



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makale

Yapıştırıcı Birleştirmelerde Bağlantı Mukavemetini Etkileyen Faktörler: Yüzey Morfolojisi ve Yüzey Enerjisi

 Ali GÜRSEL ^{a,*},  Salih YILDIZ ^b

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b Department of Mechanical Engineering, The City College of New York, NY, USA

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: aligursel@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.884675

ÖZET

İmalat sektöründe birleştirme teknolojilerinin önemi artarak devam etmektedir. Birleştirme teknolojileri yarı mamül ürün birleştirmelerinden kompleks yapılar ve kompozit malzeme üretimleri, eklemeli imalat teknolojilerine kadar her alanda kullanılmaktadır. Bu kapsamda, yapıştırıcılar vasıtasıyla yapılan birleştirme teknolojileri farklı cins malzemelerin birleştirmelerine olanak sağladığı gibi, birleştirilecek malzemelerde deformasyona sebep olmadığından büyük avantajlar sağlamaktadır. Yüksek mukavemetli yapıştırıcı uygulamalarında en önemli işlem yüzey hazırlama süreçleridir. Yapışma mekanizmalarında da en yaygın kabul gören ve ispatlanmış teori mekanik kilitlenmedir. Yüzey hazırlama süreçlerinde, malzemelerin optimum yüzey pürüzlülüğüne sahip olmaları durumunda, bağlantılardan istenen mukavemet değerleri elde edilebilir. Yapıştırıcı bağlantılarda birleştirilecek malzemelerin yüzey enerjisi, hem yapıştırıcı reçineyi absorbe etme, hem de yapıştırıcıyla bağ oluşturma bakımından büyük önem taşır. Yüzey hazırlamada uygun yüzey morfolojisi ile birlikte yüzey enerjisini arttırıcı işlemler göz önünde bulundurulmalı ve uygulanmalıdır.

Anahtar kelimeler: Yapıştırıcı birleştirmeler 1, Yapışma mekanizması 2, Yüzey hazırlama 3, Yüzey morfolojisi 4, Katıların yüzey enerjisi 5.

Affecting Factors of Bond Strength in Adhesive Joints: Surface Morphology and Surface Energy

ABSTRACT

In the manufacturing industry, the importance of joining technologies has been increasing continuously. Joining techniques are widely employed in many fields such as additive manufacturing, bonding semi-products, manufacturing composite and complex structures. Particularly, adhesively bonded joints provide exceptional advantages over conventional joining techniques such as environmental resistance, thermal/electrical resistance, weight-saving and its ability to join dissimilar materials. In the bonding process of high-strength adhesives, surface preparation of adherends play a significant role in the performance of adhesive joints. Although there are many theories on adhesion mechanism, the most accepted and proven theory is 'mechanical-interlocking'. In the light of mechanical-interlocking theory, desired strength of adhesive joints can be achieved by keeping the roughness of bonding surfaces optimum. Overall, appropriate surface morphology and other procedures increasing the surface energy should be taken into account for surface preparation step of adhesive joint manufacturing.

Keywords: Adhesively bonded joints 1, Adhesion mechanisms 2, Surface preparation 3, Surface morphology 4, Surface energy of solids 5.

I. GİRİŞ

İmalat sanayiinde yeni nesil malzemelerin ve kompleks yapıların gelişmesiyle, üretim ve birleştirme tekniklerinin de buna paralel olarak gelişme zorunluluğu doğmuştur. Bu tür malzemelerin çeşitliliklerinin artması ve kombinasyonuyla birlikte, yapıştırıcılar vasıtasıyla yapılan birleştirmeler tercih edilmekte, hafiflik ağırlık ve uygulama kolaylığı gibi alternatifler sunmaktadır.

Yapıştırıcı birleştirme teknikleri, metalik malzemeler de dahil olmak üzere, polimerler ve seramiklerin, hafif materyallerin, benzer veya farklı yapıdaki malzemelerin, farklı kombinasyonlar içeren kompleks, kompozit ve hibrit malzemelerin birleştirmelerinde kullanımı artmaktadır [1], [2]. Yapışma mekanizması, polimer ve yüzey kimyası, fizik, kırılma mekaniği, malzeme mekaniği ve diğer alanlar gibi çok disiplinli alanları ilgilendiren karmaşık bir konudur. Literatürde difüzyon, mekanik, termodinamik, moleküler ve kimyasal faktörlerden etkilendiği tartışılmaktadır [3]-[8].

Kaynak teknolojileri ve mekanik birleştirme teknikleri, imalat endüstrisindeki en yaygın birleştirme yöntemleridir, ancak yapıştırma haricindeki yöntemlerde birleştirilen malzemeler bu birleştirme teknikleriyle tahrip edilmektedir [2]. Cıvata, vida vb gibi mekanik bağlama tekniklerinde delme ve diğer işlemlere ihtiyaç vardır ve ana malzemeleri tahrip edilir veya süreksizliklere sebep olur. Kaynak uygulamalarında ise genellikle ana malzemelerin ve dolgu malzemelerinin bir kısmının eritilmesi gerekir, daha sonra hızlı katılaşmalar meydana gelir ki, bu da mikro yapılarda bozulmalara, kalıcı gerilmelere, distorsiyonlara ve hasara neden olmaktadır. Bunlara ek olarak, kaynak tekniklerinin birbirinden farklı malzemelerin birleştirilmesinde sınırlamaları vardır. Yapıştırıcı birleştirme tekniği bu sorunlara sebep olmayan iyi bir alternatiftir ve ana malzemeleri tahrip etmeyerek farklı malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlamaktadır [9].

Bu çalışmada, yapışma mekanizmaları ile yüzey hazırlama yöntem ve aşamalarının, yüzey enerjisinin, yüzey morfolojisinin ve yüzey pürüzlülüğünün yapışma başarısına etkileri tartışılacaktır. Bu doğrultuda, yapıştırıcılar ve özellikleri, yapıştırıcı bağlantılara uygulanan mekanik testler, yapışma mekanizmaları, yapıştırıcı bağlantılardaki hatalar ve yapışma teorileri ile iyi bir birleşmeyi etkileyen faktörler tartışılacak, yüzey enerjisi ile yüzey pürüzlülüğü ve morfolojisinin birleşmeye etkisi incelenecektir.

II. YAPIŞTIRMA PROSESLERİ VE YÜZEY HAZIRLAMA

Yapıştırma yöntemiyle yapılan birleştirmelerde işlem basamakları; yapıştırılacak malzemelerin istenen boyut ve özelliklerde hazırlanması, yüzey temizliği, yüzey hazırlama işlemleri, kütleme ve yapıştırma sonrası temizlik işlemleri olarak sıralanabilir. Bu işlemlerden en kritik ve zaman alan aşama yüzey hazırlama işlemleridir.

Yapıştırma işlemlerinde bağlantı yüzeylerinin durumu, yapıştırıcı ve yapıştırılacak malzemelerin yüzeyleri arasındaki kimyasal ve fiziksel ara yüzün kalitesini etkilemektedir. Yüksek ve dinamik yüklerle karşı dayanıklı bir birleşme alanı oluşturmak için, ana malzemeye, yapıştırıcıya ve kullanım amacına uygun yüzey işleme prosedürleri uygulanmalıdır [10]-[12].

Yüzey hazırlama işlemleri; yüzeyin kir ve yağlardan temizlenmesi, taşlama ve kumlama vb yöntemlerle istenen yüzey pürüzlülüğü için aşındırma, yapıştırma yüzeyine inorganik ve organik malzemeler arasında bağ elde etmek için malzeme cinsine göre kimyasal solüsyon uygulama şeklinde sıralanan işlem basamaklarından oluşmaktadır. [13].

Yapıştırmadan önce yüzey işlemleri uygulamanın ana nedenleri şunlardır [13]:

- . ana malzemelerin yüzeyinde oluşan zayıf tabakayı kaldırmak veya önlemek,
- . ana malzeme üzerinde optimum yüzey morfolojisini ve mikro yapısı oluşturmak,
- . yapıştırıcı veya astar ile ana malzeme yüzeyi arasındaki moleküler etkileşim derecesini arttırmak,
- . arayüzler boyunca gelişen yapışma kuvvetlerini optimize etmek ve bağın çalışma ömrü boyunca yeterli birleşme mukavemetini sağlamak.

Lukas ve arkadaşlarına (2018) göre yüzey hazırlama işlemleri; yüzeye uygulanan yapıştırıcıyı absorbe edilebilir hale getirmek, mekanik olarak sağlam bir yüzey oluşturmak, yaşlanma, çevresel etkiler ve korozyon veya uygulanan yükler gibi harici faktörlerin potansiyel olarak zarar verici etkilerini en aza indirecek uygun bir yüzey sağlamak şeklinde sıralanmaktadır [14].

Yapıştırma ve kütleme işlemleri sırasında yapıştırıcı ile ana malzeme arasındaki yakın moleküler bağ seviyesini arttırmak için yüksek serbest yüzey enerjisinin oluşturulması gerekir. Yapıştırma işlemlerinden önce yapıştırıcının yüzey enerjilerini pasifleştirmek gerekir. Pasifleştirme işlemleri, ana malzemede elektrokimyasal ve korozyon direnci sağlayarak yapıştırma sonrasında yüzeyin korunmasını sağlar [14]. Pasifleştirilen yapıştırıcı reçine, yüzey hazırlama prosesleriyle aktive edilen ana malzemeler tarafından daha kolay absorbe edilir ve bu işlemler bağ oluşumunu destekler.

Aşındırma veya kumlama gibi mekanik aşındırma işlemleri uygulanmış yüzeylerin daha iyi bir yapışmaya (mekanik kenetlenme) imkan sunduğu bilinmektedir. Özellikle metallerin birleştirilmesi için kimyasal tabaka oluşturma ve metallerin anodik oksidasyonu dahil olmak üzere oldukça karmaşık, çok aşamalı işlemler uygulanmaktadır, ve bunların yapışma performansını arttırdığı kabul edilmektedir [14].

III. BAĞLANTI YÜZEYLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Bağlantı yüzeylerini etkileyen faktörler; arayüz, yüzey enerjisi (yapıştırıcının), yüzey gerilimi, yüzey serbest enerjisi, katıların yüzey enerjisi (yapıştırılan malzemelerin) olarak sıralanabilir.

A. ARAYÜZ

Temas halindeki katı veya sıvı fazlar, arayüz adı verilen izafi bir düzlemin her iki tarafında bulunan atomlara/moleküllere sahiptir. Arayüzey taneleri faz sınırında olmaları ve diğer fazlar ile etkileşimleri nedeniyle her fazın kütledeki enerjileri farklıdır. Bileşme ve enerji, arayüz boyunca bir fazdan diğerine sürekli olarak geçişgen haldedir. Bu bölge, genellikle 0,1 μm 'den daha az olan sonlu bir kalınlığa sahiptir [15].

B. YÜZEY GERİLİMİ

Yüzey gerilimi; bir yüzeyin alanını bir birim miktarda izotermal ve tersinir şekilde artırmak için gereken iş olarak tanımlanır. Yüzey gerilimi (γ), birim alan başına yüzey enerjisi ve alternatif olarak birim uzunluk başına kuvvet olarak ifade edilir. Sıvıların yüzey gerilimi doğrudan ölçülebilir ve birim alandaki iş veya enerji birimleri (erg/cm^2) cinsinden ifade edilebilir, bu daha sonra din/cm (erg/cm^2 5 din ; cm/cm^2 5 din/cm) olarak sadeleştirilir [13].

Metaller yüksek yüzey gerilimine, polimerler düşük yüzey gerilimine sahiptirler. Düşük yüzey gerilimine sahip maddeler yüksek yüzey gerilimine sahip maddeler tarafından absorbe edilir [13]. Bu nedenle iyi bir

yapıştırma işlemi için birleştirilecek malzemelerin (katı) yüzey enerjilerini arttırmak (aktive etmek), yapıştırıcı reçinelerin enerjilerini düşürmek (pasivize etmek) gerekir.

C. YÜZEY ENERJİSİ

Yapıştırıcı bağlantılarda ıslatma mekanizmasından hareketle, yüzey enerjisi veya yüzey gerilimi kavramları genellikle yapıştırıcı sıvı reçinelerle ilgili olarak ele alınmaktadır. Yapıştırıcı reçinenin vizikositesi ve yüzey enerjisinin, ıslatma mekanizmasında en belirleyici faktör olduğu düşünülür.

Bir sıvının molekülleri çekim kuvvetleriyle bir arada tutulur ve kütesinde bulunan herhangi bir molekül üzerindeki tüm çekim kuvvetlerinin toplamının ortalaması sıfırdır. Bir yüzey molekülü üzerindeki net kuvvet 'kohezyon kuvveti' olarak adlandırılır, kütleyle doğru yönde ve sıfırdan farklı bir miktardır. Bu, yüzey alanını artırmak için karşı konulması gereken kuvvettir; bunun için sarfedilen enerjiye yüzey enerjisi denir. Arayüz üzerindeki dengesiz kuvvetler, minimum yüzey alanına indirgenmesine neden olur. Bir hacim için minimum yüzey alanına sahip şekil küredir, bu nedenle damlacıklar küreseldir. Bir sıvının yüzey gerilimi ve yüzey serbest enerjisi eşitken, katı bir yüzey için aynı şey geçerli değildir.

C. 1. Yüzey Serbest Enerjisi

Yüzey serbest enerjisi kavramı da genellikle sıvılar için ele alınan bir konudur. Bir sistemin toplam serbest enerjisi, sıvı kütle ve yüzeydeki sıvının enerjisinden oluşur. Birim alan başına yüzey serbest enerjisinin, yüzey alanı ile çarpımına eşittir. Saf bir maddenin serbest yüzey enerjisi, yüzey gerilimine eşittir. Tersinir bir sistemde, yeni yüzeyin ortadan kaldırılmasıyla ilişkili ısı, entropi veya yüzey entropisiyle ilişkilendirilebilir. Toplam yüzey enerjisi (E_S), sıvı yüzeye Gibbs serbest enerjisi (birim alandaki yüzey enerjisi G_S) ve entropi (entropi S , yüzey entropisi S_S) ile entalpi ilişkisi (H_S) uygulanarak hesaplanır (Eşitlik 1) [13].

$$H_S = E_S = G_S + T S_S \quad (1)$$

Sıvıların yüzey gerilimi, artan sıcaklıkla doğrusal bir şekilde azalır. Sıcaklık ve yüzey gerilimi arasındaki ilişkiyi tanımlayan ifade Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$\gamma V^{2/3} = k(T_C - T) \quad (2)$$

V molar hacimdir, k sabiti çoğu sıvı için aynı değere sahiptir (2.1 erg/K), T_C sıvının kritik sıcaklığı ve T sıvı sıcaklığıdır. Burada beklenti, bir sıvının yüzey geriliminin kritik sıcaklığında sıfıra yaklaşmasıdır [13].

C. 2. Katıların Yüzey Enerjisi

Sert ve gerilime dirençli malzemeler 'katı' malzemeler olarak adlandırılır. Katı bir yüzey, yüzey serbest enerjisi ve yüzey enerjisi ile ifade edilebilir. Bir katının yüzey enerjisi (gerilimi), yüzeyinin tersinir formda olmayışı nedeniyle sıvılarınkine benzer şekilde ölçülemez.

Katı malzeme yüzeyleri, yüksek veya düşük yüzey enerjili malzemeler olarak iki kategoriye ayrılabilir [16]: Yüksek yüzey enerjili malzemeler arasında; metallere ve oksitlere, silikatlar, silika, elmas ve nitrürler gibi inorganik bileşikler bulunur. Yüksek enerjili malzemelerin yüzey gerilimi 200-500 din/cm'dir. Düşük enerjili malzemeler esas olarak kritik yüzey gerilimi 100 din'den daha az olan polimerler dahil organik

bileşiklerden oluşur. Polimer yüzeyler düşük, orta veya yüksek yüzey enerjili olarak sınıflandırılmıştır [17]. Düşük yüzey enerjili polimerler (katı) 10-30 din/cm kritik yüzey gerilimi aralığında, orta enerjili 30 ila 40 din/cm aralığında ve 40 din/cm'den daha büyük olduğunda da yüksek enerjili olarak adlandırılır [13].

Sistemin serbest yüzey enerjilerinin az olması nedeniyle yağlar, polimer bazlı sıvılar gibi düşük enerjili malzemeler yüksek enerjili yüzeyler tarafından kendiliğinden emilir. Bu, normal atmosfer ortamına maruz kalan temiz ve yüksek enerjili bir yüzeyin, uzun süre temiz kalmayacağı anlamına gelir ki; su, yağ ve özellikle organik partiküllerin çevreden emilmesi söz konusu olacaktır. Bu nedenle yapıştırıcı veya kaplama uygulamasından hemen önce çevre etkilerine maruz kalan malzeme yüzeylerinde temizleme işlemleri yapılır [9].

IV. YAPIŞMA MEKANİZMASI

Yapışma mekanizması, iki fazın arayüzünü denge durumundan sonsuz ayırma mesafesine ayırmak için gereken tersinir termodinamik bir fonksiyon olarak tanımlanır.

Eşitlik (3), bir likid-solid kombinasyonu için yapışma mekanizmasını gösterir [13].

$$W_a = \gamma_L + \gamma_S - \gamma_{SL} \quad (3)$$

γ_L sıvı fazın yüzey enerjisidir (gerilim), γ_S katı fazın yüzey enerjisidir, γ_{SL} arayüzey yüzey gerilimidir ve W_a yapışma fonksiyonudur. Arayüzey çekiminde bir artış, yapışma mekanizmasında da artışa neden olur. Eşitlik (3), iki faz aynı olduğunda ($\gamma_L = \gamma_S$ ve $\gamma_{SL} = 0$) kohezyonu (W_c) belirlemek için yeniden yazılabilir ve Eşitlik (4) katı faz için.

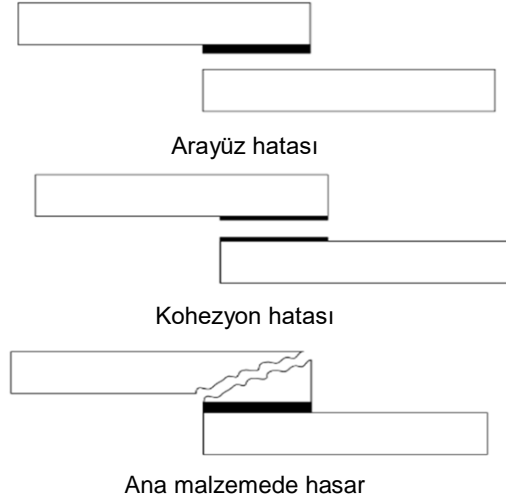
$$W_a = 2\gamma_S \quad (4)$$

biçiminde yazılır [13].

Yapışma mekanizmaları/teorileri

Yapışma; yapışan yüzeylerin arayüzündeki atomlararası ve moleküllerarası etkileşimdir [18]. Yapışma mekanizmaları, malzemelerin yüzey özelliklerine bağlıdır. Yapışma mekanizmalarının anlaşılması, daha hafif iş parçalarının, daha az deformasyonun ve diğer avantajlarla daha az üretim sürecinin gerçekleşmesine yardımcı olacaktır [2]. Yapıştırıcı bağlantıları etkileyen temel faktör polimer yapıştırıcılarla esas malzemeler arasındaki arayüzlerdir [19]-[22].

Yapıştırıcı bağlantılar hakkında yapılan araştırmaların çoğu polimer malzemelerin birleştirilmesi hakkındadır. Ve yapışma mekanizmalarının esası hala iyi bilinmemektedir ve tüm yapışma fenomenlerini veya mekanizmalarını ayrıntılı olarak açıklayacak tek bir genel metodoloji veya teori yoktur [2], [22], [24]. Yapıştırıcılar farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve her bir malzemede kompleks bağ teorilerini ihtiva etmektedir. Bağlanma süreçlerini ve mekanizmalarını açıklayacak altı temel sistem veya teori vardır. Bu teoriler, "mekanik kenetlenme teorisi, elektronik veya elektrostatik teori, zayıf sınır tabakası teorisi, absorpsiyon teorisi, difüzyon veya inter-difüzyon teorisi ve kimyasal bağ teorisi" olarak sıralanabilir [24]-[27].



Şekil 2 Yapıştırıcı bağlantılarda muhtemel hata modları [28]

Yapışma hatası modunda, yapıştırıcı ile yapışan malzeme arasındaki arayüzde hata meydana gelir ve yapışma tam gerçekleşmez. Bu tür bir hata, yapıştırıcı ile ana malzeme arasındaki kötü yüzey kalitesinden ve kimyasal bağlarda sulanmadan kaynaklanır. Hatalı yüzey hazırlama yönteminin kullanılması, kirletici maddelerin yüzeyden temizlenememesi veya uygun olmayan kütleme döngüsü (malzemeye yapışmaya ve bağ oluşturmaya fırsat olmadan yapıştırıcının hızlı kürlenmesi) yapışma başarısızlığının temel nedenleri olabilir. Ayrıca, herhangi bir yapışma (ara yüzey) hatası, uygun olmayan yapıştırma işlemi, yükleme koşulları (sıyırılma gerilimi, yorgunluk veya yapışkanın sünmesi) bu tür hatalara sebep olabilmektedir [9].

İnce veya zayıf malzemeler güçlü yapıştırıcı bağlar ile birleştirildiğinde, hasar ana malzemede meydana gelebilir [28]. Bu hata modunda, bağlantıların performansı tam olarak sağlanmış olur. Bu sadece, yapıştırıcının yük kapasitesinin ana malzemenin mukavemetinden çok yüksek olması durumunda düşünülebilir.

Kohezyon hatası modunda yapıştırıcı, ana malzemeye yapışan kısımların her iki tarafında da mevcut olabilir. Bu tür bir hata, kesme ve soyulma ile bunların gerilmelerinin bir kombinasyonundan kaynaklanabilir [9]. Kohezyon hatalarına, yapışkan bağlantı tasarımındaki bazı hatalar (aşırı sıyırılma gerilimi, yetersiz örtüşme alanı) ile zayıf yapıştırıcı ve yapıştırıcı eksikliği de sebep olabilir.

VI. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapışma, yapışan malzeme yüzeylerinin arayüzündeki atomlar ve moleküller arası etkileşimle ilgilidir [18]. Yapışma mekanizması çok karmaşık konulardır [3]-[8], bunlar hala net bir şekilde açıklanamamaktadır ve tüm yapışma mekanizmalarını ayrıntılı olarak tanımlayacak tek bir metodoloji veya teori yoktur [23], [24].

Yapıştırılan malzemelere, yapıştırıcılara ve yapıştırma prosedürlerine ilişkin uygulamalar için yapışma mekanizmalarının bilinmesi gerekir. Örneğin, balistik ve patlama yükleri gibi çok yüksek ve darbeli yükler için yapıştırıcı uygulama prosedürleri oldukça karmaşıktır ve hassas süreçlerden oluşur. Bu

uygulamalarda işlem sayısının azaltılması, daha az zaman kaybı ve daha düşük üretim maliyeti için yeni araştırmalara ihtiyaç vardır.

Literatürde bahsedildiği üzere, yapıştırıcı bağlanma mekanizmalarını açıklayan altı temel sistem veya teori olduğu belirtilmektedir [23]. Mekanik kenetlenme modeli veya teorisi en yaygın olarak kabul edilen teoridir ve mekanik bağlanma için malzeme üzerindeki yüzey pürüzlerinin yapıştırmanın temeli olduğu iddia edilmektedir. Mekanik kenetlenme modelini etkileyen faktörler; uygun viskoziteye ve yüksek arayüz mukavemetine sahip yapıştırıcılarla yeterli ıslatma ve nüfuziyet, yüzey pürüzlülüğü, düzensizliklerdir. İyi bir yapıştırma işlemi için bu özellikler dikkatle uygulanmalıdır.

Amaca uygun yüzey hazırlığı ve prosedürler, yapıştırıcı bağlar için çok önemli rol oynamaktadır. İyi bir kenetlenme bağı, kolaylıkla uygulanan taşlama ve zımparalama işlemleriyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü sayesinde sağlanabilmektedir. Bu doğrultuda, zaman kaybını ve genel üretim maliyetini azaltmak için, araştırmacılar mekanik kenetlenmeye dayalı yapıştırıcı bağlantılara yönelik çalışmalara odaklanabilirler.

Yapıştırıcıların hata modunun sınıflandırılması, yapışma bağlantılarının bozulmasının nedenini anlamak için önemlidir. Yapışma (ara yüzey) hatası, kohezyon hatası ve ana malzemede hasar olmak üzere üç temel yapışma hata modu bulunmaktadır. Yapıştırıcı bağlantılar için seçilen uygulama prosedürleri, ara yüzey hatalarına neden olmamalıdır. Kohezyon hatası; uygun olmayan yapıştırma prosedürü ve kötü bir uygulamanın göstergesidir. Yapıştırıcı bağların güçlendirilmesi için güçlü ve yapıştırılacak malzemeler için uyumlu yapıştırıcıların seçilmesi, sağlam uygulamalar için önemlidir.

7. KAYNAKLAR

- [1] A., Baldan, “Adhesion phenomena in bonded joints,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 38, pp. 95–116, 2012.
- [2] A. Gursel, “Fundamentals in Adhesive Bonding Design for Complex Structures and Conditions,” *Journal of Advanced Technology Sciences*, vol. 8, no.1, pp. 1-10, 2019.
- [3] F. Awaja, Gilbert M, Kelly G, Fox B, Pigram PJ., *Prog Polym Sci*, vol. 34, pp. 948–68, 2009.
- [4] R.Y. Qin Schreiber, H.P., *Colloids Surf.*, vol. 156, pp. 85–93, 1999.
- [5] J. L. Been, N. M. Bikales, J. J. Bickerman, R.F. Blomquist, E. Moks, G. P. Kovach, *Adhesion and Bonding*, 1st ed. John Wiley and Sons Inc., 1971.
- [6] M. C. Van Leeden, G. Frens, “Surface Properties of Plastic Materials in Relation to Their Adhering Performance,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 4, no.5, pp. 280–289, 2002.
- [7] H. R. Brown, “Polymer adhesion,” *Materials Forum*, vol. 24, pp. 49–58, 2000.
- [8] W. C. Wake, “Adhesion and the Formulation of Adhesives,” 2nd ed. Essex: Applied Science Publishers Ltd., New York, 1982.
- [9] A. Gursel, A. A. Mohamad, M. F. M. Nazeri “Adhesion mechanism and failure modes in adhesively bonded joints,” 4. International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC’19) Proceedings, pp. 106-114, Kızılcahamam, 2019.

- [10] S. Yildiz, Y. Andreopoulos, F. Delale, "Mode I characterization of toughened epoxy adhesive joints under shock-wave loading," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 90 pp. 71–87, 2019.
- [11] K. Gollins, J. Chui, A. Gursel, F. Delale, B.M. Liaw, "Comparison of Manufacturing Techniques Subject to High Speed Impact," *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2014-39677*, Montreal-Canada, 2014.
- [12] A. Gursel, H.M. Cekirge, "Adhesive Joints Subjected to Impact Loading: A Review," *International Journal of Materials Engineering*, vol. 9, no.1, pp. 16-21, 2019.
- [13] S. Ebnesajjad, C. Ebnesajjad, "Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding Elsevier Inc.," pp. 3-24, 2014.
- [14] Lucas F. M. da Silva, Andreas Öchsner, Robert D. Adams - *Handbook of Adhesion Technology*, Springer International Publishing, pp. 133-144, 2018.
- [15] Wu S. *Polymer interface and adhesion*. 1st ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1982.
- [16] Fox HW, Zissman WA., "The spreading of liquids on low energy surfaces," I. polytetrafluoroethylene, *Journal of Colloid Science*, vol. 5, no. 6, pp. 514-531, 1950.
- [17] L.H. Lee, "Fundamentals of adhesion," New York: Plenum Press, 1991.
- [18] B. Pukanszky, E. Fekete, "Adhesion and Surface Modification," *Mineral Fillers in Thermoplastics: Adhesive in Polymer Science*, vol. 139, pp. 109–153, 1999.
- [19] J. C. Roberts, "The Chemistry of Paper 1st ed. Cambridge," UK: The Royal Society of Chemistry, 1996.
- [20] N. Amouroux, L. Leger, "Modulation of Adhesion at Acrylic Adhesive-Silicone Elastomer Interfaces," *The Journal of Adhesion*, vol. 82, no. 9, pp. 919-932, 2006.
- [21] C. T. Lo, F. C. Laabs, B. Narasimhan, "Interfacial adhesion mechanisms in incompatible semicrystalline polymer systems," *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, vol. 42, no.14, pp. 2667–2679, 2004.
- [22] J. Raghavan, R. P. Wool, "Interfaces in repair, recycling, joining and manufacturing of polymers and polymer composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol.71, no.5, pp. 775–785, 1999.
- [23] J. P. Oliver, C. Huh, S. G. Mason, "An experimental study of some effects of solid surface roughness on wetting," *Colloids Surface*, vol.1, no.1, pp. 79-104, 1980.
- [24] S. Yang, L. Gu, R. F. Gibson, "Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures," *Compos Structures*, vol. 51, no.1, pp. 63–71, 2001.

- [25] A. Buchman, H. Dodiuk-Kenig, "Laser surface treatment to improve adhesion," In: Mittal KL, Pizzi A, editors Adhesion promotion techniques: technological applications, pp. 205-243. New York: Marcel Dekker, Inc. 2002.
- [26] E. Maeva, I. Severina, S. Bondarenko, G. Chapman, B. O'Neill, F. Severin, R.G. Maev, "Acoustical methods for investigations of adhesively bonded structures: a review," Canadian Journal of Physics, vol. 82, pp. 891-1025, 2004.
- [27] G. Fourche, "An overview of the basic aspects of polymer adhesion, " Part I: Fundamentals. Polymer Engineering and Science, vol. 35, pp. 957-967, 1995.
- [28] L. J. Hart-Smith, "Effects of flaws and porosity on strength of adhesive-bonded joints, " Douglas Aircraft Company Report MDC J4699, 1981.