

Galvaniz Kaplı 3. Nesil Çeliklerde Nokta Direnç Kaynağı Sonrası Sıvı Metal Kırılabilirliği Oluşumu

Tanya A. Başer^{1*} , Mehtap Hıdıroğlu¹ , Nizamettin Kahraman² 

¹Coşkunöz Kalıp Makina Ar-Ge Merkezi, Bursa, TÜRKİYE

²Karabük Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Karabük, TÜRKİYE

Article Info

Review article
Received: 13/08/2024
Revision: 11/09/2024
Accepted: 20/09/2024

Keywords

3rd generation steels
Liquid-metal embrittlement
Galvanized coating
Resistance spot welding

Makale Bilgisi

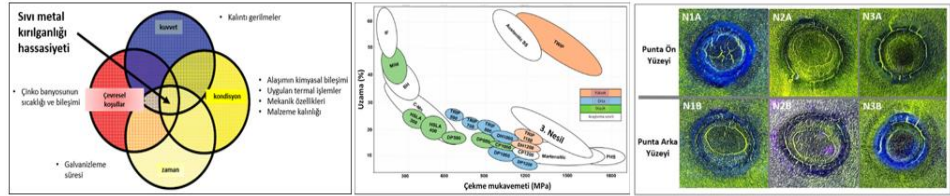
Derleme makalesi
Başvuru: 13/08/2024
Düzeltilme: 11/09/2024
Kabul: 20/09/2024

Anahtar Kelimeler

3. nesil çelikler
Sıvı metal kırılabilirliği
Galvaniz kaplama
Nokta direnç kaynağı

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışmada 3. nesil çeliklerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının SMK (sıvı metal kırılabilirliği) hassasiyetine etkileri anlatılmış olup, aynı zamanda farklı galvaniz kaplama türlerinin SMK oluşumuna etkileri sunulmuştur. Nokta direnç kaynağı sırasında SMK hassasiyetinin olası mekanizmaları tartışılmış ve oluşumunu azaltmak için uygun yöntemler önerilmiştir / In the study, the effects of the mechanical properties and microstructure of the 3rd generation steels on the LME (liquid metal embrittlement) sensitivity are explained. The effects of different galvanized coating types on the LME formation are also presented. Possible mechanisms of LME sensitivity during resistance spot welding (RSW) are discussed and suitable methods to minimize its occurrence are suggested.



Şekil A: Galvaniz kaplı 3. nesil çeliklerde SMK hassasiyeti ve oluşumu / Figure A: LME sensitivity and occurrence in galvanized coated 3rd generation steels

Önemli noktalar (Highlights)

- Galvaniz kaplı 3. nesil çeliklerde SMK oluşumu ve hassasiyeti ele alındı / LME occurrence in galvanized coated 3rd generation steels were studied.
- Galvaniz kaplı çelikler SMK hassasiyetine göre sınıflandırıldı / Galvanized coated steels were classified according to LME sensitivity.
- Galvaniz kaplama türüne göre SMK oluşumu raporlandı / LME sensitivity depending on galvanized coating type was reported.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı; nokta direnç kaynağı sırasında SMK hassasiyetinin olası mekanizmaları tartışılması ve oluşumunu azaltmak için uygun yöntemlerin incelenmesidir / The aim of this study is to discuss possible mechanisms of LME sensitivity during spot resistance welding and to investigate proper methods in order to reduce its occurrence.

Özgünlük (Originality): Nokta direnç kaynağı sonrasında oluşan SMK hassasiyeti üzerine yapılan literatür incelemelerinin derlemesi sunulmuştur / A review of the literature survey on LME sensitivity after spot resistance welding is presented.

Bulgular (Results): Çalışmada 3. nesil çelik grubunun mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının SMK hassasiyetine etkileri ve aynı zamanda farklı galvaniz kaplama türlerinin SMK oluşumuna etkileri sunulmuştur. Son olarak, nokta direnç kaynağı sırasında SMK hassasiyetinin olası mekanizmaları tartışılmış ve oluşumunu bastırmak için uygun yöntemler önerilmiştir / The effects of the mechanical properties and microstructure of the 3rd generation steel group on the LME sensitivity are explained, and the effects of different galvanized coating types on the LME formation are also presented. Finally, possible mechanisms of LME sensitivity during RSW are discussed and suitable methods to suppress its occurrence are suggested.

Sonuç (Conclusion) NDK sonrasında oluşan SMK hassasiyeti üzerine yapılan literatür incelemelerinin derlemesi sunulmuş olup, bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar raporlanmıştır / A review of the literature on LME sensitivity after RSW is presented and the results of these studies are reported.



Galvaniz Kaplı 3. Nesil Çeliklerde Nokta Direnç Kaynağı Sonrası Sıvı Metal Kırılabilirliği Oluşumu

Tanya A. Başer^{1*} , Mehtap Hıdıroğlu¹ , Nizamettin Kahraman²

¹Coşkunöz Kalıp Makina Ar-Ge Merkezi, Bursa, TÜRKİYE

²Karabük Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Karabük, TÜRKİYE

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 13/08/2024
Düzeltilme: 11/09/2024
Kabul: 20/09/2024

Anahtar Kelimeler

3. nesil çelikler
Sıvı metal kırılabilirliği
Galvaniz kaplama
Nokta direnç kaynağı

Öz

3. nesil çelikler, ağırlık azaltma çalışmaları kapsamında son yıllarda otomotiv endüstrisinin uygulamalarında büyük bir öneme sahiptir. Özel üretim yöntemine sahip 3. nesil çeliklerin şekillendirme problemleri ile birlikte kaynaklanabilirliği de yoğun olarak çalışılmaktadır. Genellikle galvaniz kaplamalı olarak tercih edilen bu çeliklerin nokta direnç kaynağı (NDK) sırasında, galvaniz kaplamada yer alan çinko (Zn) elementinin ergime derecesinin düşük olması nedeniyle sıvı faza geçmektedir. Bu durum ergimiş Zn atomlarının kaynak sonrası ana malzemeye difüzyonu ile sıvı metal kırılabilirliğine (SMK) neden olmaktadır. Kaynak bölgesinde meydana gelen SMK hassasiyeti, ana malzemede mikro çatlaklara sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca SMK kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini de olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışma, nokta direnç kaynağı sonrasında oluşan SMK hassasiyeti üzerine yapılan literatür incelemelerinin derlemesini içermektedir. Çalışmada 3. nesil çelik grubunun mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının SMK hassasiyetine etkileri anlatılmış olup, aynı zamanda farklı galvaniz kaplama türlerinin SMK oluşumuna etkileri sunulmuştur. Son olarak, nokta direnç kaynağı sırasında SMK hassasiyetinin olası mekanizmaları tartışılmış ve oluşumunu bastırmak için uygun yöntemler önerilmiştir.

Liquid Metal Embrittlement Formation in Galvanized 3rd Generation Steel After Resistance Spot Welding

Article Info

Review article
Received: 13/08/2024
Revision: 11/09/2024
Accepted: 20/09/2024

Keywords

3rd generation steels
Liquid-metal embrittlement
Galvanized coating
Resistance spot welding

Abstract

3rd generation steels have been of great importance in the applications of the automotive industry in recent years within the scope of weight reduction efforts. The weldability of 3rd Generation steels with special production methods, along with their forming problems, is being studied intensively. During resistance spot welding (RSW) of these steels, which are generally preferred as galvanized coated, they pass into the liquid phase due to the low melting temperature of the zinc (Zn) element in the galvanized coating. This situation causes liquid metal embrittlement (LME) with the diffusion of molten Zn atoms into the main material after welding. LME sensitivity occurring in the welding area can cause micro cracks in the main material. In addition, LME negatively affects the mechanical properties of the weld area. This study includes a compilation of literature reviews on LME sensitivity that occurs after spot resistance welding. In the study, the effects of the mechanical properties and microstructure of the 3rd generation steel group on the LME sensitivity are explained, and the effects of different galvanized coating types on the LME formation are also presented. Finally, possible mechanisms of LME sensitivity during RSW are discussed and suitable methods to suppress its occurrence are suggested.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv endüstrisi ürünlerinin kalitesinden ödün vermeden maliyetleri düşürmeye çalışırken, aynı zamanda da konfordan vazgeçmeden, araç yakıt tüketimini azaltmayı hedeflemektedir. İleri yüksek mukavemetli çeliklerin (İYMÇ) kullanımı yoluyla ağırlık azaltma çalışmaları, yakıt sarfiyatını

azaltmak ve zararlı CO₂ emisyonunu düşürmek için otomotiv endüstrisinde önemli bir rol oynamakta [1] ve son zamanlarda bu malzemelerin kaynaklanabilirliğine odaklanılmaktadır [2]. İYMÇ kategorisinde değerlendirilen 3. nesil çelikler, yüksek dayanım ve iyi şekillenebilirlik özellikleriyle otomotiv endüstrisinde soğuk şekillendirme uygulamalarında yerini almıştır [3].

Bu çelikler, A ve B sütunu, tavan başlığı, tavan rayı, kapı çarpma kirişi, koltuk ve alt gövde tünel takviyeleri gibi otomobil yapısal güvenlik bileşenlerini oluşturmak için kullanılmaktadır [4].

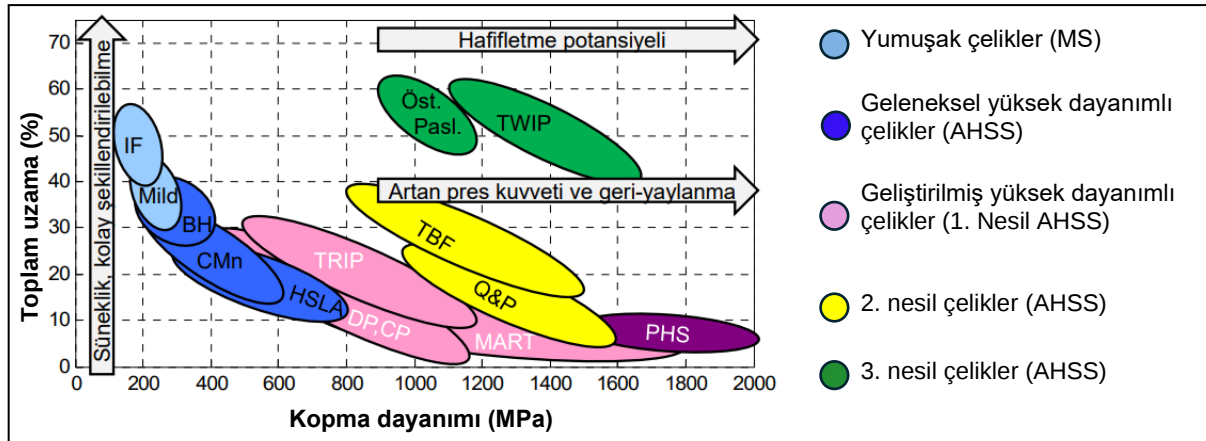
3. nesil çelikler korozyon direncini arttırmak için kaplama işlemine tabi tutulurlar. Yeni nesil kaplama uygulamaları, düşük maliyetleri nedeniyle genel olarak sıcak daldırma galvaniz kaplama olarak tercih edilmektedir. NDK sırasında galvaniz kaplamada bulunan ergimiş Zn atomlarının, çelik ana malzeme yüzeyinde tane sınırlarına nüfuziyeti gerçekleşebilir. NDK sonrası katılaşma sırasında Zn'nin ana malzemenin tane sınırlarına nüfuziyeti ile çatlaklar oluşabilir [5]. SMK olarak adlandırılan bu çatlak oluşumları 1870 yılından beri bilinmektedir. Ancak, galvaniz kaplı 3. nesil çeliklerde NDK sırasında oluşan SMK yeni bir bulgudur ve bu alanda sınırlı miktarda araştırma çalışması yürütülmüştür [6].

Bu çalışmada, NDK sırasında 3. nesil galvaniz kaplı çeliklerde meydana gelen SMK hassasiyetini anlamak için literatürde yapılan çalışmalar derlenmiştir. İlk olarak 3. nesil çelikler ve otomotiv uygulamaları ile bu malzemelerin en sık birleştirildiği kaynak yöntemleri sunulmuş, devamında 3. nesil çeliklerde SMK hassasiyetinin

oluşum mekanizmaları tanıtılmıştır. Ayrıca SMK çatlaklarının makroskopik ve mikroskopik özellikleri ve NDK sırasında oluşabilecek çatlak konumları hakkında bilgi verilmiştir. Ve son olarak farklı İYMÇ'lerin SMK çatlak oluşumuna duyarlılığı, farklı galvaniz kaplama türlerinin SMK oluşumuna etkileri ve NDK parametrelerinin SMK duyarlılığı üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

2. 3. NESİL ÇELİKLER (3RD GENERATION STEELS)

Otomotiv uygulamalarında çelik alaşımlarının kullanım oranları, özellikle B ve C segment araç gövdelerinde diğer hafif alaşımlara göre daha yüksektir. Ağırlık azaltma çalışmaları kapsamında çevresel gereklilikler ve regülasyonlar otomotiv endüstrisinden beklentiyi yükseltmiştir. Bunun nedeni CO2 emisyon oranının %20'sinin araçlardan kaynaklanmasıdır. Sera gazlarının %80 oranının sorumlusu olarak yine otomotiv üreticileri gösterilmektedir [7]. Çelik üreticileri hafif alaşımlar ile rekabeti önemsemekte ve araç hafifletme çalışmaları için düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli çelik alaşımı geliştirme çalışmaları yapmaktadır. Şekil 1'de gösterilen muz diyagramı olarak adlandırılan görselde çeşitli çelik sınıflarının dayanım-toplam uzama eğrisi gösterilmektedir [8].



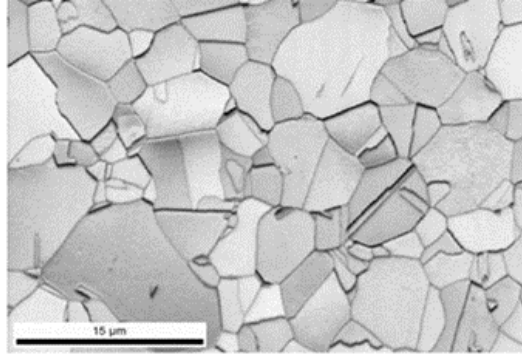
Şekil 1. Çeşitli çelik sınıflarının dayanım-toplam uzama eğrisi [8] (Strength-elongation curve of various steel grades)

3. nesil çelikler, İYMÇ çelikler grubunda yer almaktadır. 2. nesil çelik alaşımları yüksek dayanım ve iyi şekillenebilirlik özellikleri ile (Şekil 1) otomotiv endüstrisinde büyük önem taşımaya rağmen kullanım alanları oldukça kısıtlı kalmıştır. 2. nesil olan TWIP çeliğin mikroyapısı tamamen östenit faz içermektedir (Şekil 2). Yüzey merkezli kübik kristal yapısına sahip östenit faz nedeniyle çok iyi şekillenebilirlik özelliği göstermektedir. Kimyasal bileşimindeki mangan (Mn) elementi ilavesi de (% 15–25 Mn) form vermede kolaylık sağlamaktadır. Ancak TWIP çeliklerinin yüksek

Mn içermesi nedeniyle kaynaklanabilirlikleri oldukça zayıftır. Oda sıcaklığındaki bekleme sürelerinde ise malzeme yüzeylerinde sonradan kırılma denilen oluşum gözlenmektedir. Bu çelikler kaynaklanabilirliğinin kötü olmasının yanında yüksek maliyetlidir. Stok koşulları da göz önüne alındığında TWIP çeliğinin otomotiv sektöründe kullanımı kısıtlı kalmıştır [8]. Tablo 1'de İYMÇ grubundaki 2. nesil TWIP çeliğinin otomotiv endüstrisinde tercih edildiği alaşımların literatürden elde edilen çekme testi sonuçları verilmiştir [9,10]. Şekil 1'de gösterilen 3. nesil çelik grubunun

geliştirilmesindeki en önemli motivasyon, 2. nesil çelikler gibi yüksek mekanik özelliklere sahip aynı zamanda 1. nesil çeliklere yakın bir maliyete sahip çelik sınıfının otomotiv uygulamalarında kullanımını sağlamaktır. Q&P (Quenched ve partitioning çelikleri) ve TBF (Dönüşüm etkili plastisite katkılı beynitik ferritik çelikler) sınıfı çelikler bir çok çelik firması tarafından üretilmektedir. Nanosteel sınıfı çelikler için Ar-Ge, patent vb. çalışmalar halen devam etmektedir. Nanosteel, mevcut durumda ticarileşmiş bir ürün

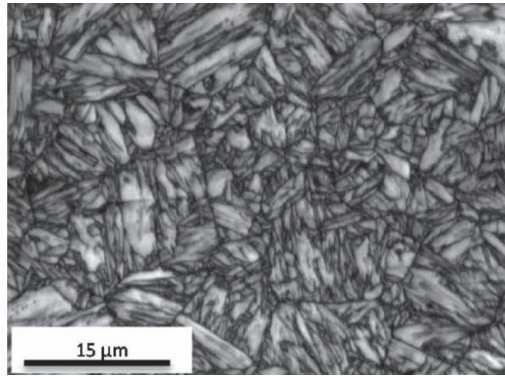
değildir [11]. 3. nesil çelikler, 2. nesil çelik grubuna göre daha düşük oranlarda Mn içerdikleri için (< %10) kaynak kabiliyetleri daha iyidir [11,12]. 3. nesil çelik grubunda olan Q&P çelikleri 1180 Mpa dayanım ve yüksek süneklik kombinasyonunu sergilerler [13]. Şekil 3'de Q&P çeliğin EBSD mikro yapısı verilmiştir. Bu çeliklerin mikroyapısı martenzit ve östenit içermektedir. Ferrit, tek fazlı östenitik bölge yerine iki fazlı bölgede interkritik tavlamanın yapılması durumunda da mevcuttur.



Şekil 2. TWIP çeliğin mikro yapısı [9] (Microstructure of TWIP steel)

Tablo 1. Bazı TWIP çelik alaşımlarının akma, çekme ve % uzama değerleri [9,10] (Yield, tensile and elongation values of some TWIP steels)

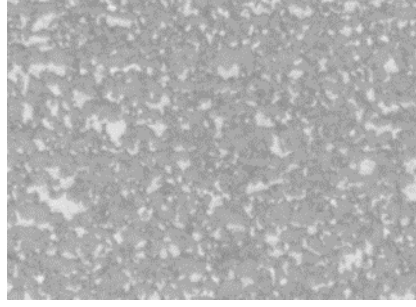
Alaşım	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
TWIP880	~480	~880	~45
TWIP980	450-600	950-1050	>45



Şekil 3. Q&P çeliğin mikro yapısı [13] (Micro structure of Q&P steel)

Çelik üretici firmalar tarafından 1. nesil çelik grubunda olan TRIP çelikleri geliştirilerek 3. nesil çelik grubunda yer alan TBF çelikleri üretilmiştir. TRIP çeliklerinin üretiminde yaşanan en büyük problem üretimindeki tekrarlanabilirlik problemidir. Bu problemin bertaraf edilebilmesi için alaşımın mikro yapısal konfigürasyonu

tasarlanarak beynitik ve ferrit fazı oluşturulmuştur. Mikroyapıda yer alan kararlı östenit fazı alaşımın özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemenin isminin baş harfi (T) TRIP malzemesinden diğer iki harf ise beynit ile ferritten (B ve F) gelmektedir. Şekil 4'de TBF çeliğinin mikro yapısı verilmiştir.



Şekil 4. TBF çeliğin mikro yapısı [14] (Micro structure of TBF steel)

Tablo 2. Bazı Q&P ve TBF çeliklerinin mekanik özellikleri [15] (Mechanical properties of Q&P and TBF steels)

Çelik kalitesi	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Q&P 980	650-800	980-1050	17-23
Q&P 1180	1000-1150	1180-1300	17
TBF 980	≥600	980-1130	≥18
TBF 1050	≥700	1050-1200	>14
TBF 1180	≥850	1180-1330	≥11

3. 3. NESİL Q&P VE TBF ÇELİKLERİNİN ÜRETİMİ (Production of Q&P and TBF Steels)

3. nesil Q&P ve TBF çeliklerin üretiminde kullanılan alaşım stratejisi element bazında aşağıda açıklanmıştır [15];

Karbon (C) ilavesi: Östenit faz oluşumu için güçlü bir dengeleyicidir. Alaşımın sertleşmesine katkı sağlar. Martenzit fazın mukavemetini yükseltir.

Mangan (Mn) ilavesi: Östenit faz oluşumu için güçlü bir dengeleyicidir. Alaşımın sertleşmesine katkıda bulunur. Ferrit ve östenit fazların dayanımını artırır.

Silisyum (Si) ilavesi: Östenit fazında karbon tutmak için karbür çökmesini engeller. Kaynaklanabilirliği olumsuz yönde etkilediğinden, az miktarlarda ilave edilmelidir.

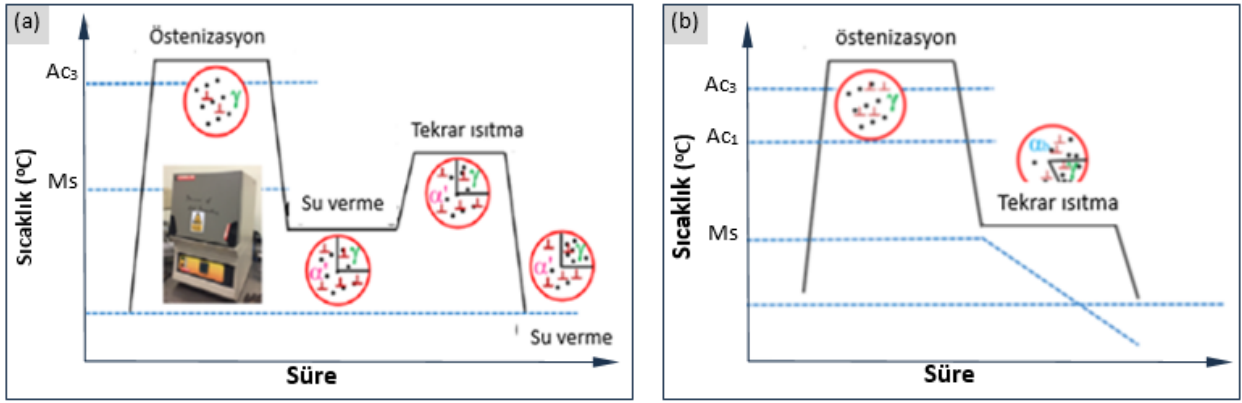
Alüminyum (Al) ilavesi: Östenit fazında C çözünürlüğünü artırır. Ferrit ve östenit fazlarının

dayanımını artırır. Alüminyum ilavesi az da olsa yoğunluk düşüne katkı sağlar.

Niyobyum (Nb) ilavesi: Tane boyutlarının incelmelerini sağladığından daha iyi tokluk ve süneklik elde edilmesine yardımcı olur.

Bor (B), krom (Cr), molibden (Mo) ve titanyum (Ti) ilavesi: Bu elementler alaşımın sertliğine katkı sağlamak amacıyla yeterli miktarlarda ilave edilirler.

3. nesil çeliklerin üretiminde özel ısıtma işlem adımları uygulanmaktadır [16]. Bu çeliklere ait üretim diyagramları Şekil 5’de verilmiştir. Bu çeliklere ısıtma işlemi uygulanırken soğuma aşamasında soğuma işlemi durdurulup tekrar ısıtılmaktadır. Böylelikle malzemenin mikroyapısında kısmi fazlar (östenit, ferrit ve martenzit) oluşmaktadır. Dolayısıyla bu malzemelerde yüksek mukavemet ve iyi bir darbe sönümleme yeteneği elde edilmektedir.



Şekil 5. Q&P (a) ve TBF (b) çeliklerinin üretim adımları [16] (Production steps of Q&P (a) and TBF (b) steels)

4. 3. NESİL ÇELİKLERİN KAYNAĞI (WELDING OF 3RD GENERATION STEELS)

Otomotiv sektöründe çelik sac malzemelerin kullanımının söz konusu olduğu yerlerde birleştirmelerin kaynakla yapılması kaçınılmazdır. Bu sektörde kullanılmak üzere üretilen 3. nesil çelikler genellikle ince sac levha formunda üretilmektedirler. Dolayısıyla bu malzemelerin birleştirilmesinde TIG, MIG-MAG, plazma, lazer ve elektrik direnç kaynakları kullanılmaktadır [17]. Ancak kullanılan bu sacların kalınlıklarının az olması, kaynak esnasındaki yüksek ısı girdisi nedeniyle çarpılma ve distorsiyonu artırmakta dolayısıyla kaynaklanabilirliği düşürmektedir. Bu nedenle bu çalışmada bu tür malzemelerin birleştirilmesinde uygulamada en çok kullanılan lazer ışın ve elektrik direnç kaynakları tanıtılmıştır.

4.1. LAZER IŞIN KAYNAĞI (LASER WELDING)

Lazer teknolojisi günümüzde otomotiv, gemi, hava, askeri ekipmanlar, enerji ve tıp gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca lazerler yarı iletken üretimi, elektronik, iletişim gibi uygulamalarda da kendine yer bulmaktadır. Lazerler neredeyse bütün malzeme türüne işlem yapılabilen ve lazer teknolojisi endüstride markalama, kazıma, kesme ve kaynak işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [18]. Yüksek güç yoğunluğu ve küçük nokta boyutu nedeniyle, lazer ışın kaynağı, ısıdan etkilenen küçük bölgelerle yüksek hızlarda kaynak yapmak için uygundur. Ek olarak, lazer ışınlarını optik fiberler veya uzak aynalar kullanarak yönlendirme yeteneği, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların kaynaklanması için nokta direnç kaynağına bir alternatif sağlamaktadır [19]. Lazer kaynağındaki güç yoğunluğu, geleneksel kaynak yöntemlerine göre yaklaşık 4 kat daha yüksek olan 108 W/cm² mertebesinde. Bu nedenle kaynak bölgesinde ve çevresinde etkisi oldukça düşüktür ve bu nedenle

kaynakta mikroyapı bozulması minimum düzeydedir [20]. Endüstride sıklıkla kullanılan lazer kaynağının birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

- Yüksek güç yoğunluğu sebebiyle malzemede minimum deformasyon,
- Malzemeyi çok hızlı ısıtması nedeniyle yüksek kaynak hızı,
- Her tür malzemeyi ergitebilecek güçte olması,
- Kaynak mukavemetlerinin yüksek ve gözeneksiz olması,
- 25 mm malzeme kalınlığına kadar etkili bir şekilde derin kaynakların yapılabilmesi,
- Lazer ışınının, başka türlü kaynak yapılması mümkün olmayan, ulaşılması zor yerleri yerel olarak kaynaklayabilir olması [21].
- Otomasyona ve robot teknolojisine uygun olması,
- Kaynak operasyonu esnasında izleme olanağı ile sürecin kontrol edilebilir olmasıdır [22].

4.2. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI (RESISTANCE SPOT WELDING)

Nokta direnç kaynağı, otomotiv endüstrisinde araba gövdesi bileşenlerini bir araya getirmek için yaygın olarak kullanılan etkili bir kaynak yöntemidir [23-25]. Bir araba yapısının, bir çarpışma durumunda yaralanmalara karşı yolcularına yeterli koruma sağlama yeteneği olarak tanımlanan aracın çarpmaya dayanıklılığı, büyük ölçüde nokta kaynaklarının bütünlüğüne ve mekanik performansına bağlıdır [26]. Bu nedenle nokta direnç kaynak işlemlerinden beklenen yüksek performanslı ve tekrarlanabilir kaynakların elde edilmesidir. NDK işleminde kaynak yapılacak parçalar su soğutmalı bakır elektrodlar arasına

yerleştirilir ve daha sonra parçalar üzerinden belirli bir süre boyunca büyük bir elektrik akımı geçirilerek ısı elde edilir [27]. Yöntemde herhangi bir dolgu maddesi kullanılmadığından kaynak işleminden sonra parçalar nispeten temiz kalabilmektedir. Birleştirme, basınç ve ısı uygulanmasıyla oluşturulur ve elektrik akımının akışı malzemelerde ısınmaya neden olur. Bu ısıtma ayrıca malzemenin küçük bir kısmının bölgesel olarak ergimesine ve birleşmesine yol açmaktadır [28]. Kaynak parametreleri (akım, zaman ve baskı kuvveti), nokta direnç kaynaklı bağlantıların kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [29]. Kaynak esnasında elektrik direnci nedeniyle oluşan ısı girdisi aşağıdaki genel ifadeyle verilmektedir.

$$H=I^2RtK \quad (1)$$

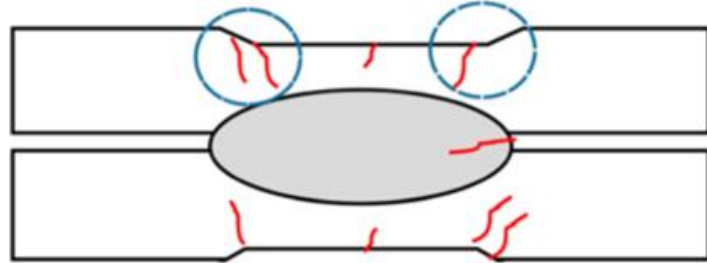
Burada H ısı girdisi, I kaynak akımı, R toplam direnç, t kaynak süresi ve K radyasyon ve iletimden kaynaklanan enerji kayıplarını temsil eden bir faktördür. Toplam direnç R, elektrot direnci, elektrot-iş parçası temas direnci, iş parçası direnci ve iş parçası-iş parçası temas direncinin toplamıdır [19].

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı malzemelerde kaynak çekirdeğinin geometrik ve

mekanik özellikleri kaynak akımına, kaynak süresine, uygulanan elektrot kuvvetine, malzeme özelliklerine ve kaynak yapılan malzemelerin yüzey durumlarına bağlıdır [30]. Ayrıca nokta direnç kaynaklarının mekanik performansı SMK çatlaklarından etkilenebilirler. Bu nedenle bu çatlakların giderilmesi gerekmektedir [31]. Bu çalışmada 3. nesil yüksek mukavemetli çeliklerin NDK esnasında meydana gelen SMK problemlerine çözüm aranmaya çalışılmıştır.

5. SMK OLUŞUMU VE HASSASİYETİ (LME OCCURANCE AND SENSITIVITY)

3. nesil çeliklerde yüksek dayanım ve yüzeyindeki kaplama nedeniyle kaynak sırasında problemler yaşanmaktadır. Kaynak sırasında yaşanan bu problem sıvı metal kırılabilirliği olarak tanımlanır. Yüksek dayanımlı çelik alaşımları, Zn, Hg, Sn, Pb ve Al gibi sıvı metallerle temas ettiğinde kırılabilirlik oluşur. Galvaniz kaplamaya sahip 3. nesil alaşımlarda kaynak sırasında galvaniz kaplamada bulunan ergimiş Zn atomlarının ana malzeme tane sınırlarına nüfuz etmesi ile yüzeyde kırılmalar meydana gelmektedir [32]. Kaynak sonrası oluşan SMK ve genel olarak çatlakların gözlemlendiği bölgeler Şekil 6'da şematik gösterilmiştir.



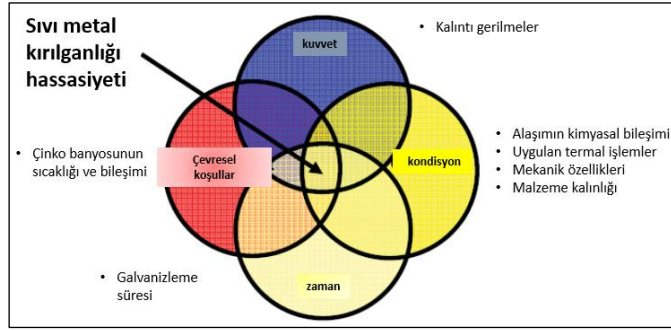
Şekil 6. Kaynak sonrası oluşan SMK ve çatlakların oluştuğu bölgeler [33] (LME and its occurrence areas after welding)

SMK hassasiyetini oluşturan nedenler aşağıda maddeler halinde ve açıklamalı olarak belirtilmiştir ayrıca bu oluşum Şekil 7'de gösterilmiştir [32-34].

- 1- Kuvvetler: Kaynak sırasında kalıntı gerilmeler ve ısıl gradyent yoğunlaşması oluşmaktadır.
- 2- Malzeme kondisyonu: Malzemenin kimyasal bileşimi, ısıl işlem geçmişi, mekanik özellikleri önemlidir. 3. nesil çeliklerin mikroyapısında yer alan kalıntı östenitin SMK hassasiyetini arttırdığı raporlanmıştır [32,33]. Ayrıca

malzemenin kalınlığı da SMK hassasiyetini etkilemektedir [33].

- 3- Galvanizleme süresi: Galvanizleme süresi SMK hassasiyetinde önemli bir parametredir. Bununla birlikte malzemeye yapılan galvaniz kaplama türü de SMK hassasiyeti oluşumu tetiklemektedir.
- 4- Çevresel koşullar: Galvanizleme esnasında kullanılan çinko banyosunun bileşimi ve sıcaklığı da SMK hassasiyetini etkilemektedir.



Şekil 7. SMK hassasiyetini oluşturan nedenler [32]. (Effects on LME sensitivity)

Yüksek sünekliğe sahip galvaniz kaplı İYMÇ malzemeler nokta direnç kaynağında belirli termomekanik yükleme koşulları altında, SMK hassasiyeti gösterme eğilimindedir. SMK, %95'e kadar ciddi bir süneklik kaybına yol açan taneler arası bir ayrışma olgusudur. Sonuç olarak galvaniz kaplı bir malzeme için SMK'nın oluşması esas olarak termal ve mekanik yüklemeye bağlıdır [35].

Galvaniz kaplamada yer alan çinko (Zn) elementinin ergime sıcaklığı 420 °C'dir (Şekil 8). Zn 782 °C'de tamamen sıvı faza geçmektedir. NDK sırasında 782 °C'de sıvı Zn (Şekil 8), çelik malzemeye nüfuz etmektedir. Bu durum yüzeyde çatlak oluşumuna neden olmakta dolayısıyla da çeliğin dayanımında ve sünekliğinde ciddi oranda düşüş meydana gelmektedir [32]. Kaynak sırasında oluşan SMK hassasiyeti kaynağı yapılan malzeme özelliklerine ve galvaniz kaplama türüne bağlı olduğu bilinmektedir. 2. ve 3. nesil çeliklerde SMK hassasiyeti 1. nesil çeliklere göre daha fazladır. Yüksek Si ilavesi SMK oluşumunu arttırmaktadır. Ancak literatürde yüksek Si ilavesinin olumsuz belirtilmesine rağmen tam net bir kanıt/açıklama bulunmamaktadır [33]. Tüm bu nedenlerin yanında mikroyapının da SMK hassasiyetinde önemli olduğu bir gerçektir. Örneğin östenit fazın SMK hassasiyeti ferrit faza göre daha fazladır. Bununla birlikte SMK hassasiyeti sıcak daldırma galvaniz kaplamada artmaktadır. Ayrıca kaplamasız bir çelik, galvaniz kaplı bir çelik ile kaynak edildiğinde yüzeyde SMK oluşumu gözlemlenmektedir.

Galvaniz kaplamalı malzemelerin kaynak ile birleştirilmesi sonucu meydana gelen SMK oluşumu çeliğin kimyasal bileşimine, çeliğin mikroyapısına, çeliğin kaplamasına ve NDK parametrelerine (örn. elektrot tipi, kaynak akımı, toplam ısı girdisi vb.) bağlıdır. İYMÇ'ler genellikle % 4-5 oranında Mn ve Si içermektedir. Bu çeliklerin içerdiği Mn, Si ve Al gibi elementler dayanıma büyük ölçüde katkı sağladıkları gibi aynı zamanda

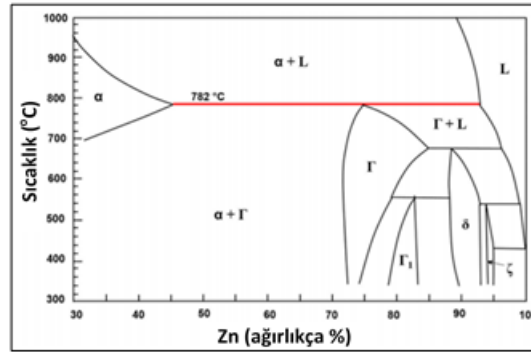
alaşımın elektrik iletkenliği özelliğini de arttırmaktadır. Bu durum yüksek ısı oluşumuna neden olduğu için NDK sırasında daha yüksek gerilmeler ile birlikte düşük alaşımlı çeliklere göre SMK hassasiyeti artmaktadır [37].

5.1. SMK HASSASİYETİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER (EFFECTS ON LME SENSITIVITY)

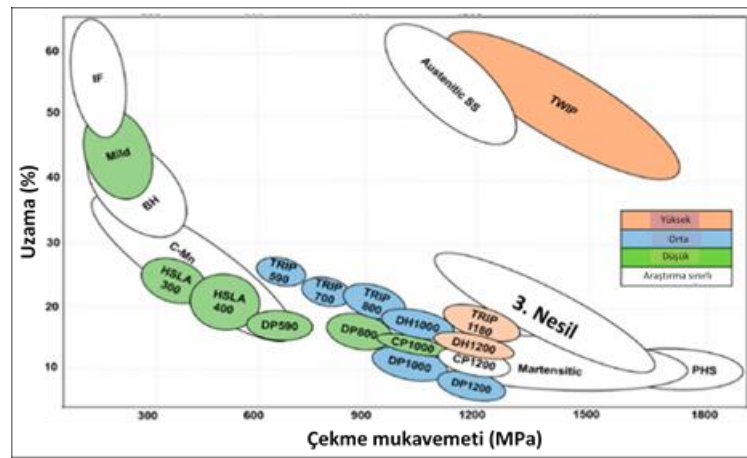
Galvaniz kaplı ileri yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklarında meydana gelen SMK olayını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunların en önemlileri malzeme türü, kaplama çeşidi, mikroyapı etkisi ve kaynak parametrelerinin etkisidir. Bu değişkenlerin etkileri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

5.1.1. YÜKSEK DAYANIMLI ÇELİK TÜRÜ (GRADE OF HIGH STRENGTH STEELS)

Çelik alaşımları SMK duyarlılığına göre düşük, orta ve yüksek çelikler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Şekil 9 galvaniz kaplamalı çeliklerin düşük-orta-yüksek SMK hassasiyetine göre sınıflandırılmasını gösterilmektedir. SMK hassasiyetinin, çeliklerin mukavemeti arttıkça artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Çekme mukavemeti 1000 MPa'nın üzerinde olan çelikler en yüksek SMK çatlak hassasiyetini sergilemektedir [33]. Birçok çalışmada, TWIP çeliklerinin SMK'ya karşı çok yüksek duyarlılık sergilediği kabul edilmiştir [38-42]. Şekil 9 incelendiğinde 1000 MPa'dan daha yüksek çekme dayanımına sahip TRIP ve çift fazlı yüksek süneklik (DH) çeliklerde de yüksek bir SMK duyarlılığı görülmektedir. Bununla birlikte, benzer dayanım seviyelerine sahip DP çeliklerinin SMK duyarlılığının TRIP veya DH çeliklerinden daha düşük olduğu görülmektedir. TWIP ve TRIP çelikleri, DP çeliklerine kıyasla mikroyapıda daha yüksek östenit fazı oranına sahip olduğundan, genellikle SMK duyarlılığının mikroyapının östenitik faz içeriğinden etkilendiği varsayılmaktadır [33].



Şekil 8. Zn'nin ergime sıcaklığını gösteren faz diyagramı [36]. (Binary phase diagram showing the melting temperature of Zn)



Şekil 9. Zn kaplı çeliklerin SMK hassasiyetine göre sınıflandırılması [18]. (Classification of LME sensitivity according to Zn-coated steels)

5.1.2. Zn KAPLAMA TÜRÜ (TYPE of Zn COATING)

Literatürde sıcak daldırma galvaniz (GI) kaplamanın, galvaniz-tavlı (GA) ve elektro galvaniz (EG) kaplamaya göre SMK hassasiyetini artırdığı rapor edilmektedir. Sıcak daldırma galvaniz kaplamanın (GI-Zn) ergime noktasının sıcak daldırma galvaniz-tavlı kaplama (GA-FeZn) ve elektro galvaniz kaplamaya (EG-ZnNi) göre daha düşük olmasından dolayı, kaynak sırasında daha fazla Zn sıvı olarak bulunduğu için kırılabilirlik artmaktadır. Buna ek olarak kaplama ile ana malzeme arasında oluşan intermetaliklerin, kaplamanın ergime sıcaklığını artırmalarından dolayı, SMK hassasiyetini azalttığı belirtilmektedir. GA kaplamada, GI kaplamadan farklı olarak 500 °C'de yapılan tavlama işlemi nedeniyle GA kaplama ile ana malzeme arasında oluşan Fe-Zn intermetalik bileşiği SMK hassasiyetini

azaltmaktadır. GE kaplamada, kaplama ile ana malzeme arasında oluşan Zn-Ni intermetalikliği de aynı şekilde SMK hassasiyetini azaltmaktadır [14,43]. Tablo 3'te Zn kaplama bazı malzeme türlerinin SMK duyarlılığı üzerindeki etkileri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

5.1.3. MİKROYAPININ ETKİSİ (THE EFFECT OF MICROSTRUCTURE)

Literatürde TRIP ve TWIP çeliklerindeki SMK hassasiyetinin çok yüksek olduğu rapor edilmiştir [33]. Bununla birlikte dayanımı 1000 MPa'ın üstündeki çeliklerde SMK hassasiyetinin yüksek olduğu belirtilmektedir. Ancak 1000 MPa üstü DP çeliklerindeki hassasiyet TRIP ve TWIP çeliklerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni TRIP ve TWIP'in mikroyapısında östenit oranının daha fazla olmasıdır. Mikroyapının SMK hassasiyeti üzerine etkisini anlamak için termo

Tablo 3. Zn kaplama türlerinin LME duyarlılığı üzerindeki etkisi karşılaştırılması [33] (The comparison of Zn coating types on LME sensitivity)

Çelik kalitesi	Kaplama çeşidi/Kompozisyonu	SMK Hassasiyeti ile ilgili gözlemler
TWIP980	GI (Zn); GA (Fe-Zn); EG (Zn-Ni)	EG < GA < GI
DP1000	GI (Zn); GA (Fe-Zn)	GA < GI
TRIP1180	GI (Zn); GI (Zn-Mg)	GI (Zn) < GI (Zn-Mg)

mekanik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada DP çeliklerinde gevrekleşme östenit oluşum sıcaklığının (Ac₃) üzerinde gözlemlenmiştir. Yapılan birçok çalışmada SMK hassasiyetinin östenit faz oluşumu sonrası ortaya çıktığı raporlanmıştır [11,15,33].

5.1.4. KAYNAK PARAMETRELERİNİN ETKİSİ (THE EFFECT OF WELDING PARAMETERS)

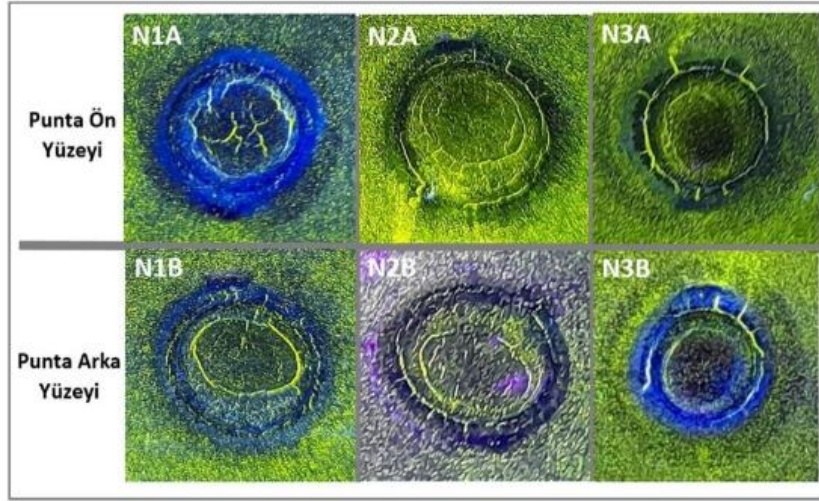
Literatürde değişik malzemeler üzerinde ve farklı kaynak koşullarında SMK oluşumları incelenmiştir. Bu incelemelere göre SMK hassasiyeti kaynak akımının artması, uzun kaynak çevirim süresi, yüksek elektrot kuvvetleri, tutma süresinin artması ve elektrotların yanlış hizalanması ile elektrotların düzensiz baskı kuvveti oluşturması nedeni ile artmaktadır [44,45]. Farklı kaynak parametrelerine bağlı SMK oluşumu incelemelerinde kesitten alınan numunelerde yüzey çatlaklarını tespit etmek için makro ve mikro incelemeler yapılmaktadır [4,5]. Ancak punta yüzeyinde oluşan bazı SMK çatlakları derin olmadığı için yüzeyde görülemez. Sıvı penetrasyon testi, X-ışını testi gibi tahribatsız muayene yöntemleri, NDK sonrası kaynak yüzeyindeki derin olmayan çatlakları belirlemek için kullanılmaktadır. Literatürde sıcak daldırma galvaniz kaplı 3. nesil bir çeliğin NDK sonrası kaynak kesit bölgelerinde floresan manyetik parçacık testi, yüzeydeki çatlaklar tespit etmek için kullanılmıştır. Hıdıroğlu ve arkadaşları [5] galvaniz kaplı TBF1180 çeliğini NDK yöntemi ile üç farklı parametrede birleştirmişler ve elde edilen numunelere manyetik parçacık testi yaparak punta yüzeyindeki SMK çatlak yoğunluğu ve yerlerini tespit etmişlerdir. Şekil 10'da bu çalışmadan elde edilen manyetik parçacık test sonuç görselleri verilmiştir.

Buna göre tüm numunelerde kaynak metalinde ve ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) çatlakların olduğu ve çatlak miktarı ve uzunluklarının NDK sırasındaki parametre değişiminden etkilendiği tespit edilmiştir.

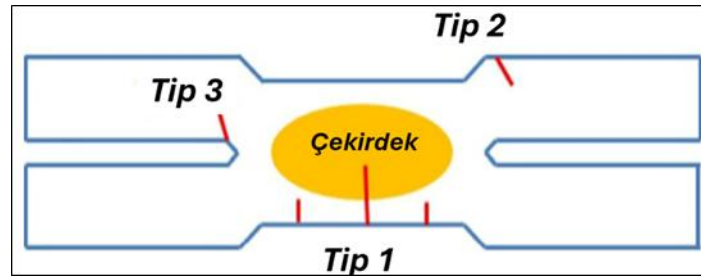
LME çatlakları, Şekil 11'de şematik olarak gösterildiği gibi, American Welding Society (AWS) tarafından üç kategoride sınıflandırılmıştır. Bu üç tip çatlak, konumlarına göre belirlenirler. Bunlar;

- Tip 1 çatlaklar kaynak yüzeyinde, elektrot girinti bölgesinin ortasında bulunur ve kaynak çekirdeğinin iç kısmına ulaşabilirler.
- Tip 2 çatlaklar, mikro yapının genellikle ITAB'a karşılık geldiği elektrot girinti bölgesinin köşesindedir.
- Tip 3 çatlaklar, aşınma yüzeyindeki çentik ucunun yakınında bulunur. Tip 1 ve 2 dış çatlaklar olarak etiketlenirken Tip 3 iç çatlaklar olarak etiketlenir.

Direnç nokta kaynağı sırasında sıvı metal gevrekleşmesi çok sayıda çalışmanın konusu olmasına rağmen, her bir çatlak tipinin arkasındaki kesin mekanizma henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Yaygın olarak benimsenen senaryo, ergimiş çinkonun kaynak işlemi sırasında tane sınırları boyunca yüzeyin altına hızla nüfuz edebileceğini ve bunun da kaynağın potansiyel kırılabilirliğine yol açabileceğini belirtilmektedir [46]. SMK nedeniyle oluşan çatlaklar genel olarak stereo mikroskopta kolaylıkla görülebilir. Şekil 11'de SMK nedeniyle oluşan çatlakların numune yüzeyi ve kesitinden görüntüleri yer almaktadır. Şekil 11'de belirtilen Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 bölgeleri makroskobik olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 10. Farklı NDK parametreleri sonrasında manyetik parçacık test sonucu [5] (Magnetic particle test results on different RSW parameters)



Şekil 11. AWS'ye göre LME çatlaklarının kategorileri (LME crack catagories according to AWS)

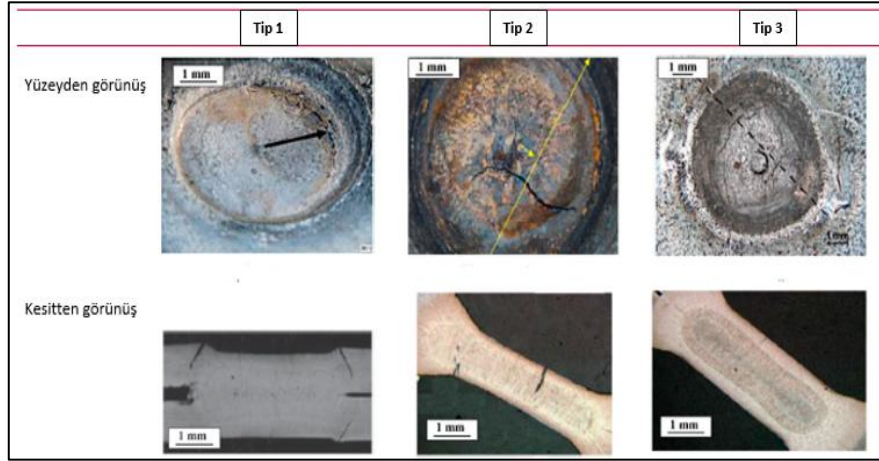
SMK nedeniyle oluşan çatlaklar genel olarak stereo mikroskopta kolaylıkla görülebilir. Şekil 11'de SMK nedeniyle oluşan çatlakların numune yüzeyi ve kesitinden görüntüleri yer almaktadır. Şekil 11'de belirtilen Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 bölgeleri makroskobik olarak gözlemlenmiştir.

Çelik sac/elektrot girinti bölgesinin kenarları (kaynak omuzları) (Şekil 12) SMK kırılma yüzeyi en hassas bölge olarak belirtilmektedir. Tip 2 bölgesinde meydana gelen SMK çatlakları yaygın olarak tercih edilen endüstriyel kaynak koşullarında gözlenmektedir. Tip 1 ve Tip 3 uygulanan kaynak koşullarında, yüksek ısı ve artan akım ve uzun süreli giriş kaynak çevirimleri ile oluşabilmektedir [33].

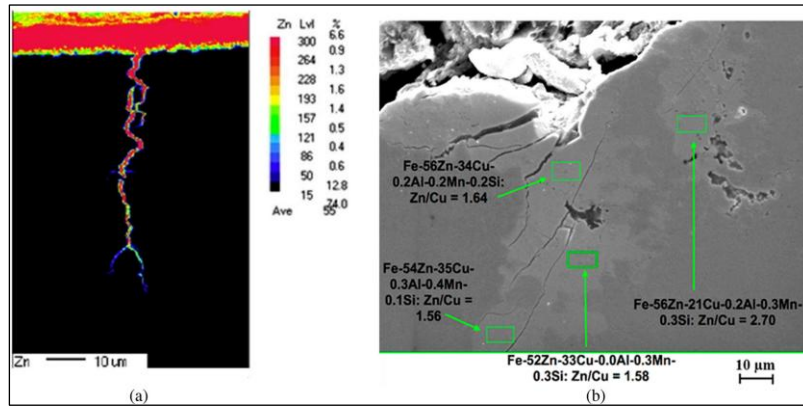
Literatürde [47,48] nokta direnç kaynak sırasında oluşan SMK çatlaklarının karakteristikleri ile kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Kırılma yüzey çalışmalarında SMK kırılmaların Zn'nin nüfuz etmesi nedeniyle taneler arası oluştuğu gözlemlenmiştir. Galvaniz kaplamalı TWIP alaşımı üzerinde elektron probu mikro analizi

(EPMA) ile elde edilen görüntüler Tip 2 SMK kırılmaları olarak belirlenmiş olup Şekil 13a'da gösterilmektedir. Bu araştırmalardan bazıları Zn'nin Tip 2'deki gibi yüzeyde SMK hassasiyeti oluşturarak çatlaklar oluştuğunu raporlarken diğer araştırmalar da SMK çatlaklarının oluştuğu bölgede Zn ile birlikte yüksek oranda Cu (ağırlıkça yaklaşık % 15-20) varlığının olduğu Şekil 13b'de gösterilmektedir [33].

Yılmaz ve arkadaşları [49] farklı kalınlıktaki (0,95 ve 1,55 mm) TBF çelik sacların NDK ile kaynaklanabilirliği üzerine deneysel bir çalışma yapmışlar ve NDK'lı TBF çeliklerin sıvı metal gevrekleşme çatlakları hassasiyeti çok yüksek olduğunu, sıvı metal gevrekleşme çatlaklarının sac yüzeyinde başlayıp ve ITAB'da yayıldığını belirtmişlerdir. Bu çatlakların ve çatlak derinliklerinin kaynak ısı girdisi ile yakından ilişkili olduğunu ve ısı girdisinin artışına bağlı olarak arttığını ayrıca çatlakların, nokta kaynakların çekirdek bölgesine kıyasla kaynak çevresi boyunca çok daha derin ve geniş olduğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 12. Nokta direnç kaynaklarında SMK çatlaklarının makroskopik görünümü ve çatlak yeri ve derecesine göre sınıflandırılması [33] (Macro images of LME cracks and illustration the location of the LME crack types)



Şekil 13. NDK SMK çatlak karakterizasyonu; a) SMK çatlak oluşumundaki Zn analizi, b) Zn'nin nüfuz ettiği bölgedeki Cu oranı (Zn/Cu konsantrasyonu) [33] (RSW LME crack characterisation; a) Zn analysis on LME cracks, b) Cu ratio in the penetration area of Zn (Zn/Cu))

Bhattacharya ve arkadaşları [50] gelişmiş yüksek mukavemetli C-Mn-Si çeliklerinin çinko (Zn) kaynaklı SMK duyarlılığı üzerindeki başlangıç mikro yapısındaki değişikliklerin etkisini araştırmak için yüksek sıcaklık (500, 600 ve 700°C'de) çekme testleri yapmışlardır. Çalışmalarında tek bir alaşım kullanılarak başlangıç mikro yapısı çinko elektrokaplama öncesinde ısıl işlemlerle değiştirilmiştir. Sıcak çekme testi sonucunda martenzitik, DP, Q&P ve TBF çeliklerinde farklı SMK hassasiyetlerinin olduğu belirlenmiştir. DP çeliğinin martenzitik, Q&P veya TBF çeliklerine kıyasla daha düşük SMK duyarlılığı, ultra ince ferrit tanelerinin ve ayrı martenzit adalarının varlığı ve DP mikro yapısının yalnızca %40-50'si martensitik olduğundan bu mikro yapıda önceki östenit tane sınırlarının daha küçük bir alan fraksiyonuna sahip olmasıyla alakalı olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca SMK çatlak

yolu analizlerinin, önceki östenit tane sınırlarının, martenzitik, Q&P ve TBF mikro yapıları boyunca LME çatlakları için tercih edilen yayılma yolları olduğunu belirtmişlerdir.

İYMÇ çeliklerin NDK'da sıvı metal kırılmalığını önlemek için yapılan çalışmalardan bir tanesi de kaynak esnasında çoklu darbeleri kaynak uygulamalarıdır. Wintjes ve arkadaşları [51] TRIP1100 malzemelerin NDK'da çoklu darbe kaynak programlarının SMK şiddeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda SMK duyarlılığını azaltmak için iki farklı tipte darbe metodolojisi önermişlerdir. Bunlar; çinko kaplamayı çıkarmak için ana kaynak akımından önce bir ön darbe uygulamak ve ısı oluşumunu yönetmek için ana kaynak akımı sırasında darbe uygulamaktır. Burada ön darbe, kaynağa çok fazla ilave ısı vermeden çinkonun kaplamaya yayılmasını ve çinkoyu stabilize etmesini sağlamaktadır. Bu

sonuçlar, SMK'nı etkileyen mekanizmalar önceden düşünüldenden daha karmaşık olmasına rağmen, çoklu darbe kaynak programlarının SMK çatlamasını azaltmak için başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir.

NDK uygulamalarında elektrot ucu geometrisin de SMK üzerinde etkili olduğu bir gerçektir. Dupuy [52] 1180 MPa'lık 3. nesil ileri yüksek mukavemetli Q&P çeliklerinin NDK esnasında meydana gelen SMK için yeni bir elektrot ucu geometrisi tasarlanmış ve yeni elektrot ucu geometrisi sayesinde levha/elektrot yanlış hizalaması da dahil olmak üzere farklı kaynak koşulları altında oluşan çatlak miktarının azaldığını, ayrıca yeni tasarım ile birlikte elektrod ömürlerinin de arttığını rapor etmiştir.

İYMÇ nokta direnç kaynağında SMK'nı etkileyen parametrelerden bir diğeri de malzemelere uygulanan kaplama cinsidir. DiGiovanni ve arkadaşları [53] hem GI hem de GA kaplı Q&P 980 ve Q&P 1180 malzemeleri NDK yöntemi ile birleştirmişler ve SMK hassasiyeti için birleştirme dayanımlarına kaplamanın etkisini sıcak çekme testi ile incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda kaplama tipine bağlı olarak SMK tepkisinde bir farklılık olduğunu belirlemişlerdir. GI kaplı çeliklerde gözlemlenen SMK'nın GA kaplı çeliklerden elde edilenden daha fazla olduğu dolayısıyla GI kaplı malzemelerdeki süneklilik kaybının GA kaplı malzemeler göre çok daha fazla olduğunu rapor etmişlerdir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, NDK sonrasında oluşan SMK hassasiyeti üzerine yapılan literatür incelemelerinin derlemesi sunulmuş olup, bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- 3. nesil çeliklerin, 1. ve 2. nesil çelikler ile karşılaştırıldığında yüksek dayanım ve iyi şekillenebilirlik avantajları ile birlikte, maliyetlerinin de düşük olması nedeniyle, yakın gelecekte otomotivde kullanımının artacağını göstermektedir.
- 3. nesil Q&P ve TBF çeliklerin üretiminde alaşım stratejisi element bazında önemli rol oynamaktadır.
- 3. nesil çeliklerde özel bir ısıtma işlem adımları söz konusudur. Isıtma ve soğutma adımlarını içeren

bu özel ısıtma işlemleri ile alaşımın mikroyapısında kısmi fazlar (östenit, ferrit ve martenzitik) oluşturularak yüksek dayanım ve iyi enerji sönümleme yeteneği elde edilmektedir.

- Kaynak sonrası oluşan SMK hassasiyetini oluşturan nedenler arasında NDK sırasında oluşan kalıntı gerilmeler, malzemenin kimyasal bileşimi ve mikroyapısı, galvaniz kaplama cinsi ve çinko banyosunun koşulları gelmektedir.
- Galvaniz kaplamada yer alan çinko (Zn) elementi 782 °C'de tamamen sıvı faza geçerek NDK sırasında çelik ana malzemeye nüfuz etmektedir. Bu durum NDK sırasında yüzeyde çatlaklara neden olarak, alaşımın mekanik özelliklerinde ciddi oranda düşüş meydana gelmektedir.
- Zn kaplı çelikler düşük-orta-yüksek SMK hassasiyetine göre sınıflandırılmıştır. SMK çatlak hassasiyetinin çeliklerin mukavemeti arttıkça artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Çekme mukavemeti 1000 MPa'nın üzerinde olan çelikler en yüksek SMK çatlak hassasiyetini sergilemektedir.
- Literatürde sıcak daldırma galvaniz (GI) kaplamanın galvaniz-tavlı (GA) ve elektro galvaniz (EG) kaplamaya göre SMK hassasiyetini artırdığı rapor edilmektedir.
- Literatürde TRIP ve TWIP çeliklerindeki SMK hassasiyetinin çok yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte dayanımı 1000 MPa'nın üstündeki çeliklerde SMK hassasiyetinin yüksek olduğu belirtilmektedir.
- Literatürde SMK hassasiyetinin östenit faz oluşumu sonrası ortaya çıktığı raporlanmıştır.
- SMK hassasiyeti kaynak akımının artması, uzun kaynak çevirim süresi, yüksek elektrot kuvvetleri, tutma süresinin artması, yanlış hizalanmış ve/veya aşınmış elektrotlar nedeni ile artmaktadır.
- Nokta direnç kaynaklarında SMK çatlaklarının makroskobik görünümü, çatlak yeri ve derecesine göre Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 olarak sınıflandırılmıştır.
- NDK uygulamalarında çoklu darbe kaynak programları SMK çatlamasını azaltmak için kullanılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Tanya A. Başer: Çelik malzemelerde Sıvı metal kırılabilirliğinin tanıtımı, nedenleri ve giderilmesi

Introduction, causes and elimination of liquid metal embrittlement in steel materials.

Mehtap Hıdıroğlu: 3. nesil çeliklerin tanıtılması ve sıvı metal kırılabilirliğine hassasiyetlerinin tanıtılması.

Introduction of 3rd generation steels and their sensitivity to liquid metal embrittlement.

Nizamettin Kahraman: 3. nesil çeliklerde kaynak yöntemlerine göre sıvı metal kırılabilirlikleri ve kıyaslamaları.

Liquid metal embrittlement and comparisons according to welding methods in 3rd generation steels.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yürük A., Çevik B., Kahraman N., Analysis of mechanical and microstructural properties of gas metal arc welded dissimilar aluminum alloys, Mater. Chem. Phys., 273, (2021) 125117.
- [2] Khan M.I., Spot welding of advanced high strength steels, Master Thesis of Applied Science, Ontario, Canada, (2007) 9-16.
- [3] Park G., Jeong S., Lee C., "Fusion weldabilities of advanced high manganese steels: A Review. Met. Mater. Int., 27 (2021) 2046–2058.
- [4] Başer T.A., Resistance Spot Welding of Zn-coated third generation automotive steels using mid-frequency direct current technology, Trans Indian Inst Met, 76 (2023) 49–57.
- [5] Hıdıroğlu, M., Başer T.A., Tekelioğlu O., Kahraman N., Üçüncü nesil çeliklerin nokta

direnç kaynağında sıvı metal kırılabilirliği, 10th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2020, September 6-7, Bursa, Türkiye, (2021) 1566-1575.

- [6] Yang K., Meschut G., Seitz G., Biegler M., Rethmeier M., The identification of a new liquid metal embrittlement (LME) type in resistance spot welding of advanced high-strength steels on reduced flange widths, Metals, 13 (2023) 1754.
- [7] Karabulut S., Erzincanlıoğlu S., Ünal C. U., Bilici A. Y., Yılmaz İ. Ö., Üçüncü Nesil Çeliklerin Otomotiv Tasarımında Kullanımı, Mühendis ve Makina, (Ağustos 2019) 35-41.
- [8] Billur E., Dykeman J., Altan T., "Three generations of advanced high strength steels for automotive applications, 3 parça yazı dizisi", Stamping Journal: Nov/Dec 2013, p.15-16, Jan/Feb 2014, p.12-13, Mar/Apr 2014, p. 12-13.
- [9] World Steel Association AISBL [https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/twinning-induced-plasticity/#:~:text=TWinning%20Induced%20Plasticity%20\(TWIP\)%20steels,elongation%20typically%20greater%20than%2050%25](https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/twinning-induced-plasticity/#:~:text=TWinning%20Induced%20Plasticity%20(TWIP)%20steels,elongation%20typically%20greater%20than%2050%25) Son erişim tarihi: 17.02.2025
- [10] Horvath C. D., Advanced steels for lightweight automotive structures, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, (2010) 35-78.
- [11] Li W., Yong Z., Weijun F., Xinyang J., Speer J.G., Industrial application of Q&P sheet steels, Proceedings of Intl. Symp. on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels, (2013) 141-151.
- [12] Max-Planck-Gesellschaft https://www.mpie.de/3084542/Research_Project_Optimization_Q_P_steels Son Erişim Tarihi: 17.02.2025
- [13] Huyghe, P., Dépinoy, S., Caruso, M., Mercier, D., Georges, C., Malet, L., Godet, S., On the Effect of Q&P Processing on the Stretch-flange-formability of 0.2C Ultra-high Strength Steel Sheets, ISIJ International, 58(7) (2018), 1341–1350.
- [14] Steels for cold stamping – Fortiform https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/third_gen_AHSS/fortiform Son erişim Tarihi: 17.02.2025
- [15] Blake K. Zuidema, Introduction to 3rd Generation Advanced High Strength Steels, ArcelorMittal Global R&D, (2017).
- [16] Liu L., He B., and Huang M., The role of transformation-induced plasticity in the development of advanced high strength steels, Adv. Eng. Mater., 20 (2018) 1701083.

- [17] Yüce O., Farklı özelliklerdeki otomotiv saclarının lazer kaynak uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, (2023) 15-28.
- [18] Köle A., Ayan Y., Kahraman N., Markalama ve kesme işlemleri için karbondioksit (CO₂) lazer makinesi tasarımı, üretimi ve test çalışmaları, Politeknik Dergisi, 27(2) (2024) 759-768.
- [19] Dasgupta A. K. and Mazumder J., Laser welding of zinc coated steel: an alternative to resistance spot welding, Science and Technology of Welding and Joining, 13(3) (2008) 289-293.
- [20] Němeček S., Mužík T., Mišek M., Differences between laser and arc welding of HSS steels, Physics Procedia, 39 (2012) 67-74.
- [21] Bakošová D., Bakošová A., Experimental study of thin steel tubes welded by fiber laser, Manufacturing Technology, 21(1) (2021) 3-13.
- [22] Yüce O., Hıdıroğlu M., Erdoğan İ., Kahraman N., TBF1180 Çeliğin Fiber Lazer Uygulamaları, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 12(1) (2024) 267-281.
- [23] Spena P. R., Maddis M. De, Lombardi F., and Rossini M., Investigation on resistance spot welding of TWIP Steel sheets, Steel research int., 86(12) (2015) 1480-1489.
- [24] Bina M. H., Jamali M., Shamanian M., Sabet H., Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel, Int J Adv Manuf Technol, 75 (2014) 1371-1379.
- [25] Kaya İ., Başer T. A., Kahraman N., Mechanical properties and corrosion behavior of similar/dissimilar resistance spot welded automotive aluminum alloys, Materials Science and Engineering Technology (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik), 54(11) (2013) 1433-1443.
- [26] Pouranvari M., Alizadeh-Sh M., and Marashi S. P. H., Welding metallurgy of stainless steels during resistance spot welding Part I: fusion zone, Science and Technology of Welding and Joining, 20(6) (2015) 502-511.
- [27] Kahraman N., The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets, Materials and Design, 28 (2007) 420-427.
- [28] Rao S. S., Chhibber R., Aror K. S., Shome M., Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel, Journal of Materials Processing Technology, 246 (2017) 252-261.
- [29] Vinas J., Kascak L., and Gres M., Optimization of resistance spot welding parameters for microalloyed steel sheets, Open Eng. 6(1) (2016) 504-510.
- [30] Lin H.C., Hsu C.A., Lee C.S., Kuo T.Y., Jeng S.L., Effects of zinc layer thickness on resistance spot welding of galvanized mild steel, Journal of Materials Processing Tech., 251 (2018) 205-213.
- [31] Murugan S. P., Vijayan V., Ji C., and Park Y.-D., Four types of LME cracks in RSW of Zn-coated AHSS, Welding Journal, 99 (March 2020) 75-92.
- [32] Park Y., Murugan S. P., Liquid metal embrittlement cracks in resistance spot welded advanced high strength steels, Proceedings of the JAAA2018, Kitakyushu, Japan, (November 2018) 27-28.
- [33] Bhattacharya D., Liquid metal embrittlement during resistance spot welding of Zn-coated high-strength steels, Materials Science and Technology, 34(15) (2018) 1809-1829.
- [34] Billur E., Çetin B., Gürleyik M., New generation advanced high strength steels: Developments, trends and constraints, International Journal of Scientific and Technological Research, 2(1) (2016) 50-62.
- [35] Prabitz K. M., Asadzadeh M. Z., Pichler M., Antretter T., Beal C., Schubert H., Hilpert B., Gruber M., Sierlinger R., Ecker W., Liquid metal embrittlement of advanced high strength steel: experiments and damage modeling", Materials, 14(18) (2021) 5451.
- [36] Ling Z. X., Chen T., Kong L., Wang M., Pan H., Lei M., Liquid metal embrittlement cracking during resistance spot welding of galvanized Q&P980 steel, Metallurgical and Materials Transactions A, 50(11) (2019) 5128-5142.
- [37] Sierlinger R., Gruber M., A cracking good story of liquid metal embrittlement during spot welding of advanced high strength steels, Technical report, Linz, Austria: voestalpine Stahl GmbH, (2016) 1-6.
- [38] Beal C., Kleber X., Fabregue D., Bouzekri M., Embrittlement of a zinc coated high manganese TWIP steel, Materials Science and Engineering A, 543 (2012) 76-83.
- [39] Meyerdierks M., Zinke M., Jüttner S., Biro E., Determination of LME sensitivity of zinc coated steels based on the programmable deformation cracking test,

- Welding in the World, 65 (2020) 2295–2308.
- [40] Ling Z., Wang M., Kong L., Chen K., Towards an explanation of liquid metal embrittlement cracking in resistance spot welding of dissimilar steels, *Materials and Design*, 195 (2020) 109055.
- [41] Lalachan A., Murugan S. P., Jin W. S., Park Y. D., Liquid metal embrittlement in Zn-coated steel resistance spot welding: Critical electrode-contact and nugget growth for stress development and cracking, *Journal of Materials Processing Technology*, 318 (2023) 118009.
- [42] Kim Y.G., Kim I.J., Kim J.S. et al. Evaluation of surface crack in resistance spot welds of Zn-coated steel, *Mater Trans*, 55(1) (2014) 171–175.
- [43] <https://www.baosteel.com/en/home>
Son erişim Tarihi: 17.02.2025
- [44] Emre H. E., Kaçar R., Resistance spot weldability of galvanize coated and uncoated TRIP steels, *Metals (Basel)*, 6 (2016) 299.
- [45] Beal C., Mechanical behaviour of a new automotive high manganese TWIP steel in the presence of liquid zinc, *Doctoral Dissertation, Intelligence and National Security Alliance, Lyon, France*, (2011) 34-67.
- [46] Siar O., Benlatreche Y., Dupuy T., Dancette S., Fabrègue D., Effect of severe welding conditions on liquid metal embrittlement of a 3rd-generation advanced high-strength steel, *Metals*, 10(9) (2020) 1166.
- [47] Ashiri R., Anwarul H. M., Chang-Wook J., et al., Super-critical area and critical nugget diameter for liquid metal embrittlement of Zn-coated twinning induced plasticity steels, *Scr Mater.* 109 (2015) 6–10.
- [48] Ashiri R., M Shamanian., Salimijazi H. R., et al., Liquid metal embrittlement-free welds of Zn-coated twinning induced plasticity steels, *Scr Mater.* 114 (2016) 41–47.
- [49] Yilmaz I. O., Bilici A. Y., and Aydin H., Resistance spot weldability of TBF steel sheets with dissimilar thickness, *Metall. Res. Technol.* 117(6) (2020) 620-633.
- [50] Bhattacharya D., Cho L., van der A E., Pichler A., Pottore N., Ghassemi-Armaki, H. Findley K. O., Speer J.G., Influence of the starting microstructure of an advanced high strength steel on the characteristics of Zn-Assisted liquid metal embrittlement, *Materials Science and Engineering: A*, 804 (2021) 140391.
- [51] Wintjes E., DiGiovanni C., He L., Bag S., Goodwin F., Biro E., Zhou Y., Effect of multiple pulse resistance spot welding schedules on liquid metal embrittlement severity, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(10) (2019) 101001.
- [52] Dupuy T., A novel electrode tip geometry to mitigate liquid metal embrittlement during resistance spot welding, *Welding in the World*, 66(9) (2022) 1715–1731.
- [53] DiGiovanni C., He L., Pan H., Zhou N. Y., Biro E., Predicting liquid metal embrittlement severity in resistance spot welding using hot tensile testing data, *Welding in the World*, 66(9) (2022) 1705–1714.