

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of Mechanical Properties on Coated Terminal Tip by Co-design

Mert Onan^a, Ahmet Celal Topkaya^b, Eyyüp Öksüztepe^c

Submitted: 27.11.2021 Revised: 21.03.2022 Accepted: 07.04.2022 doi:10.30855/gmbd.2022.01.09

ABSTRACT

Keywords: Terminal, CuNiSiP, Finite Element Analyses, Gold-plated, Mechanical Properties

^a Hatko Teknik Donanımlar Müm. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Avcılar-İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8793-8215

^b Hatko Teknik Donanımlar Müm. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Avcılar-İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8646-7338

^c Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Merkez-Elazığ, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5446-4308

*Corresponding author:
mertonan@yahoo.com
mert.onan@hatkoelectronics.com

Copper alloys used in the automotive and white goods industry are preferred as terminals due to their high conductivity. For low contact resistance and high mechanical strength of copper alloys, appropriate design selection becomes important. As a result of the coating of copper alloy, current transition level of the conductive terminal and the formation of a film that protects against corrosion on the surface are improved. The aim is to optimize the PCB terminals to be made of CuNiSiP material according to the contact forces and to produce them as gold-plated. Production is done for the CuNiSiP copper alloy supplied within the developing dimensions. With the FEA, contact forces were calculated according to different contact diameter and oral cavity parameters. The surface roughness was measured from the product contact point after the final design. The surface roughness data in the cutting zone were compared again after the prototype production, depending on the number of cycle period. During prototype production, sensitive area of terminal tip was characterized by Electron Microscopy. After the characterization, coating thickness of gold-plated regions was measured as minimum 0.8 μm by X-ray Analyses. It is experimentally proven that contact forces of PCB terminal meet the requirements.

Kaplamalı Terminal Blok Ucunda Tasarımsal Değişim Yapılarak Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

ÖZ

Otomotiv ve beyaz eşya sektöründe kullanılan bakır alaşımlarının iletkenlikleri yüksek olmasından dolayı terminal olarak tercih edilmektedir. Bakır alaşımlarının düşük kontak direnci, yüksek mekanik dayanım için uygun tasarım seçimi önemli hale gelmektedir. Bakır alaşımın kaplanması neticesinde iletken terminalin akım geçiş seviyesi ve yüzeyde korozyondan koruyan film oluşumu geliştirilmektedir. Bu çalışma da amaç CuNiSiP malzemeden imal edilecek PCB terminallerinin kontak kuvvetlerine göre optimize etmek ve altın kaplamalı olarak üretmektir. Yapılan Sonlu Elemanlar Analizleri ile farklı kontak çapı ve ağız boşluğu parametrelerine göre kontak kuvvetleri hesaplanmıştır. Tasarım sonrası ürün kontak noktalarında yüzey pürüzlülüğünün düşük olduğu ölçülmüştür. Kesme bölgesindeki yüzey pürüzlülük verileri devir sayısına bağlı olarak prototip üretim sonrası tekrar kıyaslanmıştır. Terminal ucu hassas bölgesinde Elektron Mikroskopisi ile karakterize edilmiştir. Karakterizasyon sonrası altın kaplanan bölgelerin kaplama kalınlığı min. 0.8 μm X-ray cihazında ölçülmüştür. Üretilen PCB terminalinin kontak kuvvetlerinin gereksinimleri karşıladığı deneysel olarak ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Terminal, CuNiSiP, Sonlu Elemanlar Analizi, Altın Kaplama, Mekanik Özellikler

1. Giriş (Introduction)

Endüstriyel olarak terminal uygulamalarına talep, elektronik kontrol ünitelerinin artmasıyla çoğalmıştır. Otomotiv sektöründeki terminal uygulamaları çevresel koşullara bağlı olarak yüksek deformasyona, sıcaklığa ve neme maruz kalmaya dirençli olmalıdır. Uzun süreli sıcaklık ve nem dayanımının yanında düşük kontak direnci gösterebilen terminaller üretilebilmelidir. Ayrıca güç ve elektrik aksamlarındaki terminaller için yüksek sıcaklık direncine bağlı kaplama ve özellikleri önem kazanmaktadır [1]. Birçok çalışmada terminallerin farklı koşullardaki etkisi boyutsal olarak tasarım dikkate alınarak çalışılmıştır [2-5]. Otomotiv terminallerinin gerçek zamanlı simülasyon ve test uygulamaları zordur. Farklı boyut ve geometrilere sahip bakır alaşımlarının, yapılan sayısal analizlere göre, 10 N'den düşük kuvvetlerde yüzey pürüzlülüğünün kontak direnci üzerinde etkisinin olmadığı tespit edilmiştir [5]. Terminallerin aşınma davranışı, uygulama yerlerine bağlı olarak üretildikleri hammadde ile ilişkilidir [6]. Bakır alaşımlarında yüksek elektrik iletkenliği sağlanırken yapıya bağlı olarak mukavemet azalmaktadır [7]. Kontak kuvvetinin terminale etkisi, terminalin takma çıkarma sayısına bağlı olarak mekanik deformasyonunu ANSYS yazılımı Sonlu elemanlar analizi (SEA) ile doğrulanmıştır. Buna ek olarak ağırlık kaybı ve aşınma davranışı ile kıyas yapılmıştır [8,9]. Bu konudaki çalışmalar sınırlı olmayıp aynı zamanda otomotiv terminallerinde takma çıkmaya bağlı kuvvetin azaldığı, dokuz takma çıkarmada pinin girdiği terminalin yüzeyinde aşınma izleri gözlenmiştir [10]. Ayrıca krimpleme yapılan terminallerdeki ayak kısımlarında kesmeye bağlı sürtünme SEA analizleri ile incelenmiş ve zımbanın sürtünmesinin krimp kalitesini etkilediği vurgulanmıştır [11, 12].

Bu çalışma da tedarik edilen CuNiSiP bakır alaşımının kalıpta kesme yapılarak uygun tasarımsal ölçülerde üretilmesi hedeflenmiştir. Yapılan SEA çalışması ile alaşımın farklı kontak kuvvetini etkileyen kontak çapı ve ağız boşluğu değişimine dair hesaplamalar ANSYS yazılımı ile yapılmıştır. Kesme bölgesindeki yüzey pürüzlülük verileri üretim öncesi ve devir sayısına bağlı olarak prototip üretim (50.000 adet) sonrası tekrar kıyaslanmıştır. Üretim sonrası terminal ucu hassas ezme bölgesinde Taramalı Elektron Mikroskopisi ile karakterize edilmiştir. Karakterizasyon sonrası nikel ve altın kaplanan bölgelerin kaplama kalınlık ölçümü X-ray cihazında gerçekleştirilmiştir.

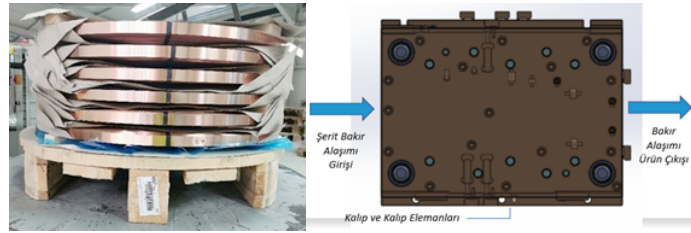
2. Materyal ve Metod (Material and Method)

Terminal blok tasarımı için gereken malzeme CuNiSiP şerit formunda bakır malzeme olup ilgili malzeme tedarikçimiz Wieland Electric GmbH (Almanya) temin edilmiştir. CuNiSiP malzemenin mekanik özellikleri ve kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de sunulmuştur [13].

Tablo 1. CuNiSiP malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri
(Chemical and mechanical properties of CuNiSiP material)

Kimyasal Kompozisyon				
	Ni (%)	Si (%)	P (%)	Cu (%)
<i>CuNiSiP (UNS C19010)</i>	0.283	0.283	0.283	0.283
<i>R520 Temper</i>				
Mekanik Özellikler				
	Çekme Mukavemeti (R_m-MPa)	Akma Mukavemeti (R_{0.2}-MPa)	Uzama (A- %)	Sertlik (HV)
<i>CuNiSiP (UNS C19010)</i>	520 - 590	> 440	> 9	150 - 180
<i>R520 Temper</i>				

Terminalin üretimi Hatko Teknik Donanımlar Müm. ve Tic. A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiş olup hammadde malzeme ve üretilen terminalin kalıp görseli Şekil 1'de verilmiştir. Şerit bakır alaşımı bir taraftan hatta girerken diğer taraftan presten geçirilerek biçimlendirilmiş ürün elde edilir.



Şekil 1. Terminal hammaddesi ve terminal üretimi yapılan kalıp geometrisi
(Terminal raw material and die geometry of terminal production)

Terminalin kalıp üretimi sonrası kontrol edilen tasarımsal geometrik toleranslar MITUTOYO Keyence ve Quickscope cihazı yardımıyla alınmıştır. Böylece istenen tasarım ölçülerinde terminal üretimi fiziki olarak doğrulanmıştır.

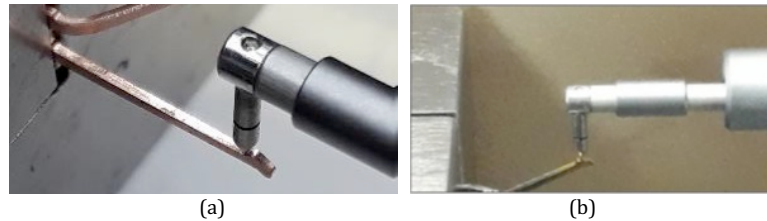
Bu çalışmada SEA analizleri yapılarak terminalin kontak alanının çapı ve ağız boşluğunun kontak kuvveti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kontak alanı çapı ve ağız boşluğunun sırasıyla 3'ü kombinasyonları SEA analizine tabi tutulmuştur. Her bir parametre değişken olarak tercih edildiğinde diğer parametreler sabit tutulmuştur. Bulgular bölümünde bu ölçüm sonuçlarına dair grafikler Mesafe (X) – Kontak Kuvveti (Y) eksenel olarak verilmiştir.

Kontak kuvveti denklem 1 ile hesaplanmıştır [14]. Toplam alanı etkileyen parametreler ise kontak çapı, ağız boşluğu olmaktadır.

$$F = \frac{P_{av}}{A_t} \quad (1)$$

F : Kontak Kuvveti (N),
Pav : Ortalama Kontak Basıncı (MPa),
At : Toplam Alan (mm²)

Terminalin prototip üretimi esnasında kalıp devrine bağlı üretim sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Üretim için en uygun koşul seçilen 200 baskı sayısı/dk'da terminalin çok adetli ön seri çalışmaları 50.000 adet sonrası sonlandırılmıştır. Buna ek olarak altın kaplama sonrası yapılan Şekil 2'de görselleri verilen ölçümlerde yüzey pürüzlülük uygunluğu kontrol edilmiştir.



Şekil 2. Yüzey pürüzlülük cihazı ve numunedeki ölçüm yeri: (a) Kaplama öncesi (b) Kaplama sonrası
(Surface roughness measurement device and specimen (a) before coating (b) after coating)

Kalıpta kesme ile üretim sonrası numuneler Taramalı Elektron Mikroskopisi analizlerine gönderilerek PCB takılan bölgenin hassas alanları kontrol edilmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) görüntüleri hizmet alımı yapılarak alınmıştır.

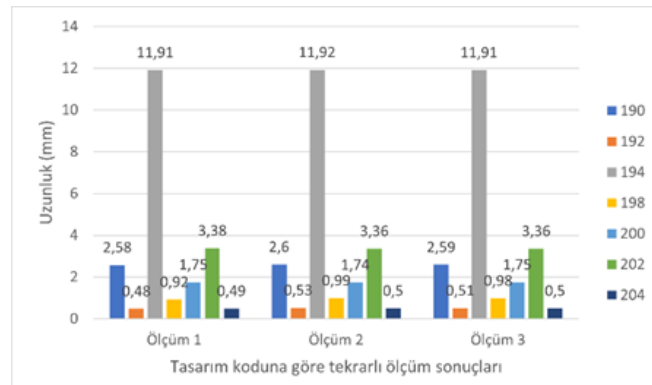
Terminaler firma dışında ilk katman olarak komple nikel ile kaplanmıştır. Ek olarak terminalin ikinci katman olarak bir ucu altın ile kaplanmıştır. Kaplama işleminin tamamlanmasının ardından ince kaplama kalınlıkları Fisherscope X-Ray marka XDV-SDD model cihazı yardımıyla ölçülmüştür.

Altın kaplama sonrası altın tabaka üzerinde oluşan gözenek yoğunluğunun tespiti için DMG yöntemi kullanılmıştır. DMG testi uygulanmasının ardından yüzeydeki gözenekler limitler dahilindedir.

Son olarak kaplanan terminaler bükme kalıbında şekillendirilerek nihai ürün halini almaktadır. Bükme işleminde en uygun seçilen 100 baskı sayısı/dk'da herhangi bir deformasyon gözlenmediği için çalışmanın son aşaması dikkate alınmamıştır.

3. Sonuçlar ve Bulgular (Experimental Results)

Şerit bakır alaşımı CuNiSiP malzeme tercih edilerek 3 farklı tasarım ölçüsü değiştirilerek en uygun tasarımın üretimi gerçekleştirilmiştir. Terminal ürünün progresif kalıplarda hassas metal şekillendirilmesi mümkün olmaktadır. Prototip üretim sonrası malzemenin üzerine Nikel ve Altın kaplama yapılmıştır. Terminal bloku tasarımlarında en kritik nokta PCB takılan bölgenin ağız ölçüsüdür. Hedef değer aralığı çok dar olup istenilen tolerans aralığının yakalanmaması durumunda gerekli işlevselliği yerine getirememektedir. Farklı tasarım parametreleri (Kontak çapı (R), Ağız boşluğu (d)) SEA yöntemi ile incelenerek en uygun form saptanmıştır. Hedef PCB'ye ağız ölçüsünün uygun olduğu tespit edilmiş ve ağız ölçüsünün her üründe belirtilen hata payı içinde olduğu Şekil 3'de yapılan boyutsal ölçümler ile tespit edilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde kalay ve gümüş kaplı bakır alaşımın 40 N yük altında kontak bölgesindeki yük ölçülerek bunun SEA analizi ile doğrulanması yapılmıştır [15].



Şekil 3. Terminal uç, Keyence ve Quickscope kullanarak boyutsal ölçüm sonuçları (Dimensional measurement results using terminal tip by Keyence and Quickscope)

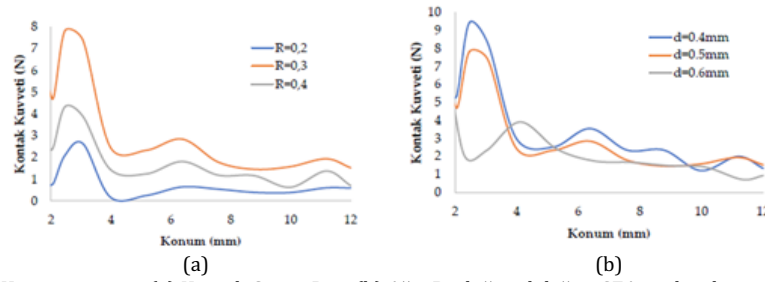
Ölçüm detay referansı sırasıyla 190; 2.6 mm, 192; 0.5 mm, 194; 11.9 mm, 198; 0.95 mm, 200; 1.8 mm, 202; 3.4 mm, 204; 0.5 mm Standart sapma ± 0.10 toleransında tekrarlı ölçüm yapılarak hedeflenen değeri sağladığı görülmüştür. Hassas metal şekillendirmede tasarımı etkileyen faktörler öncelikli olarak pres hızı, kuvvet, malzeme türü, malzeme kalınlığı, malzeme geometrisi ve diğer ortam koşulları gelmektedir. Üretim toleransları, parçanın geometrisine bağlı kontrol amaçlı geliştirilen algoritma sayesinde 0.2 mm ile 0.5 mm arasındaki yer değiştirme limitleri ile zımbanın çalışacağı öngörülmüştür [16]. Bu veriler, proses kontrolünde geometrik toleransların düşük olması gerekliliğini göstermektedir.

Bakır alaşım terminalerin şekillendirilmesi esnasında kontak alanına bağlı farklı kuvvet ve tasarımlar kullanılarak SEA analizleri yapılmıştır [15]. Bu çalışma da ise terminal blok ucu için SEA parametrelerinin değişimleri (Kontak çapı (R), Ağız boşluğu (d)) kullanılarak Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Terminalin sonlu elemanlar analizi için seçilen parametreler ve ölçüleri (Selection of parameters and dimensions for finite element analysis of the terminal)

Değişken Parametre No	Ağız Boşluğu-d (mm)	Kontak Çapı-R (mm)
1	0.4	0.2
2	0.5	0.3
3	0.6	0.4

Kontak alanı yarıçapı ile kontak kuvvetinin değişimine ait SEA sonuçları erkek terminalin konumuna göre Şekil 4a'da, terminal ağız boşluğu ile kontak kuvvetinin değişimi erkek terminalin konumuna göre SEA sonuçları Şekil 4b'de verilmiştir.



Şekil 4. Kontak Kuvveti üzerine (a) Kontak Çapı - R ve (b) Ağız Boşluğu - d değeri SEA analiz ölçüm sonucu grafikleri
(On contact force (a) Contact diameter - R over contact force and (b) oral cavity - d value FEA analysis measurement result graphs)

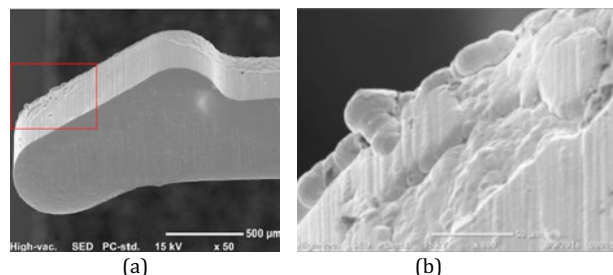
Şekil 4a'da yer alan R değeri 0,3 mm için 7.5 N en yüksek pik değeri elde edilmiştir. Şekil 4b'de ise d değeri 0,5 mm için 7.5 N kontak kuvveti optimum sonucun alındığını göstermektedir. Kontak kuvvetinin kontak alanı ile olan bağıntısı yapılan bir çalışma da SEA analizleri ile gösterilmiş ve kalay-gümüş kaplı (1-5 μm TiN ve 2-6 μm Ag) terminallerin kontak alanları arasındaki ilişki incelenmiştir. Gümüş kaplı bakır alaşımın kontak kuvveti 10 N ve 40 N uygulandığında buna karşılık gelen kontak alanı 0.03 mm² ve 0.07 mm² sırasıyla ölçülmüştür. Kullanılan set-up düzeneği ile kaplamalı fosfor bronz bakır alaşımına kontak kuvveti uygulanmış, temas eden yüzeylerde metalik adhezyona bağlı yüzey pürüzlülüğü görüldüğünü açıklamışlardır [17]. Çalışmamızda tercih edilen kontak alanı düşünüldüğünde SEA ile hesaplanan kontak kuvvetine denk gelen kontak alanı benzerlik göstermektedir.

Terminalin prototip üretimi esnasında kalıp devrine bağlı üretim sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Üretim için en uygun koşul seçilen 200 baskı sayısı/dk için terminalin çok adetli ön seri çalışmaları yapılarak prototip üretim sonrası (50.000 adet) yüzey pürüzlülükleri referans başlangıç üretim olan 200 baskı sayısı/dk ile kıyaslanmıştır. Tüm pürüzlülük ölçümleri 100, 200 ve 300 baskı sayısı/dk için terminalin 5 ayrı bölgesinden yapılmıştır ve ortalamaları Tablo 3'te verilerek 200 baskı/dk sayısı prototip üretim sonrası değerleri kıyaslanmıştır. Buna ek olarak altın kaplama sonrası yapılan ölçümler de yüzey pürüzlülük değeri 0,39-0,66 μm aralığında ölçülmüştür. Devir sayısı artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca adetteki artışa bağlı olarak 200 Prototip üretiminde pürüzlülük değerinin her bölge de aynı devir sayısına kıyasla artış gösterdiği bulunmuştur. Ölçülen değerler yüzey pürüzlülük standartına göre [18] yer alan istenen toleranslar ($R_a < 1.6 \mu\text{m}$) arasında yer almaktadır.

Tablo 3. Terminalin üretim esnasında devir sayısına bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri
(Surface roughness changes depending on the number of revolutions of the terminal during production)

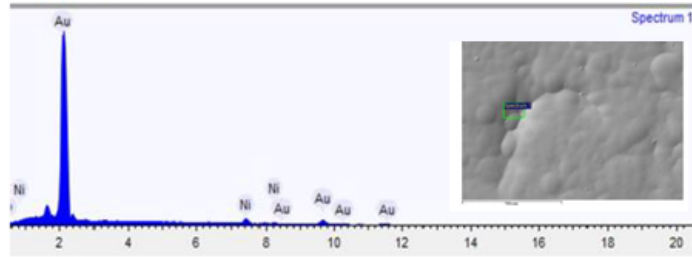
	Devir / dk	100	200	300	200 Prototip
Bölge	Orta 1 (μm)	0,22	0,25	0,33	0,33
	Orta 2 (μm)	0,21	0,24	0,38	0,29
	Orta 3 (μm)	0,18	0,23	0,33	0,25
	Kesme (μm)	0,23	0,19	0,35	0,20
	Kopma (μm)	0,57	0,52	0,49	0,60

Altın kaplama sonrası altın tabaka üzerinde oluşan gözenek yoğunluğunun tespiti yapılmıştır. Standartta [19, 20] belirtildiği şekilde 0,2 mm çapından yüksek olan gözenekler sayılmıştır. Tüm terminallerde 0,2 mm çapından fazla olan gözenek sayısı 25 adet gözenek/cm²'nin altında olduğu görülmüştür. Şekil 5'de ise kalıptan çıkan üründeki terminal blok ezme uçlarındaki üretim sürecine bağlı hassas bölgelerin karakterizasyonu yapılmıştır. Benzer şekilde bir terminalin birden çok bükme operasyonuna ile üretimi sonrası gerilmeye bağlı yüzeyi karakterize edilmiştir [21].



Şekil 5. Çoklu üretim sonrası terminal ucundaki hassas bölgelerin SEM'de görüntüleme sonrası (a) yüzey ve (b) aşınan bölge
(SEM images of sensitive areas at the terminal tip after production (a) the surface and (b) the wear section)

En uygun sonuç belirlenen ağız boşluğu 0.5 mm ve kontak çapı 0.3 mm terminaller önce ilk katman olarak komple nikel ile kaplanmıştır. İkinci katman olarak terminalin bir ucu altın ile kaplanmıştır. Bunun sebebi elektriksel iletimi arttıran kaplamalar farklılık göstermekle beraber en çok tercih edilen kaplamaların başında altın ve gümüşün gelmesidir. Kaplama işleminin tamamlanmasının ardından kalınlık ölçümlerinin istenen limitlerde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Hedef değerler olan nikel kaplama kalınlığı 1,3-2,5 μm , altın kaplama kalınlığı ise minimum 0,8 μm başarılı bir şekilde uygulandığı görülmüş ve hedef değerlere ulaşılmıştır. Altın kaplanmış terminalin sahip olduğu Au ve Ni elementi pik dağılımı Şekil 6'de verilmiştir.



Şekil 6. Altın kaplanmış terminale yapılan analiz bölgesi ve SEM-EDS analiz sonucu
(Gold-plated terminal analyses of area and SEM-EDS results)

4. Sonuçlar (Conclusions)

CuNiSiP terminal üretimi ve kaplamasına ait yapılan faaliyetler ve test-analiz hizmetleri neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1-Malzemenin şekillendirme esnasında hassas bölgelerde geometrik değişkenler Keyence-Quickscope ölçümleri ve SEA analizleri ile doğrulanmıştır. Ağız ölçüsü, terminal uzunluğunun toleransları istenen Geometrik toleranslar ± 0.10 mm içinde olduğu ve üretimde herhangi bir engel teşkil etmediği görülmüştür.

2-Kontak kuvvetlerinin yüksek ve buna bağlı muhtemel kontak dirençlerinin düşük olduğu optimum sonuç 0.5 mm ağız ölçüsü ve 0.3 mm kontak çapındaki geometrik tasarıma göre elde edilmiştir.

3-Üretim sonrası kaplama öncesi yüzey pürüzlülük değeri araştırılarak üretim devir hızı belirlenmiştir ve kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değeri istenen değer limitleri arasındadır. Yüzey pürüzlülük değeri ortalama 0.33 μm olup adhezyona bağlı değişim göstermektedir. Üretim esnasında farklı bölgelerde yüzey pürüzlülüğünün 2-8 μm arttığı görülmüştür. Denemelerdeki artan devir sayısının yüzey pürüzlülük değerini arttırdığı ölçülmüştür. Son olarak yüksek adetli üretimlerde yüzey pürüzlülüğün arttığı gözlemlenmiştir.

4-Taramalı Elektron Mikroskobu incelemeleri yapılarak hassas bölgelerde çapak, çatlak oluşumu görülmezken az miktarda aşınan bölgeler tespit edilmiştir.

5-Nikel ve Altın kaplama kalınlığı ve gözenek miktarı istenen limit değerler içinde elde edilmiştir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma, TÜBİTAK TEYDEB 1501 Projesi (Proje No : 3180183) kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. Test ve analizlerde yardımını esirgemeyen Hatko Teknik Donanımlar Müm. ve Tic. A.Ş. birimlerine teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

[1] S. Kyeong and M. G. Pecht Ed., *Electrical Connectors Design, Manufacture, Test and Selection*. United Kingdom: Wiley-IEEE

Press, 2021. (Editör)

[2] F. Ossart, S. Noel, D. Alamarguy, S. Correia and P. Gendre, "Electromechanical modelling of multilayer contacts in electrical connectors," in *Proceeding of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 16-19 Sept. 2007, PA, USA* [Online]. Available: IEEE Xplore, <http://www.ieee.org>. [Accessed: 10 Dec. 2021].

[3] J. L. Queffelec, N. Ben Jemaa, D. Travers and G. Pethieu, "Materials and contact shape studies for automobile connectors development," *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 90-94, March 1991. doi:10.1109/33.76515

[4] A. Monnier, B. Froidurot, C. Jarrige, R. Meyer and P. Testé, "A mechanical, electrical, thermal coupled-field simulation of a sphere-plane electrical contact," in *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 26-28 Sept. 2005, Chicago, USA* [Online]. Available: IEEE Xplore, <http://www.ieee.org>. [Accessed: 01 Dec. 2021].

[5] R. E. Abdi and N. Benjema. "Study of contact resistance for high copper alloys under indentation and insertion forces," *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development*, vol. 2, no. 2, pp. 75-82, 2008.

[6] P. G. Slade Ed., *Electrical contacts: Principles and Applications*. New York: CRC Press., 1999. (Editör)

[7] R. Zauter and D. V. Kudashov, "Precipitation hardened high copper alloys for connector pins made of wire," *www.citeseerx.ist.psu.edu*, Nov. 29, 2021. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.601.9158&rep=rep1&type=pdf>. [Accessed: Nov. 29, 2021].

[8] R. E. Abdi, N. Benjema and M. A. Beloufa, "Numerical and experimental studies of automotive connector behaviour," in *Proceeding of the 18th IASTED International Conference on Modelling and Simulation, 30 May- 1 June 2007, Montreal, Canada* [Online]. Available: actapress, <http://www.actapress.com>. [Accessed: 11 Dec. 2021].

[9] C. I. Ucenic and C. Ratiu, "Applying finite element method (FEM) for solving a self cleaning filtering battery module prototype - Case study," in *Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS Int. Conf. on Energy and Environment, 15-17 May 2007, Portoroz, Slovenia* [Online]. Available: ACM DL Digital Library, <https://dl.acm.org>. [Accessed: 11 Dec. 2021].

[10] R. E. Abdi, N. Benjema and M. A. Beloufa, "Behaviour evolution of automotive connectors," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 222, no. 2, pp. 151-159, Feb. 2008. doi:10.1243/09544070JAUTO664

[11] G. Villeneuve, D. Kulkarni, P. Bastnagel and D. Berry, "Dynamic finite element analysis simulation of the terminal crimping process," in *Electrical Contacts: Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts, 1996*, pp. 156-172. doi: 10.1109/HOLM.1996.557193.

[12] D. V. Zhmurkin, N. E. Corman, C. D. Copper and R. D. Hilty, "3-Dimensional Numerical Simulation of Open-Barrel Crimping Process," in *Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2008*, pp. 178-184. doi:10.1109/HOLM.2008.ECP.41.

[13] "Wieland-K76", *wieland.com*, Datasheet, Dec 11, 2021. [Online]. Available: https://www.wieland.com/de/content/download/12513/file/K76_RP_DE.pdf. [Accessed: Dec. 11, 2021].

[14] R. Holm Ed., *Electric contacts Theory and Application*, Berlin: Springer Verlag, 2000. (Editör)

[15] K. Shimizu, S. Shimada, S. Sawada, Y. Hattori, "Contact Area Analysis by FEM with Plating Layer for Electrical Contact," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E92.C, no. 8, pp. 1013-1019, August 2009. doi:10.1587/transele.E92.C.1013

[16] X. Gong, Y. Feng, Z. W. Ren, J. Cheng, J. R. Tan, "An adaptive design method for understanding tolerance in the precision stamping process," *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 16, no. 5, pp. 387-394. doi:10.1631/jzus.A1400220

[17] S. Sawada, K. Shimizu, Y. Hattori, T. Tamai and K. Iida, "Analysis of Contact Resistance Behavior for Electric Contacts with Plating Layer," in *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2010*, pp. 1-8. doi: 10.1109/HOLM.2010.5619560.

[18] "SAI Global," *infostore.saiglobal.com*, Standards On-Line-SAI Global, Dec. 11, 2021. [Online]. Available: https://infostore.saiglobal.com/enus/standards/din-en-1990-2010-386091_saig_din_din_877194. [Accessed: Dec. 11, 2021].

[19] "ASTM Standards," *astm.org*, Standards Online, Dec. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/B298.htm>. [Accessed: Dec. 11, 2021].

[20] "ISO Standards," *iso.org*, TS EN ISO 4524, Dec. 11, 2021. [Online]. Available: <https://intweb.tse.org.tr>. [Accessed: Dec. 11, 2021].

[21] B. Jiang, J. Fu, D. Li and L. Ke, "An Advanced Structural Analysis Method for Connector Terminal Based on Multi-step Forming", in *Proceedings of SAE-China Congress 2015: Selected Papers, 2015*, pp. 599-608. doi: 10.1007/978-981-287-978-3_54.

This is an open access article under the CC-BY license

