



Ray Bağlantı Elemanlarına Akımsız Ni-B Kaplama ve Isıl İşlem Uygulamaları

Mustafa DURSUNLAR^{*1}, Zakir TAŞ²

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Sorgun Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Yozgat, Türkiye

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

*mustafa.dursunlar@yobu.edu.tr

(Alınış/Received: 19.04.2024, Kabul/Accepted: 20.05.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Son yıllarda raylı sistem araçlarının hızı ve taşıdığı yük miktarları artmıştır. Bu durum kent içi ve yüksek hızlı tren hatlarının günümüz koşullarına uyumunu zorlaştırmaktadır. Bu amaçla ray bağlantı elemanlarının aşınma, korozyon ve yorulma dayanımlarının artırılması için genellikle Zn-Al kaplanarak kullanılmaktadır. Zn-Al kaplamanın yeterli sertlik ve aşınma direncine sahip olmaması, çinko banyolarının sürdürülebilir ve çevreci olmaması, homojen olmayan kaplama kalınlığı gibi nedenler Zn-Al kaplamayı dezavantajlı kılmaktadır. Bu çalışmada Zn-Al kaplamaya alternatif olarak, SKL14 gergi kışacları akımsız Ni-B kaplanmış ve ısıl işlem uygulanmıştır. Kaplama yüzeylerinin incelenmesinde, Zn-Al kaplama yüzeylerinde bazı çizik, çukur ve süreksizlikler gözlemlenmiş olup, Ni-B kaplama yüzeylerinde ise boşluk, gözenek, çizik, çukur, süreksizlik, akma, kabarma, pullanma, çatlama, kılcal kırılma vb. herhangi bir kusur gözlemlenmemiştir. Kaplamaların kesitten görünüşlerinin incelenmesinde, Zn-Al kaplama kalınlığının homojen olmadığı ve kaplama kalınlığının ortalama yaklaşık 22,5µm olduğu, atma, kabuk, süreksizlik ile altlık malzemeye çok iyi yapışmadığı gözlemlenmiştir. Ni-B kaplamalarda atma, kabuklanma ve süreksizlik gözlemlenmemiş olup, homojen bir kaplama kalınlığı elde edilmiş ve altlık malzemeye çok iyi bir şekilde yapıştığı, kaplama kalınlıklarının yaklaşık ise 19,5 µm olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama yüzeylerinin SEM analizi sonucunda, Zn-Al kaplama yüzeyinde pürüz, çatlak ve boşlukların olduğu heterojen bir yapı gözlemlenmiştir. Ni-B kaplamaların ise yüzeyde düzensiz, dokulu ve çok katmanlı küme oluşmasını sağlayan nodüllerden kaynaklanan karnabahar formu gözlemlenmiştir. Isıl işlem sonucu, tane boyutlarının küçüldüğü ve tane sınırlarının daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, ısıl işlemin kaplamanın sertlik ve aşınma direncini artırmasıyla açıklanmaktadır. Sonuç olarak, gergi kışaclarına Ni-B kaplama ve ısıl işlem başarılı bir şekilde uygulanmış olup, Zn-Al kaplamalara iyi bir alternatif oluşturmaktadır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Ray, Ray bağlantısı, Gergi kışacı, Ni-B kaplama

Electroless Ni-B Coating and Heat Treatment Application for Rail Fastener Elements

Abstract: In recent years, the speed of rail system vehicles and the amount of load they carry have increased. This situation makes it difficult for urban and high-speed train lines to adapt to today's conditions. For this purpose, Zn-Al coating is generally used to increase the wear, corrosion and fatigue resistance of rail fasteners. Reasons such as Zn-Al coating not having sufficient hardness and wear resistance, zinc baths not being sustainable and environmentally friendly, and non-homogeneous coating thickness make Zn-Al coating disadvantageous. In this study, as an alternative to Zn-Al coating, SKL14 tension clamps were coated with electroless Ni-B and heat treated. In the examination of the coating surfaces, some scratches, pits and discontinuities were observed on the Zn-Al coating surfaces, while on the Ni-B coating surfaces, voids, pores, scratches, pits, discontinuities, flowing, blistering, flaking, cracking, capillary breaks, etc. were observed. No defects were observed. When examining the cross-sectional views of the coatings, it was observed that the Zn-Al coating thickness was not homogeneous and the average coating thickness was approximately 22.5µm, and that it did not adhere very well to the substrate material due to flaking, crust, discontinuity. No flaking, crusting or discontinuity was observed in Ni-B coatings, a homogeneous coating thickness was obtained and it was observed that it adhered very well to the substrate material, and the coating thickness was approximately 19.5 µm. As a result of the SEM analysis of the coating surfaces, a

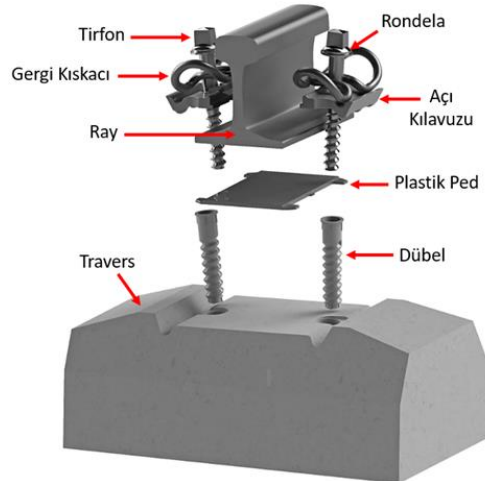
Atıf için/Cite as: M. Dursunlar, Z. Taş, "Ray bağlantı elemanlarına akımsız Ni-B kaplama ve ısıl işlem uygulamaları," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 67-78, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1471045

heterogeneous structure with roughness, cracks and voids was observed on the Zn-Al coating surface. The cauliflower form of Ni-B coatings, resulting from nodules that create irregular, textured and multi-layered clusters on the surface, was observed. It was observed that as a result of heat treatment, grain sizes decreased and grain boundaries became more distinct. This is explained by the fact that heat treatment increases the hardness and wear resistance of the coating. As a result, Ni-B coating and heat treatment have been successfully applied to tension clamps and represent a good alternative to Zn-Al coatings.

Keywords: Railway, Rail, Rail fastener, Tension clamp, Ni-B coating

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı birçok ülke ve bölgedeki yolcu ve yük taşımacılığı için her zaman çok önemli bir ulaşım aracı olmuştur. Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle beraber raylı sistem araçlarının hızları ve taşıyabildikleri yük tonajları artmıştır. Bu durum demiryollarındaki ray-travers bağlantı elemanlarının hem mukavemetli hem de esnek yapıda olmasını gerektirmiştir [1]. Demiryoluna mukavemet ray ve traversler aracılığıyla, gerekli esneklik ise ray-travers bağlantı elemanlarıyla verilmektedir. Ray-travers bağlantı elemanları arasında esnekliği sağlayan eleman ise gergi kısıkaçlarıdır [2]. Gergi kısıkaçları, ray-travers bağlantı elemanı çeşitlerinden biri olan HM tipi bağlantının bir elemanıdır. Günümüzde HM tipi bağlantı, yüksek hızlı hatlarda, ağır taşımacılık, konvansiyonel ve kent içi raylı sistem hatlarında en sık kullanılan ortak bağlantı tipidir. HM tipi ray-travers bağlantı elemanlarından biri olan yaylı gergi kısıkaçları ise SKL olarak adlandırılmaktadır [3]. HM tipi bağlantıya ait görsel Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. HM tipi bağlantı

Gergi kısıkaçları, demiryolu hattı boyunca uzanan karşılıklı her iki rayın sağ ve sol tabanlarına basacak şekilde ortalama 60 cm aralıklarla yerleştirilen traverslere sıkıca montajı yapılarak hatlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sayede rayların ve traverslerin uzunlamasına ve yanıl hareket etmesini engelleyerek hat bütünlüğünü korur. Ayrıca iki ray arası açıklık olan ekartman ile iki travers arası eker aralığının sabit kalmasını sağlar. Hattın rijitliğini ve sistemin ekstra titreşimini alarak demiryolunun esnek olmasını sağlar. Bu özellikleri sayesinde gergi kısıkaçları demiryolu güvenliği, verimliliği ve konforunu önemli ölçüde artırmaktadır [3-6].

Gergi kısıkaçları uluslararası standartlara sahip ve farklı kimyasal bileşimli, sakin çelikten imal edilen ve gerekli mekanik özellikleri sağlaması için ısıl işlem ve dekarbürizasyon uygulanan alaşım bir yay çeliğidir [1]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yay çeliklerinin başında 38Si7, 51CrV4, 60Si2MnWE, 60Si2Mn ve 62Si2CrA gelmektedir. Bu yay çeliklerinin içerisinde Alman standartlarına göre isimlendirilen 38Si7 en az karbon içeriğine sahip olanıdır. Düşük karbon içeriği, plastisitenin zayıflığını alır ve tokluğun üstesinden gelir. Ayrıca dekarbürizasyon

hassasiyetini en aza indirger ve yorulma ömrünü artırır. Bu özellikleri sayesinde demiryolu yapım, bakım ve onarım maliyetlerini azaltarak demiryolu işletmeciliğine ekonomik olarak katkı sağlar. Ayrıca karbon oranının az olması sürdürülebilir bir çevre, iklim değişikliği ve nötr karbon ilkelerini benimseyip destekler [7-9].

Gergi kısıkaçları, raylı sistem araçlarının neden olduğu yüksek hız ve tonajların etkisiyle yapısı itibarıyla ortalama 12 mm aşağı-yukarı yer değiştirme hareketi yaparak demiryoluna gerekli esnekliği sağlamaktadır. Ancak gergi kısıkaçının demiryoluna kazandırdığı bu esnekliğe karşın aşınması kaçınılmazdır. Gergi kısıkaçının aşınmasıyla birlikte ray-travers bağlantı sıklığı zayıflar ve gergi kısıkaç yüzeylerinde çatlakların oluşmasıyla yorulma kaynaklı kırılma gibi çeşitli hasarlara neden olmaktadır. Bu durum, raylı taşıtların derayman (raydan çıkma) olmasına ve demiryolu trafiğini olumsuz etkileyerek yolcu ve yük taşımacılığını riske atmaktadır [10-12]. Bu durumun üstesinden gelmek için gergi kısıkaçlarına çeşitli kaplamalar ve ısıl işlem uygulamaları yapılmaktadır.

Gergi kısıkaçlarının imalinde ısıl işlem ve dekarbürizasyon işlemi uygulanmaktadır [1, 13]. Isıl işlem, gergi kısıkaçının sertlik ve aşınma direncini artırmaktadır. Dekarbürizasyon işlemi ise sertlik ve aşınma direncini azaltmakla beraber yorulma ömrünü artırmaktadır. Dekarbürizasyon işlemi malzeme yüzeylerinde çapak, çatlak ve çukur gibi bazı imal kusurlarına neden olabilmektedir. Dekarbürizasyonla sertliği azalan gergi kısıkaçları yüksek hız, ağır tonaj, aşırı titreşim, çevre ve yol şartları gibi etkenlerden dolayı kolayca aşınmaktadır [10-11, 13]. Bu duruma çözüm olarak gergi kısıkaçlarına genellikle çinko galvaniz kaplama yapılarak hatlarda kullanılmaktadır. Çinko kaplama yapılmasının asıl amacı aşınma direncinin artırılmasından ziyade korozyon koruması için uygulanmaktadır. Çinko galvaniz kaplama banyolarına son yıllarda Al ilave edilmesine rağmen yeterince sertlik ve aşınma direncine sahip olmaması, çinko banyolarının sürdürülebilir ve çevreci olmaması, homojen bir kaplama kalınlığının elde edilememesi gibi nedenler çinko galvaniz kaplama kullanımını dezavantajlı hale getirmektedir [14-17]. Çinko galvaniz kaplamanın bu dezavantajlarına karşın, akımsız kaplamalar sahip olduğu üstün özellikleri sayesinde iyi bir alternatif sunmaktadır.

Akımsız kaplamalar, otokatalik bir süreç olup kimyasal biriktirme olarak bilinir ve elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmadan kaplama yapılmasına olanak sağlayan bir yöntemdir [18]. İlk akımsız Nikel (Ni) kaplama 1940'lı yıllarda Brenner ve Riddel tarafından [19], ilk akımsız Nikel-Bor (Ni-B) kaplama ise yaklaşık 10 yıl sonra geliştirilmiştir [20]. Akımsız nikel kaplama banyolarında bir indirgeyici ajanla birikme olur ve homojen kaplama kalınlığı elde edilir. Bu sayede diğer kaplama yöntemlerine kıyasla karmaşık geometriler için mükemmel şekil uyumu sağlar [21].

Ni-B kaplamalar, akımsız Nikel-Fosfor (Ni-P) kaplamaların bir çeşidi olarak yaklaşık 70 yıldır endüstriyel olarak kullanılmaktadır. Yüksek sertlik ve aşınma direnci (Ni-P'ye göre), düşük sürtünme katsayısı, korozyon direncinin nispeten yüksek olması, lehimlenebilir olması, yüksek elektrik iletkenliği, homojen kaplama kalınlığı eldesi, yüzey kalitesinin iyi olması, estetik görünmesi, çevreci bir kaplama olması gibi birçok olumlu özelliklere sahiptir. Bu sayede Ni-B kaplamalar elektronik, havacılık, otomotiv, tekstil ve kimya endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir [18, 22]. Akımsız kaplamalar içerisinde Ni-P kaplamalar popüler olsa da son yıllarda üstün sertlik ve aşınma direnci sayesinde yüksek teknoloji gerektiren önemli kaplamalarda Ni-B kaplamalar sıklıkla tercih edilmektedir [22].

Ni-B kaplamadaki yüzey morfolojisi karnabahar benzeri bir yapıya, renk olarak açık gri veya fümre rengi görünüme sahiptir [23]. Amorf olan kaplama yapısı, bor miktarının artışı ile amorf faz miktarını artırmaktadır. Ni-B kaplamaların geneli %5-7 arasında bor içeriğine sahip olup, X-ışınında ağırlıkça %5-6 oranında bulunan kaplamalar amorf yapı olarak görünür ve kaplamadaki bor miktarının artışı sertlik, aşınma ve korozyon direncini artırır [20]. Ayrıca sertlik, aşınma ve

korozyon direncini optimize etmek için amorf olan yapı kristale döndürülebilmektedir [24]. Yaklaşık 300°C ve üzeri ısıl işlem uygulamaları sonrasında yapıda kristal faz görülebilmekte ve bu sayede sertlik yaklaşık iki katına çıkabilmektedir [25].

Ni-B kaplamaların metalik altlıklara yapışmaları ve süreklilikleri çok iyi olmakta ve kaplama işlemi çok kolay yapılabilmektedir. Bu sayede homojen bir kaplama yapılmasına imkan sağlar ve karmaşık geometrilerin düzgün bir biçimde kaplanabilmesi çok kolaydır [26-27]. Morfolojileri karnabahara benzer ve bu yapı özellikle adeziv aşınma koşulları altında yağlayıcıları tutma konusunda iyidir [28]. Sertlik ve aşınma dirençlerinin yüksek olması, yağlayıcılıkları ve yükleme kapasitelerinin iyi olmasından kaynaklanır [27]. Yüksek sertlik ile aşınma ve korozyon dirençlerinin yüksek olması sayesinde paslanmaz çelik, alüminyum ve titanyum gibi malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için Ni-B kaplamalar son yıllarda birçok endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [29].

Literatür incelendiğinde, Ni-B kaplamaların çeşitli altlık malzemelere başarıyla uygulandığı birçok çalışma mevcuttur. Krishnaveni ve ark. [28], yumuşak, bakır ve paslanmaz çelik üzerine Ni-B kaplama yapmışlar ve sertlik ile aşınma direncini incelemişlerdir. Sonuç olarak Ni-B kaplamaların sertlik ve aşınma direncini artırdığını bulmuşlardır. Vitry ve ark. [25], altlık malzeme olarak St-37 yumuşak çelik üzerine Ni-B kaplaması yapmışlar ve kaplamanın çizilme testine karşı iyi bir direnç göstererek sünek bir davranış sergilediğini bulmuşlardır. Bülbül ve ark. [30], AISI 316L paslanmaz çelik üzerine Ni-B kaplama yaparak kaplamanın yapısı, tribolojik ve korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak karnabahar bir morfolojiye sahip amorf olan kaplamanın çeliğin sertlik ve aşınma direncini iyileştirdiğini bulmuşlardır. Correa ve ark. [31], magnezyum ve AZ91D alaşım altlıkların üzerine Ni-B kaplama yapmışlar ve tribolojik davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak Ni-B kaplamaların düşük sürtünme katsayıları ile aşınma oranlarını önemli ölçüde azalttığını bulmuşlardır. Madah ve ark. [32], altlık olarak Ck45 çeliği üzerine akımsız Ni-B kaplamış ve kaplamanın kuru kayma sırasındaki aşınma mekanizmaları ve aşınmış yüzeylerin dayanıklılık ömrü üzerine çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak Ni-B kaplamanın spesifik aşınma oranının çeliğinkinin onda biri kadar olduğunu bulmuşlardır. Bonin ve ark. [26], altlık malzeme olarak St-37 yumuşak çelik üzerine Ni-B/Ni-P; Ni-P/Ni-B; Ni-B/Ni-B ve Ni-P/Ni-P dörtlü dubleks kaplama yaparak aşınma karakterizasyonunu incelemişlerdir. Sonuçlarda Ni-B kaplamaların daha iyi yapışma, sertlik ve aşınma direncinin daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Balaraju ve ark. [33], altlık olarak orta karbonlu çelik üzerine Ni-B kaplamışlar ve sertlik ile aşınma davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak kaplamanın sertlik ve aşınma direncinin arttığını gözlemlemişlerdir. Vitry ve ark. [20], altlık malzeme olarak St-37 yumuşak çelik üzerine Ni-B kaplama koşullarını değiştirerek kaplamanın bor içeriğinin artırılması üzerine çalışmışlardır. Sonuç olarak yüksek borlu (%7–9 B) kaplamanın aşındırıcı aşınmaya, orta borlu (%5–6 B) kaplamaların ise kayma aşınması ve çizik testine daha iyi direnç gösterdiğini bulmuşlardır. Mukhopadhyay ve ark. [18], altlık olarak AISI 1040 çeliğine Ni-B, Ni-B-Mo ve Ni-B-W kaplamalar yapmış ve kaplamaların oda ile yüksek sıcaklıklarda tribolojik davranışını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak kaplamaların sertlik ve aşınma dirençlerinin arttığını bulmuşlardır. Mukhopadhyay ve ark. [34], AISI 1040 çeliği üzerine Ni-B kaplama yaparak tribolojik davranışa çalışma sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak farklı çalışma sıcaklıklarında kaplamanın aşınma direncinin arttığını bulmuşlardır. Gültekin ve ark. [35], düşük karbonlu St-42 çeliğinin üzerine kurşunsuz Ni-B ve Ni-B/CeO₂ kompozit kaplama yapmışlar ve bu kaplamaların aşınma direncini artırdığını bulmuşlardır. Bayatlı ve ark. [36], altlık malzeme olarak su verilmiş ve temperlenmiş AISI 1040 çelik malzeme üzerine Ni-B ve Ni-B-W kaplamalara bor karbür takviyesinin yüzey özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, kaplamaların sertlik, aşınma ve çizilme dirençlerinin arttığını bulmuşlardır. Agrawal ve ark. [37], altlık olarak çelik malzemelerin üzerine stabilizatör içermeyen çift banyodan oluşan Ni-B kaplama yapmışlardır. Sonuç olarak yapılan kaplamaların sertlik, çizilme sertliği, aşınma ve korozyon dirençlerinin arttığını bulmuşlardır.

Bu çalışmada, özellikle kaynaklı demiryollarında [38] standart olarak Zn-Al kaplanarak kullanılan gergi kısıkaçlarına, kaplama ve yüzey kalitesi, altlık malzemeye yapışma ve üstün mekanik özellikleri vb. açısından Ni-B kaplama ile iyi bir alternatif oluşturulması amaçlanmıştır.

2. Metot

2.1. Materyal

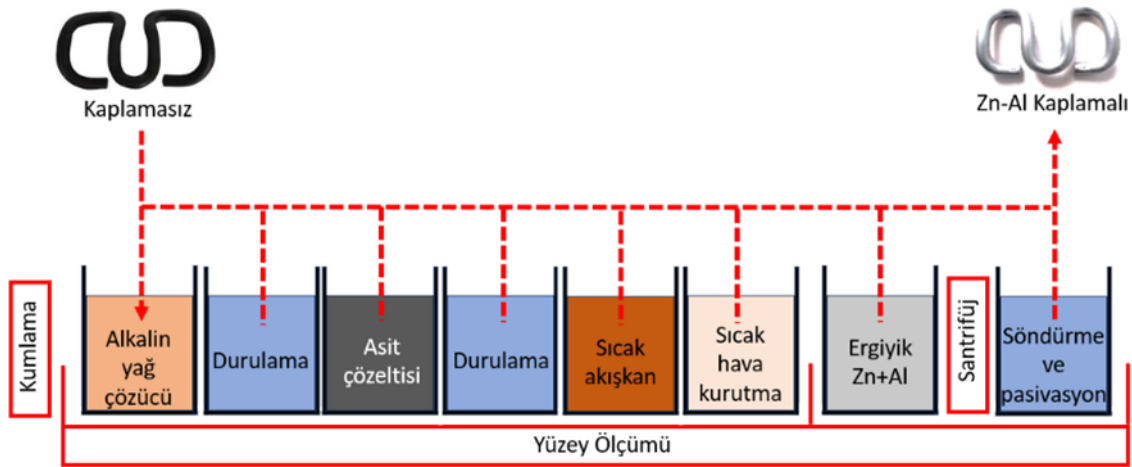
Çalışmada altlık olarak kullanılan malzeme Ø13 mm çapında ve 38Si7 kimyasal bileşime sahip HM tipi ray-travers bağlantı elemanlarından SKL14 yaylı gergi kısıkaçtır. Çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan gergi kısıkaçları aynı döküm, şarj ve imalat numarasına sahip olup, Gürmak Demiryolundan temin edilmiştir.

Tablo 1. 38Si7 SKL14 kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	P	S
Yüzde (%)	0,35-0,42	1,50-1,80	0,5-0,8	maks. 0,025	maks. 0,025

2.2. Zn-Al kaplama

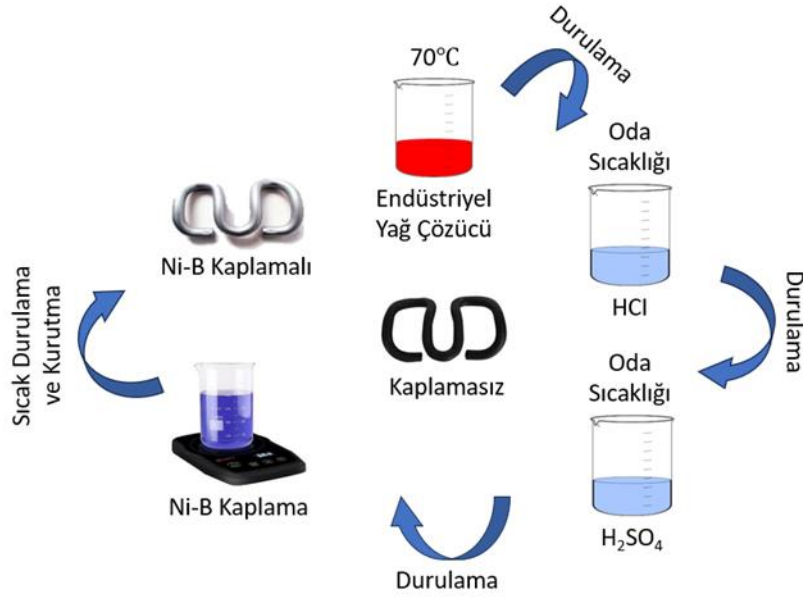
Zn-Al kaplamalar, demiryolunda kullanılan gergi kısıkaçlarına standart olarak uygulanan Zn-Al prosesine uygun bir biçimde Gürmak Demiryolunda yapılmıştır. Kaplama öncesi tüm numuneler 230µ ile kumlanmıştır. Kaplama işleminde banyo içeriği yaklaşık %60 Zn ve %40 Al olarak ayarlanmıştır. Kaplama kalınlığı yaklaşık ~20µm olarak yapılmıştır. Kaplamaya ait proses Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Zn-Al kaplama prosesi

2.3. Ni-B kaplama

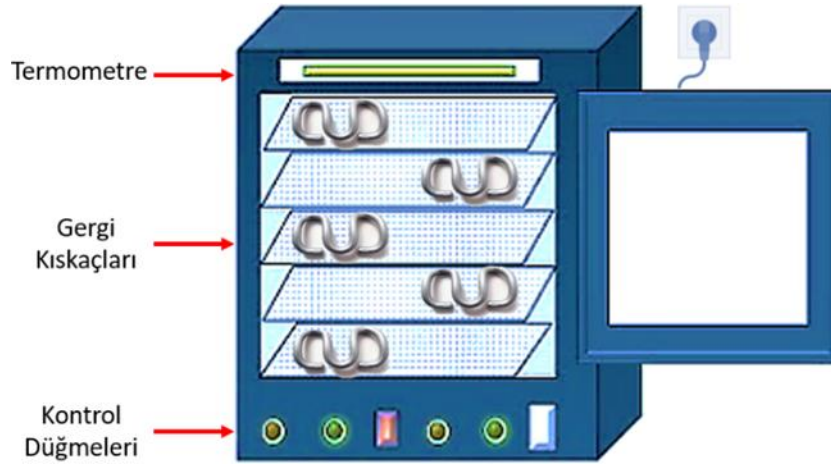
Ni-B kaplamalar, BoraPlate ticari prosesiyle kaplanmıştır. Kaplama öncesi numunelerin tamamı 230µ ile kumlanmıştır. Daha sonra 70°C sıcaklıkta 10 dakika boyunca endüstriyel yağ çözücü ile yüzeyler temizlenmiştir. Ardından sırasıyla HCl ve H₂SO₄ çözeltileri ile yüzeyler oda sıcaklığında aktive edilmiştir. Her bir adımdan sonra numuneler damıtılmış su ile durulanmıştır. Tüm akımsız kaplama işlemleri 60 dakika süreyle 90±2°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Banyo manyetik bir karıştırıcı kullanılarak çalkalanmıştır. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra 50-55°C sıcaklığındaki sıcak suda durulama yapılmıştır. Kaplama kalınlığı yaklaşık ~20µm ve bor içeriği ise yaklaşık %5 olarak ayarlanmıştır. Ön işlem, kaplama işlemi ve kaplama koşullarını içeren proses Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Ni-B kaplama prosesi

2.4. Isıl işlem

Isıl işlem, Ni-B kaplama sonrasında endüstriyel elektrikli ısıl işlem fırınında 250°C sıcaklıkta 5 saat olarak uygulanmıştır. Isıl işleme ait proses Şekil 4'te gösterilmiştir.



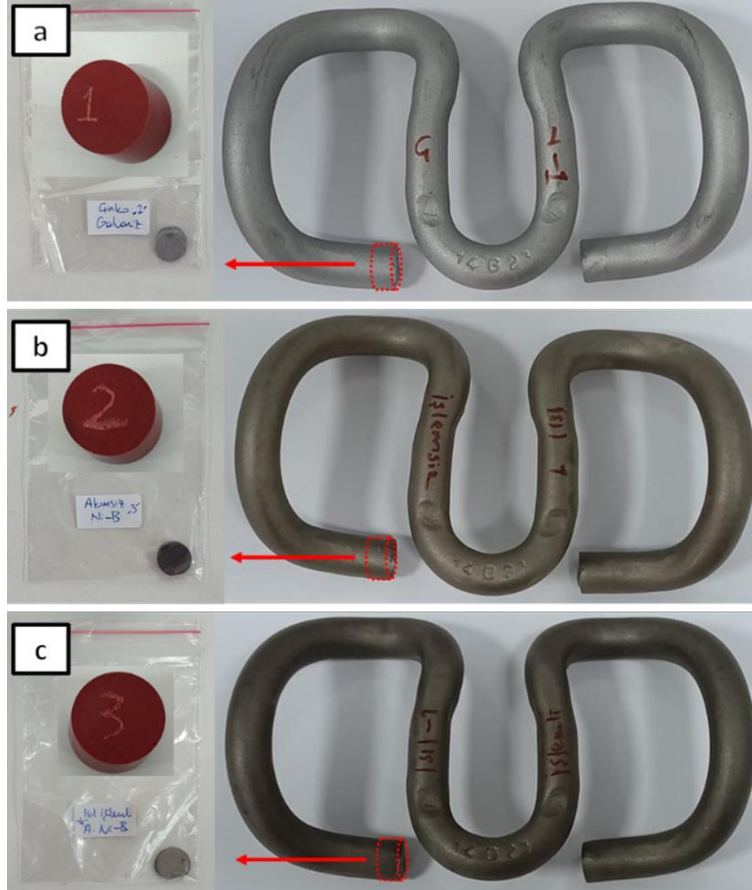
Şekil 4. Isıl işlem fırını

2.4. Karakterizasyon

Mikroyapı çalışmaları, Sivas Bilim ve Teknolojisi Üniversitesi ile Karadeniz Teknik Üniversitesi Laboratuvarlarında yapılmıştır. Mikroyapı analizleri için Zn-Al, Ni-B ve ısıl işlemlenmiş Ni-B numunelerinin hassas kesimle belirlenen kesit alanları tabanlarından kesilmiş ve daha sonra bakalite alınmıştır. Numune tabanlarının dışarıda kalan yüzeyleri bakalitin üst kısmında kalmış ve dolayısıyla kaplamaların en dış yüzeyi incelenmiştir. Hassas kesim yerleri, kesilen numune parçaları ve bakalite alınan numunelere ait görsel Şekil 5'te gösterilmiştir. Bakalite alınan numunelere daha sonra gerekli mikroyapı analizi için zımpara ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Kesit görüntüleri ve kaplama kalınlığı SOIF MDS400 model bilgisayar destekli optik cihazıyla, kaplama yüzeylerinin morfoloji analizi ise yüksek çözünürlüğe sahip Zeiss Evo LS10 model SEM cihazı kullanılarak analiz edilmiştir.

3. Bulgular

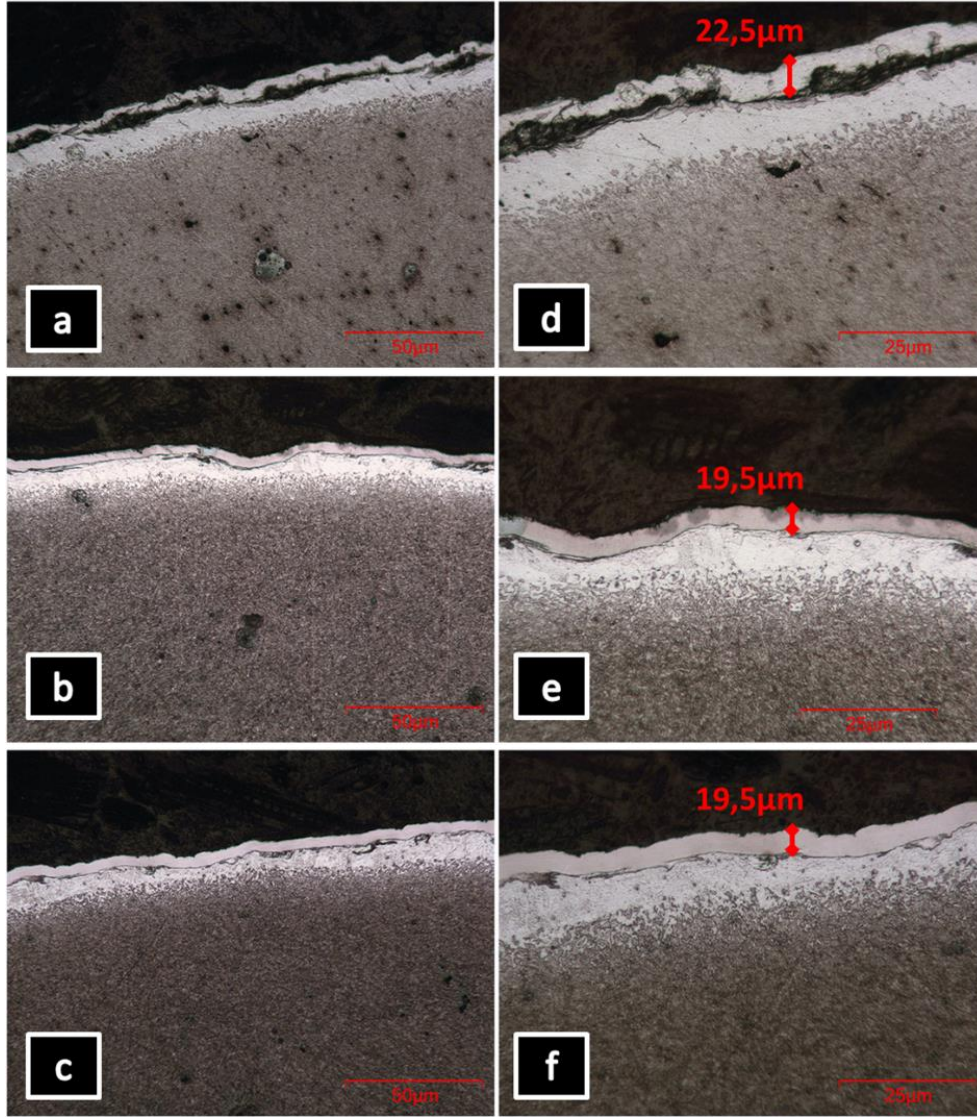
Şekil 5'te gergi kısıkaçlarının kaplama sonrası makro görüntüleri ve ilgili hassas kesim yerleri gösterilmektedir. Şekil 5-a Zn-Al kaplamalı gergi kısıkaçını göstermektedir. Bu kaplamanın yüzey kalitesi çok iyi olmamakla beraber, numune üzerindeki bazı çizik, çukur ve süreksizlikler gözlemlenmiştir. Şekil 5-b Ni-B kaplamalı gergi kısıkaçını ve Şekil 5-c ise ısıtılmış Ni-B numunesine ait görseldir. Ni-B ve ısıtılmış Ni-B numunelerinin yüzeylerinde boşluk, gözenek, çizik, çukur, süreksizlik, akma, kabarma, pullanma, çatlama, kılcal kırılma vb. herhangi bir kusur gözlemlenmemiş olup, kaplama başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca Ni-B ve ısıtılmış Ni-B numunelerinin yüzey kalitesinin klasik Zn-Al kaplamadan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Kaplama sonrası gergi kısıkaçları a) Zn-Al b) Ni-B c) Isıl işlemlenmiş Ni-B

Şekil 6-a-b-c kaplanan numunelere ait kesit görüntülerini, Şekil 6-d-e-f görselleri ise kaplama kalınlıklarını göstermektedir. Şekil 6-a Zn-Al kaplamanın kesit görüntüsünü, Şekil 6-d ise kaplama kalınlığını göstermektedir. Şekil 6-a incelendiğinde, Zn-Al kaplamadaki atma, kabuklanma, süreksizlik ve homojen olmayan kaplama kalınlığı görülmektedir. Bu nedenlerden dolayı Zn-Al kaplamanın altlık malzemeye çok iyi bir şekilde yapışmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 6-d incelendiğinde, Zn-Al kaplama kalınlığının yaklaşık $22,5\mu\text{m}$ olduğu gözlemlenmiştir.

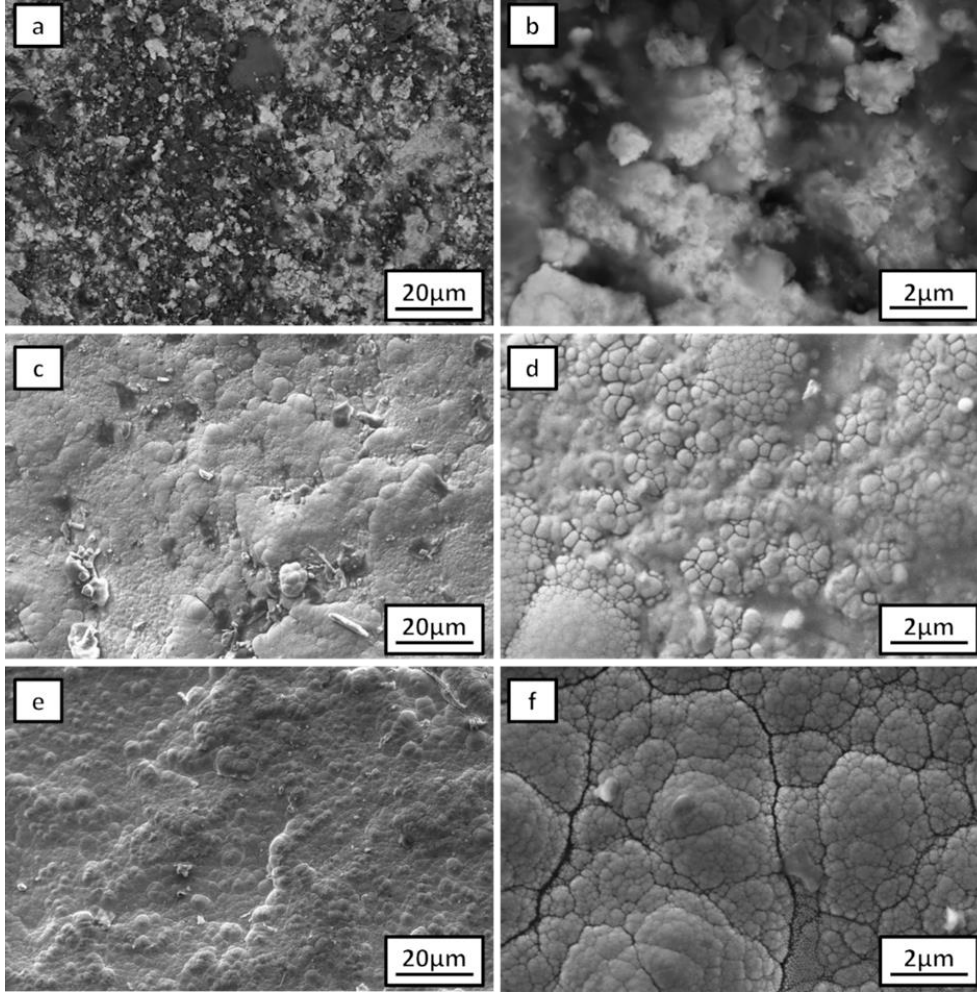
Şekil 6-b Ni-B kaplamanın kesit görüntüsünü, Şekil 6-e ise kaplamanın kalınlığını göstermektedir. Şekil 6-c ısıtılmış Ni-B kaplamanın kesitini, Şekil 6-f ise kaplama kalınlığını göstermektedir. Şekil 6-b ve Şekil 6-c incelendiğinde, Ni-B ve ısıtılmış Ni-B kaplamada atma, kabuklanma ve süreksizlik gözlemlenmemiş olup, homojen bir kaplama kalınlığı elde edilmiştir. Bu sayede Ni-B kaplama, altlık malzemeye çok iyi bir şekilde yapışmıştır. Şekil 6-e ve Şekil 6-f incelendiğinde, Ni-B ve ısıtılmış Ni-B kaplama kalınlıklarının yaklaşık $19,5\mu\text{m}$ olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Kesit a) Zn-Al b) Ni-B c) Isıl işlemlenmiş Ni-B ve kaplama kalınlıklarının mikroyapıları

Şekil 7 kaplama yüzeylerinin morfolojilerine ait SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 7-a-b Zn-Al, Şekil 7-c-d Ni-B, Şekil 7-e-f ise ısıl işlemlenmiş Ni-B kaplamalara ait SEM görüntüleridir. Şekil 7-a incelendiğinde, Zn-Al kaplamanın yüzey morfolojisinin heterojen bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7-b incelendiğinde ise yüksek büyütmede kaplama yüzeyinde pürüz, çatlak ve boşlukların varlığı gözlemlenmiştir.

Şekil 7-c incelendiğinde, düşük büyütmede yüzeyin pürüzlü olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7-d incelendiğinde ise yüksek büyütmede beklenildiği üzere literatürde kendi has görüntüsü olan karnabahar formu gözlemlenmiştir [36]. Bu karnabahar formu, yüzeyde düzensiz, dokulu ve çok katmanlı küme oluşmasını sağlayan nodüllerden kaynaklanmaktadır. Nodüller sayesinde oluşan özgün karnabahar morfolojisi, Ni-B kaplamalara estetik bir görünüm kazandırmasının yanı sıra yüksek sertlik ve aşınma direnci sağlar. Ayrıca bu nodüller, kaplamaya iyi bir yapışma, homojen kaplama kalınlığı ile geniş bir yüzey alanı kazandırır [33]. Şekil 7-e-f için ısıl işlemin yüzey morfolojisine etkisi incelendiğinde, kaplama dokusunun değişmediği, tane boyutlarının küçüldüğü ve tane sınırlarının daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Tane sınırlarının oluşup daha belirgin hale gelmesi ve tane boyutlarının küçülmesinin, kaplamanın sertlik ve aşınma direncini artırdığı birçok çalışmada ispatlanmıştır [21].



Şekil 7. Kaplama yüzeylerinin SEM görüntüleri a-b) Zn-Al ve c-d) Ni-B e-f) Isıl işlemlenmiş Ni-B

4. Sonuç

Bu çalışmada SKL14 ray bağlantı elemanı gergi kısıkaçları Zn-Al, Ni-B ve 250°C-5 saat ısıtılmış Ni-B olmak üzere üç farklı şekilde kaplanmıştır. Ni-B ve ısıtılmış Ni-B kaplama yüzeylerinde boşluk, gözenek, çizik, çukur, süreksizlik, akma, kabarma, pullanma, çatlama, kılcak kırılma vb. herhangi bir kusur gözlemlenmemiş olup, Zn-Al kaplama yüzeylerinde ise bazı çizik, çukur ve süreksizlikler gözlemlenmiştir. Makro düzeyde yüzey kalitesi gözlem analizi sonucunda, Ni-B ve ısıtılmış Ni-B kaplamaların yüzey kalitelerinin Zn-Al kaplamadan çok daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama kesitlerinin optik incelemeleri sonucu, Zn-Al kaplama kalınlığının yaklaşık 22,5µm olduğu, homojen olmayan kaplama kalınlığı, atma, kabuk, süreksizlik ile altlık malzemeye çok iyi yapışmadığı gözlemlenmiştir. Ni-B ve ısıtılmış Ni-B kaplamalarda atma, kabuklanma ve süreksizlik gözlemlenmemiş olup, homojen bir kaplama kalınlığı elde edilmiş ve altlık malzemeye çok iyi bir şekilde yapıştığı, kaplama kalınlıklarının yaklaşık ise 19,5 µm olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama yüzeylerinin SEM sonucunda, Zn-Al kaplama yüzeyinde pürüz, çatlak ve boşlukların olduğu heterojen bir yapı gözlemlenmiştir. Ni-B kaplamaların SEM sonucunda ise yüzeyde düzensiz, dokulu ve çok katmanlı küme oluşmasını sağlayan nodüllerden kaynaklanan karnabahar formu gözlemlenmiştir. Isıl işlemin Ni-B kaplamanın yüzeyine etkisi olarak tane boyutlarının küçüldüğü ve tane sınırlarının daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum yüksek sertlik ve aşınma direnciyle açıklanmaktadır. Ni-B kaplama ile sertlik ve aşınma direnci artacak gergi kısıkaçlarının yüzeylerindeki olası çentik darbe kaynaklı çatlak, kırılma ve aşınmaların, Zn-Al kaplamalı gergi kısıkaçları numunelerine kıyasla gecikeceği öngörülmektedir. Bu sayede gergi kısıkaçları, servis koşulları altında herhangi bir hasar mekanizmasına uğramadan ve

aşınmadan uzun ömürlü kullanılabilir. Bu durum demiryolu güvenliğine ve ekonomisine olumlu katkıda bulunacaktır. Sonuç olarak, gergi kısıkaçlarına Ni-B kaplama ve ısıl işlem başarılı bir şekilde uygulanmış olup, bu çalışmadaki sonuçlar ve literatür araştırmalarına göre Ni-B kaplama, demiryollarında standart olarak kullanılan Zn-Al kaplamaya göre iyi bir alternatif olacaktır. Ayrıca bu çalışmanın gergi kısıkaçlarının akımsız Ni-B kaplama ve ısıl işlem uygulamalarının deneysel olarak incelendiği ilk çalışma olarak literatüre ve raylı sistem endüstrisine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Mustafa DURSUNLAR'ın doktora tez çalışmalarından türetilmiş olup, malzeme temini ve kaplamalar için Gürmak Demiryolu ve Bematek'e teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] J. Liu, B. Jiang, C. Zhang, G. Li, Y. Dai, and L. Chen, "Evolution during hot rolling and control by thermomechanical control process of surface decarburization on 38Si7 spring steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, no. 11, pp. 8677–8686, 2022, doi:10.1007/s11665-022-06956-5
- [2] Y. Liu, X. Jiang, Q. Li, and H. Liu, "Failure analysis and fatigue life prediction of high-speed rail clips based on dic technique," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 12, 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/16878140211066225>
- [3] D. Ferreño, J. A. Casado, I. A. Carrascal, S. Diego, E. Ruiz, M. Saiz, J. A. Sainz-Aja, and A. I. Cimentada, "Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system," *Engineering Structures*, vol. 188, pp. 553–563, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.053>
- [4] M. Chen, W. Zhai, S. Zhu, L. Xu, and Y. Sun, "Vibration-based damage detection of rail fastener using fully convolutional networks," *Vehicle System Dynamics*, vol. 60, no. 7, pp. 2191–2210, 2022, doi: 10.1080/00423114.2021.1896010
- [5] Y. Lu, H. Xie, J. Wang, Z. Li, F. Jia, H. Wu, J. Han, and Z. Jiang, "Influence of hot compressive parameters on flow behavior and microstructure evolution in a commercial medium carbon micro-alloyed spring steel," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 58, pp. 1171–1181, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.021>
- [6] M. Sol-Sánchez, L. Pirozzolo, F. Moreno-Navarro, and M. C. Rubio-Gámez, "A study into the mechanical performance of different configurations for the railway track section: a laboratory approach," *Engineering Structures*, vol. 119, pp. 13–23, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.008>
- [7] W. Peng, J. Zhang, X. Yang, Z. Zhu, and S. Liu, "Failure analysis on the collapse of leaf spring steels during cold-punching," *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, no. 4, pp. 971–978, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.11.008>
- [8] C. Xu, Y. Liang, M. Yang, J. Yu, and X. Peng, "Effects of the ultrasonic assisted surface rolling process on the fatigue crack initiation position distribution and fatigue life of 51CrV4 spring steel," *Materials*, Vol. 14, Page 2565, 2021, doi:10.3390/MA14102565
- [9] C. L. Zhang, L. Y. Zhou, and Y. Z. Liu, "Surface decarburization characteristics and relation between decarburized types and heating temperature of spring steel 60Si2MnA," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, no. 8, pp. 720–724, 2013, doi:10.1007/s12613-013-0789-1
- [10] D. Ma, J. Shi, Z. Yan, and L. Sun, "Failure analysis of fatigue damage for fastening clips in the ballastless track of high-speed railway considering random track irregularities," *Engineering Failure Analysis*, vol. 131, no. 105897, 2022, doi:10.1007/s12613-013-0789-1
- [11] H. Wang, F. Su, Z. Wen, and C. Li, "Effects of Mn and Si on the ferrite decarburization of spring steel," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 27, pp. 363–371, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.259>
- [12] N. Zhang, C. Fu, B. Jiang, L. Sun, and Y. Liu, "Failure analysis of fatigue fracture for 60Si2Mn steel fastening clip in the track of high-speed railway," *Engineering Failure Analysis*, vol. 142, no. 106757, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106757>

- [13] X. W. Wang, Q. F. Hu, C. L. Zhang, L. Chen, C. Y. Zhu, B. Tao, B. Jiang, and Y. Z. Liu, "Optimization of heat treatment for 38Si7 spring steel with excellent mechanical properties and controlled decarburization," *Materials*, vol. 15, no. 11, 2022, doi:10.3390/ma15113763
- [14] H. Kania, J. Mendala, J. Kozuba, and M. Saternus, "Development of bath chemical composition for batch hot-dip galvanizing—a review," *Materials*, vol. 13, no. 18, pp. 4168, 2020, doi:10.3390/MA13184168
- [15] M. Klekotka, K. Zielińska, A. Stankiewicz, and M. Kuciej, "Tribological and anticorrosion performance of electroplated zinc based nanocomposite coatings," *Coatings*, vol. 10, no. 6, pp. 594, 2020, doi:10.3390/coatings10060594
- [16] Q. Li, H. Lu, J. Cui, M. An, and D. Li, "Electrodeposition of nanocrystalline zinc on steel for enhanced resistance to corrosive wear," *Surface and Coatings Technology*, vol. 304, pp. 567–573, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.056>
- [17] I. D. Utu, R. Muntean, and I. Mitelea, "Corrosion and wear properties of Zn-based composite coatings," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29 no. 8, pp. 5360–5365, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04995-4>
- [18] A. Mukhopadhyay, T. K. Barman, P. Sahoo, and J. P. Davim, "Comparative study of tribological behavior of electroless Ni–B, Ni–B–Mo, and Ni–B–W coatings at room and high temperatures," *Lubricants*, vol. 6, no. 3, pp. 67, 2018, doi:10.1177/1350650118755781
- [19] A. Brenner, and G. E. Riddell, "Nickel plating on steel by chemical reduction," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 37, no. 1, pp. 31, 1946, doi:10.6028/jres.037.019
- [20] V. Vitry, and L. Bonin, "Increase of boron content in electroless nickel-boron coating by modification of plating conditions," *Surface and Coatings Technology*, vol. 311, pp. 164–171, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.009>
- [21] S. Pal, and V. Jayaram, "Effect of microstructure on the hardness and dry sliding behavior of electroless Ni–B coating". *Materialia*, vol. 4, pp. 47–64, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.09.004>
- [22] P. Sahoo, and S. K. Das, "Tribology of electroless nickel coatings—a review," *Materials & Design*, vol. 32, no. 4, pp. 1760–1775, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.013>
- [23] M. Yunacti, V. Vitry, A. Montagne, and M. H. Staia, "Replacing toxic hard chrome coatings: exploring the tribocorrosion behaviour of electroless nickel-boron coatings," *Coatings*, vol. 13, no. 12, pp. 2046, 2023, doi:10.3390/coatings13122046
- [24] V. Vitry, J. Hastir, A. Mégret, S. Yazdani, M. Yunacti, and L. Bonin, "Recent advances in electroless nickel boron coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 429, no. 127937, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127937>
- [25] V. Vitry, A. F. Kanta, and F. Delaunoy, "Mechanical and wear characterization of electroless nickel-boron coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 206, no. 7, pp. 1879–1885, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.021>
- [26] L. Bonin, and V. Vitry, "Mechanical and wear characterization of electroless nickel mono and bilayers and high boron-mid phosphorus electroless nickel duplex coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 307, pp. 957–962, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.021>
- [27] V. Vitry, and F. Delaunoy, "Nanostructured electroless nickel-boron coatings for wear resistance," *Anti-Abrasive Nanocoatings: Current and Future Applications*, pp. 157–199, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-211-3.00007-8>
- [28] K. Krishnaveni, T. S. N. Sankara Narayanan, and S. K. Seshadri, "Electroless Ni–B coatings: preparation and evaluation of hardness and wear resistance," *Surface and Coatings Technology*, vol. 190, no. 1, pp. 115–121, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.01.038>
- [29] R. Tima, and F. Mahboubi, "Effect of plasma nitriding temperature on microstructure and wear properties of electroless nickel-boron coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 415, no. 127084, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127084>
- [30] F. Bülbül, H. Altun, V. Ezirmik, and Ö. Küçük, "Investigation of structural, tribological and corrosion properties of electroless Ni–B coating deposited on 316L stainless steel," *Journal of Engineering Tribology*, vol. 227, no. 6, pp. 629–639, 2012, doi:10.1177/1350650112464928
- [31] E. Correa, A. A. Zuleta, L. Guerra, M. A. Gómez, J. G. Castaño, F. Echeverría, H. Liu, P. Skeldon, and G. E. Thompson, "Tribological behavior of electroless Ni–B coatings on magnesium and AZ91D alloy," *Wear*, vol. 305, no. 1–2, pp. 115–123, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.004>
- [32] F. Madah, C. Dehghanian, and A. A. Amadeh, "Investigations on the wear mechanisms of electroless Ni–B coating during dry sliding and endurance life of the worn surfaces," *Surface and Coatings Technology*, vol. 282, pp. 6–15, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.003>

- [33] J. N. Balaraju, A. Priyadarshi, V. Kumar, N. T. Manikandanath, P. P. Kumar, and B. Ravisankar, "Hardness and wear behaviour of electroless Ni-B coatings," *Materials Science and Technology*, vol. 32, no.16, pp. 1654–1665, 2016, doi:10.1080/02670836.2015.1137683
- [34] A. Mukhopadhyay, T. K. Barman, and P. Sahoo, "Effect of operating temperature on tribological behavior of as-plated Ni-B coating deposited by electroless method," *Tribology Transactions*, vol. 61, no. 1, pp. 41–52, 2018, doi:10.1080/10402004.2016.1271929
- [35] D. Gültekin, E. Duru, and H. Akbulut, "Improved wear behaviors of lead-free electroless NiB and Ni-B/CeO₂ composite coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 422, no. 127525, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127525>
- [36] A. Bayatlı, E. F. Şahin, and M. Kocabaş, "Effect of boron carbide reinforcement on surface properties of electroless Ni-B and Ni-B-W coatings," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 305, no. 127899, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127899>
- [37] R. Agrawal, L. Gupta, S. Jain, R. Sharma, and A. Mukhopadhyay, "Electroless Ni-B coating formed from a stabilizer-free double bath," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 77, no. 4, pp. 1039-1051, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s12666-023-03220-9>
- [38] H. Çuğ ve M. Dursunlar, "Termit ve yakma alın kaynağı ile birleştirilmiş R260 kalite rayın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 14, ss. 167–179, Temmuz 2021, doi: 10.47072/demiryolu.944266

Özgeçmiş



Mustafa DURSUNLAR

Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans ve yüksek lisans eğitimini tamamlamış olup, aynı alanda doktora eğitimine Yozgat Bozok Üniversitesinde devam etmektedir. Yozgat Bozok Üniversitesi Sorgun Meslek Yüksekokulu Ulaştırma Hizmetleri Bölümü Raylı Sistemler Makine Teknolojisi Programında öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: mustafa.dursunlar@yobu.edu.tr



Zakir TAŞ

Lisans ve yüksek lisans eğitimini Almanya'da, doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: zakir.tas@bozok.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Mustafa DURSUNLAR: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme. Zakir TAŞ: Kontrol, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.