



## Effect of surface treatments on the interfacial strength for metal/composite hybrid joints

Mustafa Bakkal<sup>1</sup> , Hande Osmanoğlu<sup>1</sup> , Mustafa Safa Bodur<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, 34437, Türkiye

<sup>2</sup>Materials Science and Nanotechnology Engineering, Yeditepe University, Istanbul, 34755, Türkiye

### Highlights:

- Effect of surface treatments on adhesive bonding in hybrid joints
- Determination of single lap-joint strength
- Measurement of wettability and surface roughness

### Keywords:

- Surface treatment
- Metal/composite hybrid joint
- Adhesive strength
- Wettability
- Surface roughness

### Article Info:

Research Article  
Received: 27.05.2021  
Accepted: 06.09.2021

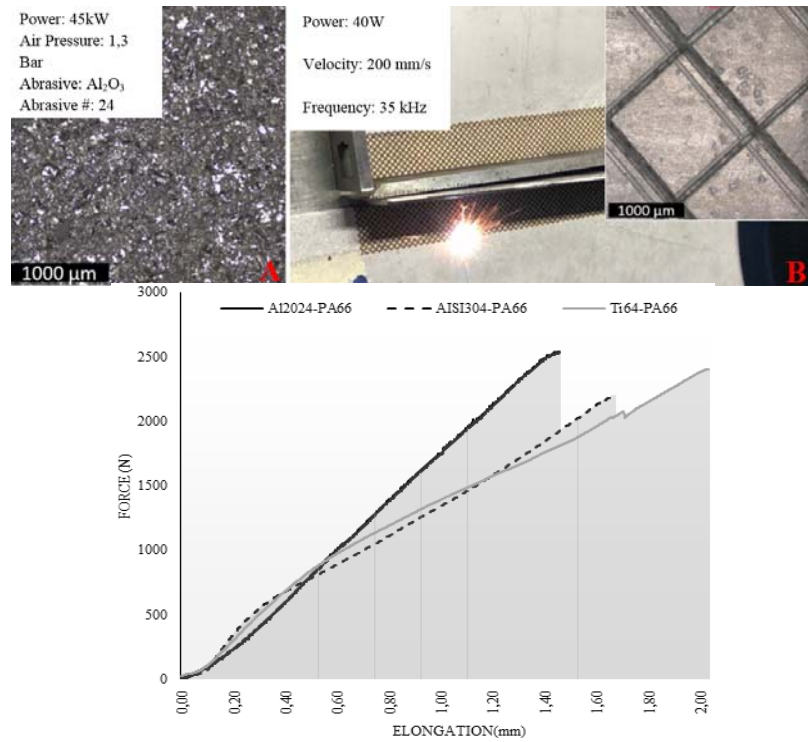
### DOI:

10.17341/gazimmfd.943926

### Correspondence:

Author: Mehmet Safa Bodur  
e-mail:  
mehmet.bodur@yeditepe.edu.tr  
phone: +90 554 947 3325

### Graphical/Tabular Abstract



**Figure A.** Surface treatments and their effects on the adhesive bonding strength for hybrid joints

**Purpose:** This study is about determination of adhesive bonding between composite and different metals with various surface treatments and reviews the surface wettability properties and roughness of metals after surface treatments and shear strengths of the hybrid metal/composite joints conducting single lap shear test.

### Theory and Methods:

Within this study, different metal types with various surface treatments such as cold working, laser texturing and sand blasting, are adhesively bonded to one type of composite. Aluminum 2024 T6, AISI 304 Stainless Steel and Titanium Ti-6Al-4V are the metal types that are coupled with polyamide composite material. The hybrid structure of the differently roughed surfaces of Aluminum, Stainless Steel and Titanium metal materials and PA 66 are tested by single lap shear tests. The shear strength values of these adhesive bonded couples are reported in association with their roughness and wettability properties.

### Results:




The results showed that although the wettability values expected to be increased proportionally with roughness on all these surfaces; in fact, it varies according to the roughness type as it was seen on the sandblasting sample. Considering the results of the droplet contact angle, it is not possible to establish a relationship between shear strength and contact angle similar to that of surface roughness and shear strength.

### Conclusion:

It is concluded that Al2024 sample with 15 Ra roughness forming a hybrid joint with PA 66 exhibited the best shear strength (8 MPa) among the metal samples exposed to different surface treatments.



## Metal/kompozit hibrit bağlantılarda yüzey işlemlerinin ara yüzey dayanımına etkisi

Mustafa Bakka<sup>1</sup> , Hande Osmanoğlu<sup>1</sup> , Mustafa Safa Bodur<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Yeditepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yüzey işlemlerinin hibrit bağlantılardaki yapışma bağ dayanımı üzerine etkisi
- Tek bindirmeli kayma dayanımlarının belirlenmesi
- Yüzey ıslanabilirlik ve pürüzlülük değerlerinin ölçümleri

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.05.2021

Kabul: 06.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.943926

### Anahtar Kelimeler:

Yüzey işlemleri,  
metal/kompozit hibrit  
bağlantılar,  
yapışma dayanımı,  
ıslanabilirlik,  
yüzey pürüzlülüğü

### ÖZ

Son zamanlarda yapılan çalışmalar ışığında, yüksek mukavemetli malzemeler, kompozit malzeme kullanımında ve üretiminde giderek artan artışı beraberinde getirmiştir. Kompozit malzemeler genellikle yapısal tasarımlarda metaller veya polimerler gibi diğer tür malzemelerle kombinasyon halinde kullanılmaktadır. Daha çok havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılan metal-kompozit yapılara hibrit yapılar adı verilmektedir. Bu çalışmada, zımparalama, lazer yüzey işleme ve kumlama gibi çeşitli yüzey işlemlerine sahip farklı metal türleri, ağırlıkça %35 cam elyaf takviyeli poliamid 66 kompozit malzemesine (PA66) yapıştırılmıştır. Alüminyum 2024 T6, AISI 304 Paslanmaz Çelik ve Titanyum Ti6Al4V metalik malzemeler poliamid kompozit malzeme ile birleştirilmiştir. Alüminyum, Paslanmaz Çelik ve Titanyum metal malzemelerin ve PA 66'nın farklı pürüzlü yüzeylerinin oluşturduğu hibrit yapının dayanımı tek bindirmeli kayma testleri ile test edilmiştir. Bu yapıstırıcı ile bağlanmış çiftlerin kayma mukavemeti değerleri, pürüzlülük ve ıslanabilirlik özellikleri ile bağlantılı olarak bildirilmiştir.

## Effect of surface treatments on the interfacial strength for metal/composite hybrid joints

### H I G H L I G H T S

- Effect of surface treatments on adhesive bonding in hybrid joints
- Determination of single lap-joint strength
- Measurement of wettability and surface roughness

### Article Info

Research Article

Received: 27.05.2021

Accepted: 06.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.943926

### Keywords:

Surface treatment,  
metal/composite hybrid  
joint,  
adhesive strength,  
wettability,  
surface roughness

### ABSTRACT

In the light of studies in the past years, high strength materials have brought the incremental increase in composite material usage and production. Composite materials are generally used in a combination with the other type of materials such as metals or polymers in structural designs. The metal-composite structures that are mostly being used in aviation and automotive sectors are called as hybrid joints. Within this study, different metal types with various surface treatments such as sandpapering, laser texturing and sand blasting, are adhesively bonded to 35%wt glass fiber reinforced polyamide 66 (PA66). Aluminum 2024 T6, AISI 304 Stainless Steel and Titanium Ti6Al4V are the metal types that are coupled with polyamide composite material. The hybrid structure of the differently roughed surfaces of Aluminum, Stainless Steel and Titanium metal materials and PA 66 were tested by single lap shear tests. The shear strength values of these adhesive bonded couples are reported in association with their roughness and wettability properties.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : bakkalmu@itu.edu.tr, handeosmanglu2@hotmail.com,

\*mehmet.bodur@yeditepe.edu.tr / Tel: +90 554 947 3325

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son çeyrek yüzyılda dünyanın içinde bulunduğu ekonomik süreç, tükenen kaynaklar ve artan doğa kirliliği; ilerleyen teknoloji ve basitleştirilme yönünde gelişen üretim teknikleri ile birleşince doğa dostu, hafif, üretilmesi ve birleştirilmesi kolay tasarımlar mühendislik çalışmalarının odak noktası haline geldi. Kompozit malzemelerin mühendislik dünyasına kazandırılması sürecinde sıfırdan kompozit olarak üretilen ürünlerin yanı sıra, var olan tasarımlara kısmen entegre edilmesi de çalışmaların büyük kısmını oluşturdu [1]. Goushegir, kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı taşımacılık, havacılık, enerji sektörleri gibi performans-hafiflik anlamında yüksek verim gerektiren sektörlerde metal-polimer ve metal-kompozit hibrit malzemelerin gittikçe geliştirilmesi gerektiğine dikkat çekmiştir. Hafif ve mukavim tasarımlar için yüksek dayanımlı kompozitler ile düşük özkütleli metallerin oluşturduğu hibrit yapılar çeşitli yöntemlerle oluşturulabilmektedir. Bu yöntemler yapıştırma, mekanik bağlama, kaynak tabanlı birleştirme yöntemleri ve bunların çeşitli kombinasyonları olarak "hibrit teknolojileri" olarak sınıflandırılmıştır. Higgins, havacılıkta kullanılan yapısal yapıştırıcılar hakkında gerçekleştirdiği çalışmasında metal-metal bağlantıların sıcak ve soğuk kürlenmesine değinmiştir [2]. Havacılıkta kullanılan malzemelerin -55 ile +80°C arasında kullanılabilir şekilde tasarlanması gerekliliğine göre çeşitli yapıştırıcıların karşılaştırmasını gerçekleştirmiştir. Da Silva vd., yapısmada yapışkan kalınlığı ve yüzey hazırlama prosedürünün önemini vurgularken kullandığı sünek-gevrek-ortalama gevrek yapıştırıcılar ile yaptığı testleri matematiksel yaklaşımlarla modellemektedir [3]. Ucsnik vd., çalışmasında kompozit-metal hibrit malzemelerin yük taşıyabilen ara yüzeylerinin oluşması gerekliliğini vurgulamış, ara yüzeylerin malzemenin dayanımını, şekil değiştirme ve enerji absorbe etme karakterlerini oluşturduğundan bahsetmiştir [4]. Kellar, çalışmasında aynı tür ve farklı tür iki malzemenin birbirleri ile birleştirilmesi yöntemlerini bir yelpaze olarak sunmuş; yapıştırma bağlantısı hakkında ise yapıştırıcı seçimi, yüzey pürüzlülüğü, yüzey hazırlama işlemlerini metal ve polimer malzemeler için ayrı ayrı incelemiştir [5]. Maressa vd., Ti6Al4 alaşımı üzerinde yaptığı yüzey deseni çalışmasında, lazer işleme ile farklı deformasyon türlerini test etmiştir [6]. Alfano vd., çalışmasında alüminyum ve paslanmaz çelik yüzeylerin sadece temizlenmesi ve farklı parametrelerle lazer işleme ile değiştirilmesi durumlarında incelemiştir [7].

Metal ve kompozit malzemeler temel olarak üç farklı yöntemle birleştirilirler. Bunlar; kaynak, mekanik bağlama ve yapıştırma bağlantısıdır. Bazı bağlantılarda hem yapıştırma bağlantısı hem mekanik bağ kullanılır. Bu tür bağlara hibrit bağlantı adı verilir [8]. Mekanik bağlantılar üretim kolaylığı, düşük maliyeti, hareket gerekliliği veya yüksek sıcaklıklarda dayanımını koruma ve metal malzemenin genişmesi durumunda da kullanılabilmesi bakımından avantajlı olup, malzemeye delik açmak gerekliliği bakımından dezavantaj yaratabilmektedir [9].

Ayrıca cam, karbon, kevlar gibi sentetik elyaf takviyeli kompozit yapıların delik delme, frezeleme gibi işlemlerinde kesici takımlar açısından oldukça aşındırıcı olmaları da ilave maliyet getirdiği gibi yapıda delaminasyon ve yüzeyde bozulmalar da görülebilmektedir [10, 11]. Kaynaklama bağlantısı olarak indüksiyon kaynağı [12], lazer kaynağı [13], ultrasonik kaynak [14] yöntemleri metal ve polimer/kompozit malzemeleri bağlamak için kullanılan başlıca tekniklerdir. Diğer yandan yapıştırma bağlantısındaki mekanizmalar kimyasal bağlanma, difüzyon teorisi, mekanik kenetlenme, elektrostatik çekim ve zayıf sınır katmanları teorileri ile açıklanmaktadır [15]. Yapıştırma bağlantılarının avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz. Delik açma gerekliliği ortadan kalktığından yapıştırma bağlantısı gerilme yığılmalarına yol açmaz, başarılı bir uygulama sonucu homojen bir dağılım sağlar. Aynı zamanda delik açılmayacak kadar ince sacları da bağlama imkânı sağlar. Bağlama elemanı kullanımını eleyerek tasarımın ağırlığı azalırken, aynı türden olmayan malzemeleri de bağlayarak kullanım yelpazesini genişletir [8]. Hibrit yapılarda bağlantı bölgesi tasarımında ele alınması gereken ilk konu bağlantının maruz kalacağı yük veya yüklerin çeşididir. Beklenen hasar, uygulanan yük ile doğrudan ilgili olacağından öncelikle yükleri tanımlamak gerekir. Bağlantı yüzeyleri, çekme, basma, kayma, ayrılma veya soyulma gerilmelerine ayrı ayrı maruz kalacakları gibi bu yüklerin kombinasyonları şeklinde olacak yüklere de maruz kalabilirler [16]. Yapışma dayanımını, yüzey kirliliği [16], yüzeylerin ıslanabilme kabiliyetleri [17], yüzey alanı ve oluşan kovalent bağlar etkilemektedir [18]. Literatürde konu üzerine farklı yaklaşımlar olsa dahi 3 farklı yüzey işleminin (kumlama, zımparalama ve lazer) 3 farklı metal (Alüminyum, Titanyum, Paslanmaz Çelik) ve kompozit kullanılarak oluşturulan hibrit bağlantıların kayma dayanımları üzerine etkileri, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey temas açıları dikkate alınarak tek bir çalışmada yorumlanmamıştır. Bu anlamda güncel çalışmada, farklı yöntemlerle elde edilen farklı pürüzlülükteki Alüminyum, Paslanmaz çelik ve Titanyum malzemelerin, PA 66 kompozit malzemesi ile oluşturdukları tek bindirmeli yapışkan bağlı hibrit yapının kayma dayanımları test edilmiş ve elde edilen en yüksek kayma dayanımları raporlanmıştır.

## 2. DENEYSEL METOD (EXPERIMENTAL METHOD)

### 2.1. Malzeme ve Hazırlama Teknikleri (Materials and Preparation Techniques)

Bu çalışma kapsamında çeşitli metaller ile PA 66 %35 cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin Hysol® EA 9394 epoksi tabanlı yapıştırıcı ile yapıştırılmasıyla oluşan hibrit yapılar incelenmiştir. Testlerde Henkel- Hysol® EA 9394 epoksi Tabanlı Yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu yapıştırıcı, hem metal hem polimer yüzeyler kullanımı uygun olması açısından çalışma için uygun bulunmuştur. Hysol® EA 9394, iki bileşenden oluşan, havacılık sektöründe yapısal bağlantıların yapılması için tasarlanmış bir yapıştırıcıdır. A bileşeni olarak adlandırılan birinci bileşen temel malzemeyi

oluştururken B bileşeni olarak adlandırılan ikinci bileşen; birinci bileşenin sertleşmesini ve kürlenmesini sağlamaktadır. A ve B bileşenlerinin fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Yapıştırıcı karışımındaki A:B’nin yüzdece ağırlık oranı sırasıyla 83:17’dir.

Otomotiv, havacılık gibi sektörlerde sıklıkla kullanılan Al 2024 T6, AISI 304 paslanmaz çelik ve Ti 64 metalik alaşımları hibrit bağlantıyı oluşturmak amacıyla tercih edilmiştir. Testlerde kullanılan PA 66 %35 cam elyaf takviyeli kompozit malzeme Farplas A.Ş. firmasından DuPont Zytel markası altında tedarik edilmiştir. Yüksek dayanım, tokluk ve sertlik değerleri ve aşınmaya ve kimyasal etkilere direnci sebebiyle havacılık ve otomotiv sektörlerinde hibrit bağlantılar oluşturabilecek tasarımlarda tercih edilmektedir.

Metal ve kompozit yüzeylerin hazırlanmasında uluslararası yüzey hazırlama standardı (ISO 17212) esas alınmıştır. Metal ve kompozit malzemelerin yüzeyinin temizlenmesi için izopropilalkol (IPA) ve sıcak deterjan banyosu kullanılmıştır. Izopropanol olarak da anılan IPA, hayvansal ve bitkisel yağların temizliğinde kullanılır. IPA ile ön temizliği yapılan numuneler 20 dakika boyunca yaklaşık 80°C sıcaklığındaki suda bekletilir ve ardından tekrar IPA banyosuna sokulup saf su ile durulanır. Yüzey her ne yöntemle temizlenirse temizlensin, en az 20 dakika boyunca 65°C sıcaklıktaki hava ile kurutulur. Bu işlemde yüzeyin parçacık ve yağ formundaki kirlerden arınması hedeflenmektedir. Yapıştırıcının etkinliğini artırmak için metal ve kompozit levha numunelerine yüzey pürüzlendirme uygulanmıştır. Bu amaçla zımpara, kumlama ve lazer işleme yöntemleri seçilmiştir. Şekil 1’de, kum püskürtme işleminden ve lazer işlemeden sonra Al 2024 yüzeyi,

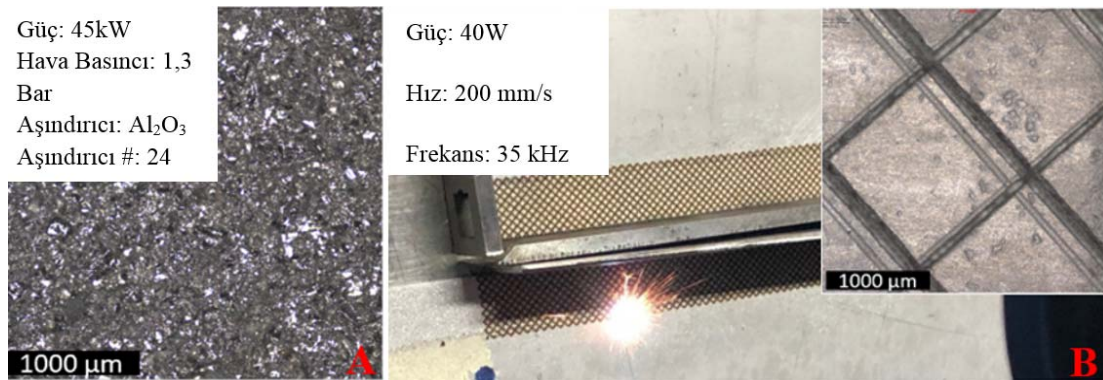
kullanılan parametrelerle birlikte gösterilmiştir. Desen, çekme doğrultusu ile 45° açı yapacak şekilde birbirine dik çizgiler şeklinde uygulanmıştır. Her bir çizginin derinliği ve genişliği 0,5mm’dir.

Numunelerin yüzeyi temizlendikten, fiziksel olarak deforme edilip istenen pürüzlülük yaratıldıktan sonra, yüzey enerjisini yükseltip ıslanabilirliğini arttırmak amacıyla dağlama işlemi uygulanmıştır. Kimyasal dağlamada hazırlanan karışımın içeriği, sıcaklığı ve dağlama süreci tüm metaller için değişmektedir, tüm dağlama çözeltileri ISO 17212’de belirtildiği gibi hazırlanmıştır.

Yapıştırıcının polimer bağlarının oluşup bir dayanım gösterebilmesi için belirli bir kalınlıkta uygulanması gerekmektedir. Testlerde kullanılan Hysol 9394’ün 0,5-1mm aralığında uygulanması gerekmektedir. Kürlenme sırasında yapışan yüzeyleri belirli bir sabitleyici yük altında tutmak gerektiğinden, yüzeylerin birbirine yapışıp yapıştırıcının kalınlığını sıfıra indirmekten kaçınmak amacıyla cam kürecikler kullanılmıştır (Şekil 2a). Genleştirilmiş cam kürecikler, 0,5-1 mm çapında olup geri dönüşümlü camdan üretilen, temel olarak betona hafiflik ve ısı-ses-nem yalıtım özelliği kazandıran inorganik bir yalıtım malzemesidir. Stikloporas firması tarafından Litvanya’da üretilen cam küreciklerin bu çalışmadaki testlerde kullanım amacı genel amacından farklı olarak, iki yüzeyin birbirine yakınlaşmasını engelleyip yapıştırıcının belirli bir kalınlıkta kürlenmesini sağlamaktır [19]. Her bir hibrit bağlantı numunesinde ortalama hacimce %9-10 oranında cam küre bulunmaktadır. Numuneler, 1 saat oda sıcaklığında ve ardından 1,5 saat 85°C sıcaklığındaki fırında tutulduktan sonra fırında yavaş soğumaya bırakılmaktadır. Yapıştırıcının tam olarak kürlenmesi için üretici firmanın direktifleri doğrultusunda,

**Tablo 1.** Hysol® EA 9394 yapıştırıcının karıştırma öncesi ve sonrası fiziksel özellikleri  
(Physical properties of Hysol® EA 9394 adhesive before and after mixing)

	A bileşeni	B bileşeni	Karışım
Renk	Gri	Siyah	Gri
Viskozite, 77°F	4000-8000 Poise	200-700 Poise	1600 Poise
Viskozite, 25°C	400-800 Pa.S	20-70 Pa.S	160 Pa.S
Yoğunluk (g/ml)	1,50	1,00	1,36
Raf ömrü, 25°C	1 yıl	1 yıl	



**Şekil 1.** Al 2024 yüzeyi a) kumlama (sand blasting) b) lazer işleme sonrası (laser texturing process)

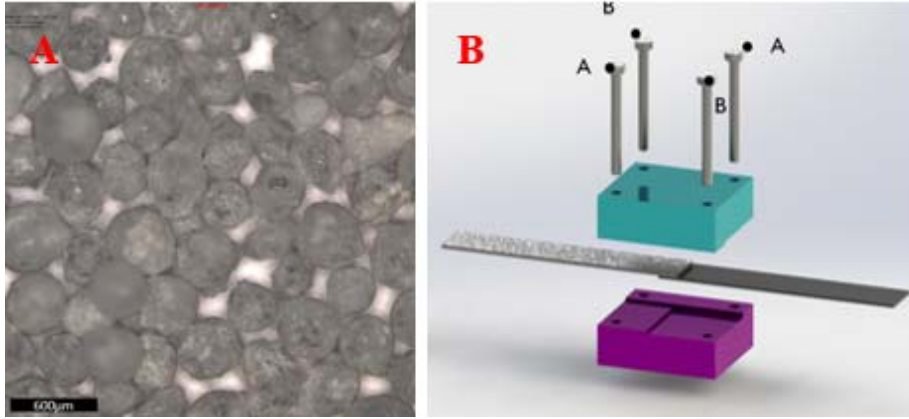


fırındaki numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra 1 gün daha oda sıcaklığında bekletilmelidir. Yapıştırma işlemi sırasında yapılan öncül çalışmalar sonucu, yapışan iki numunenin eksenselliğini korumak, tüm testlerin eşit yük ve sıcaklık altında yapılmasını sağlamak amacıyla standart bir fikstür (Şekil 2b) tasarlanmıştır.

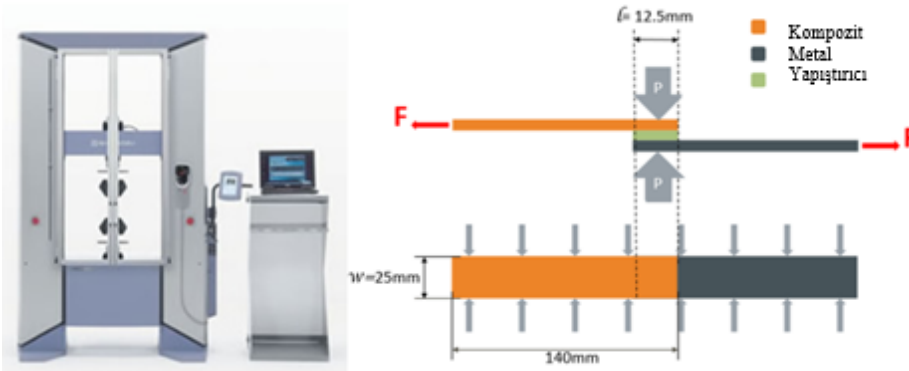
Çekme yüklemesi ile tek bindirmeli yapıştırılarak bağlanmış metal numunelerin kesme mukavemetini belirlemek için ASTM D1002'ye göre kayma testi yapılmıştır. Çekme hızı, ASTM D1002'de belirtildiği üzere 1,3 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Yapıştırıcı testi için kullanılan metaller, 2 mm kalınlığındaki Al 2024 T6, AISI 304 paslanmaz çelik ve Ti 6Al-4V saclardır. Bu metaller hibrit bağlantı özelliklerinin araştırılması amacıyla 2,5mm kalınlığındaki PA 66 %35 cam elyaf takviyeli kompozit numunelerle Şekil 3'de görüldüğü gibi yapıştırılmıştır.

Yapıştırıcı bağlı tek bindirmeli hibrit bağlantının kayma dayanımı, Denklem 1' de gösterildiği gibi çekme cihazından okunan yük değerinin (F), yapıştırıcı ile yapıştırılan alana ( $w \times l = 25\text{mm} \times 12,5\text{mm}$ ) bölümü ile bulunmaktadır. (Eş. 1)

$$\tau = \frac{F}{w \times l} \quad (1)$$



Şekil 2. a) Cam kürecikler (glass spheres) b) Yapıştırıcı uygulamasında kullanılan fikstür tasarımı (fixture design used to provide the desired thickness)



Şekil 3. a) Çekme cihazı (tensile testing machine) b) Test numunelerinin şematik görüntüsü (schematic illustration of test samples)

Islanabilirlik, damlacık testi veya temas açısı ölçüm testi olarak isimlendirilen uygulaması basit bir test ile ölçülebilmektedir. Bu test, İTÜ Evrensel Tekstil Merkezi'nde ThetaLite Optical Tensiometer TL 101 markalı cihazda BS EN 828:2013 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Standartta göre, enjektörden damlatılan damlacık 15 saniye boyunca optik kamera ile açıları taranarak kaydedilip, sağ ve sol olmak üzere okunan temas açılarının bu 15 saniyelik süreçte gösterdiği açarın ortalaması alınarak bir ortalama temas açısı oluşturulmaktadır. Temas açısının azalması, yüzeyin daha iyi ıslandığını göstermektedir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Yüzey İşlemlerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi (Effect of Surface Treatments on The Surface Roughness)

Yüzey pürüzlendirme işlemi testler sürecinde 180 numara zımpara ile başlamış; ardından geliştirmek üzere sırasıyla 60 numara zımpara, kumlama ve lazer ışını ile desen verme ile devam edilmiştir. Şekil 4'de işlenmemiş ve farklı türde deforme edilmiş metal ve kompozit yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri verilmiştir.

Şekil 4'de görüldüğü üzere; Al 2024 malzeme kolay işlenebilirliği sayesinde tüm uygulamalara olumlu yanıt vererek 15 Ra pürüzlülüğe ulaşmıştır. Paslanmaz çelik, zor işlenen bir malzeme olması sebebiyle elle yapılan zımpara işlemlerinde yeterince iyi sonuç vermemiştir. Ancak, kumlama ve lazer desen işlemleri sonrasında 12 Ra pürüzlülüğe ulaşmıştır. Titanyum, kolay işlenen bir malzeme olup parlak olması sebebiyle lazer işlemede diğerlerine göre lazer parametrelerinde değişiklik yapmayı gerektirmiştir. Zımparalama işleminde pürüzlenmekten ziyade düzleşip parlama eğilimi gösteren titanyum yüzey, en iyi sonucu kumlama üzerine lazer desen verilmesiyle elde edilip 13,4 Ra'ya ulaşmıştır. Poliamid yüzeyde en yüksek pürüzlülüğü 60 numara zımpara ile aşındırma işlemi vermiştir. Ancak bu işlem ile tamamen homojen bir yüzey elde etmek zor olduğundan, tüm hibrit yapııştırma işlemlerinde kumlanmış PA 66 kullanılmıştır.

PA 66 malzemesinin herhangi bir işlem uygulanmayan yüzey ve kumlama işlemine maruz kalan yüzey durumları mikroskopta 5 kat büyütülmeli olarak görüntülenmiş ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

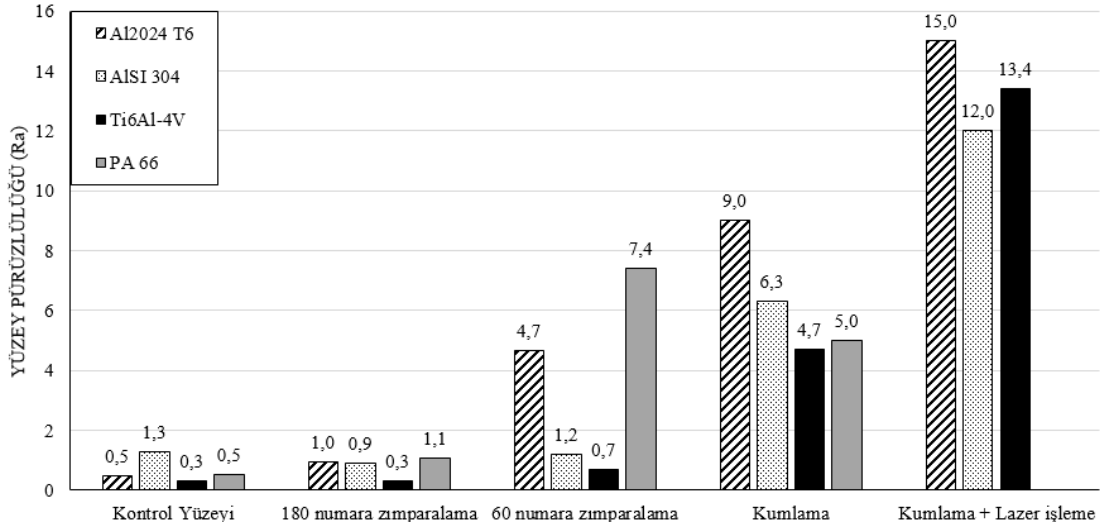
Kompozit malzemenin üretim yönteminden kaynaklanan yönlü yüzeyinin kumlama işlemi ile yok olup yönden bağımsız bir yüzey elde edildiği görülmektedir. Görüntüler pürüzlülük değerleri ile yorumlandığında, kumlama işleminin yarattığı çukurcukların krater benzeri yapılar meydana getirdiği anlaşılmaktadır. Metal yüzeylere çalışmada

bahsedilen aşındırma yöntemlerinin yüzeyde yarattığı durumun mikroskop görüntüleri Tablo 3'de görülmektedir. Şekillerin sol alt köşesinde 1000 µm uzunluğunda ölçek bulunup her yüzeyde 2,8 x 2,8 mm<sup>2</sup>'lik alan taranmıştır.

### 3.2. Yüzey İşleminin Temas Açısı Üzerine Etkisi (Effect of Surface Treatments on The Droplet Angle)

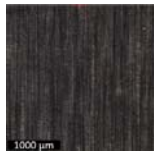
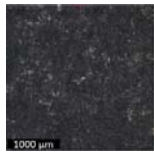
Şekil 5'de metal ve kompozit numuneleri üzerine damlatılan damlacıkların temas açıları görülmektedir. Sonuçlara göre, tüm yüzeylerde işlenmemiş yüzeyin 180 numara zımpara ile aşındırılması ıslanabilirliği arttırmış; 60 numara zımpara ile aşındırılması ise bir miktar daha arttırmıştır. Alüminyum ve paslanmaz çelikte temas açılarındaki azalma daha küçük yüzdelere görülürken, titanyum ve poliamid malzemelerde yüzdesel olarak görece yüksek değişim görülmektedir.

Kumlanmış yüzeylerin tamamında temas açısında yükseklik görülmüştür. Kumlanan yüzeyler, damlacığı sürtünme kuvveti ile tutup yayılmasına izin vermemektedir. Zımparalama işleminde pürüzlülük ile ters orantı gösteren damlacık temas açısı; kumlama işleminde bu denkleme dâhil olamamaktadır. Lazer desenli yüzeylerin tamamı önce kumlanıp sonra lazer işlenen numuneler olduğundan, lazer desenli yüzeylerdeki temas açısı, kumlama ile benzer bakış açısıyla değerlendirilebilir. Lazer desenli yüzeylerde test sırasında damlacığın düştüğü nokta, temas açılarındaki önemli sonuçlara yol açmaktadır. Damlacıklar, gritlerin ortasında bir noktaya düştüğü takdirde yüzeye yayılmayıp su itici

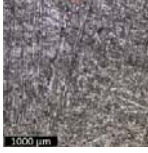
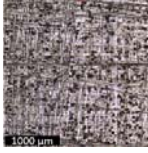
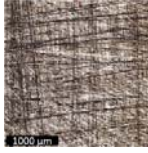
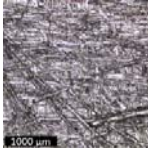
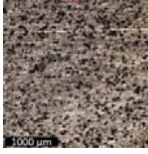
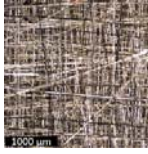
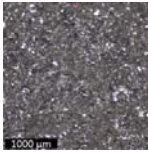
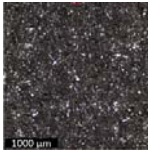
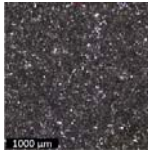
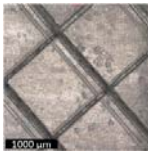
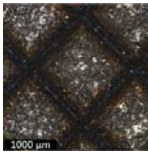
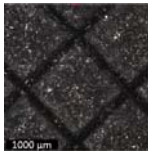


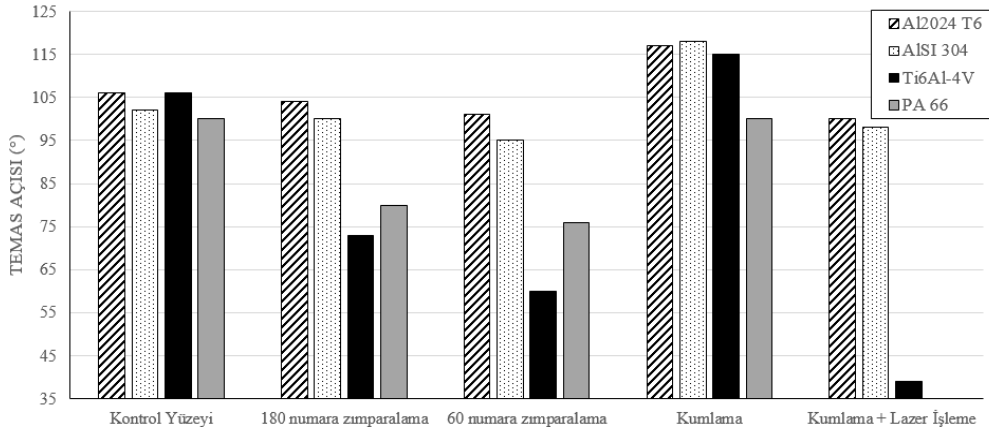
Şekil 4. Farklı malzemeler ve yüzey işlemleri için yüzey pürüzlülük değerleri  
(Surface roughness values for different materials and surface treatments)

Tablo 2. PA 66 malzemesinin farklı yüzey durumlarındaki mikroskop görüntüsü (PA 66 surface after sandblasting)

Numune	Kontrol Yüzeyi	Kumlama Sonrası
PA 66		

**Tablo 3.** Farklı aşındırma yöntemlerine maruz kalan metal yüzeylerin 5X mikroskop görüntüsü  
(Different metal surfaces exposed to different surface treatments (mag. 5X))

Yüzey işlemleri	Al 2024	AISI 304	Ti 6-4V
180 numara zımpara			
60 numara zımpara			
Kumlama			
Kumlama + Lazer			

**Şekil 5.** Farklı yüzey işlemlerine göre malzemelerin temas açılarındaki değişim  
(Contact angle for different sample surface with respect to treatment methods)

davranış göstermektedirler. Alüminyum ve paslanmaz çelik malzemelerin yüzeyindeki denemelerde damlacıklar gritlerin ortasına düşüp yüksek temas açısı vermiştir. Diğer yandan sadece titanyum malzemede damlacık desenin açtığı oyuga yayılıp oldukça düşük temas açısı oluşturmuştur. Tablo 4'de Titanyum yüzeyde yapılan testte alınan görüntüler verilmiştir. Pürüzlülüğün artmasının temas açısını azaltması; ıslanabilirliği ise arttırması beklenmiştir. Kumlanan yüzeyde görülen durum dışında, pürüzlülük ile temas açısı arasındaki ters orantı gözlenebilmektedir. Kumlama işlemi, yüzeylerin ıslanabilirlik özelliğinin sadece yüzey pürüzlülüğüne değil, aşındırma yönteminin de etkilediğini göstermektedir.

Temas açısı testleri sonucunda; Titanyum ve PA 66 malzemelerinin yüzey aşındırma işlemleri sonucunda

ıslanabilirliklerinin artmasına oldukça elverişli oldukları, Alüminyum 2024 ve AISI 304 Paslanmaz çelik malzemelerinin görece daha az yatkın ancak yine de bir miktar ıslanabilirliklerinde artış gösterdikleri görülmüştür. Bu testler sonucunda, tüm bu yüzeylerde pürüzlülükle doğru orantılı artması beklenen ıslanabilirlik değerinin; aslında pürüzlülük türüne göre değişkenlik gösterdiği kumlama örneği ile görülmüştür.

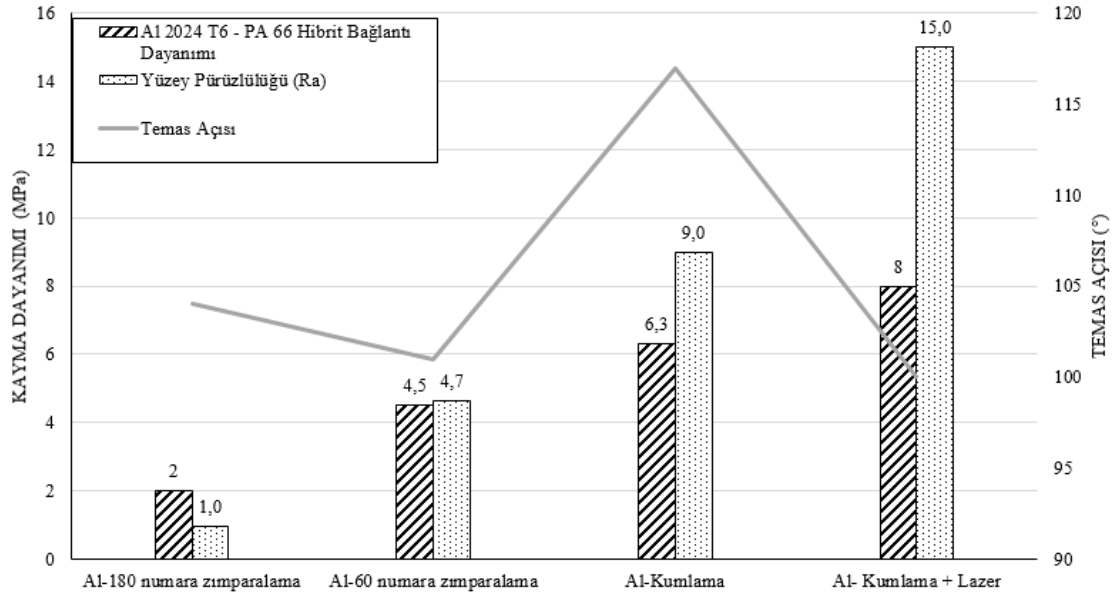
### 3.3. Yüzey İşlemlerine Göre Farklı Hibrit Bağlantıların Kayma Dayanımları

(Shear Test Results for Different Hybrid Joints with Respect to Surface Treatments)

Şekil 6'da Al2024 T6-PA66 hibrit bağlantısının farklı yüzey işlemleri, yüzey pürüzlülük değerleri ve temas açılılarına

**Tablo 4.** Titanyum yüzeyde aşındırma işlemleri, yüzey pürüzlülüğü ve damlacık temas açıları  
(Etching processes on the titanium surface, surface roughness and droplet contact angles)

Yüzey işlemi	Pürüzlülük (Ra)	Temas Açısı (°)	Damlacık Görüntüsü
Kontrol	0,3	106°	
180 numara zımpara	0,3	73°	
60 numara zımpara	0,7	60°	
Kumlama	4,7	115°	
Lazer	13,4	39	

**Şekil 6.** Farklı pürüzlülükteki Al 2024 -PA 66 bağlantılarının kayma dayanımları  
(Shear strength of Al 2024 -PA 66 joints in different roughness)

göre kayma dayanımlarındaki değişimi gösterilmektedir. Ayrıca Tablo 5'de kayma testi neticesindeki yüzey görüntüleri de verilmektedir. 4,7 Ra'ya kadar pürüzlülük

yaratan zımparalama işlemleri sonucunda yapıştırıcının hasar anında önce metal yüzeyi terk ettiği görülmüştür. Bu durum, metal yüzeyin, polimer zincirleri ile yeterince bağ






kuramadığı anlamına gelmektedir. Kumlama işlemi uygulanan ve 9 Ra pürüzlülük elde edilen Al 2024 yüzeyde hasar sonrasında Tablo 5’de gösterildiği gibi bazı numunelerde yapıştırıcının parçalanarak her iki yüzeyde de dağıldığı (Tablo 5, Numune #4), bazılarında ise tamamen metal yüzeyde kaldığı görülmüştür. Yapıştırıcının tamamen tek yüzeyde kalmaması, yapışma bağının yapışkan bağdan daha güçlü hale geldiğini göstermektedir.

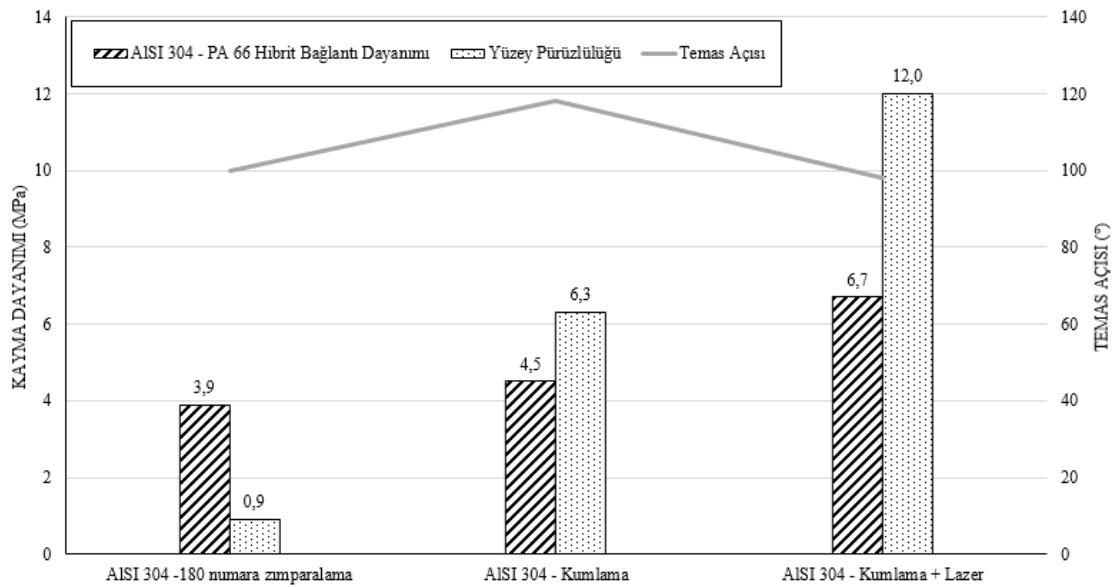
Tablo 5’de kumlanıp lazer işlenen ve 15 Ra pürüzlülük elde edilen Al yüzeyin hasar sonrası görüntüsü incelendiğinde, yapıda tüm yapıştırıcının Al yüzeyde kalmış olması, yüzeyin mekanik ve kimyasal olarak oldukça iyi hazırlandığını göstermektedir. Bu tür bir bağlantının bağlantı dayanımını güçlendirmek için bir sonraki adım olarak kompozit yüzeyde farklı uygulamalar denenerek yapıştırıcı bağ kabiliyetinin

geliştirilmesi tavsiye edilmektedir. Çalışmamızda literatürdeki benzer yayınlardan farklı olarak alüminyum malzemenin yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla bağlantı dayanımının da arttığı gözlenmiştir [20, 21]. Yasmina vd. yürüttüğü çalışmada yüzey pürüzlülüğü ile bağlantı dayanımının ters orantılı olarak değiştiği ve bu durumun yapıştırıcının pürüzlülendirilmiş numunenin girinti ve çıkıntılarına yeteri kadar ulaşmamasından ve hava boşluklarının kalmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [21]. Bu noktada akışkanlık açısından uygun olan sıvı yapıştırıcıların seçimi önemli olduğu görülmektedir.

Şekil 7’de farklı yöntemlerle aşındırılan paslanmaz çelik yüzeyler ile kumlanan poliamid malzemesinin oluşturduğu hibrit yapının kayma dayanımları gösterilmiştir. Dayanımlara pürüzlülük değerleri ile bakıldığında;

**Tablo 5.** Al2024 T6 – PA 66 hibrit bağlantılara ait kayma testi sonrasındaki yapışma durumları  
(Adhesive bonding after the shear test due to surface treatments for Al2024 T6 – PA 66 hybrid joint)

Yüzey İşlemi	Test Sonrası
Zımparalama	
Kumlama	
Kumlama + Lazer	



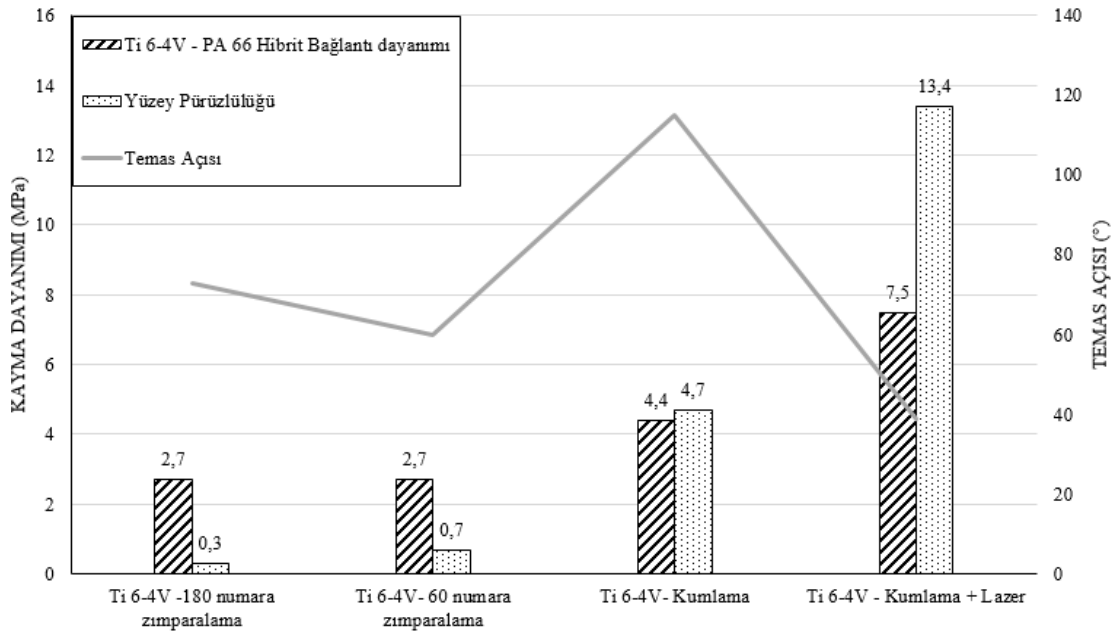
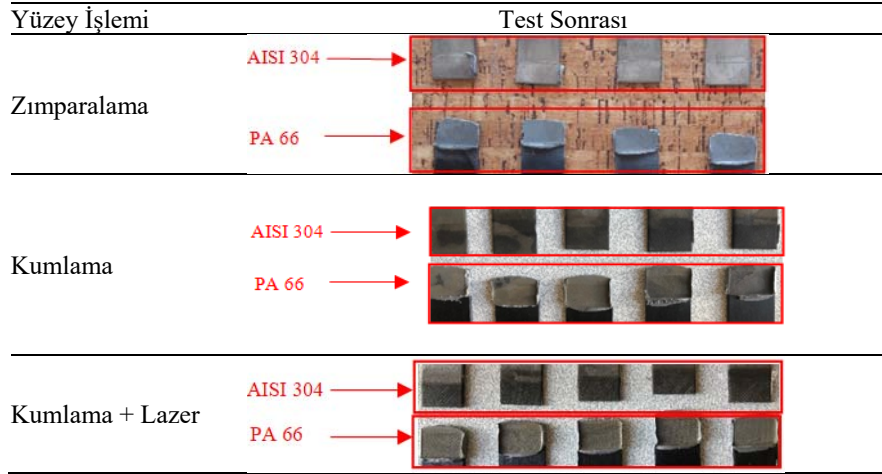
**Şekil 7.** Farklı pürüzlülükteki AISI 304-PA 66 bağlantılarının kayma dayanımları  
(Shear strength of AISI 304-PA 66 connections of different roughness)

pürüzlülük ile dayanımın doğru orantılı arttığı gözlemlenmektedir. Paslanmaz çeliğin farklı yüzey işlemleri ile oluşturulan hibrit bağlantısında metal yüzeyin pürüzlülüğü ile birlikte kayma dayanımının da arttığı görülmektedir. En yüksek dayanım lazer desen verilen paslanmaz çelik yüzeyi ile oluşturulan hibrit bağlantıda en düşük dayanım 180 numara zımpara ile aşındırılan paslanmaz çeliğin oluşturduğu yapıda görülmektedir. İslanabilirlik ile ters orantılı olan damlacık temas açısına bakıldığında ise bu orantıyı kurmak mümkün değildir. Kumlama yöntemi, malzemenin ıslanabilirliğini azaltırken pürüzlülüğünü arttırmıştır. Bu halde dayanımın artması; pürüzlülüğün, ıslanabilirliğe göre daha baskın rol oynadığını göstermektedir. Tablo 6'da farklı yüzey durumlarındaki AISI 304 –PA 66 hibrit bağlantının hasar sonrası fotoğrafları görülmektedir. Paslanmaz çelik yüzeyinde zımparalama,

kumlama, kumlama ve üzerine lazer desen ile elde edilen yüzeyin poliamid ile hibrit bağlantısında hasarın %100 metal yüzeyden başladığı görülmektedir. Bu durum tüm paslanmaz çelik yüzeylerin, 5 Ra pürüzlülüğündeki PA 66'dan daha zayıf yapışma bağ kurma yeteneği olduğunu, uygulanan pürüzlendirme ve dağlama işlemlerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Şekil 8'de ise Ti – PA 66 hibrit bağlantısına ait kayma dayanım değerleri sunulmaktadır. Titanyum malzeme de ise, uygulanan zımparalama işlemleri hibrit bağlantı dayanımında yeterli pürüzlülük yaratamamış, 1 Ra'yı dahi geçememiştir. 1 Ra'nın altındaki titanyum yüzeylerin kayma dayanımının testler sonucunda ortalama 2,7 Mpa olduğu görülmüştür. Bu yüzeylerde hasar bazı numunelerde kompozit, bazı numunelerde ise metal yüzeyde başlamış

**Tablo 6.** AISI 304 – PA 66 hibrit bağlantılara ait kayma testi sonrasındaki yapışma durumları  
(Adhesive bonds after the shear test due to surface treatments for AISI 304 – PA 66 hybrid joint)

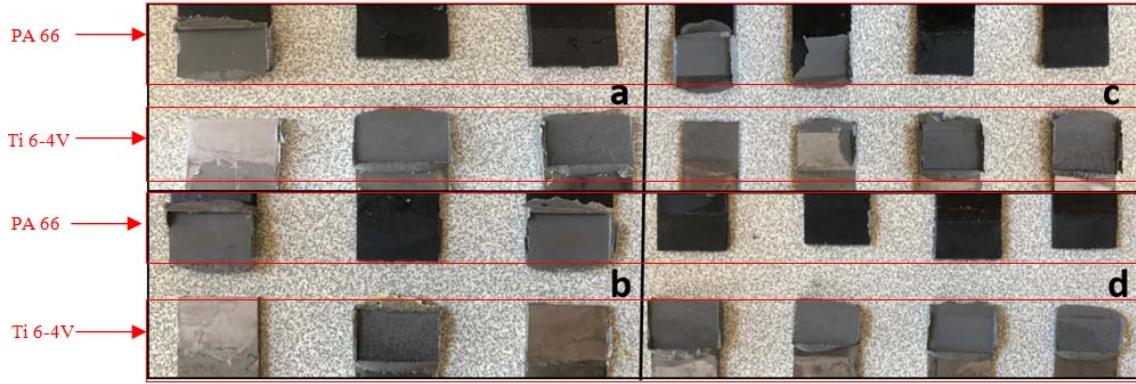


**Şekil 8.** Farklı pürüzlülükteki Ti 64-PA 66 bağlantılarının kayma dayanımları  
(Shear strength of Ti-6Al-4V / PA hybrid joints with different surface roughness)

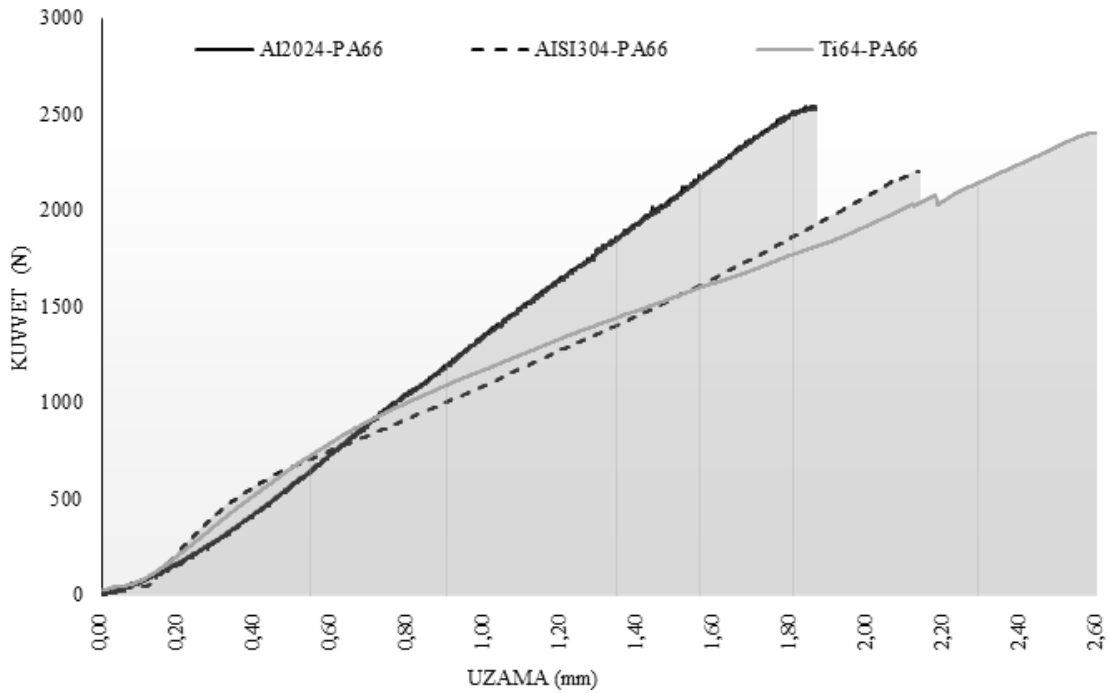
olup yapıştırma işlemi için başarılı sonuç vermemişlerdir. Kumlama işleminde 4,7 Ra, kumlama ve lazer desen verme işleminin birlikte uygulandığı durumda ise 13,4 Ra pürüzlülüğü ulaşılmış olup hibrit bağlantının dayanımı sırasıyla 4,4 ve 7,5 MPa olarak kaydedilmiştir. Literatürde Ti-6Al-4V malzemelerin hibrit bağlantılar oluşturması amacıyla uygulanan yüzey işlemleri arasında lazer işleminin yüzey pürüzlendirme ve ince bir oksit tabakası üretmesi açısından etkili bir yöntem olduğu belirtilmektedir [22, 23]. En yüksek değer olan ortalama 7,5 MPa kayma dayanımı elde edilen testlerin tamamında hasar kompozit yüzeyde başladığından, kompozit yüzey üzerinde yapılacak ileri çalışmaların bu bağlantı dayanımını daha da arttıracakları görülmektedir. Şekil 9'daki hasar sonrası görüntülerine bakılacak olursa, şekil 8'deki grafiklerde en kötü sonucu

veren 180 numara ile zımparalanmış numune ile en iyi sonucu veren lazer uygulamasına tabi tutulmuş numuneler için (Şekil 9a ve Şekil 9d) yapıştırıcının genelde metal yüzeyde (Şekil 9a'daki 1 numune hariç) kaldığı ve kompozitten tamamen ayrılma eğilimi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, yüzey alanı artırılan yüzeylerde oluşan polimer zinciri yoğunluğunun fazla olması ile açıklanabilmektedir. Titanyum yüzeyin kararlı bir şekilde yapıştırıcıyı tutabilmesi kumlama işlemi ile başlamış, ancak kumlama ve lazer desen verme işleminin birlikte uygulandığı yüzeylerde kesinleşmiştir.

Yapılan çalışmalarda, metal yüzeyde kumlama ve lazer işleme yapılan yüzey ile kompozit malzemenin oluşturduğu hibrit yapının en yüksek kayma dayanımını sağladığı



Şekil 9. Ti 64-PA 66 hibrit bağlantısı çekme sonrası görüntüsü (Fracture surface of Ti 64 – PA 66 hybrid joints) a) 180 numara ile zımparalananan (180 grade sandpapered) b) 60 numara ile zımparalananan (60 grade sandpapered) c) Kumlanan (Sanblasted) d) Kumlama+Lazer (Sanblasted + Laser)



Şekil 10. En yüksek kayma dayanımı gösteren hibrit bağlantıların kuvvet-uzama eğrileri (Force-elongation curves of hybrid joints showing the highest shear strength)

görülmüştür. Üç tür metalin oluşturduğu hibrit bağlantıların kuvvet-uzama eğrileri Şekil 10'da verilmiştir.

Şekil 10' da verilen eğrilere göre en yüksek kuvvet, Al 2024-PA 66 bağlantısında 2540 N olarak görülmüş; sonrasında Ti 64-PA 66 ve AISI 304-PA 66 bağlantılarında sırasıyla 2399N ve 2201 N olarak kaydedilmiştir. Hibrit bağlantılarda absorbe edilen enerji miktarlarına bakıldığı zaman en yüksek tokluğun Ti 64-PA 66 bağlantısında yaklaşık 3500 N.mm elde edildiği, Al 2024-PA 66 bağlantısında 2750 N.mm ve en düşük tokluk değerinin yaklaşık 2650 N.mm ile AISI 304-PA 66 bağlantısında elde edildiği görülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yüzey pürüzlülüğünün yapışma bağlantısını güçlendirerek kayma dayanımını arttırdığı yapılan testlerle kanıtlanmıştır. Aynı işlemler sonucu farklı metal türlerinde elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin farkı, metallerin sertlik farkından kaynaklanmaktadır. Sert bir malzeme olan paslanmaz çelik, uygulanan zımparalama ve kumlama işlemleri sonucunda diğer metal türlerine göre daha düşük pürüzlülük oluşturması sebebiyle daha düşük kayma dayanımları görülmüştür. Driver, D., titanyum ve alüminyum malzemeler üzerinde yaptığı çalışmada pürüzlülüğün yanı sıra bu iki metalin dağlama işlemi sonucu yüzeylerinde oluşan hücresel oksit tabakası yapısı sayesinde güçlü mekanik bağ kurabildiklerini anlatmıştır [24].

Metal yüzeyde yapılan çalışmaların hemen hepsinde kumlanıp lazer desen verilen numunede iyi bir yapışma sağlanmış ve kompozit yüzey yapışma bakımından zayıf kalmıştır. Çalışma neticesinde gözlemlenen bu durumdan dolayı mutlaka lazer desene benzer veya soğuk şekil değişimi gibi yüzey işleme çalışmalarının kompozit yüzeye de uygulanması gerektiği ortaya çıkmıştır. Etkin yüzey işlemlerinin kompozit malzeme yüzeyine de uygulanması ile bu çalışmadan elde edilen bağlantı dayanımlarının da aşılabacağı öngörülmektedir. Literatürde de benzer şekilde katmanlı kompozitlerde en üst tabakanın yüzey işlemine tabi tutulması tavsiye edilmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlerde bu mümkün değilse de yüzeydeki termoplastik malzemenin bir miktar daha tahribata uğratılması yüzeyin yapışma performansını iyileştirecek ve böylece daha yüksek kayma dayanımlı hibrit bağlantı oluşmasını sağlayacaktır [23, 25].

Ayrıca güncel çalışmaya ek olarak sadece yüzey işlemleri ile değil yapıstırıcı içeriğini ve kalınlığını da değiştirerek kayma dayanımı daha yüksek hibrit bağlantıların elde edilmesi de mümkündür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Goushegir S.M., Friction spot joining of polymer-metal hybrid structures, *Weld World*, 49 (0), 2–4, 2015.
2. Higgins A., Adhesive bonding of aircraft structures, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 20 (5), 367–376, 2000.
3. Da Silva L.F.M., Critchlow G.W., Figueiredo M.A.V., Parametric study of adhesively bonded single lap joints

by the taguchi method, *J. Adhes. Sci. Technol.*, 22 (13), 1477–1494, 2008.

4. Ucsnik S., Scheerer M., Zaremba S., Pahr D.H., Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology, *Compos. Part A-Appl. S.*, 41 (3), 369–374, 2010.
5. Adams R.D., *Adhesive Bonding 1st ed.*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2005.
6. Maressa P., Anodio L., Bernasconi A., Demir A.G., Previtali B., Effect of surface texture on the adhesion performance of laser treated Ti6Al4V alloy, *J. Adhes.*, 91 (7), 518–537, 2014.
7. Alfano M., Pini S., Chiodo G., Barberio M., Pironi A., Furguele F., Groppetti R., Surface patterning of metal substrates through low power laser ablation for enhanced adhesive bonding, *J. Adhes.*, 90 (5–6), 384–400, 2014.
8. Ellsworth Adhesives. Design Guide for Bonding Metals. <https://www.ellsworth.com/globalassets/literature-library/manufacture/henkel-loctite/henkel-loctite-design-guide-bonding-metals.pdf>. Yayın tarihi 2014. Erişim tarihi 2020.
9. Sayed A.N., Xianjie Y., Fastening and Joining of Composite Materials, 12th International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, California, USA, June 11-14, 5-23, 2012.
10. Yağmur S., Kurt A., Şeker U., Evaluation and mathematical modeling of delamination and cutting forces in milling of carbon fiber reinforced composite (CFRP) materials, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (1), 457-466, 2019.
11. İç Y., Elaldı F., Keçeci B., Önder Uzun G., Limoncuoğlu N., Aksoy İ., An optimization for milling operation of Kevlar fiber-epoxy composite material using factorial design and goal programming methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1549-1560, 2019.
12. Mitschang P., Velthuis R., Didi M., Induction spot welding of metal/CFRPC hybrid joints, *Adv. Eng. Mater.*, 9, 804-13, 2013.
13. Juhl T., Christiansen B., deClaville J., Jensen E.A., Investigation on high strength laser welds of polypropylene and high-density polyethylene, *J. Appl. Polym. Sci.*, 129 (5), 2679-85, 2013.
14. Balle F., Wagner G., Eifler D., Ultrasonic spot welding of aluminum sheet/carbon fiber reinforced polymer – joints, *Adv. Mater. Res.-Switz.*, 38 (11), 934-38, 2007.
15. Martinsen K., Hu S.J., Carlson B.E., Joining of dissimilar materials, *Cirp Ann-Manuf. Techn.*, 64 (2), 679–699, 2015.
16. Nandwani Y., Characterization of structural adhesives using lap shear and pin and collar tests, MSc thesis, University of Waterloo, Canada, 2015.
17. Bestenbostel W., Friedrich K., The Appearance of Fatigue Striations in the SEM, 17th International Conference on Composite Materials, Edinburgh, UK, 27-31 July, 2009.

18. Moldovan E., Tierean M.H., Stanciu E.M., Overview of joining dissimilar materials: metals and polymers, *Bulletin of the Transilvania of University of Braşov*, 10 (1), 39-46, 2017.
19. Omnis Composite. Expanded Glass Beads. <https://www.omniskompozit.com/kategori/genlesti-rilmis-cam-kure>. Erişim tarihi 2018.
20. Pereira A.M., Ferreira J.M., Antunes F.V., Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints, *J. Mater. Process. Technol.*, 210, 610–617, 2010.
21. Yasmina B., Sami N., Salah M., Lucas F.M., Mohamed H. & Moez B.S.A., Effect of adhesive thickness and surface roughness on the shear strength of aluminium one-component polyurethane adhesive single-lap joints for automotive applications, *J. Adhes. Sci. Technol.*, 30 (17), 1913-1929, 2016.
22. Sancaktar E., Zhang E., Reliability, stress analysis and failure prevention aspects of composite and active materials, *ASME*, 79 (65), 1994.
23. Molitor P., Barron V., Young, T., Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 21 (2), 129–136, 2001.
24. Driver D. , Adhesive bonding for aerospace applications, Springer, Dordrecht, 1995.
25. Baldan A., Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment, *J. Mater. Sci.*, 39 (1), 1–49, 2004.



