniz kaplamanın uzaklaştırılmasında kullanılan asit banyolarının herhangi olumsuz etkiye neden olmaması, içeriğindeki inhibitör adı verilen katkı maddelerinden kaynaklanmaktadır. Galvanizleme uygulanmış her bir numuneye yapılan kaplama kalınlığı ölçüm sonucu, galvaniz tabakasının kalınlığının üniform olmayıp HR numune için $52-92 \mu\text{m}$, QT numunesi için $50-94 \mu\text{m}$ aralığında değişse de ortama kaplama kalınlıklarının sırası ile $72 \mu\text{m}$ ve $71.5 \mu\text{m}$ olduğu göstermiştir. Sıcak daldırma galvanizlemede, uygulanan ıslah işleminin kaplama kalınlığına herhangi bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Galvanizleme sonrası HR+HDG ve QT+HDG numunelerinde elde edilen çinko kaplama tabakalarının SEM görüntüleri sırası ile Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.

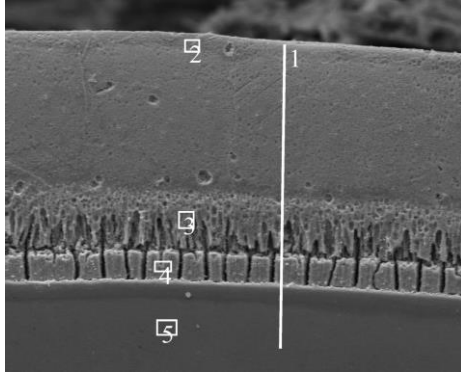


Şekil 4: HR+HDG numunede çinko kaplama tabakalarının SEM görüntüsü.



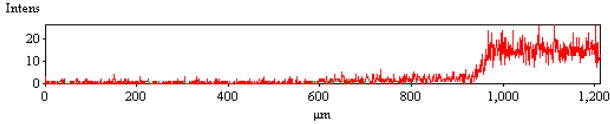
Şekil 5: QT+HDG numunede çinko kaplama tabakalarının SEM görüntüsü.

Galvaniz tabakasının kalınlığı üniform olmayıp bunu kaplama kalınlığı ölçüm değerleri de desteklemektedir. HR+HDG numuneye ait, kaplamada EDS analizi yapılan bölgeler Şekil 6a'da verilmiş olup, Şekil 6b'de (1) çizgisi boyunca Fe-Zn değişimi ve Şekil 6c'de (2),(3),(4),(5) bölgelerinin ağırlıkça % Fe-Zn miktarları verilmiştir.

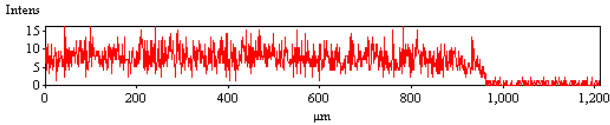


(a)

Fe



Zn



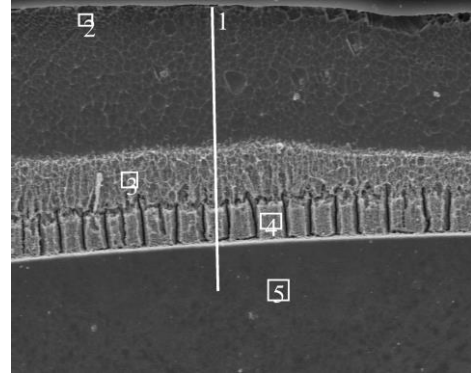
(b)

wt.%	2	3	4	5
Fe	0.311	6.514	10.496	99.463
Zn	99.689	93.486	89.504	0.537

(c)

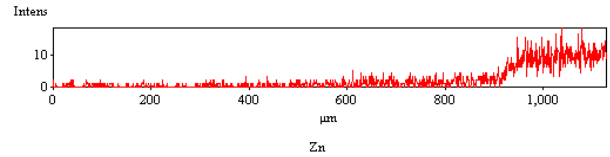
Şekil 6: HR+HDG numuneye ait EDS analizi. (a): numuneye ait görüntü ve kaplama boyunca analiz yapılan bölgelerin gösterimi, (b): (1) çizgisi boyunca Fe-Zn değişimi, (c): (2),(3),(4),(5) bölgelerinin ağırlıkça % Fe-Zn miktarları.

Hem % Fe-Zn içerikleri hem de farklı morfolojileri nedeniyle oluşan fazlar belirgin olarak görülmektedir. Kaplama kalınlığı HR+HDG numunesi için ağırlıklı olarak, en dış kısımda yer alan ve saf çinko olarak adlandırılan η fazından oluşmakta olup kalınlığı 60 μm mertebesinde dir. Kalınlıklarına göre sonrasında sırası ile 21 μm ζ fazı ve 10 μm δ fazından oluşmaktadır. %8-13 Fe içeren delta (δ) fazı çinkonun zengin tarafında δp "palisade" morfolojisi ile altlık malzeme tarafında, demir açısından zengin δk "kompakt" morfolojisi olmak üzere iki farklı yapıdan oluşmakta olup, δp sütunlu taneler halinde çelik yüzeyine dik olarak büyümektedir [21]. Γ fazı çok ince olduğu için tespit edilememiş olup sadece galvanizleme süresinin çok uzun olması durumunda görülmektedir. QT+HDG numuneye ait, kaplamada EDS analizi yapılan bölgeler Şekil 7a'da, (1) çizgisi boyunca Fe-Zn değişimi Şekil 7b'de ve (2),(3),(4),(5) bölgelerinin ağırlıkça % Fe-Zn miktarları Şekil 7c'de verilmiştir. Kaplama kalınlığı dağılımı QT+HDG numunesi için en dış kısımda 39 μm η fazı, 16 μm ζ fazı ve 11 μm δ fazından oluşmakta olup burada da Γ fazı tespit edilememiştir.

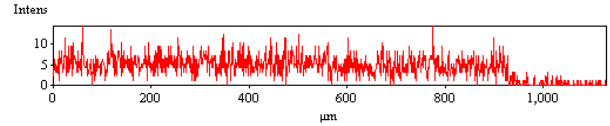


(a)

Fe



Zn



(b)

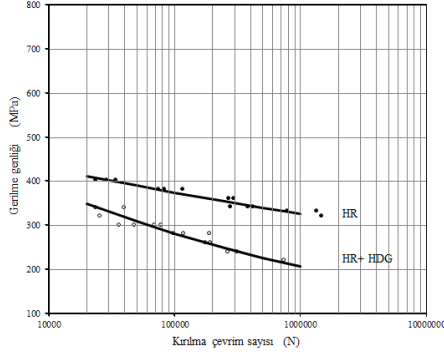
wt.%	2	3	4	5
Fe	0.167	5.841	8.090	98.813
Zn	99.833	94.159	91.910	1.187

(c)

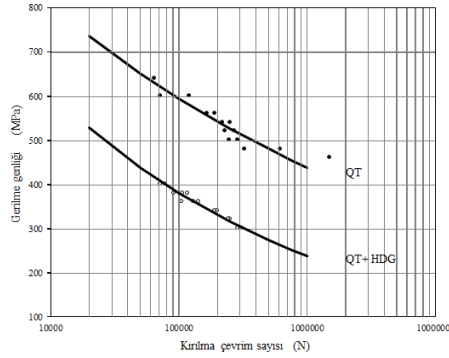
Şekil 7: QT+HDG numuneye ait EDS analizi. (a): Numuneye ait görüntü ve kaplama boyunca analiz yapılan bölgelerin gösterimi, (b): (1) çizgisi boyunca Fe-Zn değişimi, (c): (2),(3),(4),(5) bölgelerinin ağırlıkça % Fe-Zn miktarları.

İslah işlemi uygulanmamış (HR) ve uygulanmış (QT) numunelerinin galvanizleme öncesi ve sonrası Wöhler yorulma eğrileri sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. İslah işlemi sonrası artan statik mukavemet değerleri nedeniyle yorulma dayanımı da 327 MPa'dan 440 MPa'a yükselmiştir. 451 °C'de 1 dk. uygulanan sıcak daldırma galvanizleme işlemi sonrası yorulma dayanımı, HR numunede %36.7'lik azalma ile 327 MPa'dan 207 MPa değerine düşmüştür. Şekil 8 sıcak daldırma galvanizlemenin HR AISI 4340 çeliğinin yorulma dayanımına etkisini göstermekte olup, HDG sonrası S-N eğrisi bir miktar dikleşmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi, sıcak daldırma galvanizlemenin yüksek gerilme değerlerinde yorulma dayanımını azaltıcı etkisi sınırlı iken düşük gerilme değerlerinde çok daha belirgindir. Şekil 9 sıcak daldırma galvanizlemenin QT AISI 4340 çeliğinin yorulma dayanımına etkisini göstermekte olup %45.7'lik azalma ile 440 MPa'dan 239 MPa değerine düşmüştür. Sıcak daldırma galvanizleme sonrası QT numunesinin S-N eğrisinin eğiminde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Her ne kadar galvanizleme sonrası yorulma dayanımındaki % azalma miktarı QT numunelerinde daha yüksek olsa da ıslah işleminin yorulma dayanımına katkısı azalarak da olsa devam etmektedir. Uygulanan QT ıslah işlemi sonucu statik mukavemet değeri arttığından, hem galvanizleme uygulanmamış hem de galvanizle uygulanmış numunelerin yorulma dayanımı artmıştır. Uygulanan her bir yük değeri için, hem HR hem de QT koşullarında, sıcak daldırma galvanizleme uygulanmış çeliklerin yorulma

dayanımı, uygulanmamış çeliklerin yorulma dayanımından çok daha düşüktür. Sıcak daldırma galvanizleme sonrası oluşan bu düşüş QT numunelerde çok daha belirgin olup, galvanizleme uygulanmış çeliklerde, çeliklerin mekanik dayanımı ile yorulma dayanımı arasında bir ilişki olup galvanizleme sonrası yorulma dayanımındaki düşüşün yüksek dayanımlı çeliklerde daha belirgin olduğu [5],[27] görüşü ile örtüşmektedir.



Şekil 8: Ön ısıt işlem görmemiş; galvanizleme uygulanmamış (HR) ve uygulanmış (HR+ HDG) yorulma deney parçalarına ait S-N eğrileri.

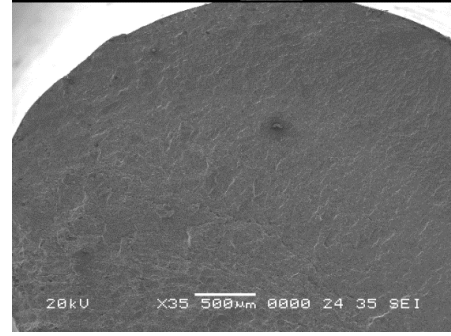


Şekil 9: Ön ısıt işlem görmüş; galvanizleme uygulanmamış (QT) ve uygulanmış (QT+ HDG) yorulma deney parçalarına ait S-N eğrileri.

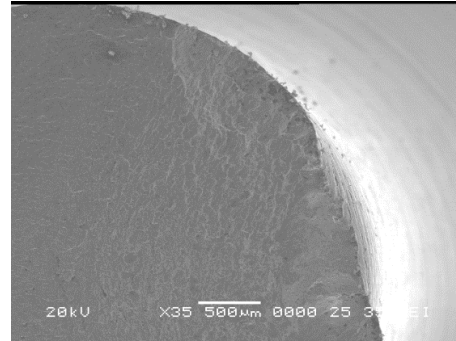
Yorulma numunelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 10-15'te verilmiştir. HR numune grubu için 340 MPa yük altında 423200 çevrim sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin görüntüsü Şekil 10'da, QT numune grubu için 500 MPa yük altında 290200 çevrim sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin görüntüsü Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 10 ve Şekil 11'de kırılma yüzeyleri verilen HR ve QT numunelerinin yüzeylerine herhangi bir yüzey işlem uygulanmadığından, birbirinden ayrılan karakteristik bir kırılma yüzeyleri olmayıp yorulma çatlakları yüzeydeki herhangi bir süreksizlikten, tek bir noktadan başlamış ve belirli bir çevrim sonunda kırılmıştır. Kırılma yüzeyi incelendiğinde, yorulma çizgileri belirgin bir şekilde görülmektedir.

HR+HDG numune grubu için; 280 MPa yük altında 118400 çevrim sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin görüntüsü ve kaplamanın ayrışması Şekil 12a ve b'de, 340 MPa yük altında 39700 çevrim sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin görüntüsü ve kaplamanın ayrışması ise Şekil 13a ve b'de verilmiştir. QT+HDG numune grubu için 300 MPa yük altında 311800 çevrim sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin görüntüsü ve kaplamanın ayrışması Şekil 14a ve b'de, 360 MPa yük altında 106100 çevrim sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin görüntüsü ve kaplamanın ayrışması ise Şekil 15a ve b'de

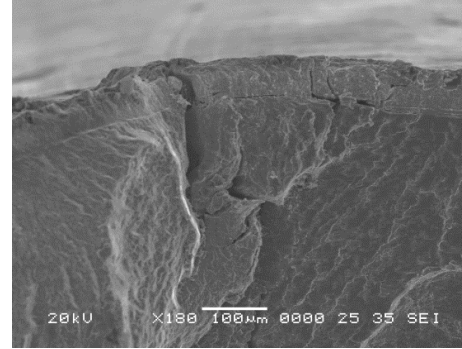
verilmiştir. Galvaniz kaplama yapılmış her iki gruba ait numunelerde yorulma çatlakları, galvanizleme öncesinde yüzeyde bulunan çentik gibi bir süreksizlikten başlamıştır.



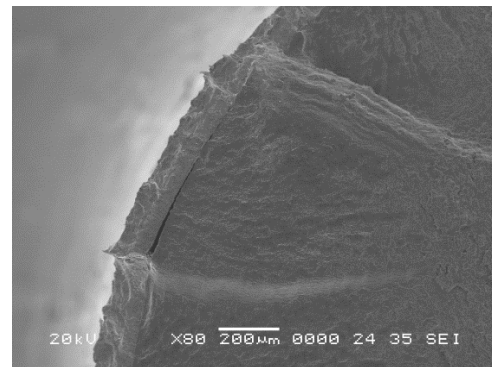
Şekil 10: HR numunenin 340 MPa yük altında 423200 çevrim sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin görüntüsü.



Şekil 11: QT numunenin 500 MPa yük altında 290200 çevrim sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin görüntüsü.

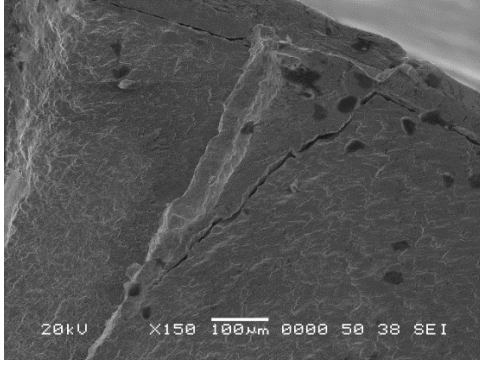


(a)

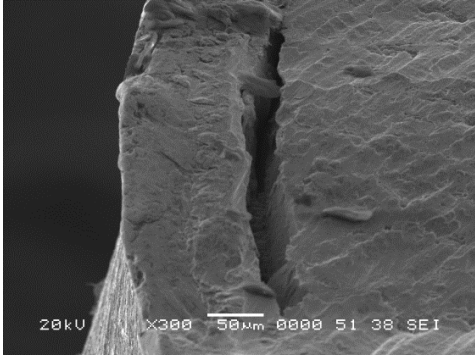


(b)

Şekil 12: HR+HDG numunedeki 280 MPa yük altında 118400 çevrim sonucu. (a): Kırılma yüzeyinin görüntüsü, (b): Kaplamanın ayrışması.

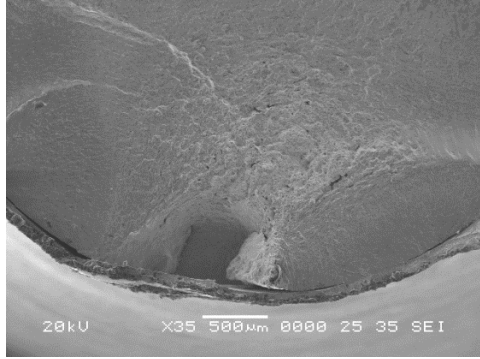


(a)

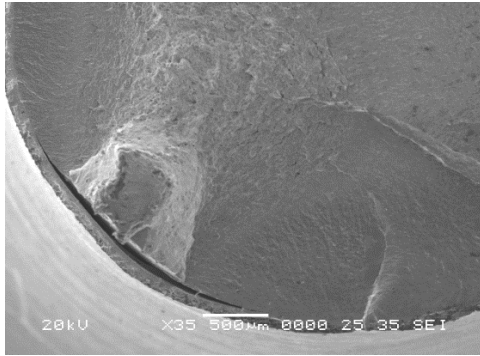


(b)

Şekil 13: HR+HDG numunede, 340 MPa yük altında 39700 çevrim sonucu. (a): Kırılma yüzeyinin görüntüsü, (b): Kaplamanın ayrışması.

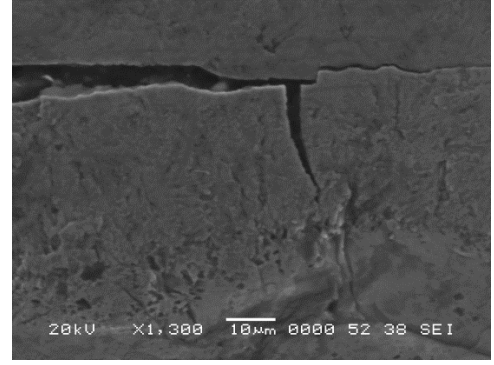


(a)

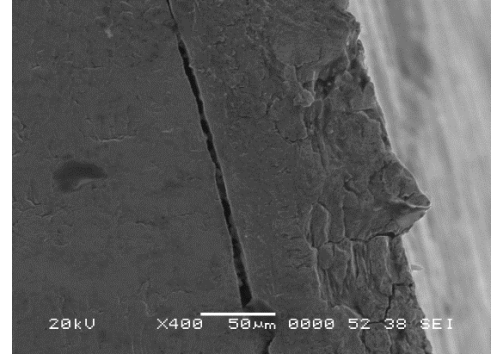


(b)

Şekil 14: QT+HDG numunede, 300 MPa yük altında 311800 çevrim sonucu. (a): Kırılma yüzeyinin görüntüsü, (b): Kaplamanın ayrışması.



(a)



(b)

Şekil 15: QT+HDG numunede, 360 MPa yük altında 106100 çevrim sonucu. (a): Kırılma yüzeyinin görüntüsü, (b): Kaplamanın ayrışması.

Galvanizleme işlemi, galvanizleme öncesinde yüzeydeki kusurların zararlı etkisini hızlandırarak yorulma dayanımında düşüşe neden olmuştur [21]. Bu nedenle yorulma dayanımı söz konusu olduğunda, galvanizleme öncesi yüzey koşullarının önemini halen koruduğu söylenebilir. Çatlak oluşumunun kaplamada bulunan intermetalik bileşiklerin yapısal ve mekanik heterojenliğini ile ilişkili olduğu ve yorulma sırasında uygulanan yük nedeniyle gevrek δ fazında ön çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların kırılma δ ve η fazlarında büyüdüğü, ζ tabakasında ayrılmaya ve kaplama ile çelik alt tabaka ara yüzeyinde katmanlar halinde ayrılmaya neden olduğu da söylenebilir [3].

4 Sonuçlar

451 °C'de 1 dk. uygulanan sıcak daldırma galvanizleme işlemi sonrası, çinkonun düşük sertliği nedeniyle ile yüzey sertliği azalmıştır. HR AISI 4340 çeliğinin ve galvanizleme işlemi öncesi uygulanan ıslah işlemi ile oluşturulan QT AISI 4340 çeliğinin sertlik değerleri birbirinden farklı olsa da galvanizleme sonrası yüzey sertlikleri azalarak benzer olmuştur. Sıvı çinkonun yüksek yüzey gerilimi nedeniyle galvanizleme sonrası, HR+HDG AISI 4340 ve QT+HDG AISI 4340 çeliğinin yüzey pürüzlülükleri azalarak benzer olmuştur. Ayrıca galvanizli numunelere asitle soyma işlemi uygulanarak, galvanizleme öncesi uygulanan kimyasal yüzey hazırlama işlemlerin yüzey pürüzlülüğüne hiç bir etkisi olmadığı da gözlemlenmiştir.

Galvanizleme işlemi sonucu elde edilen kaplama kalınlıkları HR+HDG AISI 4340 ve QT+HDG AISI 4340 çeliğinde benzer olup kaplama ağırlıklı olarak η fazı olmak üzere ζ ve δ fazından oluşmaktadır. İşlem süresi kısa olduğundan çok ince olan Γ

fazı tespit edilememiştir. Galvanizleme öncesi uygulanan ıslah işleminin; galvanizleme sonrası elde edilen yüzey sertliğine, yüzey pürüzlülüğüne, kaplama kalınlığına ve kaplamayı oluşturan fazların türüne herhangi bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.

Yorulma dayanımı 327MPa olan HR AISI 4340 çeliğine uygulanan ıslah işlemi ile yorulma dayanımı QT AISI 4340 çeliği için 440MPa değerine çıkarılmıştır. 451 °C'de 1 dk. uygulanan sıcak daldırma galvanizleme ile HR ve QT AISI 4340 çeliklerinin yorulma dayanımları belirgin olarak azalmıştır. Galvanizleme sonrası yorulma dayanımındaki düşüş HR+HDG AISI 4340 çeliğini için %36.7 olup, 207 MPa değerindedir. QT+HDG AISI 4340 çeliğini için yorulma dayanımındaki düşüş %45.7 olup, 239 MPa değerindedir. Galvanizleme sonrası yorulma dayanımındaki % düşüş miktarı QT+HDG AISI 4340 çeliğin de HR+HDG AISI 4340 çeliğine göre daha yüksek olsa da ıslah işleminin sağladığı avantaj azalarak da olsa devam etmektedir.

Galvanizleme uygulanmamış yorulma numunelerinde yorulma çatlağı yüzeydeki bir süreksizlikten başlarken, galvanizleme uygulanmış yorulma numunelerinde kaplamanın hemen altında, parça yüzeyindeki bir süreksizlikten başlamıştır.

5 Kaynaklar

- [1] Marder AR. "The metallurgy of zinc-coated steel". *Progress in Materials Science*, 45(3), 191-271, 2000.
- [2] Carpio J, Casado JA, Alvarez JA, Gutiérrez-Solana F. "Environmental factors in failure during structural steel hot-dip galvanizing". *Engineering Failure Analysis*, 16(2), 585-595, 2009.
- [3] Reumont G, Vogt JB, Iosta A, Foc J. "The effects of a FeZn intermetallic-containing coating on the stress corrosion cracking behaviour of a hot-dip galvanized steel". *Surface and Coatings Technology*, 139(2-3), 265-271, 2001.
- [4] Petit EJ, Grosbety Y, Aden-Ali S, Gilgert J, Azari Z. "Microstructure of the coating and mechanical properties of galvanized chromium-rich martensitic steel". *Surface & Coatings Technology*, 205(7), 2404-2411, 2010.
- [5] Nilson T, Engberg G, Trogen H. "Fatigue properties of hot-dip galvanized steels". *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 18(4), 166-175, 1989.
- [6] Carlos Camurri P, Rau I Benavente G, Isidoro Roa S, Claudia Carrasco C. "Deformation and fatigue behaviour of hot dip galvanized coatings". *Materials Characterization*, 55(3), 203-210, 2005.
- [7] Asgari H, Toroghinejad MR, Golozar MA. "Effect of coating thickness on modifying the texture and corrosion performance of hot-dip galvanized coatings". *Current Applied Physics*, 9(1), 59-66, 2009.
- [8] Abotani K, Hirohata K, Kiyasu T. "Hot-Dip Galvanized Sheet Steel with Excellent Press Formability and Surface Quality for the Automotive Panels". Kawasaki Steel Technical Report, No. 48, March 2003.
- [9] Shukla SK, Saha BB, Triathi BD, Avtar R. "Effect of Process Parameters on the Structure and Properties of Galvanized Sheets". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(5), 650-655, 2010.
- [10] Bicao P, Jianhua W, Xuping S, Zhi L, Fucheng Y. "Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing". *Surface & Coatings Technology*, 202(9), 1785-1788, 2008.
- [11] Culcasi JD, Sere PR, Elsner CI, Di Sarli AR. "Control of the growth of zinc-iron phases in the hot-dip galvanizing process". *Surface and Coatings Technology*, 122(1), 21-23, 1999.
- [12] Ben nasr J, Snoussi A, Bradai C, Halouani F. "Optimization of hot-dip galvanizing process of reactive steels: Minimizing zinc consumption without alloy additions". *Materials Letters*, 62(19), 3328-3330, 2008.
- [13] Ben nasr J, Snoussi A, Bradai C, Halouani F. "Effect of the withdrawal speed on the thickness of the zinc layer in hot dip pure zinc coatings". *Materials Letters*, 62(14), 2150-2152, 2008.
- [14] Katiforis N, Papadimitriou G. "Influence of copper, cadmium and tin additions in the galvanizing bath on the structure, thickness and cracking behaviour of the galvanized coatings". *Surface and Coatings Technology*, 78(1-3), 185-195, 1996.
- [15] Elkoca O. Sıcak Daldırmayla Galvanizlemede Çelik Yüzey Özelliklerinin Kaplama Davranışına Etkisi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1998.
- [16] Yaluk D. Çelik Sistemlerin Yüzey Özelliklerinin Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplamalara Etkisi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2009.
- [17] Elkoca O. "Tavlı çinko kaplamalarda Fe-Zn fazlarının gelişimi ve bunların kaplama özelliklerine etkisi". *I. Demir-Çelik Sempozyumu*, Ereğli, Türkiye, 3-5 Ekim 2001.
- [18] Safaeirad M, Toroghinejad MR, Ashrafizadeh F. "Effect of microstructure and texture on formability and mechanical properties of hot-dip galvanized steel sheets". *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1-3), 205-212, 2008.
- [19] PD Cruz, Ericsson T. "Influence of hot dip galvanizing on fatigue and corrosion fatigue resistance of a B-Mn steel". *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 26(4), 145-152, 1997.
- [20] Vogt JB, Boussac O, Foc J. "Prediction of fatigue resistance of a hot-dip galvanized steel". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 23, 33-39, 2001.
- [21] Aden-Ali S, Chamat A, Gilgert J, Petit EJ, Dominiak S, Schmitt L, Gilles M, Azari Z. "On the degradation the endurance of silicon-rich TRIP800 steel after hot-dip galvanization". *Engineering Failure Analysis*, 16(7), 2009-2019, 2009.
- [22] Tzimas E, Papadimitriou G. "Cracking mechanisms in high temperature hot-dip galvanized coatings". *Surface and Coatings Technology*, 145(1-3), 176-185, 2001.
- [23] Berchem K, Hocking MG. "The influence of pre-straining on the corrosion fatigue performance of two hot-dip galvanized steels". *Corrosion Science*, 48(12), 4094-4112, 2006.
- [24] Ramalho A, Correia LM, Costa JD. "Fretting fatigue of zinc coated low carbon steel EN H320 M". *Tribology International*, 33(11), 761-768, 2000.
- [25] Michailidis N, Stergioudi F, Maliaris G, Tsouknidas A. "Influence of galvanization on the corrosion fatigue performance of high-strength steel". *Surface & Coatings Technology*, 259(Part C), 456-464, 2014.
- [26] Pistofidis N, Vourlias G, Konidaris S, Pavlidou E, Stergiou A, Stergioudis G. "Microstructure of zinc hot-dip galvanized coatings used for corrosion protection". *Materials Letters*, 60(6), 786-789, 2006.

- [27] Bergengren Y, Melander A. "An experimental and theoretical study of the fatigue properties of hotdip-galvanized high-strength sheet steel". *International Journal of Fatigue*, 14(3), 154-162, 1992.
- [28] Berchem K, Hoccking MG. "The influence of pre-straining on the high-cycle fatigue performance of two hot-dip galvanized car body steels". *Materials Characterization*, 58(7), 593-602, 2007.
- [29] Sonsino CM. "Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety". *International Journal of Fatigue*, 29(12), 2246-2258, 2007.
- [30] Karakaş Ö, Morgenstern C, Sonsino CM. "Fatigue design of welded joints from the wrought magnesium alloy AZ31 by the local stress concept with the fictitious notch radii of $r(f)=1.0$ and 0.05 mm". *International Journal of Fatigue*, 30(12), 2210-2219, 2008.
- [31] Karakaş Ö. "Consideration of mean-stress effects on fatigue life of welded magnesium joints by the application of the Smith-Watson-Topper and reference radius concepts". *International Journal of Fatigue*, 49(4), 1-17, 2013.
- [32] Karakaş Ö. "Application of Neuber's effective stress method for the evaluation of the fatigue behaviour of magnesium welds" *International Journal of Fatigue*, 101(2), 115-126, 2017.