

55991

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

55991

**YAPIŞTIRICILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ VE ÇEKME GERİLMESİNE MARUZ
YAPIŞMA BİRLEŞMESİNİN ANALİTİK VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Müh. Levent KODAKOĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Ocak 1996

Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Şubat 1996

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Temel KOTİL

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. A. Nuri YÜKSEL

Doç. Dr. Zahit MECİTOĞLU

OCAK 1996

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinde, havacılık ve uzay sanayiinde çok geniş kullanım alanına sahip yapıştırıcılar, yapışma ve değişik gerilmelere maruz yapışma birleşmeleri hakkında genel bilgiler verilerek, çekme gerilmesine maruz l yapışma uzunluğunda, birim genişlikte, t_1 ve t_2 kalınlığında iki levhanın birbirine yapıştırıcı ile birleşmesini temsil eden basit bir model yardımı ile yapışma birleşmesi analitik ve nümerik olarak incelenmiştir.

Bu tezin hazırlanması sırasında bilgi, ilgi ve yardımlarıyla bana destek olan ve tezi yöneten değerli hocam Sayın Doç. Dr Temel Kotil' e derin saygılarımı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans boyunca beni destekleyen Aileme ve Nişanlım Eda' ya teşekkürü bir borç bilirim.

İstanbul 1996

Levent Kodakoğlu

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Yapıştırıcılar ve Yapışma İle Birleşme Dizaynı	1
1.2. Bu Yüksek Lisans Tezinin Amacı	3
BÖLÜM 2. YAPIŞMA VE YAPIŞTIRICILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ	5
2.1. Giriş	5
2.2. Yapıştırıcılar	5
2.2.1. Yapıştırıcı Çeşitleri	8
2.2.1.1. Kimyasal Tipleri Açısından Yapıştırıcılar	8
2.2.1.1.1. Kimyasal Reaksiyon İle Sertleşen Yapıştırıcılar	8
2.2.1.1.1.1. Anaerobikler	8
2.2.1.1.1.2. Cyanoacrylate' ler	9
2.2.1.1.1.3. Sertleştirilmiş Akrilikler	9
2.2.1.1.1.4. Epoksiler	9
2.2.1.1.1.5. Poliüretanlar	9
2.2.1.1.1.6. Modifiye Edilmiş Fenolikler	10
2.2.1.1.2. Fiziksel Değişim İle Sertleşen Yapıştırıcılar	10
2.2.1.1.2.1. Sıcak Eriyikler	10
2.2.1.1.2.2. Kauçuk Yapıştırıcılar	10
2.2.1.1.2.3. PVA' lar (Polyvinyl Acetates)	10
2.2.1.1.2.4. Basınç Gerektirmeyen Yapıştırıcılar	11
2.2.1.2. Formları Açısından Yapıştırıcılar	11
2.2.1.2.1. Macun Tipi Yapıştırıcılar	11
2.2.1.2.2. Film Tipi Yapıştırıcılar	12
2.2.1.2.3. Düşük Vizkoziteli Yapıştırıcılar	12
2.2.1.2.4. Düşük Yoğunluklu Yapıştırıcılar	13
2.2.1.2.5. Reçineler	13

2.2.1.2.6. Köpükler	13
2.2.2. Yüksek Sıcaklıklara Dayanıklı Yapısal Yapıştırıcılar	17
2.3. Yapışma	21
2.3.1. Islanabilirlik	22
2.3.2. Yüzey Hazırlığı	24
2.3.2.1. Yağ ve Pislikten Arındırma Metodları	25
2.3.2.2. Aşındırma Metodları	26
2.3.2.3. Kimyasal Ön İşlem	27
2.3.2.3.1. Metalik Malzemelerin Kimyasal Ön İşlemi	28
2.3.2.3.1.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları	28
2.3.2.3.1.1.1. Alüminyum Honeycomb	28
2.3.2.3.1.1.2. Alüminyum Levha	28
2.3.2.3.1.1.3. Anotlanmış Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları	32
2.3.2.3.1.2. Bakır ve Nikel Malzemeler İçin Kimyasal Ön İşlem	33
2.3.2.3.1.3. Bakır / Nikel Alaşımları	33
2.3.2.3.1.4. Düşük Mukavemetli Çelikler	33
2.3.2.3.1.5. Paslanmaz Çelikler	34
2.3.2.3.1.6. Titanyum ve Titanyum Alaşımları	34
2.3.2.3.2. Plastik Malzemelerin Ön İşlemi	35
2.3.2.3.2.1. Termosetler	35
2.3.2.3.2.2. Termoplastikler	36
2.3.2.3.2.3. Plastik Köpükler	37
2.3.2.3.2.4. Metalik Olmayan Honeycomb' lar	37
2.3.3. Yapıştırıcıların Uygulanması	37
2.3.3.1. Sıvı Yapıştırıcıların Yapışması	37
2.3.3.2. Film Yapıştırıcıların Yapışması	39
2.3.4. Montaj	40
2.3.4.1. Hidrolik / Pnömatik Basınç ile Basınçlandırılan Isıtılmış Levhalar	41
2.3.4.2. Sabit Aparatlar	42
2.3.4.3. Vakum Torbası	42
2.3.4.4. Basınçlı Fırın (Autoclave)	43
2.3.4.5. Kaynak ve Perçin Yardımı ile Yapışma	45
2.3.5. Sertleştirme	45
2.3.6. Yapışmanın Test Edilmesi ve İncelenmesi	47

BÖLÜM 3. YAPIŞMA İLE BİRLEŞME DİZAYNINA GENEL BAKIŞ 53

3.1. Giriş	
3.2. Yapıştırıcı İle Birleşmenin Avantajları, Kısıtlamaları, Form Verilebilirliği ve Sızdırmazlığı	53
3.2.1. Yapıştırıcı Kullanmanın Avantajları	53
3.2.2. Yapıştırıcı İle Birleşmenin Kısıtlamaları	56
3.2.3. Yapıştırıcı İle Birleşmenin Form Verilebilirliği	57
3.2.4. Yapıştırıcı İle Birleşmenin Sızdırmazlığı	57
3.3. Yapışma Birleşmelerinin Maruz Kaldığı Gerilmeler	58
3.3.1. Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri	62
3.3.1.1. Normal ve Yüksek Sıcaklıklarda Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinin Mukavemeti	65

3.3.1.1.1.	Çekme Gerilmesine Maruz Değişik Yapışma Birleşmeleri İçin Birleşme Faktörü Grafikleri	65
3.3.1.1.2.	Yapışmada Çekme ve Kayma Mukavemetleri İçin Etkileşim Eğrisi	66
3.3.1.1.3.	Volkerson Teorisine Göre Basitleştirilmiş Teorik Olarak Kayma Gerilmesi Dağılımı	67
3.3.1.1.4.	Oda Sıcaklığında Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri İçin Dizayn limitleri ve Nominal Mukavemet	69
3.3.1.1.5.	Yüksek Sıcaklıklarda Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri İçin Yapışma Uzunluğunun Etkisi	69
3.3.1.1.6.	Oda Sıcaklığındaki Yorulma Mukavemeti ile Birleşme Faktörü Arasındaki İlişki	72
3.3.1.2.	Yanlamasına Kayma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinin Mukavemeti	73
3.3.1.3.	Çekme Gerilmesine Maruz Perçin ile Birleştirilmiş Yapışma Birleşmelerinde Kenar Takviyeleri	75
3.3.1.3.1.	Perçin Mukavemeti	75
3.3.1.3.2.	Oda Sıcaklığında Yorulma Mukavemeti	77
3.3.1.3.3.	Yüksek Sıcaklıklardaki Mukavemet	77
3.3.2.	Basma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri	77
3.3.2.1.	Basma Gerilmesine Maruz Panellerin Burkulma Davranışı ve Yerel Burkulma Mukavemeti	77
3.3.2.2.	Basma Gerilmesine Maruz Panel Üzerindeki Yapışmış Stringerlerin Etkisi	79
3.3.2.3.	Basma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinde Yorulma Mukavemeti	81
3.3.3.	Ayrılma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri	81
3.3.3.1.	Değişik Birleşmeler İçin Ayrılma Mukavemeti Bilgileri	83
3.3.3.2.	Yüksek Sıcaklıkların ve Kuruma Şartlarının Ayrılma Mukavemeti Üzerindeki Etkisi	86
BÖLÜM 4. YAPIŞMA BİRLEŞMESİNİN GERİLME ANALİZİ		88
4.1.	Giriş	88
4.2.	Yapışma İle Birleşme Dizaynı	88
4.3.	Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesinin Analitik Olarak İncelenmesi	89
4.3.1.	Yapışma Birleşme Modeli	89
4.3.2.	Yapışma Birleşme Modelinde Yapıştırıcının Analiz Edilmesi	91
4.3.3.	Δx Uzunluğundaki Yapışma Kesiti İçin Denge Denkleminin Bulunması	92
4.3.4.	Üst Levha İçin Çekme ve Kayma Gerilmelerinin Bulunması	94
4.3.5.	Alt Levha İçin Çekme ve Kayma Gerilmelerinin Bulunması	101

4.3.6. Analitik İncelemede Kullanılan Modelin Boyutlandırılması ve Gerilme Dağılımlarının Grafik Olarak Bulunması	107
4.3.6.1. Yapışma Uzunluğunun Etkisi	110
4.3.6.2. Birleşen Levhaların Elastik Modülünün Etkisi	113
4.3.6.3. Levha Kalınlığının Etkisi	115
4.3.6.4. Yapıştırıcı Kalınlığının Etkisi	117
4.4. Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesinin Nümerik Olarak İncelenmesi	119
4.4.1. Nümerik Yöntemler	119
4.4.2. ANSYS Programı Yardımı İle Yapışma Birleşme Modelinin Nümerik Olarak Analiz Edilmesi	123
4.5. Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesi İçin Analitik ve Nümerik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	132
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	134
KAYNAKLAR	137
EKLER	138
ÖZGEÇMİŞ	139

SEMBOL LİSTESİ

ψ	: Yüzey enerjisi
ψ_{LS}	: Katı-sıvı yüzey enerjisi
ψ_{LV}	: Katı-gaz yüzey enerjisi
ψ_{LS}	: Sıvı-gaz yüzey enerjisi
θ	: Temas açısı ,°
T_{gel}	: Dinamik jelleşme sıcaklığı ,°C
J.F.	: Joint factor, geometriye bağlı birleşme faktörü , $mm^{-1/2} (= \sqrt{t} / l)$
V.F.	: Variability factor, değişkenlik faktörü $(= t_1/t_2)$
τ_{min}	: Minimum kayma gerilmesi ,Kg / mm^2
τ_{max}	: Maximum kayma gerilmesi ,Kg / mm^2
t_{min}	: Minimum levha kalınlığı ,mm
τ_{bond}	: Yapışma kayma gerilmesi ,Kg / mm^2
k_{bond}	: Yapışma katılık faktörü
t	: Katı saç kalınlığı ,mm
b	: Birleşmede iki perçin arasındaki mesafe
b_{cr}	: Yerel burkulma mukavemeti açısından iki perçin arasındaki mesafe
z	: Yapışma birleşmesinin genişliği ,m
l	: Yapışma uzunluğu ,m
l_1	: Üst levhanın yapışma dışındaki uzunluğu ,m
l_2	: Alt levhanın yapışma dışındaki uzunluğu ,m

F	: Birim genişlik başına uygulanan çekme kuvveti ,N/m
t_1	: Üst levhanın kalınlığı ,m
t_2	: Alt levhanın kalınlığı ,m
σ_1	: t_1 kalınlığındaki levhanın çekme gerilmesi ,GPa
$\sigma_{\infty 1}$	: Yapışma hattı dışındaki t_1 kalınlığındaki levhanın çekme gerilmesi ,GPa
σ_2	: t_2 kalınlığındaki levhanın çekme gerilmesi ,GPa
$\sigma_{\infty 2}$	: Yapışma hattı dışındaki t_2 kalınlığındaki levhanın çekme gerilmesi ,GPa
τ	: İki levha arasındaki kayma gerilmesi ,GPa
ε_1	: Üst levhanın birim uzaması
ε_2	: Alt levhanın birim uzaması
ν_1	: Üst levhanın poisson oranı
ν_2	: Alt levhanın poisson oranı
ν_3	: Yapıştırıcının poisson oranı
k	: Katılık parametresi
u_1	: Üst levhanın yerdeğiştirmesi ,m
u_2	: Alt levhanın yerdeğiştirmesi ,m
h	: Yapıştırıcı kalınlığı ,m
E_1	: Üst levhanın elastik modülü ,GPa
E_2	: Alt levhanın elastik modülü ,GPa
E_3	: Üst levhanın elastik modülü ,GPa
G	: Yapıştırıcının kayma modülü ,GPa
γ	: Kayma birim uzama
A	: Alt levhanın kesit alanı ,m ²

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşme Modeli	4
Şekil 2.1 Yapıştırıcılar İçin Nem Diyagramı	7
Şekil 2.2 Fenolik Reçine İçin Sıcaklık / Mukavemet Eğrisi	18
Şekil 2.3 Naylon Esaslı Yapıştırıcılar İçin Sıcaklık / Mukavemet Eğrileri	18
Şekil 2.4 Epoksi Reçineler İçin Sıcaklık / Mukavemet Eğrileri	20
Şekil 2.5 Epoksi/Fenolik Reçineler İçin Sıcaklık / Mukavemet Eğrileri	20
Şekil 2.6 Yapışma İşleminin Akış Diyagramı	21
Şekil 2.7 Islanabilirlik	22
Şekil 2.8 Temas Açısı İle Mukavemet Değişimi	23
Şekil 2.9 Aşındırılmış Alüminyum Malzemenin Mikrometre İle Büyütülmüş Kesiti	26
Şekil 2.10 Kromik/Sülfürik Asit İle Dağlanmış Alüminyum Levhanın Mikrometre İle Büyütülmüş Kesiti	29
Şekil 2.11 Kromik Asit İle Anotlanmış Alüminyum Levhanın Mikrometre İle Büyütülmüş Kesiti	30
Şekil 2.12 Fosforik Asit İle Anotlanmış Alüminyum Levhanın Mikrometre İle Büyütülmüş Kesiti	31
Şekil 2.13 Soyulma Tabakası	36
Şekil 2.14 Yapıştırıcıların Uygulanması ve Karıştırılması	38
Şekil 2.15 Reticulation (Ağ Biçiminde Oluşma)	40
Şekil 2.16 Yapışma İçin Gerekli Oda Şartları	41
Şekil 2.17 Vakum Torbası	42
Şekil 2.18 Basınçlı Fırın (Autoclave)	44

Şekil 2.19	Yapışmada Yapıştırıcı İle Birlikte Kaynak (a) ve Perçin (b) Kullanımı	45
Şekil 2.20	Kuruma / Basınç Eğrisi	46
Şekil 2.21	Modifiye Edilmiş Kuruma / Basınç Eğrisi	46
Şekil 2.22	Yapıştırıcının Sıcaklık Vizkozite Eğrisi	48
Şekil 2.23	Çekme / Basma Testi (Lap Shear Test)	49
Şekil 2.24	Sandviç Ayrılma Testi	50
Şekil 2.25	Metal / Metal Ayrılma Testi	51
Şekil 3.1	Yüke Maruz Yapılarda Gerilme Dağılımı	54
Şekil 3.2	Yapışma ve Perçinleme Sisteminin Karşılaştırılması	55
Şekil 3.3	Yüklemeye Şartları	59
Şekil 3.4	Basamaklandırılmış Yapışma Birleşmeleri ve İkincil Ayrılma Yükleri	60
Şekil 3.5	Yapışma Birleşmelerindeki Köprüler	61
Şekil 3.6	Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri	62
Şekil 3.7	Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri Karşılaştırılması	63
Şekil 3.8	Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesi Örnekleri	64
Şekil 3.9	Çekme Gerilmesine Maruz Değişik Tipte Yapışma Birleşmeleri İçin Mukavemet Eğrileri	66
Şekil 3.10	Çekme Gerilmesine Maruz Scarf Joint	67
Şekil 3.11	Volkerson Teorisine Göre Hesaplanmış Kayma Gerilmesi / Birleşme Faktörü Eğrisi	68
Şekil 3.12	Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri İçin Kayma Gerilmesi ile Birleşme Faktörü Arasındaki Değişim	70
Şekil 3.13	Normal ve Yüksek Test Sıcaklıklarında Birleşme Mukavemetinin Değişimi	71
Şekil 3.14	Değişik Yapışma Birleşmeleri İçin Yorulma Mukavemeti	72

Şekil 3.15	Yanlamasına Kayma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinin Mukavemeti	73
Şekil 3.16	Yanlamasına Kayma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinde İkincil Yüklerin Oluşumu	74
Şekil 3.17	Çekme Gerilmesine Maruz Perçin ile Yapışma Birleşmeleri Kenar Takviyeleri	76
Şekil 3.18	Z Stringerler İçin İki Ayrı Birleşmeye Göre (Perçin ve Yapışma) Yerel Burkulma Mukavemetinin Karşılaştırılması	78
Şekil 3.19	Burkulma Mukavemeti Açısından Yapışma ile Perçinlemenin Karşılaştırılması	80
Şekil 3.20	Yorulma Mukavemeti Açısından Basma Gerilmesine Maruz Panellerde Yapışma Uzunluğunun Etkisi	81
Şekil 3.21	Ayrılma Yüklerine Maruz Yapışma Birleşmeleri	82
Şekil 3.22	Yapışma Birleşmelerinde Ayrılma Gerilmesini Bulmak İçin Yapılan Testler ve Uygulamaları	83
Şekil 3.23	Bending Peel Test Yardımı ile Hesaplanan Ayrılma Mukavemeti Eğrileri	84
Şekil 3.24	Değişen Flanş Açıları ile Ayrılma Mukavemeti Arasındaki Değişim	85
Şekil 3.25	Yüksek Sıcaklıklarda Ayrılma Mukavemeti Eğrileri	86
Şekil 4.1	Yapışma Birleşmesi Modeli	90
Şekil 4.2	Yapışma Kesitine Gelen Yükler	90
Şekil 4.3	Δx Yapışma Kesitinin Yerdeğiştirmeleri	91
Şekil 4.4	Yapıştırıcı Kesiti	91
Şekil 4.5	Denge Durumundaki Yapışma Kesiti	92
Şekil 4.6	Üst Levhanın Yapışma Kesitine Gelen Yükler	94
Şekil 4.7	Üst Levha için Sınır Şartları	98
Şekil 4.8	Alt Levhanın Yapışma Kesitine Gelen Yükler	101
Şekil 4.9	Alt Levha İçin Sınır Şartları	104

Şekil 4.10	Yapışma Birleşme Modelinin Boyutlandırılması	107
Şekil 4.11	Yapışma Hattı Boyunca Üst Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı	108
Şekil 4.12	Yapışma Hattı Boyunca Alt Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı	109
Şekil 4.13	Yapışma Hattı Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı	109
Şekil 4.14	Boyutsuz Maximum Kayma Gerilmesi ile Yapışma Uzunluğunun Değişimi	111
Şekil 4.15	Değişik Yapışma Uzunlukları İçin Yapışma Hattı Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı	111
Şekil 4.16	Değişik Yapışma Uzunlukları İçin Yapışma Hattı Boyunca Alt Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı	112
Şekil 4.17	Değişik Yapışma Uzunlukları İçin Yapışma Hattı Boyunca Üst Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı	112
Şekil 4.18	Değişik Elastik Modüller İçin Yapışma Hattı Boyunca Üst Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı	113
Şekil 4.19	Değişik Elastik Modüller İçin Yapışma Hattı Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı	114
Şekil 4.20	Elastik Modüller Oranı İle Boyutsuz Maximum Kayma Gerilmesinin Değişimi	114
Şekil 4.21	Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı	115
Şekil 4.22	Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı	116
Şekil 4.23	Değişik Levha Kalınlıkları İçin Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı	116
Şekil 4.24	Kalınlıklar Oranı İle Boyutsuz Maximum Kayma Gerilmesinin Değişimi	117
Şekil 4.25	Değişik Yapıştırıcı Kalınlıkları İçin Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı	118
Şekil 4.26	Boyutsuz Maximum Kayma Gerilmesi İle Yapıştırıcı Kalınlığının Değişimi	118

Şekil 4.27	Çeşitli Analiz Elemanları	120
Şekil 4.28	Herhangi Bir Cismin Ağ Yapısı	120
Şekil 4.29	Yapışma Birleşmeleri İçin NASTRAN Ağ Yapısı	121
Şekil 4.30	NASTRAN' da Analiz Edilmiş İki ve Üç Bileşenli Yapışma Birleşmeleri İçin Boyutsuz Kayma Gerilmesi İle Yapışma Uzunluğunun Değişimi	122
Şekil 4.31	Nümerik İncelemede Kullanılan Yapışma Birleşmesi Modeli	124
Şekil 4.32	ANSYS Programında Oluşturulan Yapışma Birleşme Model	124
Şekil 4.33	ANSYS Programında Analiz İçin Oluşturulan Yapışma Birleşme Sembolik Ağ Yapısı	125
Şekil 4.34	ANSYS Programında Gerilme Analizi İçin Modelin Boyutlandırılması	125
Şekil 4.35	Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı (Nümerik İnceleme)	128
Şekil 4.36	Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı (Analitik İnceleme)	128
Şekil 4.37	Yapışma Uzunluğu Boyunca X Yönündeki Gerilme Dağılımı	130
Şekil 4.38	Yapışma Uzunluğu Boyunca X Yönündeki Asal Gerilme Dağılımı	130
Şekil 4.39	Yapışma Uzunluğu Boyunca Y Yönündeki Gerilme Dağılımı	130
Şekil 4.40	Yapışma Uzunluğu Boyunca Y Yönündeki Asal Gerilme Dağılımı	130
Şekil 4.41	Yapışma Uzunluğu Boyunca Kayma Birim Uzama Dağılımı	131
Şekil 4.42	Yapışma Uzunluğu Boyunca X Yönündeki Birim Uzama Dağılımı	131
Şekil 4.43	Yapışma Uzunluğu Boyunca X Yönündeki Birim Asal Uzama Dağılımı	131
Şekil 4.44	Yapışma Uzunluğu Boyunca Kayma Gerilmesi Dağılımı	131

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1a Yapıştırıcıların Genel Özellikleri	14
Tablo 2.1b Yapıştırıcıların Genel Özellikleri (Devam)	15
Tablo 2.2 Yapıştırıcıların Kullanım Özellikleri	16
Tablo 2.3 Naylon Esaslı Yapıştırıcılar İçin Eğilme Mukavemet Değerleri	19
Tablo 2.4 Bakır ve Nikel Malzemeler İçin Dağlama Solusyonlarının Hazırlanması	33
Tablo 2.5 Yapışmamanın Muhtemel Sebepleri ve Çözümleri	52
Tablo 3.1 Yapışma İle Birleştirmenin Yerel Burkulma Mukavemeti Açısından Karşılaştırılması	79

ÖZET

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, havacılık ve uzay sanayiinde çok geniş kullanım alanına sahip yapıştırıcılar, yapışma ve yapışma birleşmeleri konuları genel olarak değerlendirilerek, yapıştırıcı çeşitleri, yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapısal yapıştırıcıların imali ve mukavemeti, yapışma işlemi, yapışmaya yardım eden mekanizmaların başında gelen ıslanabilirlik, yapışma işleminin en can alıcı ve nihai ürünün kalitesini etkileyen yapışma yüzeylerinin hazırlığı, yapıştırıcıların uygulanması, yapışmada kullanılan alet ve ekipmanlar, sertleştirme ve yapışmanın test edilmesi hakkında geniş bilgi verilmiştir.

Konu ile ilgili olarak daha sonra, birleşmede yapıştırıcı kullanmanın avantajları, yapıştırıcı ile birleşmenin kısıtlamaları ve değişik gerilmelere maruz yapışma birleşmeleri hakkında bilgi verilerek; yapışma birleşmelerinin hangi esaslara göre dizayn edildikleri, normal ve yüksek sıcaklıklara maruz yapışma birleşmelerinde birleşme mukavemetinin değişimi, yapışma uzunluğunu artırmanın yapışma birleşmeleri üzerindeki etkisi, yapışma ile birleşme dizaynında maximum kayma gerilmesinin önemi, yapışma birleşmelerinin yorulma mukavemeti, birleşen parçaların geometrisinin yapışma birleşme mukavemeti üzerindeki etkisi, yapışma birleşmelerinin modifikasyonu ve değişik yükler karşısında yapışma birleşmesinin davranışı konuları incelenmiştir.

Yapışma ile birleşme dizaynında temel prensip, birleşenler arasında yükün emniyetli bir şekilde transferini gerçekleştirerek emniyetli, ekonomik ve yüksek performansa sahip yapışma birleşmesinin dizayn edilmesidir. Emniyetli, ekonomik ve yüksek performanslı bir birleşmeyi yapıştırıcı ile dizayn edebilme; genel olarak yapışma birleşmesi için yapılan gerilme analizlerine ve yapıştırıcının taşıyabileceği maximum yükü tespit etmek için yapılan güvenilir testlere bağlıdır.

Bu amaç ile çekme gerilmesine maruz, birim genişlikte, l yapışma uzunluğunda, t_1 ve t_2 kalınlığında iki levhanın birbirine yapıştırıcı ile birleşmesini temsil eden basit bir model yardımı ile yapışma birleşmesi analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik incelemede ANSYS programı kullanılmıştır. Analitik incelemede kullanılan model boyutlandırılarak, elde edilen denklemler yardımı ile yapışma hattı boyunca çekme ve kayma gerilmelerinin; yapışma uzunluğu, yapıştırıcı kalınlığı, elastik modül ve levha kalınlığı ile değişimlerini gösteren çeşitli grafikler bulunmuştur. Elde edilen grafikler, nümerik incelemede kullanılan ANSYS programı ile elde edilen grafiklerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak yapışma ile birleşmenin mukavemeti; birleşen levhaların kalınlığına, levhaların elastik modüllerine, yapıştırıcının kayma modülüne, yapışma uzunluğuna, yapışma yüzeylerinin ön işlemine, yapışma işlemine ve yapışma birleşmesinin maruz kalacağı şartlara bağlı olduğu ortaya çıkmıştır.

SUMMARY

PROPERTIES OF ADHESIVES; ANALYTICAL AND NUMERICAL STUDY OF BONDED JOINT SUBJECTED TO TENSILE STRESS

In this work the bonding in general was studied and some general information about adhesives, production and strength of high temperature adhesives has been given. Bonding surface preparation, application of adhesives, equipment and tools for bonding, curing and inspection of bonding joints have been inspected by giving general information about bonding and wettability. Bonded joints by using simple lap joint model subjected to tensile stress have been studied analytically and numerically.

Adhesives, which have existed for a thousands of years, have become very important in the last few decades. The growing availability of a variety of new materials and significant advances in bonding technology have allowed people to routinely trust their lives and fortunes to adhesive joint constructions.

Adhesives are generally a mixture of materials that give the desired design properties in the final bonded joint. The adhesive materials may be in several forms prior to usage; such as films, pastes, liquids, powders, etc. Chemically, the adhesives may consist of one or several materials such as epoxy, phenol, polyamid, silicone, etc. The generic properties of a adhesive usually indicates the type of properties that the final bond will have such as flexibility, temperature resistance, fluid resistance, shear strength, etc.

Modern adhesives are classified either by the way they are used or by their chemical type. The strongest adhesives solidify by a chemical reaction. Less strong types harden by some physical changes.

Adhesives solidified by a chemical reaction are as follows:

- a) Anaerobics
- b) Cyanoacrylates
- c) Toughened Acrylics
- d) Epoxies
- e) Polyurethanes
- f) Modified Phenols

Adhesives harden by some physical change are as follows:

- a) Hot melts
- b) Rubber Adhesives
- c) PVA' s
- d) Pressure Sensitive Adhesives

The adhesives that used in subsonic transport aircraft have considerable ductility in shear. It is good practice to restrict the adhesive to elastic-strain only for the regularly occurring fatigue loads, but extra strain capability is necessary for ultimate loads and for load redistribution around flaws.

Dissimilar materials can frequently be bonded together to optimize a structure; however, long bonded interfaces between dissimilar materials require

special consideration as to the effects of differential thermal expansion. The special consideration is necessary because heat curing adhesives bond at elevated temperatures, locking the faying surfaces of the bonded area and thermal expansion. This can cause some built in stresses and severely damage the assembly.

A good bonded area should be uniform and bonding material thickness is in the range of 0.005 to 0.015 inches thickness. Bonding thickness control should be maintained by the good tooling. Each cured bond line contributes approximately 0.007 inch to the overall thickness of the bonded assembly in strength consideration.

Bonding procedure is as follow; selection of adhesives and bonding primers, surface preparation, applying of the adhesives to the surfaces and curing.

Once the liquid adhesive has been applied to the adherents, start contact and wet the surfaces, and the bonding establish with the following three mechanism; mechanical interlocking, adhesion of one material to another, and formation of direct chemical bonds across the interfaces.

Mechanical interlocking can certainly be a significant factor in adhesion. Ice on glass is a common example of adhesion by mechanical interlocking. Another is the mechanical adhesion of dental fillings to teeth. In generally, mechanical interlocking is probably not a practical factor in most adhesive joining, although the roughness and porosity of a substrate and their effects on stress distribution in the interfacial region can be a significant factor.

The formation of covalent chemical bonds across the interface is the another extreme. This type of bonding would be expected to be the strongest and most durable. It does require that there be mutually reactive chemical groups tightly bound on the adherent surface and in the adhesive. Some coupling agents may be used to promote the formation of direct chemical bonds. The adhesion of solders to metals is probably increased by the formation of metallic bonds across the interface.

Surfaces are prepared by one of the following pretreatment procedures:

- a) Degrease only
- b) Degrease, abrade and remove loose particles.
- c) Degrease and chemically pretreat.

Care must be taken to avoid contaminating the surfaces during or after pretreatment. Contamination may be caused by finger marking, cloths which are not perfectly clean, contaminated abrasives, standard degreasing or chemical solutions. Contamination may also be caused by other work processes taking place in the bonding area. Particularly to be excluded are oil vapors from machinery, spraying operation (paint, mold release agent, etc.) and processes involving powdered materials.

Whatever the pretreatment procedure used, it is good practice to bond the surfaces as soon as possible after completion of the pretreatment, i.e. when surface properties are at their best.

The water-break test is a simple method to determine whether the surface to be bonded is clean. It is best suited to metals. If a few drops of distilled water applied to the surface wet and spread or- if, on drawing the surface from distilled water, the water film does not break up into droplets - then the surface may be assumed to be free of contamination. Uniform wetting of the surface by distilled water indicates that it will probably be likewise wetted by adhesive.

Most bond lines are heated by placing the assembly in the bonding fixture, in an oven or autoclave. Certain local bonds may be heated by electric blankets, hot air guns - heater strips or lamps. Press heat is supplied by hot platens or integrally heated tools.

As the component is heated to the cure temperature, the adhesive will melt and flow. In order to produce a satisfactory bond the components must be held together without movement until after the adhesive has become solid and cooled. This is accomplished in a variety of ways depending on the type of adhesive, the type of component to be bonded and the production rate required. Bonding process using some special tools and equipment as follows can be performed:

a) Hydraulic press with heated platens.

b) Tooling fixtures

c) Vacuum bag: In the absence of a press, this is a way of applying holding pressure to flat or curved components while oven curing. Bags may be purpose made to suit using a rubber diaphragm. Some reduction in strength may occur due to the sub-atmospheric pressure increasing the volume of the unavoidable air in the adhesive joint.

d) Autoclave: For very large or complicated, curved components requiring higher pressures, a large autoclave can be used and may cure several different components at the same time. The capital cost is high and the bonding time relatively slow.

e) Riveting and weld-bonding

Quality control can vary from simple strength tests on bonded joints to destructive and non-destructive testing (NDT) techniques. Non-destructive testing techniques are performed by X-ray, ultrasonic and eddy current methods. For many applications test specimens, pretreated and cured alongside the component, are sufficient for destructive testing. These test methods for lap shear strength, metal / metal peel strength and skin / core peel strength are used.

Relating to the subject in this study, strength of the bonded lap joints, effect of overlap length on the strength of the bonded lap joints, strength of bonded lap joints at normal and elevated temperatures, maximum shear stress of bonded lap joints along overlap length, formability of bonded lap joints and fuel tightness have been examined by giving information about bonded lap joints subjected to many kind of stresses.

The terminology in the bonding joint has the following meaning:

Adherent: A body held to another body by an adhesive

Primer: A coating applied to a surface, prior to the application of an adhesive, to improve the performance of the bond

Adhesive: A substance capable of holding materials together by surface attachment

Bonded joints derive their strength from the relatively large contact area (compared to mechanical fasteners) over which the transferred loads may be distributed.

Bonded joints may be subjected to tensile, compressive, shear or peel stresses, often in combination. Adhesives are strongest in shear, compression and tension. They perform relatively poorly under peel and cleavage loading. A bonded joint needs to be designed so that the loading stresses will be directed along the lines of the adhesive's greatest strengths. Load concentrations due to deflection or eccentricity should be avoided or minimized.

Cleavage and peel loading are the most critical loading: They concentrate the applied force into a single line of high stress. In practice a bonded structure has to sustain a combination of forces. For maximum strength, cleavage and peel stresses should be, as far as possible, designed out of the joints. Generally bonding can't be advised in the joints which exist cleavage and peel forces

The safe and effective design of bonded structure is fundamentally dependent on both a valid stress analysis of the adhesive in the bond and reliable tests that determine allowable stresses in the adhesive. Safe design is achieved by comparing the calculated stresses with the allowable stresses, thereby predicting the performance of the bond. Effective design is the most lightweight, economical configuration consistent with safety. This is achieved through the stress analysis itself because it contains parameters relating to the size and geometry of the adherents. This size and geometry can be selected for minimum weight and cost, consistent with safe adhesive stress levels as determined by the analysis.

For stress analysis, a model is presented that embodies the fundamental stress distribution found in the adhesive in typical bonded joints. This analysis is shown to be valid when the adherents are in tension, compression, or shear. It also shows that the indispensable property of the adhesive, for stress analysis, is stiffness in shear.

A very important fundamental concept is to understand the behavior of an adhesive as a fastener. The usual material properties of tension, compression, flexure, and modules do not serve well. The indispensable property is stiffness in the shear mode. The stiffness of the glue line relative to the stiffness of the adherents determines the stress distribution in the adhesive.

In this study a simple lap joint between two sheets of thickness t_1 and t_2 with l overlap length subjected to tensile stress has been examined in analytical and numerical using ANSYS, FEM software. Some assumptions have been made.

- a) There is a perfect bonding between adherents.
- b) Thickness of adhesive along overlap is constant.
- c) Lap joint model is subjected to only tensile stress.

The analysis methods that the engineer has available for the design of bonded joints can be divided into two groups: analytical and numerical (approximate). Each method has advantages and disadvantages, but the solution of problems with complex geometry and boundary conditions becomes possible only through numerical approximations. Analytical solutions also provide a means of checking numerical results for accuracy and convergence.

In the analytical study, the shear stress along upper skin/ lower skin interface was related to the displacements of the upper and lower skins. According to this, following equation can be written,

$$\tau = k(u_1 - u_2) \quad (1)$$

where,

k : Stiffness parameter

u_1 : Displacement of upper skin

u_2 : Displacement of lower skin

Equation (1) indicates that relative sliding between upper and lower skins is necessary to generate shear along the interface. Performing analytical study, following equations have been obtained.

$$\frac{\tau}{\sigma_{\infty 1}} = \left(\frac{\beta t_1}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \right) \left[E_2 t_2 \sinh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right) - (E_2 t_2 \cosh(\beta l) + E_1 t_1) \frac{\cosh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right)}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{\infty 1}} = \left(\frac{1}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \right) \left[E_2 t_2 \cosh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right) + E_1 t_1 - (E_2 t_2 \cosh(\beta l) + E_1 t_1) \frac{\sinh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right)}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\tau}{\sigma_{\infty 2}} = \left(\frac{\beta t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \right) \left[E_2 t_2 \sinh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right) - (E_1 t_1 + E_2 t_2 \cosh(\beta l)) \frac{\cosh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right)}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_{\infty 2}} = \left(\frac{1}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \right) \left[(E_1 t_1 + E_2 t_2 \cosh(\beta l)) \frac{\sinh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right)}{\sinh(\beta l)} + E_2 t_2 \left(1 - \cosh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right) \right) \right] \quad (5)$$

where,

$$\beta = \sqrt{k \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)}$$

$$k = \frac{G}{h}$$

As shown above equations, shear and tensile stresses along overlap in the bonded joints are relating to elastic modules, shear modules, skin thickness, thickness of the adhesives and overlap length. Eq. 2 shows shear stress distribution for upper skin. Eq. 3 shows tensile stress distribution for upper skin. Eq. 4 shows shear stress distribution for lower skin. Eq. 5 shows tensile stress distribution for lower skin.

According to these equations, some curves have been obtained between shear stress and overlap length, tensile stress and overlap length. Comparing the

solutions, effect of increasing adhesive and skin thickness, shear and elastic modules has been studied.

Numerical Analysis Techniques such as the finite-element (FE) method provide powerful tools in the design of efficient bonded joints. This is particularly true when one considers that the complicated geometry and material dissimilarity in the joint region pose mathematical difficulties that render exact solutions too complicated for most practical joints. Some of these difficulties include hard-to-satisfy boundary conditions in the joint region and the existence of points of singularity (theoretically infinite stresses) at the interface between the adherent and the adhesive.

Numerical methods, on the other hand, are easily adaptable to complex loading, geometry, material properties, and boundary conditions. In spite of their versatility, however, numerical solutions are only approximations to the actual solution. The degree of correlation between these approximations and the actual solution depends on the nature of the problem being analyzed. Thus, the designer/analyst must understand the limitations of the numerical techniques being used and also the nature of the stresses and failure mechanisms in bonded joints.

As a result of stress analysis of lap joint model, maximum shear stress along overlap in the bonding occurs at the both ends of overlap as being rivet joints. If adhesive thickness is increased, maximum shear stress decreases. Increasing the amount of overlap length in lap joint will increase the unit strength at a decreasing rate until the limit is reached. Beyond this limit, further overlap increases do not increase joint strength.

Tapering or other modifications of bonded joint to equalize the strain elongation across the bond line and reduce secondary peeling loads to increase shear joint strength.

There are a lot of advantages of bonding:

The bonding is continuous. On loading, there is a more uniform distribution of stresses over the bonded area. The local concentrations of stresses present in spot welded or mechanically fastened joints are avoided. Bonded structures can consequently offer a longer life under load.

One of the most obvious advantages with adhesive bonding compared with riveting is the considerable increase in buckling and crippling strengths due to the integral stiffening effect of bonded laminates.

The bonded joint, being continuous, produces a stiffer structure. Alternatively, if increased stiffness is not needed, the weight of the structure can be decreased while maintaining the required stiffness.

Adhesive bonding gives a smooth appearance; there are no protruding fasteners such as screws or rivets and spot-weld marks.

The bonded structure is safer, owing to the fewer and less severe concentrations of stresses, fatigue cracks are less likely to occur. A fatigue crack in a bonded structure will propagate more slowly than in a rivet structure because the bondlines act as a crack stopper.

Adhesive bonding can be achieved in lower temperatures, not like in welding. It is a suitable means for joining together heat-sensitive materials prone to distortion or to a change in properties from the heat of brazing or welding.

Complex assemblies that can not be joined together in any other way are feasible with adhesives. Composite sandwich structures are a typical example.

Adhesives can join different materials together, materials that may differ in composition, module, coefficients of expansion, or thickness.

The continuous bonding forms a seal. The joint is consequently leak proof and less prone to corrosion.

The adhesive bond can provide an electrically insulating barrier between the surfaces.

Adhesive bonds have good damping properties. This capacity may be useful for reducing sound or vibration.

Adhesive bonding can simplify assembly procedures by replacing several mechanical fasteners with a single bond, or allowing several components to be joined in one operation.

Adhesive bonding may be used in combination with spot welding or riveting techniques in order to improve the performance of the completed structure.

All these advantages may be translated in to economic advantages: Improved design, easier assembly, lighter weight and longer life in service.

However, there are some limitations of adhesive using in the joint design.

Adhesives are drawn from the class of materials which we know as polymers, plastics or synthetic resins. They have the limitations of that class. They are not as strong as metals. With increasing temperature the bond strength decreases, and the strain properties of the adhesive move from elastic to plastic. This transition is usually in the temperature range 70 - 180°C: The transition temperature depends on the particular adhesive.

The resistance of bonded joints to the in-service environment is dependent on the properties of the polymer from which the adhesive is made. Possible exposure of the bonded structure to oxidizing agents, solvents, etc., must be borne in mind when selecting the adhesive type to use.

With most adhesives maximum bond strength is not produced instantly as it is with mechanical fastening or with welding. The assembled joint must be supported at least during the curing process which the strength of the bond is build up.

The quality of the bond may be adversely affected if, in the bonding process, the surfaces are not easily wetted by the adhesive.

To ensure consistently good results may necessitate the setting up of unfamiliar process controls. A badly made joint is often impossible to correct.

Bonded structures are usually not easily dismantled for in-service repair.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Yapıştırıcılar ve Yapışma İle Birleşme Dizaynı

Havacılık ve uzay sanayiinde, yapıştırıcıların kullanımı endüstrinin ilk yıllarına dayanır [1]. Geçmiş yıllarda ağaç, lif ve kumaş gibi çoğu temel yapısal malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcılar kullanılıyordu.

Teknolojinin gelişmesi ve endüstrinin büyümesi ile alüminyum bağlantı elemanları, uçak dizaynında temel eleman oldu. Alüminyum esaslı bu bağlantı elemanları yüksek yükleme kapasitesi, basit imal teknikleri ve tekrar üretilebilme kolaylıkları ile yapıştırıcılara karşı belli avantajlara sahipti. 1960 'lara kadar bu avantajları ile alüminyum bağlantı elemanları, imalatçıların isteklerini rahatlıkla karşılayabildi. 1970 'lere doğru havacılık sektöründe alüminyum bağlantı elemanları imalatçıların isteklerini karşılayamaz hale geldi ve azaltılmış üretim ve bakım maliyeti, iyileştirilmiş yapısal etki (uniform yük dağılımı ve daha hafif yapı), yüksek performans ve kaliteli imalat kavramları önem kazandı. Bu yüzden imalatçılar tüm bu özellikleri rahatlıkla karşılayabilen yapıştırıcılara yöneldiler ve 1970 'lerde uçak imalatında yapıştırıcıları kullanmaya başladılar.

Yapıştırıcılar; genel olarak en az iki malzemenin birbirine yapıştırılarak birleştirilmesinde istenilen dizayn özelliklerini veren epoksi, fenolik, polyamid, polyimid ve silikon gibi malzemelerin [2] kimyasal olarak birleştirilmesinden oluşan karışımdır. Yapıştırıcılar kullanılmadan önce film, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilirler.

Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara, yapısal yapıştırıcılar denilir. Yapısal yapıştırıcılar; esnek, ısıya dayanıklı, sıvıya dayanıklı ve yüksek kayma mukavemetine sahiptirler. Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara nazaran

daha düşük mukavemetli, ama endüstride oldukça geniş kullanım alanına sahip fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılara ise, yapısal olmayan yapıştırıcılar denilir.

Yapışma ile birleşme dizaynında, yapıştırıcının yapışma uzunluğu boyunca davranışı, bağlantı elemanları ile yapılan birleşmelerde bağlantı elemanlarının birleşme uzunluğu boyunca davranışı ile benzer olmasıdır. Bağlantı elemanı ile birleşmede; birleşme uzunluğunun her iki ucunda kayma gerilmesi maximumdur. Aynı şekilde yapışma ile birleşmede de, yapışma uzunluğunun her iki ucunda kayma gerilmesi maximumdur. Yapışma ile birleşme dizaynında, oluşan bu maximum kayma gerilmelerinin minimize edilmesi gerekir.

Başka bir yol ile birleştirilemeyen yapılar için, yapıştırıcı kullanma dışında başka bir seçenek yoktur. Yapıştırıcılar farklı iki malzemenin birleşmesine izin verir. Yapıştırıcılar farklı malzemelerden oluştukları için, farklı malzemelerin farklı özelliklerini içerirler. Buna en iyi örnek kompozit yapılardır.

Yapışma ile birleşme dizaynında temel prensip, birleşenler arasında yükün emniyetli bir şekilde transferini gerçekleştirerek emniyetli, ekonomik ve yüksek performansa sahip yapıştırıcı ile birleşmenin dizayn edilmesidir.

Emniyetli, ekonomik ve yüksek performanslı bir birleşmeyi yapıştırıcı ile dizayn edebilme; genel olarak yapışma birleşmesi için yapılan gerilme analizlerine ve yapıştırıcının taşıyabileceği maximum yükü tespit etmek için yapılan güvenilir testlere bağlıdır.

Yapıştırıcılar, mukavemet açısından iki malzemeyi birleştiren ve birleşme yüzeyindeki kayma gerilmesi ile yükleri bir parçadan diğer parçaya transfer ederek taşıdığı yüklere göre çok farklı tipte yapışma birleşmelerini oluştururlar.

Genel olarak bu yapışma tipleri şu şekilde özetlenebilir:

- a) Çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri
- b) Basma gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri
- c) Ayrılma gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri

Yapışma birleşmeleri çekme, kayma ve basma yüklerine karşı mukavemetli olmalarına rağmen, ayrılma kuvvetlerine karşı zayıftırlar. Yapıştırıcı ile birleşme dizaynında, yapının hangi tip yüklemeye maruz kalacağı önceden tespit edilmelidir. Yükleme tipi tayin edildikten sonra gerilme analizini yapmak için, yapışma düzlemindeki gerilme dağılımını temsil eden uygun, basit bir model kurulması

gerekir. Gerilme analizi; analitik, nümerik ve deneysel olmak üzere üç değişik yol ile yapılabilir.

Genel olarak yapışma ile birleşmenin mukavemeti; birleşen parçaların büyüklüğüne, kalınlığına, elastik modülüne, yapıştırıcının kayma modülüne, yapışma uzunluğuna, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine, yapışma işlemine ve yapışma birleşmesinin maruz kalacağı şartlara bağlıdır.

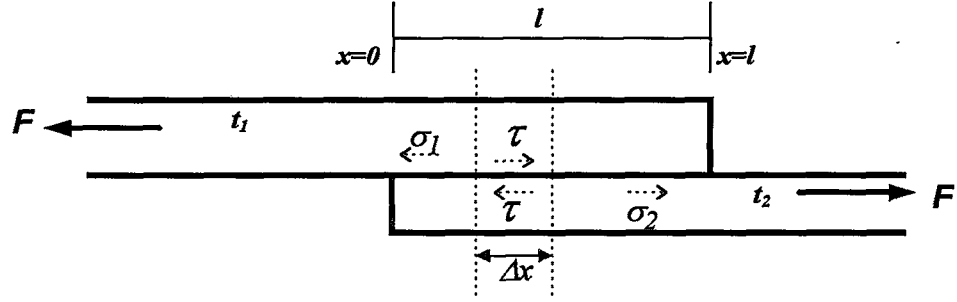
1.2. Bu Yüksek Lisans Tezinin Amacı

Bu yüksek lisans tezinin amacı, yukarıda genel hatları ile çizilen yapıştırıcı ve yapışma birleşmelerini değerlendirmek ve çekme gerilmesine maruz iki levhanın yapıştırıcı ile birleşmesini temsil eden basit bir model yardımı ile yapışma birleşmesini analitik ve nümerik olarak incelemektir.

Bu amaç ile bu yüksek lisans tezinin ikinci bölümünde, havacılık ve uzay sanayiinde çok geniş kullanım alanına sahip yapıştırıcılar, yapıştırıcı çeşitleri, yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapısal yapıştırıcıların imali ve mukavemeti, yapışma, yapışmaya yardım eden mekanizmaların başında gelen ıslanabilirlik, yapışma işleminin en can alıcı ve nihai ürünün kalitesini etkileyen yapışma yüzeylerinin yüzeylerinin hazırlığı, yapıştırıcıların uygulanması, yapışmada kullanılan alet ve ekipmanlar, sertleştirme ve yapışmanın test edilmesi hakkında geniş bilgi verilecektir.

Bu yüksek lisans tezinin üçüncü bölümünde, birleşmede yapıştırıcı kullanmanın avantajları, yapıştırıcı ile birleşmenin kısıtlamaları ve değişik gerilmelere maruz yapışma birleşmeleri hakkında bilgi verilerek, yapışma birleşmelerinin hangi esaslara göre dizayn edildikleri, normal ve yüksek sıcaklıklara maruz yapışma birleşmelerinde birleşme mukavemetinin nasıl değiştiği, yapışma uzunluğunu artırmanın yapışma birleşmeleri üzerindeki etkisi, yapışma ile birleşme dizaynında maximum kayma gerilmesinin önemi, yapışma birleşmelerinin yorulma mukavemeti, birleşen parçaların geometrisinin yapışma birleşmesinin mukavemetini nasıl etkilediği, yapışma birleşmelerinin nasıl iyileştirildikleri ve değişik yükler karşısında nasıl davrandıkları sırası ile incelenecektir.

Bu yüksek lisans tezinin dördüncü bölümünde ise, şekil 1.1’de gösterilen çekme gerilmesine maruz, birim genişlikte, l yapışma uzunluğunda, t_1 ve t_2 kalınlığında iki levhanın birbirine yapıştırıcı ile birleşmesini temsil eden basit bir model yardımı ile yapışma birleşmesi analitik ve nümerik olarak incelenecektir. Nümerik incelemede ANSYS programı kullanılacaktır.



Şekil 1.1 Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşme Modeli

Analitik incelemeden sonra kullanılan model boyutlandırılarak elde edilen denklemler yardımı ile yapışma uzunluğu boyunca çekme ve kayma gerilmelerinin; yapışma uzunluğu, yapıştırıcı kalınlığı, elastik modül ve levha kalınlığı ile değişimlerini gösteren çeşitli grafikler bulunacaktır. Sonuç olarak, elde edilen grafikler, nümerik incelemede kullanılan ANSYS programı ile elde edilen grafiklerle karşılaştırılarak değerlendirilecektir.

BÖLÜM 2

YAPIŞMA VE YAPIŞTIRICILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Giriş

Bu bölümün birinci kısmında, havacılık ve uzay sanayiinde çok geniş kullanım alanına sahip yapıştırıcılar hakkında geniş bilgi verilecektir. Bu amaç ile yapıştırıcılar genel olarak değerlendirilecek, yapıştırıcı çeşitleri incelenecek ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapısal yapıştırıcıların imali ve mukavemeti hakkında bilgi verilecektir.

İkinci kısımda ise, yapışma işlemi ele alınacaktır. Bu amaç ile yapışmaya yardım eden mekanizmaların başında gelen ıslanabilirlik, yapışma işleminin en can alıcı ve nihai ürünün kalitesini etkileyen yapışma yüzeylerinin hazırlığı, yapıştırıcıların uygulanması, yapışmada kullanılan alet ve ekipmanlar, sertleştirme ve yapışmanın test edilmesi hakkında geniş bilgi verilecektir.

2.2. Yapıştırıcılar

Yapıştırıcılar; genel olarak en az iki malzemenin birbirine yapıştırılarak birleştirilmesinde istenilen dizayn özelliklerini veren; epoksi, fenolik, polyamid, polyimid ve silikon gibi malzemelerin kimyasal olarak birleştirilmesinden oluşan karışımdır.

Yapısal yapıştırıcılar mukavemetleri açısından, yapısal ve yapısal olmayan yapıştırıcılar olarak iki ana gruba ayrılır. Yapısal yapıştırıcılar; esnek, ısıya dayanıklı, sıvıya dayanıklı ve yüksek kayma mukavemetine sahiptirler. Sesaltı yolcu uçaklarında kullanılan yapısal yapıştırıcıların kayma mukavemeti olarak kıymete değer bir sünekliğe sahip olması gerekir. Elastik uzama bakımından,

yapıştırıcıları sadece düzenli yorulma yükleri ile sınırlamak gerekir. Ama aynı zamanda yapıştırıcının, çatlaklar etrafında oluşan yükler içinde extra uzama kapasitesine sahip olması istenir.

Yapıştırıcılar kullanılmadan önce film, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilirler. İyi bir yapışma için yapıştırıcı kalınlığı, 0.05 ile 0.15 mm arasında olmalıdır. Yapışma öncesi birleşme yüzeylerinin temiz olması, yapışma işleminin en can alıcı ve nihai ürünün kalitesini etkileyen en önemli noktadır. Ayrıca yapıştırıcının kuruma süresince kalınlık kaybıda, dizayn ve analiz açısından gözönüne alınması gereken bir kriterdir.

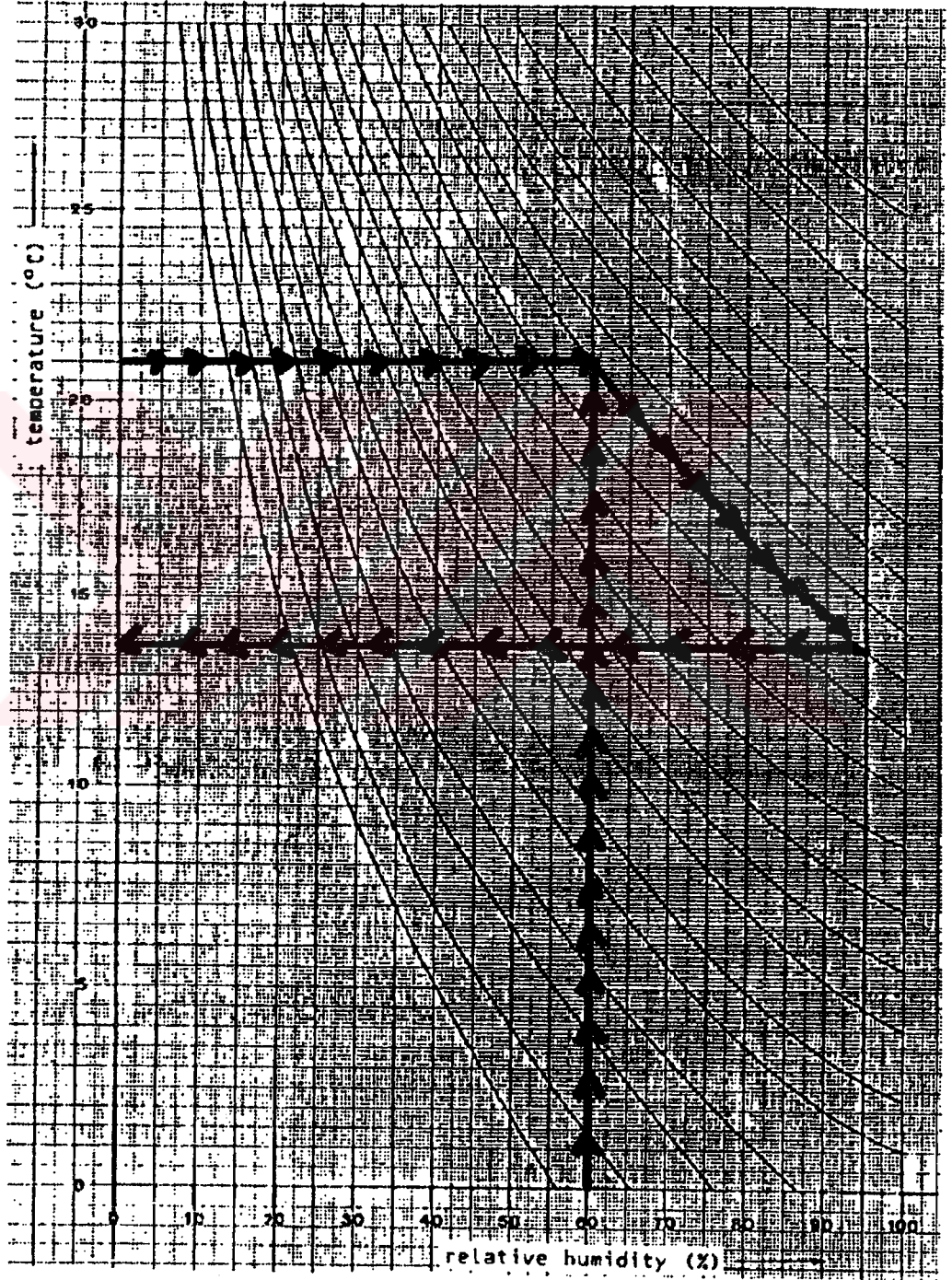
Bütün yapıştırıcılar, kimyasal yapılarından dolayı kabuklaşma süresine sahiptirler. Yani ömürlü malzemelerdir. Bu süre birkaç haftadan birkaç yıla kadar değişebilir. Kabuklaşma süresini doldurmuş yapıştırıcıları kullanma yapışmanın mukavemetini ve dayanıklılığını düşürür.

Yapışma için kullanılan yapıştırıcı ve yapışma astarları uygun soğuk hava depolarında saklanmalıdır [3]. Yapıştırıcı ve yapışma astarlarının saklanması ve depolama şartları, şekil 2.1 'de verilen nem diyagramının yardımı ile saptanır. Soğuk hava depolarından çıkarılan yapıştırıcı ve yapışma astarlarının kullanılabilmesi için buzların çözülmesi gerekir. Eğer bu çözülme işlemi yanlış yapılırsa, yapıştırıcı ve yapışma astarlarının kabuklaşma süresi düşer. Depodan çıkarılan malzemelerin buzlarının çözülmesini sağlamak için kullanılan sıcaklığın 30°C 'yi geçmesi gerekir. Bu sıcaklığın aşılması, yapışmada kullanılacak yapıştırıcı ve yapışma astarlarının bozulmasına neden olur.

Soğuk hava depolarından çıkarılan yapıştırıcıların şekil 2.1 yardımıyla istenilen sıcaklığa getirilmesi nem oluşmasını önler ve esnekliği artırır. Soğuk hava depolarında saklanan yapıştırıcıların istenilen şartlarda kabuklaşma süresinin düşmesini en aza indirmek için, depo sıcaklığının -18 °C veya daha az olması gerekir.

Şekil 2.1'de, oda sıcaklığı 21°C ve bağıl nemi % 60 olan bir ortamda yapışma işlemi yapıldığında, yapıştırıcının ve yapışma astarının ısıtılması gereken minimum sıcaklığın nasıl bulunabileceği bir örnek ile açıklanmıştır. Görüldüğü gibi yoğunlaşmanın başladığı bağıl nem % 95 olarak kabul edilir. -18°C 'deki soğuk hava deposundan çıkarılan yapıştırıcı ve yapışma astarları üzerinde yoğunlaşma oluşmasını

önlemek için, yapıştırıcı ve yapışma astarlarının ısıtılması gereken minumum sıcaklık $13,8^{\circ}\text{C}$ olarak bulunur.



Şekil 2.1 Yapıştırıcılar İçin Nem Diyagramı [3]

2.2.1. Yapıştırıcı Çeşitleri

Günümüzde kullanılan modern yapıştırıcılar, kimyasal tipleri ve formları [4] açısından iki ana grup olarak sınıflandırılır.

- a) Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar
- b) Formları açısından yapıştırıcılar

2.2.1.1. Kimyasal Tipleri Açısından Yapıştırıcılar

Yapıştırıcılar kimyasal tipleri açısından,

- a) Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılar
- b) Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar

olarak iki gruba ayrılır.

2.2.1.1.1. Kimyasal Reaksiyon İle Sertleşen Yapıştırıcılar

En güçlü yapıştırıcılar kimyasal reaksiyon ile sertleşirler. Bu tip yapıştırıcılara, yapısal yapıştırıcılar da denir. Günümüzde kullanılan kimyasal reaksiyon ile sertleşen kimyasal yapıştırıcı tipleri ve özellikleri şöyledir:

2.2.1.1.1.1. Anaerobikler

Sızdırmazlık amacı ile kullanılan bu yapıştırıcılar, hava ile temasın ortadan kalkması ile sertleşirler. Emniyet ve sızdırmazlık için kullanılırlar. Akrilik olarak bilinen sentetik reçine esaslıdır.

2.2.1.1.1.2. Cyanoacrylate ‘ler

Yapıştırıcıların özel bir tipi olan cyanoacrylate ‘ler, yapıştırılacak olan yüzeyler üzerindeki nemin reaksiyonu ile sertleşirler. Çok kısa sürede kuruyan bu yapıştırıcılar plastik parçaların yapıştırılması için oldukça uygundur.

2.2.1.1.1.3. Sertleştirilmiş Akrilikler

Akriliklerin modifiye edilmiş bir tipi olan bu yapıştırıcılar, oldukça hızlı sertleşirler. Yüksek mukavemet ve sertlik isteyen yerlerde kullanılırlar. Reçine ve katalizör olarak iki parçalıdır. Genellikle ayrı olarak uygulanırlar. Yapışma yüzeylerinin birine reçine, diğerine katalizör tatbik edilir.

2.2.1.1.1.4. Epoksiler

Epoksi yapıştırıcılar, epoksi reçine ile sertleştiriciden oluşur. Epoksi yapıştırıcılar ile son derece mukavemetli yapışmalar elde edilir. Çok farklı tipte malzemeleri yapıştırmak için kullanılabilirler. Tek parçalı, iki parçalı ve film olarak üç farklı formdadırlar.

2.2.1.1.1.5. Poliüretanlar

Poliüretan yapıştırıcılar, iki parçalı ve hızlı sertleşen yapıştırıcılardır. Darbe mukavemetine dayanıklıdır. Cam esaslı kumaşları yapıştırmak için oldukça uygundur. Hızlı kuruma için makina ile yapıştırıcının uygulanması gerekir. Genellikle yapışma astarı ile beraber kullanılırlar.

2.2.1.1.1.6. Modifiye Edilmiş Fenolikler

Yüksek mukavemet gerektiren metal ile metal, metal ile ağaç ve metal ile kompozit esaslı fren pabucu yapışmaları için oldukça iyidir. Sertleşmesi için, ısı ve basınç uygulamak gerekir.

2.2.1.1.2. Fiziksel Değişim İle Sertleşen Yapıştırıcılar

Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara nazaran, fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar, daha düşük yapışma mukavemetine sahiptirler. Bu yapıştırıcılara, yapısal olmayan yapıştırıcılar da denir. Endüstride oldukça yaygın kullanım alana sahip fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcı tipleri ise şöyledir:

2.2.1.1.2.1. Sıcak Eriyikler

Sıcak eriyikler polimer esaslıdır. Hafif yüklere maruz kalacak şekilde dizayn edilmiş yapıları, hızlıca birleştirmek için kullanılırlar.

2.2.1.1.2.2. Kauçuk Yapıştırıcılar

Eriyik esaslı kauçuk yapıştırıcılar, su ortamının yada çözülmenin kaybolması ile sertleşirler. Yüke maruz kalan yapışmalar için uygun değildir.

2.2.1.1.2.3. PVA 'lar (Polyvinyl Acetates)

Ağaç ve karton gibi gözenekli malzemelerin yapışması için uygundur. Endüstride oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler.

2.2.1.1.2.4. Basınç Gerektirmeyen Yapıştırıcılar

Teyp ve etiket için uygun olan bu tip yapıştırıcılar sertleşmemelerine rağmen çevre şartları durumlarını değiştirebilir. Yüke maruz kalan yapışmalar için uygun değildir.

2.2.1.2. Formları Açısından Yapıştırıcılar

Modern yapıştırıcılar, kullanılmadan önce film, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilirler. Kullanım yeri olarak, yani formu bakımından yapıştırıcılar çeşitli gruplarda değerlendirilebilir. Bu gruplar:

- a) Macun tipi yapıştırıcılar
- b) Film tipi yapıştırıcılar
- c) Düşük vizkoziteli yapıştırıcılar
- d) Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar
- e) Reçineler
- f) Köpükler

2.2.1.2.1. Macun Tipi Yapıştırıcılar

Metal yada kompozit parçaları birleştirmek için kullanılan iki parçalı oda sıcaklığında sertleşen yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcıların yüksek viskoziteye sahip olanları, mükemmel yakın yapışma sağlar. Bu yapıştırıcılar 80 °C 'nın altındaki sıcaklıklarda sertleşir. Sabit ısıtma gerektiğinde ısı yorgani kullanmak gerekir. Optimum yapıştırma kuruma eğrisine göre ısıtmadan sonra elde edilir. Yapıştırıcı kalınlığının 0.1 ile 0.2 mm arasında olması, yapışma için yeterlidir. Karışım oranlarına dikkat edilmez ise, uygulama süresi göreceli olarak düşer. Bu yapıştırıcılar düşey yüzeylerde yada düşey yapışmalarda kullanılmazlar. Yüksek ve düşük kayma mukavemetinin gerektiği yerlerde kullanılır.

Bu grubun bazı ticari örnekleri,
REDUX408, EA9309, EA9321, EC1838 B/A, EA934NA, EA 9390,
EA9330, ARALDITE

2.2.1.2.2. Film Tipi Yapıştırıcılar

Film tipi yapıştırıcılar, metalik yada kompozit malzemelerin yapıştırılması yada prepreglerin yapışmasına yardım etmesi için kullanılan epoksi esash malzemelerdir. Çok geniş kullanım alanına alanına sahiptirler.

Kompozit tamirler için kalın filmler (300gr/cm²), metal parçaların tamirleri için ise ince filmler (150gr/cm²) kullanılır.

Bu grubun bazı ticari örnekleri,
REDUX 312.06, FM73.06, FM123-5.06, EA9628NW.06, AF163/2K.06,
FM300K

2.2.1.2.3. Düşük Vizkoziteli Yapıştırıcılar

Bu yapıştırıcılar, iki parçalı epoksi reçine esaslıdır. Oda sıcaklığında yada yüksek sıcaklıklarda (120 - 180°C) sertleşir.

Düşük vizkoziteli yapıştırıcılar, petek yapıları veya sandviç levhaların kenarlarını doldurmak için kullanılırlar. Bu yapıştırıcılar, birleşmeler içindeki süreksizliklere karşı daha fazla kayma mukavemetine sahip olmalarından dolayı, yapısal bütünlüğü korurlar. Kuruma süresi içinde köpürmez ve genişlemezler. Bu yüzden bu yapıştırıcıları belli bir yerde hapsedmek için özel bir aparata veya korumaya gerek yoktur.

Bu grubun bazı ticari örnekleri,
ARALDITE AV134, ARALDITE AY105, EC2216 B/A, EA954, EA956,
HYSOL EA 9309

2.2.1.2.4. Düşük Yoğunluklu Yapıştırıcılar

Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar; iki parçalı, oda sıcaklığında sertleşebilen yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar;

- a) göçük yada ayrılma tipi dolgu tamiri,
- b) kompozit kumaş tabakalarının yapıştırılması,
- c) mükemmel yapışması istenen iki parçanın yapıştırılması

için kullanılır. Optimum yapışma, kuruma eğrisine göre, sertleşme işlemi sona erdikten sonra yapılabilir. Karışma oranı yanlış yapılırsa, yapıştırıcının uygulama süresi göreceli olarak düşer.

Bu grubun bazı ticari örnekleri,

EC3524 B/A, EC3439 HT, EC3500 B/A, EC404 B/A, BOSTIC E5260

2.2.1.2.5. Reçineler

Kompozit kumaşların emdirilmesi için kullanılan, iki parçalı düşük viskoziteli epoksi reçinelerdir. Optimum yapıştırma kuruma eğrisine göre sertleşme işlemi tamamen sona erdikten sonra elde edilebilir. Karışma oranı yanlış yapılırsa uygulama süresi göreceli olarak düşer.

Bu grubun bazı ticari örnekleri,

ARALDITE LY564-1, EPICOTE 816, RESİN EUROPROX 730.

2.2.1.2.6. Köpükler

Köpükler, kuruma süresince genişleyen epoksi esaslı yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar birleşmedeki boşlukları doldurur ve birleşen parçalarının tümünü birbirine kuvvetlice yapıştırır. Köpük kalınlığının en az 2 mm olması istenir.

Bu grubun bazı ticari örnekleri,

REDUX 204, FM33, F41, HYSOL THERMO FOAM 3050, AF3024

Tablo 2.1a Yapıştırıcıların Genel Özellikleri

TİCARİ ÜRÜN	KARIŞIM ORANI	UYGULAMA SÜRESİ	KURUMA SÜRESİ	ÖMÜR	SERVİS SICAKLIĞI	SPEC	KAYMA MUKAVEMETİ	AYRILMA MUKAVEMETİ	ÇEKME MUKAVEMETİ	BASMA MUKAVEMETİ
EA934NA	Part A 100 (Gray) Part B 33 (Amber)	40 dk	5 - 7 gün (77 °F da) 1 saat 2000 F da	1 yıl < 0°F	-423 ile 350 °F	MMM-A-132 Typel class 3 BMS 5-109 Type II class 2 Grade A	Test Sıcaklığı °F Sonuç (PSI) -67 2800 77 3100 300 1100 500 450	-	Çekme muk 5800 PSI Elastik modül 550 KSI 77°F da	Kayma muk 9500 PSI 77°F da Kayma modülü 2500 PSI (300°F da)
EA956AB	Part A 100 (Amber) Part B 58 (Amber)	> 30 dk	5 - 7 gün (77 °F da) 1 saat 200 °F da	1 yıl <40 °F	-67 300 °F	-	Test Sıcaklığı °F Sonuç (PSI) -67 2400 77 2500 400 300	-	Çekme muk 5800 PSI Elastik modül 370000 PSI 77°F da	Kayma muk 12000 PSI Kayma modülü 158000 PSI (77°F da)
EA9390	Part A 100 (Ton) Part B 56 (Violet)	2 saat	220 dk 200 °F da 130 dk 300 °F da	1 yıl < 40 °F	-67 ile > 350 °F	BMS 8 - 301 class 1	Test Sıcaklığı °F Sonuç (PSI) -67 2200 77 2600 250 3600 350 1700	-	Çekme muk 8200 PSI Elastik modül 418 KSI 77°F da	-
EA9321	Part A 100 (Gray) Part B 50 (White)	40 dk	5 - 7 gün 77 °F 1 saat 180 °F	1 yıl < 40 °F	250 °F	-	Test Sıcaklığı °F Sonuç (PSI) -67 3000 77 4000 180 1700 400 500	Test Sıcaklığı °F Sonuç (Lb/in) -67 5 77 6 180 42	Çekme muk 7100 PSI Elastik modül 420 KSI 77°F da	Kayma muk 16880 PSI
EA9330	*Part A 100 Part B 33	60 dk	5 - 7 gün 77 °F 2 saat 180 °F	1 yıl	-67 ile 180 °F	-	Test *Sıcaklığı °F Sonuç (PSI) -67 5000 77 5000 180 1000	Test Sıcaklığı °F Sonuç (Lb / in) 77 35	Çekme muk 5600 PSI Elastik modül 394000 77°F da	Kayma muk 7700 PSI Kayma modülü 253000 PSI

Tablo 2.1b Yapıştırıcıların Genel Özellikleri (Devam)

TİCARİ ÜRÜN	KARIŞIM ORANI	UYGULAMA SÜRESİ	KURUMA SÜRESİ	ÖMÜR	SERVİS SICAKLIĞI	SPEC	KAYMA MUKAVEMETİ	AYRILMA MUKAVEMETİ	ÇEKME MUKAVEMETİ	BASMA MUKAVEMETİ
KS 4008 Electroband 2016	100 / 16	1 saat	24 saat 25 °C	12 Ay 25 °C	-55 °C +125 °C	-	1200 PSI 25 C de	-	-	-
FM 123 - 5	-	30 gün 24 °C de	1 saat 120 °C	12 ay 6 ay	-55 °C 82 °C	MMM-A-132A Type 1 ,Class 2	-55 °C 24 °C 82 °C 120 °C	55 24 82 °C 120 °C	-	-
AF163-2K	-	-	60 dk 250 °F da	-	-57 °F 250 °F	-	6650 PSI 6500 4340 1040	73 95 130 88	-	-
EPOCAST 1617 AB	100 /20	1 saat	24 saat 25 °C de	6 ay 25 °C	-	BMS 5-28 Type 17	75 °F 180 °F 5780 PSI	75 F 80	-	5500 PSI
EPOCAST 87005 AB 60	100 / 35	80 dk	48 saat	12 ay 25 °C	-	DPM 5357	77 °F 2000 PSI	-	-	2500 PSI
RTV 102	-	-	100 °C 1 saat	12 ay	60 °C 205 °C	MIL-A-46106	-	7,2 Kg/cm	30 Kg/cm ²	-
RTV 157	-	-	100 °C de 1 saat	6 ay	60 °C 205 °C	DTD 1900	-	15 Kg/ cm	56 Kg/cm ²	-
EA911FNA	Part A 100 Yellow Part B 70 Gray	6 dk (77 °F da)	5-7 gün 77°F	1 yıl <77°F	150°F	-	Kuruma süresi 77°F da 30 dk 60 dk 24 dk 7 gün	-	-	-

Tablo 2.2 Yapıştırıcıların Kullanım Özellikleri

[illegible]

2.2.2. Yüksek Sıcaklıklara Dayanıklı Yapısal Yapıştırıcılar

Genel olarak yapıştırıcılar metal, seramik ve polimer malzemelerden [5] oluşur. Polimerler, organik esaslı malzemeler oldukları için, yüksek sıcaklıklara dayanma mukavemetleri düşüktür.

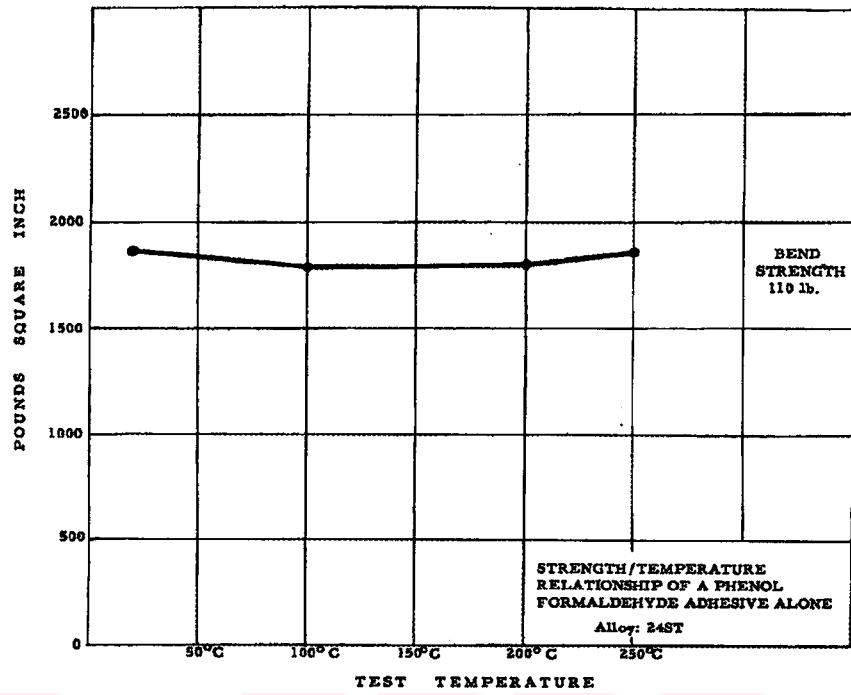
Polimer esaslı yapıştırıcılar, termosetler ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılır [6]. Termosetler ve termoplastikler arasındaki en önemli fark, termosetlerin sertleşmesi için moleküler yapıda çapraz bağların oluşması gerekirken, termoplastikler böyle bir bağ oluşturmazlar. Ayrıca termoplastiklerin ısıtılıp soğutulduklarında önceki şekillerini tekrar kazanabilmeleri mümkünken termosetler sertleştikten sonra, tekrar ısıtıldıklarında bozulurlar.

Termoset malzemeler genelde termoplastikler malzemelerden daha serttirler ve yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Termoset malzemelerin proses zamanı, termoplastik malzemelere nazaran çok daha uzundur.

Bilindiği gibi yapıştırıcılar, belirli bir sıcaklığın üzerinde kimyasal özelliğini kaybederler. Yapıştırıcıların kimyasal özelliğini kaybettiği bu sıcaklığa, yumuşama noktası adı verilir. Yumuşama noktası yüksek bir değere sahip olan yapıştırıcılar, yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapıştırıcıdır. Bu yapıştırıcılara , metalik yapıştırıcılar da denilebilir.

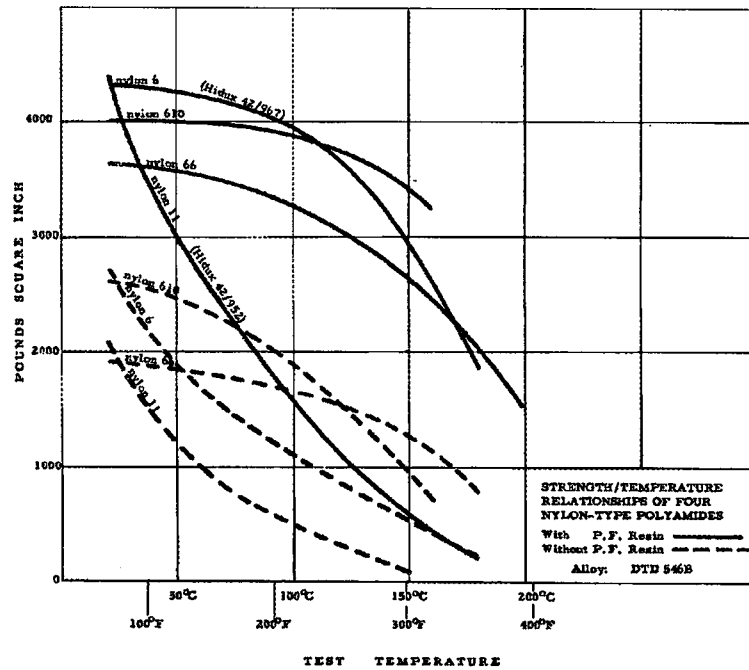
Bütün polimer malzemelerin yumuşama noktası düşüktür. Bu yüzden yapıştırıcının yüksek sıcaklığa dayanımını artırmak için, yapıştırıcının kimyasal bileşimindeki fenolik ve epoksi reçine oranını artırmak ya da polimer oranını düşürmek gerekir.

Polimer malzemelerin tümünü yapıştırıcının kimyasal içeriğinden atarak sadece fenolik reçine kullanımı, 250°C 'ye kadar dayanımlı yapıştırıcıların elde edilmesini sağladı. Şekil 2.2 'de, sadece fenolik reçine kullanılmış 600 lb/dk çekme gerilmesine maruz, 1/2 inch yapışma uzunluğunda ve 1 inch genişliğindeki yapışma birleşmesi için, sıcaklık / mukavemet eğrisi gösteriliyor. Şekil 2.2 'de de görüldüğü gibi, yüksek test sıcaklıklarında birleşme mukavemetinde önemli bir azalma olmamıştır.



Şekil 2.2 Fenolik Reçine İçin Sıcaklık / Mukavemet Eğrisi [5, s 171]

Şekil 2.3' de ise, fenolik reçineli ve reçinesiz naylon esaslı yapıştırıcılar için, sıcaklık / mukavemet eğrileri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi fenolik reçine esaslı yapıştırıcılar, yüksek sıcaklıklarda daha yüksek çekme mukavemeti vermektedir.



Şekil 2.3 Naylon Esaslı Yapıştırıcılar İçin Sıcaklık / Mukavemet Eğrileri [5, s 172]

Metal yapıştırıcılar olarak bilinen yüksek sıcaklığa dayanıklı, çok çeşitli malzemeler arasında mükemmel yapışma sağlayan fenolik esaslı yapıştırıcılar, ideal şartlarda ve ideal oranlarda karıştırılması sonucunda, yapıştırıcıda kırılganlık olmaksızın yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet vermenin yanında iyi bir dolgu malzemesi olarak da kullanılır.

Tablo 2.3’de, fenolik reçineli ve reçinesiz naylon esaslı değişik yapıştırıcılar için eğilme mukavemeti değerleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi fenolik reçine oranını artırma ile yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapıştırıcılar elde edilebilir. Bu aynı zamanda yapıştırıcının kırılganlığının da bir ölçüsüdür.

Tablo 2.3 Naylon Esaslı Yapıştırıcılar İçin Eğilme Mukavemet Değerleri [5, s 173]

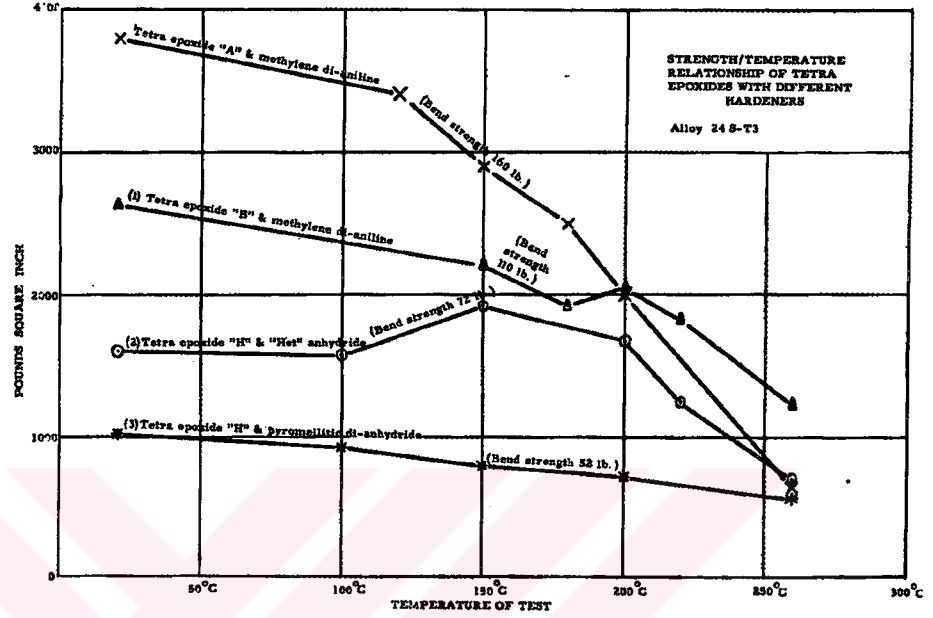
Type	With P.F.	Without P.F.
Nylon 6	280 lb.	78 lb.
Nylon 6/6	90 lb.	50 lb.
Nylon 610	250 lb.	120 lb.
Nylon 11	220 lb.	90 lb.

Bir başka yüksek sıcaklığa dayanıklı yapıştırıcı tipi ise, epoksi reçine esaslı yapıştırıcılardır. Epoksi yapıştırıcılar, kimyasal yapısından dolayı oldukça esnek ve ısıya dayanımı yüksek malzemelerdir. Epoksi reçinelerin yumuşama noktası, molekülleri arasındaki çapraz bağların sayısının artırılması ile yükseltilir. Epoksi reçinelerin yumuşama noktasının artırılması ile yüksek sıcaklığa dayanıklı yapıştırıcılar elde edilmiştir.

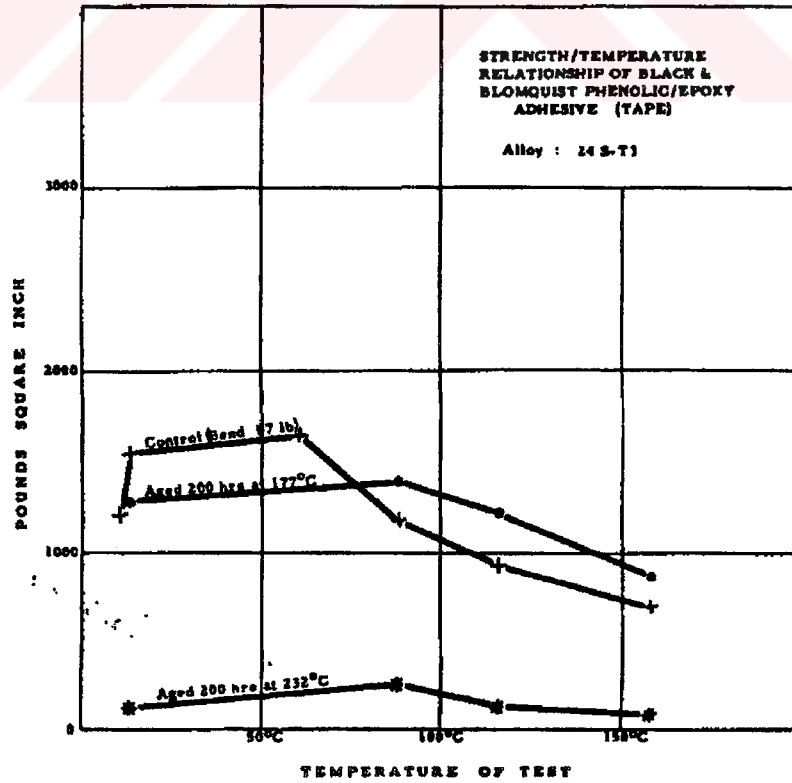
Epoksi reçinelerin yumuşama noktasını artırmak için, içeriğindeki sertleştiricinin fonksiyonel olarak artırılması gerekir. Şekil 2.4 ‘de, farklı sertleştiriciler ile karıştırılmış epoksi reçinelerin sıcaklık / mukavemet eğrileri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sertleştiricinin fonksiyonel olarak artırılması ile yüksek sıcaklıklarda daha yüksek mukavemet elde edilir.

Yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapıştırıcıları elde etmenin diğer bir yolu ise, epoksi reçineler ile fenolik reçinelerin birbirlerine belirli oranlarda karıştırılmasıdır. Belirli oranlarda karıştırılan bu tip yapıştırıcılar, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet vermesine rağmen, aynı zamanda kırılgandır. Kırılganlığın artması ise,

ayrılma ve eğilme mukavemetinin azalmasına neden olmuştur. Şekil 2.5'de, epoksi reçineler ve fenolik reçinelerin birbirine karıştırılması ile elde edilen değişik yapıştırıcılar için, sıcaklık / mukavemet eğrileri gösterilmektedir.



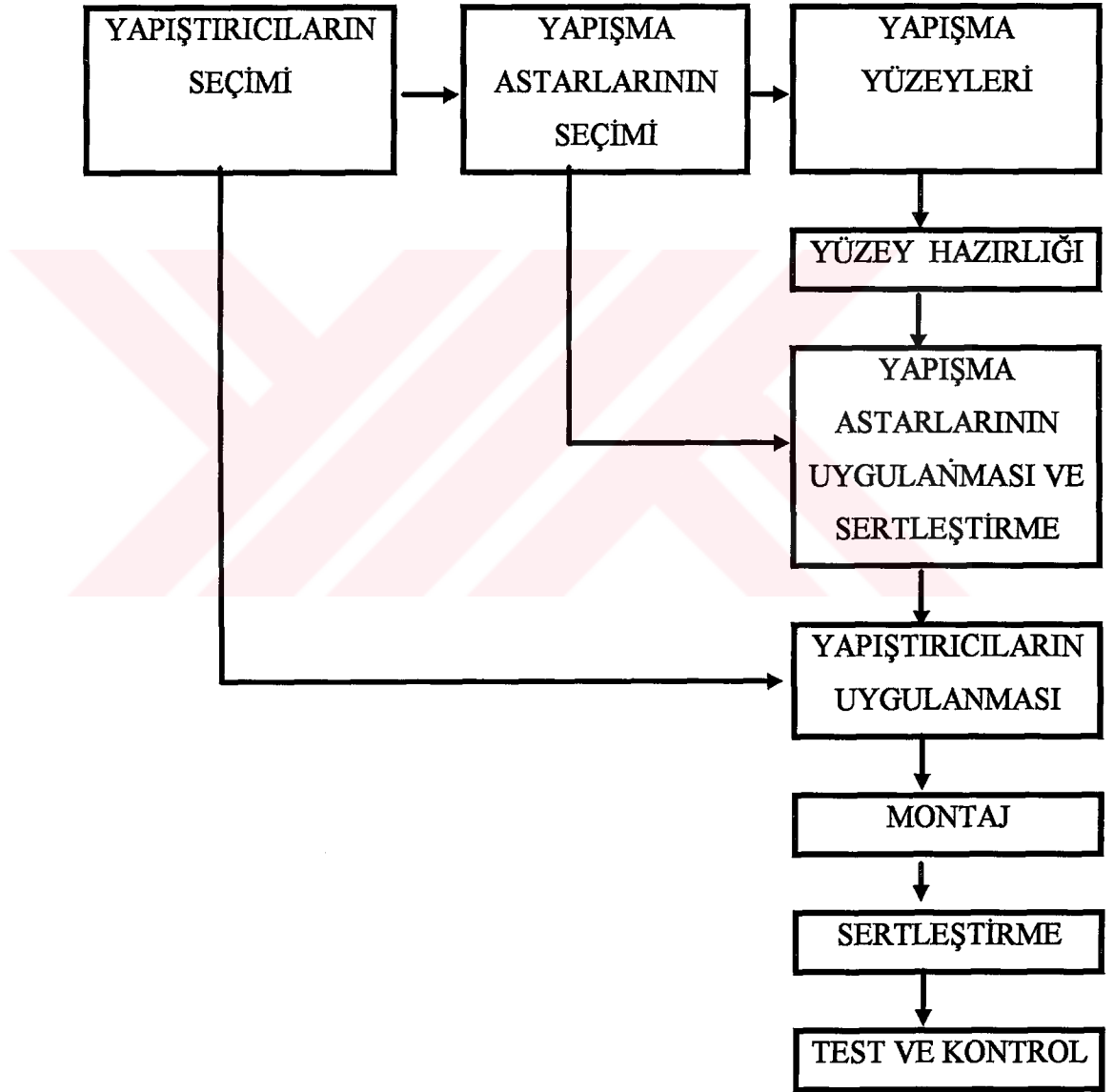
Şekil 2.4 Epoksi Reçineler İçin Sıcaklık / Mukavemet Eğrileri [5, s 175]



Şekil 2.5 Epoksi / Fenolik Reçineler İçin Sıcaklık / Mukavemet Eğrileri [5, s 177]

2.3. Yapışma

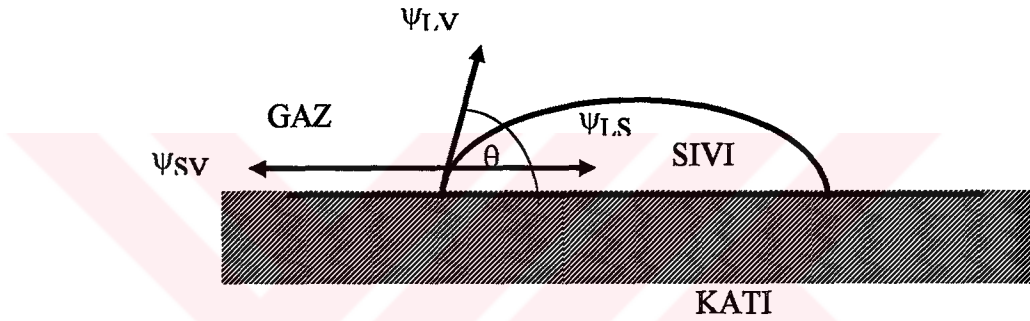
Yapışma işlemi; yapıştırıcı ve yapışma astarının seçilmesi ile başlar, yapıştırılacak parçaların yüzey ön işlemlerinin yapılması ile devam eder ve parçaların montaj edildikten sonra sertleştirme işlemi ile sona erer. Şekil 2.6, şematik olarak bu durumu gösteriyor.



Şekil 2.6 Yapışma İşleminin Akış Diyagramı

2.3.1. Islanabilirlik

Yapışmaya yardım eden mekanizmaların başında ıslanabilirlik [7] gelir. Islanabilirlik, sıvının katı yüzeye yayılabilirliğini tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Atmosferde düzlem katı yüzey içinde kalan damlalardan oluşan bir sistem içindeki kuvvetlerin dengesini gözönüne alarak bir sıvı damlası yardımıyla verilen bir katının ıslanabilirliği ölçülebilir. Sistemin özgür enerjisinin net olarak azalması ile damla yüzeye tamamen yayılır ve yüzeyi ıslatır. Şekil 2.7 şematik olarak bu durumu gösteriyor.



Şekil 2.7 Islanabilirlik [7, s 80]

Katı yüzey üzerindeki damla, katı ve sıvı arasında temas açısı yapar. Şekil 2.7 'de, ψ_{LS} , ψ_{LV} ve ψ_{SV} , sırasıyla katı-sıvı, sıvı-gaz, katı-gaz temaslarının yüzey enerjisini temsil ediyor. Tamamen ıslanabilirlik için aşağıdaki denklem yazılır.

$$\psi_{LS} + \psi_{LV} < \psi_{SV} \quad (2.1)$$

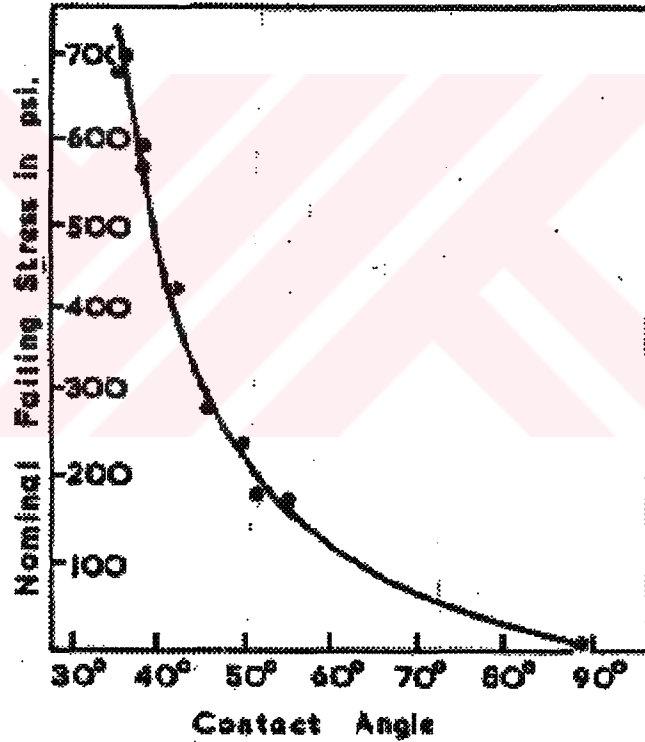
Denklem 2.1 'deki; S, L ve V sırasıyla, katı(solid), sıvı(liquid) ve gazı (vapor) temsil ederken, ψ yüzey enerjisini temsil eder. Yüzey üzerindeki kuvvetler dengeleninceye kadar sıvı, katı yüzeye yayılır. Bunun anlamı kısmi bir ıslanmadır. Yukarıdaki şekilden de görülebildiği gibi θ açısına, temas açısı denir. Kuvvetlerin dengesinden,

$$\psi_{LS} + \psi_{LV} \cos\theta = \psi_{SV} \quad (2.2)$$

veya

$$\theta = \cos^{-1}((\psi_{SV} - \psi_{LS}) / \psi_{LV}) \quad (2.3)$$

yazılabilir. $\theta = 180$ için küresel damla yada ıslanma olmadığı anlamına gelir. Ters olarak $\theta = 0$ için mükemmel ıslanma oluşur. $0 < \theta < 180$ için ise kısmi ıslanma oluşur. Temas açısı θ , yüzeyin yapısına bağlıdır. Yüzeyin pürüzlülüğü θ temas açısını azaltır. Emilmiş gazlar θ temas açısını artırır. Şekil 2.8, temas açısı ile mukavemet arasındaki değişimi göstermektedir. θ temas açısı arttıkça, yapışma mukavemeti azalır.



Şekil 2.8 Temas Açısı ile Mukavemet Değişimi [5, s 7]

Yapışma yüzeyi üzerindeki leke ve kimyasal reaksiyonlar sırasında oluşacak kirlilik, ıslanabilirliği etkiler.

Yapışma ve ıslanabilirlik literatürde gevşeme olarak kullanılır. İyi bir yapışma, yapışma temas hattı boyunca atomik ve moleküler bağların uniform olarak şekil alması anlamına gelir. Yapışma mukavemeti, zayıf Van Der Waal

Bağlarından, kuvvetli Kovalent Bağılara geçebilir. Atomik ve moleküler seviyedeki çok yakın temas yapışmaya yardım eder. İslanabilirlik moleküler seviyede çok yakın temasın muhtemel genişlemesine bağlıdır.

Yukarıda da anlatıldığı gibi yapışma ve ıslanabilirlik, sıvının katıyı ıslatmasının boyutunu tanımlamak için kullanılır. Yüksek temas açısı fakir bir ıslanabilirliği temsil ederken, düşük temas açısı yüksek ıslanabilirliği temsil eder.

2.3.2. Yüzey Hazırlığı

Her ne zaman yapısal parçalar yapışma ile birleştirilmek zorunda kalırsa, yapışan yüzeylerin durumu göz önüne alınmalıdır [4]. Yüzeyler üzerinde istenmeyen malzemeler ve şartlar, yapışmanın kalitesini düşürür.

Yapışma işleminin gerçekleştirileceği yüzeylerin son derece temiz olması gerekir. Yapışma yüzeylerin yapışma işlemi öncesi yüzey temizlikleri, bu işlemin en can alıcı ve nihai ürünün kalitesini etkileyen en önemli noktadır. Bu amaç ile özellikle havacılık ve uzay sanayiinde kimyasal temizleme ve aşındırma işlemleri geliştirilmiştir.

Değişik tür malzemeler için, işlemlerin ve kullanılan kimyasalların değişebileceği göz önünde bulundurulmak kaydıyla aşağıda sırasıyla anlatılacak ön işlemler, yüzeyleri yapışmaya hazırlar:

- a) Sadece yağ ve pislikten arındırma
- b) Yağını temizleme, aşındırma ve artık malzemelerin temizliği
- c) Tekrar yağından arındırma ve kimyasal ön işlem

Ön işlem süresince yada sonra yüzeylerin lekelenmesi el, iyi temizlenmemiş eldiven, yağlı zımpara ve kimyasal malzemeler ile olur. Ayrıca lekelenme, yapışma alanında yapılan diğer işlemlerden dolayı (sprey, tozlu malzeme kullanımı, yağ buharı vb.) oluşabilir.

Yüzeyler için her ne tip ön işlem yöntemi kullanılırsa kullanılsın yapışmanın kalitesini artıracaktır. Ama hangi iki değişik malzeme yapıştırılacak ise en iyi ön işlem yöntemi seçilmelidir.

2.3.2.1. Yağ ve Pislikten Arındırma Metodları

Bütün yapışmalar için, yapışan parçalar üzerinde yağın ve pisliğin temizlenmesi esastır. Parçaların yağ ve pislikten arındırma işlemleri, dört değişik yol ile yapılabilir:

a) 1,1,1- trikloreten solventi içeren buhar tanklarına parçaları geçici olarak sokma yolu ile parçalar temizlenebilir. Bu tankta, sıvı solvent ile ilk yıkama gerçekleşir. Bu işlem özellikle alüminyum alaşımları için, sıcak solvent tankına daldırma yolu ile de yapılabilir. Temizlemeden sonra, parçalar basınçlı temiz su ile yıkanarak kurutulmalıdır.

b) Eğer solvent içeren sıcak buhar tankları mevcut değilse, aynı solventi içeren iki değişik tanka parçaların daldırılması ile temizleme işlemi yapılabilir. Birinci tank yıkama, ikinci tank ise şiddetli tekrar yıkama olarak görev yapar. Solvent olarak 1,1,1-trikloreten kullanılabilir. Birinci tankda, yağ ve pislik miktarı arttığında tank boşaltılır, temizlenir ve tekrar solvent ile doldurulur. Parçaların ilk yıkama işlemi biter bitmez parçalar ikinci tanka sokularak ve sallama yolu ile tekrar temizlenmesi gerekir. Bu yöntemin bir avantajı, ilk tank kirlenince tekrar temizlendiğinde, ikinci tank olarak kullanılabilmesidir.

c) Eğer emniyet açısından herhangi bir sorun yoksa, temiz aseton vasıtasıyla ıslatılmış temiz bir bez yada temiz bir fırça aracılığıyla, yapışma yüzeyleri temizlenebilir.

d) Sıvı deterjan solusyonu ile parçalar yıkama yolu ile temizlenebilir. Parçalar daha sonra sıcak, temiz, basınçlı su ile yıkanarak ve 40°C 'deki sıcak hava ile kurutulması gerekir.

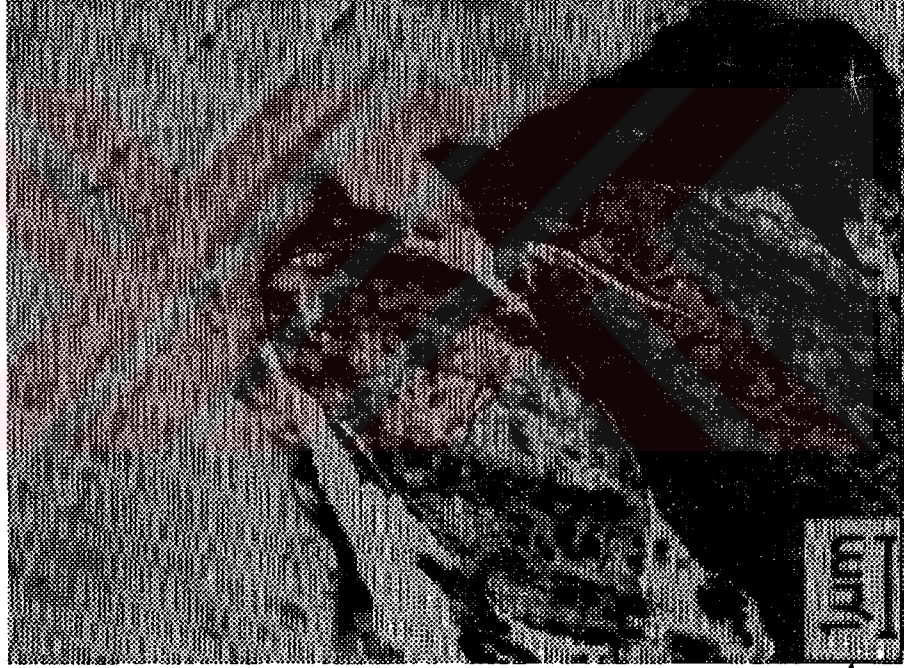
Yukarıda anlatılan dört yol ile parçaların yağ ve kirden arındırma işlemi biter bitmez yapışma yüzeylerin yapışmaya uygun olup olmadıklarını anlamak için “Su Kırılma Testi’nin” yapılması gerekir.

Su kırılma testi, demineralize su ile yapışma yüzeylerinin ıslatılarak incelenmesi ile gerçekleştirilir. Su, kesintisiz bir film olarak alanı kaplarsa, yüzeyler temizdir. Eğer su küçük damlacıklar halinde şekil alırsa, bu yüzeylerin temizlenmemiş olduğunu ve temizlenmenin tekrar yapılması gerektiğini gösterir.

Temizleme işlemi için yukarıda anlatılan dört yöntemden hangisi en uygun ise o yöntem ile yapışma yüzeyleri temizlemelidir. Bazı plastik malzemeler için, yağdan arındırma ile temizleme yöntemleri kullanılamaz. Bu yüzden, bu tip plastik malzemelerin sadece su kullanılarak temizlenmesi gerekir.

2.3.2.2. Aşındırma Metodları

Cilalama işleminin yerine yapışma yüzeylerinin hafifçe aşındırılması, yapışmada daha iyi sonuç verir.



Şekil 2.9 Aşındırılmış Alüminyum Malzemenin Mikrometre İle Büyütülmüş Kesiti [4, s 8]

Aşındırma işleminin amacı, yapışmada iyi bir yüzey elde etmektir. Yani yapışma yüzeylerindeki toz, oksit ve gevşek malzemelerin temizlenmesidir. Şekil 2.9'da, aşındırılmış alüminyum levhanın mikrometre ile büyütülmüş bir kesiti gösterilmektedir. Aşındırma işleminden sonra yapışma yüzeyleri üzerindeki istenmeyen parçalar, daha sonra gerilme çatlağı ile sonuçlanır. Bu yüzden yapışma yüzeyleri üzerindeki toz, oksit ve gevşek malzemelerin temizlenmesi gerekir.

Aşındırma işleminde zımpara kullanımı, aşındırılacak malzemelere bağlıdır. Yani alüminyum zımpara, galvanik korozyondan dolayı düşük mukavemetli çelikler için kullanılmaz. Bu yüzden, demir yada çelik tipi zımpara kullanılır.

Zımpara tipinin ve büyüklüğünün seçimi, çeşitli faktörlere bağlıdır: Bu faktörler; ön işlem yapılacak metal, kullanılacak ekipmanın tipi, basınç, zımparanın açısı ve süresidir.

Zımparalama el ve makina olmak üzere iki şekilde yapılır. Makina ile zımparalamanın su ve hava ile beraber kullanılan iki türü vardır. Su ile beraber kullanılan tipi, demir malzemelerin aşındırılması için kullanılırsa, aşındırma işleminden hemen sonra parçalar kurutulmalı yada suya korozyon önleyici ilave edilmelidir. Plastik malzemelerin zımparalanmasında makina kullanılırsa, zımparalama süresinin çok kısa olması gerekir. Aksi takdirde plastik malzemeler oluşan ısıdan dolayı erir. Eğer zımpara makinası mevcut değilse, yüzeyler 125 ile 315 μm arasındaki zımparalar kullanılarak el ile aşındırılması gerekir.

El ile aşındırmada optimum zımpara tipi deneme ile bulunur. Genelde 125 μm 'lik zımpara optimumdur. Aşındırma işleminin nemli ortamda yapılması, yapışacak parçaların toz tutmasını ve lekelenmesini önler. Aşındırma işleminden sonra parçalar temiz, sıcak hava ile kurutulması gerekir. Yapışmanın kalitesini dahada artırmak için aşağıda verilen işlemler de yapılabilir:

- a) Temiz ve yumuşak fırça ile yüzeylerinin fırçalanması
- b) Filtre edilmiş, kirlenmemiş hava ile yüzeylerin temizlemesi
- c) Parçaların tekrar yağından arındırılması

2.3.2.3. Kimyasal Ön İşlem

Yukarıda anlatılan yağdan arındırma ve aşındırma ön işlemleri yapışma için yeterli olabilir ama yapışmanın kalitesini daha da artırmak için, yapışma yüzeylerine kimyasal ön işlem uygulamak oldukça etkilidir. Yapışacak yüzeylerinin kimyasal ön işleme tabii tutulması, maximum yapışma mukavemeti ve dayanıklılığı artırmak açısından önem taşır.

Kimyasal ön işlem malzemelerin tipine göre iki ana başlık altında ele alınır:

- a) Metalik malzemelerin kimyasal ön işlemleri
- b) Plastik malzemelerin kimyasal ön işlemleri

2.3.2.3.1. Metalik Malzemelerin Kimyasal Ön İşlemleri

Anlatılacak olan her bir metal malzeme grubu, yapılacak olan kimyasal ön işleme farklı yanıt verecektir. Bir yöntemin bir başka yöntem üzerindeki etkisi (aynı metal ve aynı yapıştırıcı için) sadece deneme ile sonuçların karşılaştırılması ile anlaşılır. Ayrıca metaller üzerinde boya varsa, kimyasal ön işlemden önce kesinlikle sökülmesi olmalıdır.

2.3.2.3.1.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

2.3.2.3.1.1.1. Alüminyum Honeycomb

Leke izi görülmedikçe, alüminyum honeycomb'a yapışmadan önce herhangi bir ön işlem yapmaya gerek yoktur. Eğer leke izi varsa, yağdan arındırma işleminde anlatıldığı gibi honeycomb temizlenerek kurutulmalıdır. Yapışmanın kalitesi açısından honeycomb kenarlarında ezilmeler olmamalıdır.

2.3.2.3.1.1.2. Alüminyum Levha

Alüminyum malzemeler yüksek sünekliğe sahip olduklarından, yapışma yüzeylerinin aşındırılmaması gerekir. Alüminyum levhaların kimyasal ön işlemleri çeşitli metodlar kullanılarak yapılabilir. Kullanılan alaşım ve kimyasal ön işleme bağlı olan etkili alüminyum oksidin kontrol edilebilen film kalınlığı yapısal yapışma için uygun olabilir.

Alüminyum levhaların kimyasal ön işlemleri dört değişik yöntem ile yapılır:

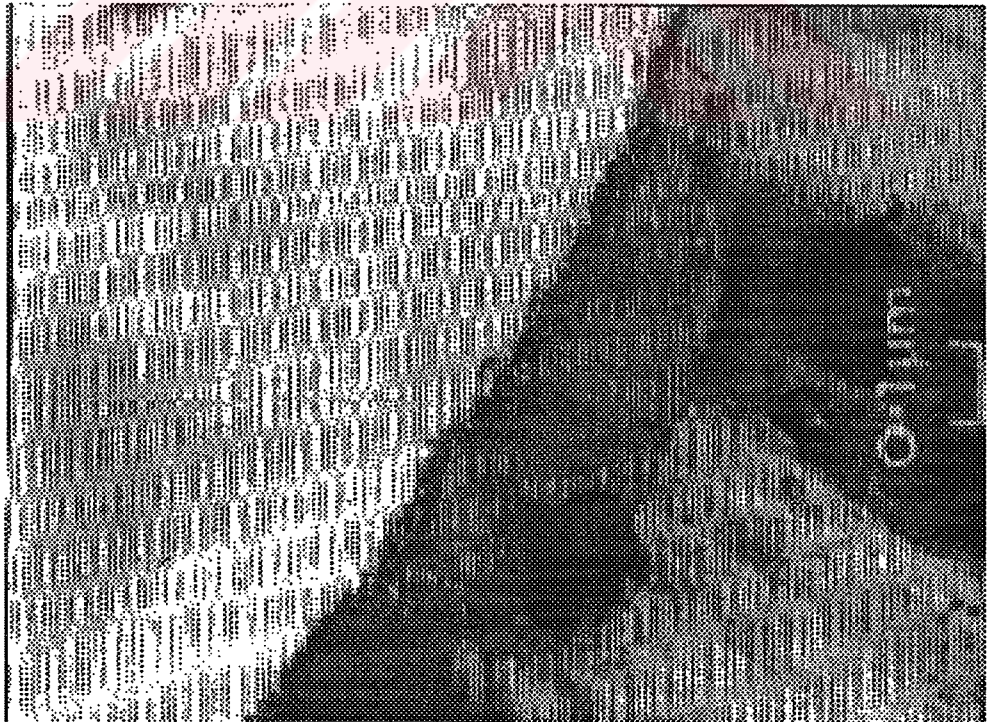
a) Kromik/Sülfürik asit dağlama yöntemi

Şekil 2.10'da kromik / sülfirik asit ile dağlanmış alüminyum levhanın mikrometre ile büyütölmüş bir kesiti gösterilmektedir. Dağlama ile elde edilmiş yapışma için etkili oksit film tabakası kalınlığı, yaklaşık 3µm' dir.

Alüminyum levhaların yapışma yüzeylerinde etkili oksit tabakası elde etmek için kullanılacak dağlama solusyonu aşğıdaki şekilde hazırlanır.

Su	1.5 litre
Konsantre Sülfirik Asit	0.75 litre
Sodyum Dikromat [$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$]	0.375 litre .

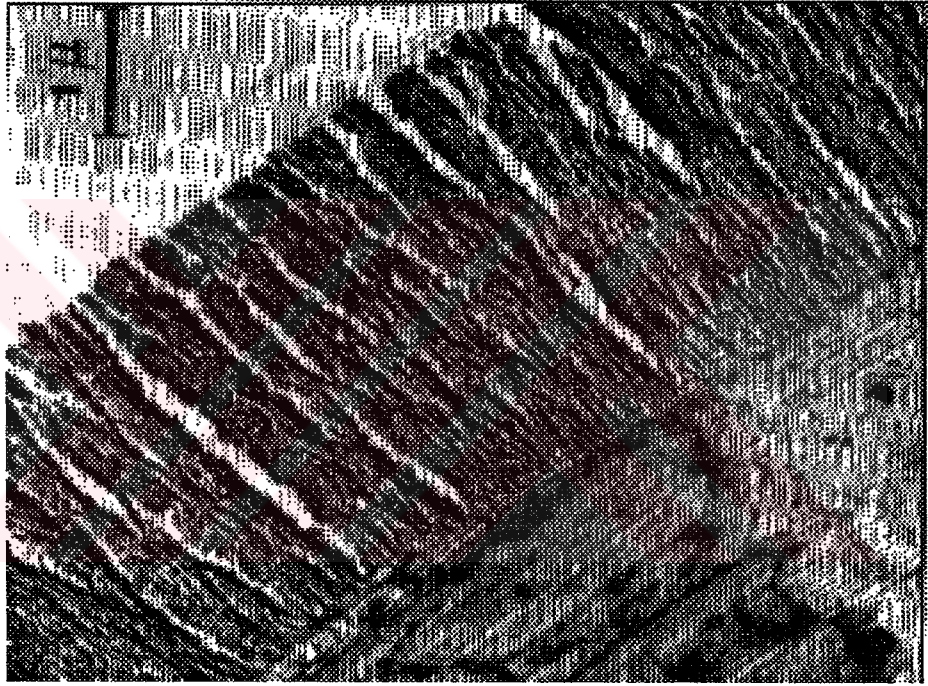
Dağlama solusyonu hazırlandıktan sonra 60-65°C' deki dağlama banyosuna alüminyum levhalar, 30 dakika süre ile daldırılır. Bu sürenin sonunda levhalar oda sıcaklığında temiz su tankına daldırılarak temizlenir. Bu işlemden sonra levhalar sıcaklığı 45°C' den yüksek olmayan fırın içinde kurutulur. Yapışma öncesi alüminyum levhalar için kullanılan dağlama kimyasal ön işleminin etkisinin kaybolmaması için, yapışma işlemi 8 saat içinde yapılmalıdır.



Şekil 2.10 Kromik / Sülfirik Asit İle Dağlanmış Alüminyum Levhanın Mikrometre İle Büyütölmüş Kesiti [4, s 9]

b) Kromik asit anotlama yöntemi

Alüminyum levhaların kimyasal ön işleminde kromik asit anotlama yöntemi kullanılması ile daha güçlü, daha kalın oksit tabakası elde edilebilir. Şekil 2.11’de, kromik asit anotlama yöntemi ile anotlanmış alüminyum levhanın mikrometre ile büyütülmüş bir kesiti gösterilmektedir. Anotlama işlemi ile elde edilmiş, yapışma için göreceli olarak daha düz ve kalın oksit film tabakası kalınlığı, yaklaşık 2.5-4µm arasındadır.



Şekil 2.11 Kromik Asit İle Anotlanmış Alüminyum Levhanın Mikrometre ile Büyütülmüş Kesiti [4, s 10]

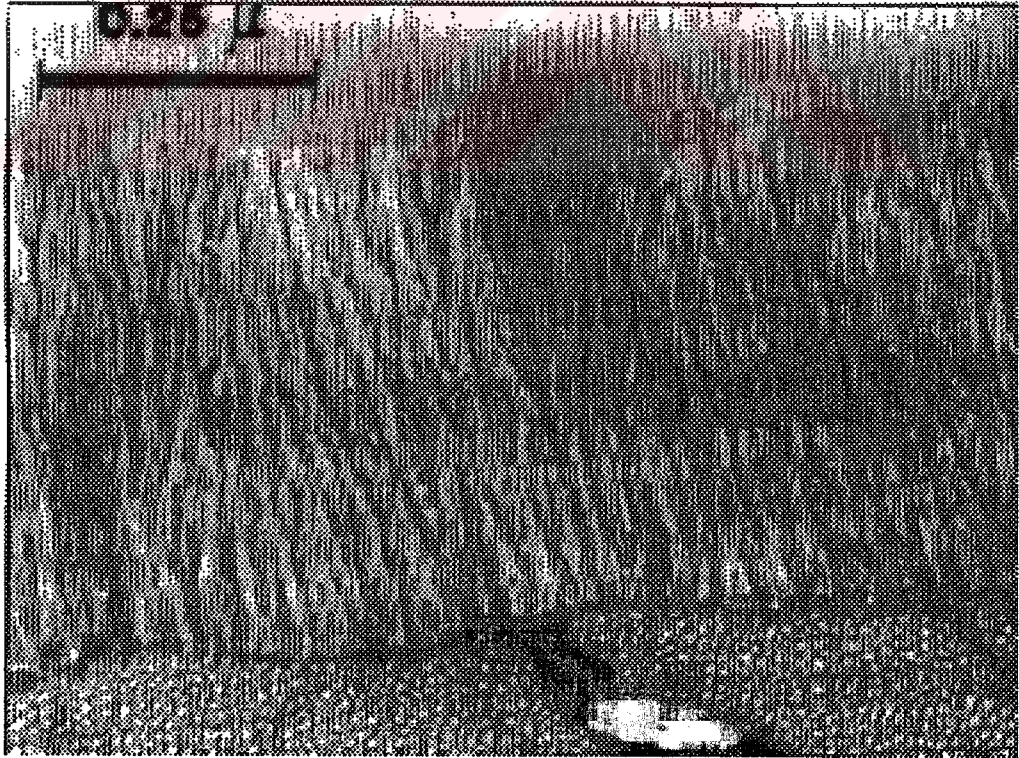
Dağlanmış alüminyum levhalar (anotlamadan önce belli şartlar altında sadece yağdan arındırma işlemi yeterli olan) standart anotlama banyosuna konur. Sıcaklığı 40°C olan kromik asit anotlama banyosu aşağıdaki gibi hazırlanır.

Krom Trioksit [CrO_3]	0.5 kg
Su	10 lt.

Dağlamadan sonra anotlama voltajı, 5 dakika için 50V' a yükseltilir. Bu işlem sonunda parçalar anotlama banyosundan çıkarılır ve oda sıcaklığındaki soğuk su ile yıkanarak 45°C' yı aşmayan fırınlarda yada sıcak temiz hava ile kurutulur. Kromik asit anotlama kimyasal ön işleminin etkisinin kaybolmaması için, yapışma işlemi 4-6 saat içinde yapılmalıdır.

c) Fosforik asit anotlama yöntemi

Kromik asit anotlama ile elde edilen yapışma için etkili oksit film kalınlığından daha kalın ve daha açık oksit film kalınlığı elde etmek için, alüminyum levhalara fosforik asit anotlama işlemi yapılır. Şekil 2.12'de, fosforik asit anotlama yöntemi ile anotlanmış alüminyum levhanın mikrometre ile büyütülmüş kesiti gösterilmektedir. Fosforik anotlama yöntemi ile elde edilmiş yapışma için daha etkili, göreceli olarak daha düz ve yoğun oksit film tabakası kalınlığı, yaklaşık 0.6-1µm arasındadır. Fosfat içeren anodik oksit yapışmanın dayanıklılığını artırır.



Şekil 2.12 Fosforik Asit İle Anotlanmış Alüminyum Levhanın Mikrometre İle Büyütülmüş Kesiti [4, s 11]

Dağlanmış alüminyum levhalar (anotlamadan önce belli şartlar altında sadece yağdan arındırma işlemi yeterli olan) standart anotlama banyosuna daldırılarak anotlanır. Sıcaklığı 25°C olan fosforik asit anotlama banyosu aşağıdaki gibi hazırlanır:

Ortofosforik Asit	1 litre
Su	16.6 litre

Alüminyum levhalar anotlama banyosuna daldırıldıktan sonra anotlama voltajı, 25 dakika için 15 Volta yükseltilir. Bu işlem sonunda parçalar fosforik asit anotlama banyosundan çıkarılır. Bu işlem ile alüminyum levhaların yüzeyinde kontrollü bir şekilde gözeneklerin oluşması sağlanır. Amaç daha sonra uygulanacak olan yapıştırıcının bu gözeneklere sızarak iki levhayı kuvvetli bir şekilde tutmasını sağlamaktır. Anotlama işleminden sonra levhalar oda sıcaklığında, şiddetli soğuk su ile yıkanır ve sıcaklığı 45°C olan fırınlarda yada temiz sıcak hava ile kurutulur. Alüminyum levhaların yapışma öncesi fosforik asit anotlama yöntemi ile anotlanmasından sonra kimyasal ön işlemin etkisinin kaybolmaması için, yapışma işlemi 3 saat içinde yapılmalıdır.

d) Sülfürik asit anotlama yöntemi

Sülfürik asit anotlama yöntemi alüminyum ve alüminyum alaşımları için kimyasal ön işlem olarak kullanıldığı zaman, diğer kimyasal ön işlemler ile karşılaştırıldığında daha düşük mukavemet ve dayanıklılık vermektedir. .

2.3.2.3.1.1.3. Anotlanmış Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Boyanmış yada korozyona karşı anotlanmış alüminyum ve alüminyum alaşımları, yapışma için uygun değildir. Bu tip malzemelerin üzerindeki kaplama, yapışma işleminden önce sökülmelidir. Sökme işlemi için aşındırma işlemi iyi sonuç vermez. Bu yüzden alüminyum levhaların üzerindeki anodik oksit film, kromik / sülfürik asit solusyanları ile sökülür. Sökme işlemi biter bitmez alüminyum ve alüminyum alaşımları için yukarıda verilen yöntemlerden biri kullanılarak yapışma öncesi kimyasal ön işlem yapılabilir.

2.3.2.3.1.2. Bakır ve Nikel Malzemeler İçin Kimyasal Ön İşlem

Bakır ve nikel malzemeler için yüzey hazırlığı, yukarıda anlatıldığı gibi ya yağından arındırma ve aşındırma yada sıcaklığı 23°C' de olan konsantre nitrik asit solusyonunda yapışma yüzeylerinin dağlanması ile gerçekleştirilir. Dağlama için uygun solusyon tablo 2.4' de gösterildiği gibi hazırlanır.

Tablo 2.4 Bakır ve Nikel Malzemeler İçin Dağlama Solusyonlarının Hazırlanması [4, s 11]

Malzeme	Bakır ve Bakır Alaşımları	Nikel ve Nikel Alaşımları
Dağlama Solusyonu	Konsantre Nitrik Asit ve 1/3 Oranında Su	Sulandırılmış Konsantre Nitrik Asit
Daldırma Süresi	30 Saniye	5 Saniye

Dağlama işleminden sonra parçalar soğuk su ile yıkanarak sıcak hava ile kurutulur. Optimum yapışma mukavemeti, kimyasal ön işlemten sonra kullanılacak yapıştırıcı tipine göre parçalar için seçilmiş yapışma astarının uygulaması ile elde edilir. Yapışma astarının tatbikinden sonra ve yapışmadan önce parçalar, 1 saat 175°C' de kurutulmalıdır.

2.3.2.3.1.3. Bakır / Nikel Alaşımları

Bu tip malzemeler için en iyi solusyon ve daldırma süresi aynı tip malzeme ve aynı tip yapıştırıcı için, bakır ve nikel malzemeler için kullanılan dağlama solusyonu ile aynı olmak şartıyla, yapılan deneylerle bulunabilir.

2.3.2.3.1.4. Düşük Mukavemetli Çelikler

Düşük mukavemetli çelikler için yağından arındırma ve aşındırma işlemleri yapışma öncesi ön işlem olarak kullanılabilir. Ayrıca düşük mukavemetli çelikler

için, bu ön işlemler yerine dağlama yöntemi de kullanılabilir. Sıcaklığı 60°C olan dağlama solusyonu aşağıdaki gibi hazırlanarak parçalar 10 dakika süre ile bu dağlama solusyonuna daldırılır.

Metil Alkol	2 litre
Ortofosforik Asit	1 litre

Bu işlem sonunda parçalar dağlama banyosundan çıkarılır. Daha sonra şiddetli soğuk su ile yıkanarak ve yumuşak, temiz, sünek naylon fırça ile fırçalanır. Metil alkolle ıslatılmış temiz bir bez ile parçalar üzerindeki artık malzemeler temizlenerek 120°C'deki fırında 1 saat süreyle kurutulur.

Birkaç uygun fosfatlama sistemi mevcut olmasına rağmen düşük mukavemetli çelikler için optimum yapışma mukavemeti aşındırma ön işlemi ile elde edilmektedir.

2.3.2.3.1.5. Paslanmaz Çelikler

Yapışma ile birleşmede paslanmaz çelik kullanımı oldukça zor ve dayanıklılık açısından iyi sonuç vermemesinden dolayı, paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde yapıştırıcı kullanımı genelde tercih edilmez. Ama paslanmaz çelikler için yapıştırıcı kullanmak gerekirse ön işlem olarak dağlama, yağdan arındırma ve aşındırma yöntemleri kullanılır. Aşındırma ön işlemi için, demir zımpara, cam zımpara veya alüminyum zımpara kullanılır. Eğer dağlama yapılırsa sülfürik / fosforik asit esaslı dağlama solusyonları kullanılır. Paslanmaz çelikler ile yapışma öncesi kimyasal ön işlem, yapıştırılacak parçaların planlanan dayanıklılık süresine ve parçaların minumum çekme mukavemetine bağlıdır.

2.3.2.3.1.6. Titanyum ve Titanyum Alaşımları

Yağdan arındırma, aşındırma, dağlama ve anotlama işlemleri bu tür malzemeler için ön işlem olarak kullanılabilir. Yağdan arındırma ve aşındırma ön

işleminden sonra dağlama işlemi, oda sıcaklığındaki aşağıda verilen solusyona parçaların 20 dakika daldırması gerçekleştirilir.

Konsantre Nitrik Asit	4.5 litre
Hidroflorik Asit	0.045 litre
Su	10 litre

Dağlama banyosundan parçalar çıkarıldıktan sonra, şiddetli soğuk su ile yıkanır. Daha sonra temiz, sünek fırça ile fırçalanır. Dağlama işlemi bu şekilde sona erdikten sonra, parçalar standart anotlama için aşağıda verilen 40°C 'deki solusyona (katod oranı 1/3) daldırılır.

Krom Trioksit (CrO_3)	0.7 litre
Su	10 litre

Anotlama banyosunun voltajı, 30 dakika süre ile 20 volta yükseltilerek parçaların özel mavi bir renge dönüşmesi ile anotlama işlemi biter. Anotlama banyosundan çıkarılan parçalar, şiddetli soğuk su ile yıkanır ve 45°C 'yi geçmeyen fırınlarda veya temiz sıcak hava ile mükemmel bir şekilde kurutulur.

2.3.2.3.2. Plastik Malzemelerin Ön İşlemi

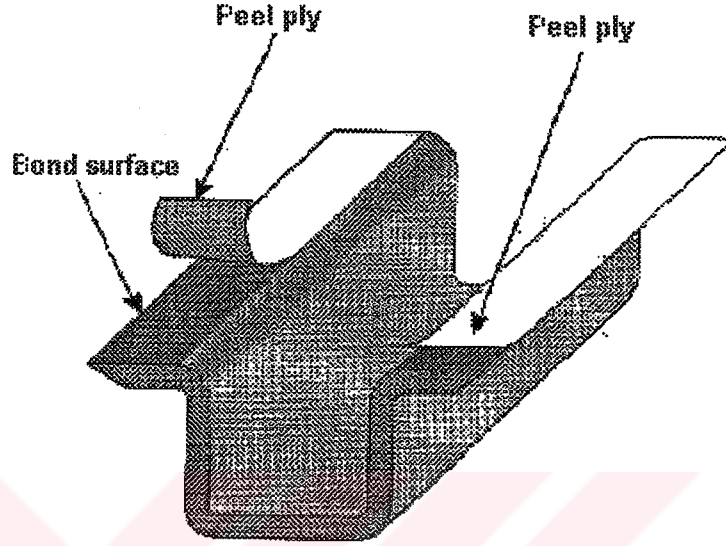
Polimerik termoplastikler (özellikle belli solventlerle kimyasal reaksiyona giren plastikler) ve termoset malzemelerin ön işlemi için teknik bilgilere ve testlere gerek vardır.

2.3.2.3.2.1. Termosetler

Amina, epoksi, fenolik, polyimide yada doymamış polyester plastiklerden üretilen kalıp, eriyik, kompozit tabakalar gibi malzemeler polimerik termoset grubuna dahildir.

Islak metod yada prepreplerden oluşan fiber takviyeli termoset kompozit tabakaların yapışma işleminde yapışma yüzeyleri üzerine soyulma tabakası konur.

Yapışmadan hemen önce bu soyulma tabakası alınır ve yapışma için temiz, iyi hazırlanmış bir yüzey elde edilir.



Şekil 2.13 Soyulma Tabakası [4, s 12]

İyi bir yapışma mukavemeti ve dayanıklılık elde etmek için, tabakalar yapışmadan önce kurutulmalı ve üzerindeki nem alınmalıdır. Bu kurutma işlemi, soyulma tabakası söküldükten sonra, tabakalara ısısal bir zarar vermeyecek şekilde temiz sıcak hava kullanılarak hemen yapılmalıdır. Bu soyulma tabakası kullanma tekniği yapışacak yüzeyler için oldukça iyi sonuç verir.

Bununla beraber tabakalara fazla miktarda yapıştırıcı emdirilmesi, yapışma mukavemetinin azalmasına neden olur. Bu tip malzemeler için yapışma öncesi ön işlem olarak fazlasıyla el mahareti ve ustalık isteyen aşındırma yöntemi de kullanılabilir. Aşındırma işlemi esnasında tabakalardan oluşan kompozit yapının hasarlanmamasına da özen gösterilmelidir.

2.3.2.3.2.2. Termoplastikler

Polimerik termoplastiklerin yapışmasını belli faktörler etkiler. Bunlar; polimerin tipi ile derecesi, erime şartları ve karışım oranlarıdır. Verilen şartlar

altında yapışma mukavemeti ve dayanıklılık testlerle bulunabilir. Bu tip plastikler için yapışma öncesi flame, corona ve plazma gibi alışılmamış teknikler, mükemmel mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine sahip yapışma birleşmelerini elde etmek için kullanılan çok özel kimyasal ön işlemlerdir.

2.3.2.3.2.3. Plastik Köpükler

Fenolik reçine, poliüretan ve PVC gibi malzemelerden yapılan köpükler, kirlenmedikçe ön işlem gerekmez. Temiz, kuru ve tozsuz yüzey olması yapışma için yeterlidir.

2.3.2.3.2.4. Metalik Olmayan Honeycomb' lar

Aramidden yapılan honeycomb' lar, kirlenmedikçe ön işlem gerekmez. Bununla beraber sadece yapışmadan önce 120°C 'de 1 saat honeycomb' ların kurutulması ile daha yüksek mukavemetli ve daha dayanıklı yapışmalar elde edilir.

2.3.3. Yapıştırıcıların Uygulanması

Yapıştırıcılar genel olarak sıvı ve film formunda olduklarından yapışma işlemide, yapıştırıcının formuna göre ikiye ayrılır:

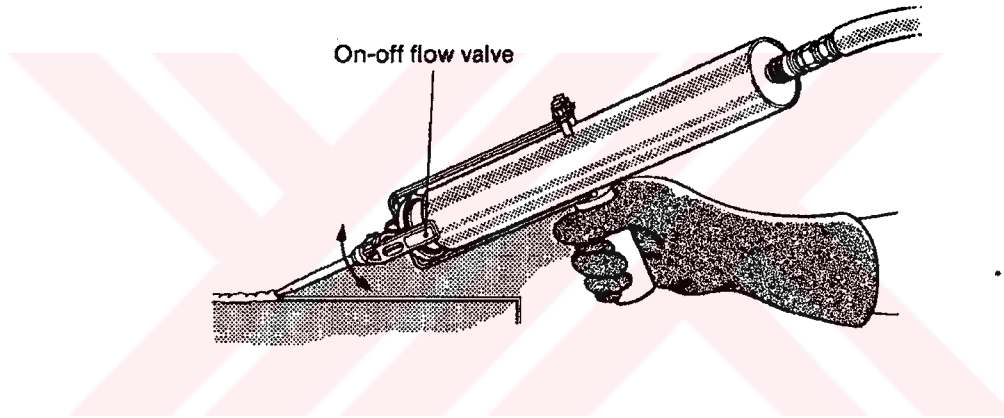
- a) Sıvı yapıştırıcıların yapışması
- b) Film yapıştırıcıların yapışması

2.3.3.1. Sıvı Yapıştırıcıların Yapışması

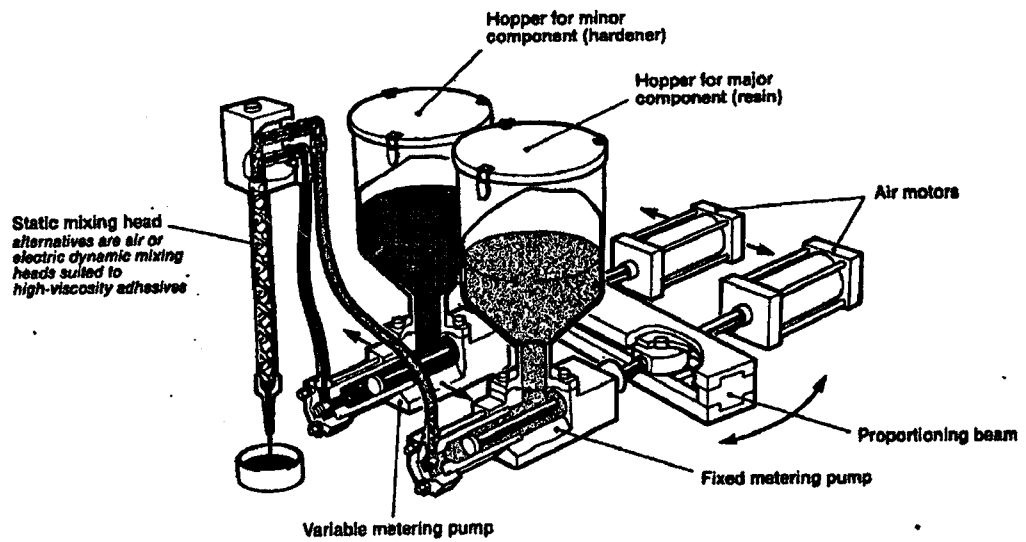
Yapışma astarı kuruduktan sonra ve sıvı yapıştırıcıları uygulamadan önce yapıştırılacak yüzeyler temiz ve kuru olmalıdır. Sıvı yapıştırıcılar en az iki

bileşenden oluşur. Yapışma öncesi bunların belirli oranlarda karıştırılması gerekir. Karıştırma işlemi makina ve el ile olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Karıştırma işleminin ve karışım oranlarının yanlış yapılması, yapışmanın kalitesini etkiler. Bu yüzden karıştırma işleminin itina ile yapılması gerekir.

Yapışma işleminde iki parçadan fazla parça kullanılıyorsa, yapışma işleminin yapılmadığı yüzeyler maskelenmelidir. İlk yapışma işlemi bittikten sonra bu maskeler açılmalı, temizlenmeli ve bir sonraki yapışma kademesine geçilmelidir. Eğer yapıştırılacak yüzeyler eğriliğe sahipse, yapıştırıcı kalınlığı merdane ile ayarlanmalıdır. Ayrıca yapışma işleminde hava kabarcığı yapmamaya da özen gösterilmelidir.



a) Hava ile çalışan el tabancası



b) Sıvı yapıştırıcılar için ölçme ve karıştırma makinası

Şekil 2.14 Yapıştırıcıların Uygulanması ve Karıştırılması [8, s 8-9]

2.3.3.2. Film Yapıştırıcıların Yapışması

Film yapıştırıcıların bir yüzünde release paper backing ve diğer yüzünde de polythene interleave adı verilen iki koruyucu tabakası vardır. Her ikisinde yapışmadan önce sökülür. Film yapıştırıcıların uygulanmasında, kullanılan yaygın iki yöntem vardır:

a) Koruyucu tabakalar sökülmeden istenilen ölçülerde film yapıştırıcı kesilerek release paper backing sökülür. Ön işlemi görmüş yapışma yüzeylerine film yapıştırıcı yapıştırılır. Daha sonra polythene interleave kenardan başlayarak film yüzeyine paralel olarak çekme yoluyla sökülerek diğer yapışacak olan parça film yapıştırıcının yüzeyine yapıştırılır.

b) Kesme yüzeyi üzerinde, film yapıştırıcı uzunluğu boyunca açılarak polythene interleave sökülür. Ön işlem görmüş yapışma yüzeyine film yapıştırıcı yapıştırılır. Yapışma yüzeyinin kenarlarından film yapıştırıcı kesilerek release paper backing sökülür. Diğer parça bu yüzeye yapıştırılır.

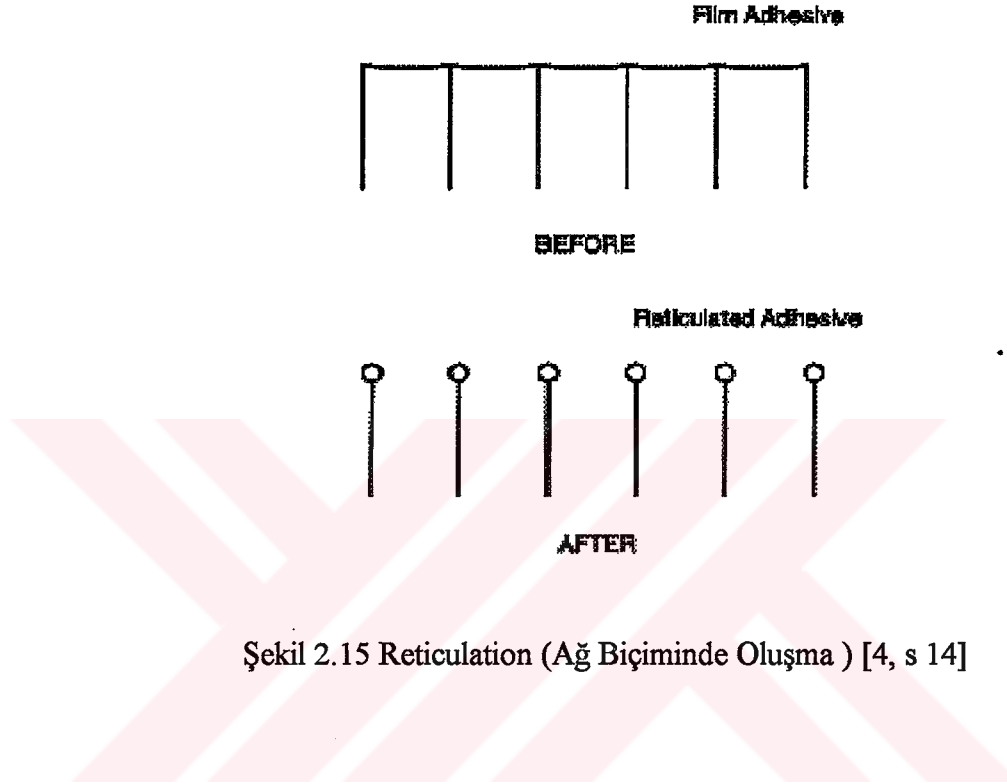
Film yapıştırıcılar esas olarak kurudurlar ve yapışma yüzeylerine kolayca yapışırlar. Yapışma oranı, film üzerindeki sıcaklığa ve gereken yapışmayı artırmak için uygulanan ilave ısıya bağlıdır.

Film yapıştırıcılar en çok kullanıldığı yerlerden biride turbofan tipi uçak motorlarıdır. Uçak motorlarında ses izolasyonu amacıyla gözenekli bir yapıya sahip akustik paneller kullanılır. Akustik panel, delikli levha ile metal honeycomb'ların birbirine film yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi ile imal edilir. Delikli yüzeye sahip akustik levhaların, metal honeycomb'lara film yapıştırıcılar ile yapıştırılmasında karşılaşılan en büyük problem, deliklerin yapıştırıcı ile tıkanmasıdır.

Bu deliklerin tıkanması, motorların sesinin artmasına ve performansının düşmesine neden olur. Delikli yüzeye sahip metal levhalar ile metal honeycomb'ların yapışması esnasında deliklerin tıkanması, film yapıştırıcıların reticulation (ağ biçiminde oluşma) işlemine tabii tutulması ile azaltılabilir.

Reticulation işlemi geniş alanların yapışmasında, her iki tarafındaki koruyucu tabakası sökülmüş film yapıştırıcının sıcak hava akımından geçirilerek metal honeycomb' a yapıştırılması ile yapılır. Daha küçük alanların yapışması için

ise bu işlem, 80-110°C 'deki fırınlarda film yapıştırıcıların kısaca ısıtılması ile yapılır. Pratik olarak, herbir honeycomb hücresine sıcak prob ile yapıştırıcıya nüfuz ettirerek reticulation (ağ biçiminde oluşma) hızlandırılabilir. Bu olay özellikle akustik panellerin tamirinde oldukça önemlidir.



Şekil 2.15 Reticulation (Ağ Biçiminde Oluşma) [4, s 14]

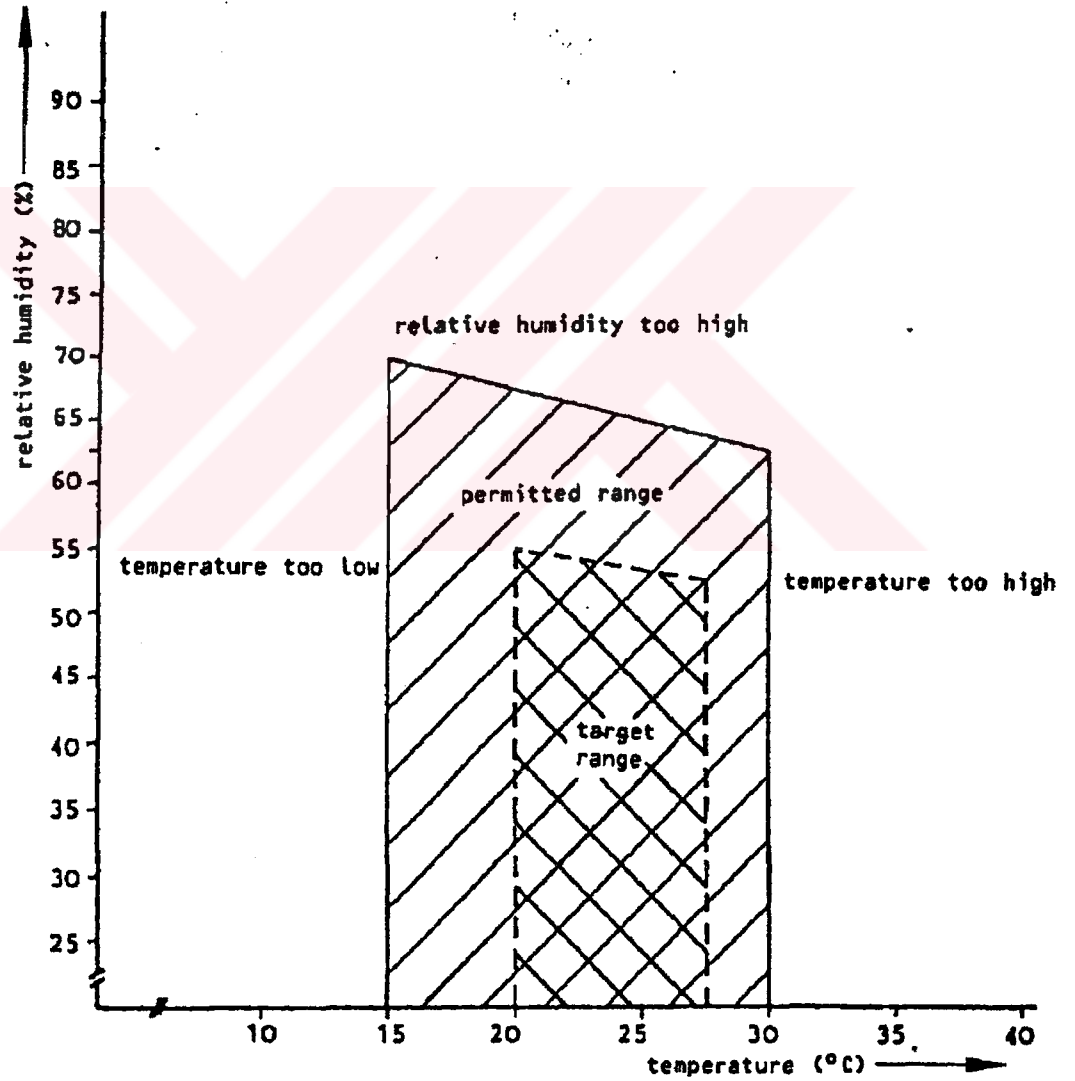
2.3.4. Montaj

Yapıştırılacak parçaların kuruma sıcaklığına erişinceye kadar (yani yapıştırıcının kuruma sıcaklığına erişinceye kadar), yapıştırıcıların akma ve erime ihtimalleri vardır. İyi bir yapışma elde etmek için birleştirilecek parçaların, yapıştırıcı sertleşinceye kadar hareketsiz, dengeli ve hiçbir gerilmeye maruz kalmadan beraber olarak sabitlenmesi gerekir. Bu, gereken imalat oranına, yapışacak parçaların tipine ve yapıştırıcının formuna bağlıdır. Ayrıca yapışma işleminin yapıldığı oda şartları da çok önemlidir. İyi havalandırılan, sıcaklık, basınç ve nem gibi değerleri sabit ve düşük toz oranına sahip oda şartları aşağıda verilen şekil 2.16 yardımıyla elde edilir.

Yapışma işlemi çeşitli aparatlar kullanarak değişik yöntemler aracılığıyla yapılabilir.

2.3.4.1. Hidrolik / Pnematik Basınç ile Basınçlandırılan Isıtılmış Levhalar

Bu yöntem sandviç panel gibi geniş düz yüzeye sahip parçalar için oldukça uygundur. Isıtma genellikle uygun bir ekipman, otomatik kuruma devirlerine programlanabilen makinelerin yardımı ile ısıtılmış yağ, hava akımı veya elektrik kullanılarak ısıtılan levhalar ile yapılır. İlave aparat kullanılarak, açılı ve eğrisel yapışmalar da bu yöntem ile yapıştılır.



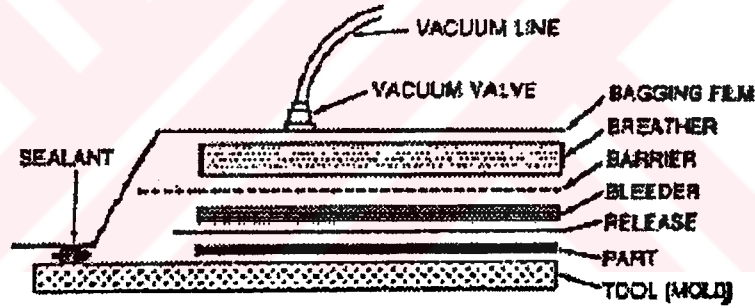
Şekil 2.16 Yapışma İçin Gerekli Oda Şartları [3]

2.3.4.2. Sabit Aparatlar

Çeşitli bükümlere sahip karmaşık parçaların yapışmasında, yaylanabilen mengenelerden oluşan sabit aparatları kullanmak gerekir. Bu sabit aparatlar, yayları ile yapışma parçalarına basınç uygulayarak parçaların fırın içinde, hareketsiz ve dengeli olarak sertleşmesine izin verir.

2.3.4.3. Vakum Torbası

Genelde kompozit parçaların imalinde iki yöntem kullanılır. Birincisi ıslak metod, ikincisi ise prepreg metodudur. Her iki metod ile kompozit parça imalatında vakum torbası vazgeçilemez bir ekipmandır.



Şekil 2.17 Vakum Torbası [6, s 9]

Islak metod yöntemi, ilk modern kompozit parçaların imalatında kullanılan tekniktir. Bu yöntem de, fiberler önceden hazırlanmış bir kalıba serilerek, üzerlerine fırça ile reçine emdirilir. Böylece hazırlanan ilk katın üzerine parçada istenilen kalınlığı sağlayacak şekilde diğer katlar serilir ve sertleşmeye bırakılır. Sertleştirme işlemi, çoğu zaman oda sıcaklıklarında gerçekleştirilir. Bu yöntem genelde cam elyafı polyesterden üretilen kompozit parçaların imalinde kullanılır.

Kompozit parça imalinde kullanılan prepreg metodu, oldukça basit ve hızlı bir methodur. Yöntemin basit olmasından kaynaklanan bazı avantajları vardır. Örneğin reçine önceden fibere emdirildiğinden imalat esnasında fiberin kullanımı

son derece kolaydır. Islak metod ile kompozit parça imalinde, reçinenin fiberi ıslatabilme özelliği iyi olmayabilir. Bundan dolayı reçinenin kalınlığının ayarlanması oldukça zordur. Bu da sertleşme sonrası kompozit parça üzerinde çok kalın yada çok ince bölgelerin oluşmasına neden olur. Prepreg metodu ile kompozit parça imalinde böylesine bir dezavantaj yoktur.

Eğriliğe sahip yada düz parçaları sıcak hava ile yada fırında sertleşmesi esnasında vakum uygulamanın iki büyük amacı vardır. Birincisi yapışmayı hızlandırmak, ikincisi ise yapışan katlar arasında yapıştırıcının sertleşmesi esnasında oluşan hava kabarcıklarını gidermektir. Yapıştırılan yüzeyler hava çantası denilen çantalar içine alınarak vakum yapılır. Çok yaygın bir yöntemdir.

İşlem gereği bir zorunluluk olmamasına karşılık parçayı sertleşme esnasında vakum torbalarına alarak ve parça içerisindeki hava kabarcıklarının vakum ile emilmesi, katların daha iyi yapışmasını sağlar. Bu da imal edilen kompozitin kalitesini artırır. Gerçekte vakum torbası kullanmanın amacı budur.

2.3.4.4. Basınçlı Fırın (Autoclave)

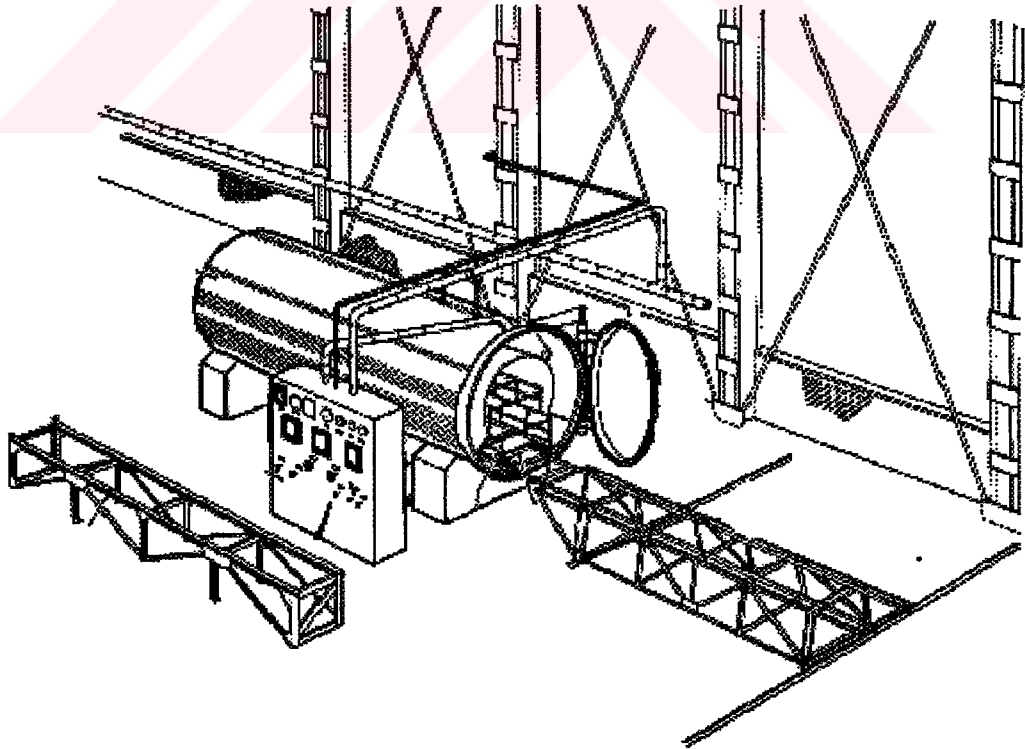
Büyük, karmaşık ve eğriliğinden dolayı yüksek basınç gerektiren parçalar, basınçlı fırın aracılığıyla sertleştirilir [6]. Aynı anda birkaç değişik yapışma birleşmeleri basınçlı fırın içine konulabilir. Basınçlı fırın pahalı bir alettir. Basınçlı fırında sertleştirme süresi göreceli olarak düşer. Genel olarak bir basınçlı fırın sistemi, basınçlı bir kabin içerisinde önceden belirlenen bir program çerçevesinde karmaşık kimyasal reaksiyonların oluşmasına imkan kılar. Son yıllarda gerek malzeme gerekse de proseslerdeki gelişme sonucu 760 °C ve 6900 KPa'ya kadar dayanıklı basınçlı fırın sistemleri geliştirilmiştir. Bir basınçlı fırının belli başlı sistemleri; basınca dayanıklı bir kap, basıncı sağlayan akışkanın ısıtılması ve bu gazı uniform olarak basınçlı fırında dağıtabilmesi için gerekli kaynaklar, akışkanı basınçlandırmak, vakum torbası içerisindeki parçaya vakum uygulayabilmek ve operasyon parametrelerini kontrol edebilmek için gerekli alt sistemlerdir.

Basınçlı fırında sertleştirilecek parçalar için genellikle metal veya kompozit kalıplar kullanılır. Bu kalıpların basınçlı fırın içerisindeki basınç ve sıcaklığa

dayanıklı olmaları zorunludur. Basınçlı fırın, sadece vakum ile sağlanabilecek basıncın çok üzerinde bir basınç sağladığından basınçlı fırında pişirilen parçaların kalitesi, hem basınçlamanın iyi olması açısından hem de parçada herhangi bir boşluk kalmamasından dolayı çok daha iyidir.

Günümüzde 8 m çapında ve 30 m uzunluğunda basınçlı fırınlar mevcuttur. Basınçlı fırın satın alınması ve işletilmesindeki en önemli parametreler, basınçlı fırın içerisindeki ısı akışının çok düşük toleranslar içerisinde her yerde aynı olabilmesi, izolasyonun kalitesi, iyi ve kolay işletilebilir kontrol sistemi ve özellikle yüksek sıcaklık ve basınçta yangın riskini azaltıcı sistemlerin varlığıdır. Basınçlı fırının ısıtılması elektrik, doğalgaz, kızgın madeni yağların sirkülasyonu ve buhar ile gerçekleştirilebilir.

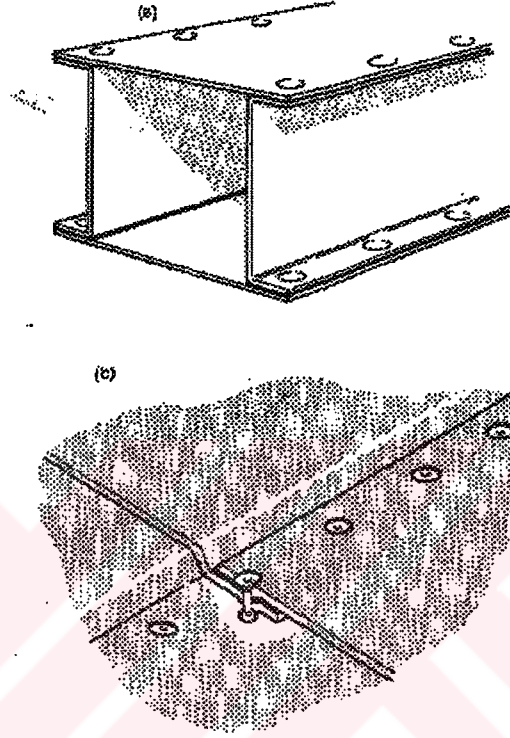
Basınçlı fırında sertleştirilmiş parçalar, basınçsız pişirilen parçalara nazaran çok daha kaliteli olduklarından basınçlı fırın özellikle havacılık sanayinde kompozit parça üretiminde ve metal / metal yapıştırırmada vazgeçilmez bir ekipman durumuna gelmiştir.



Şekil 2.18 Basınçlı Fırın (Autoclave) [5, s 74]

2.3.4.5. Kaynak ve Perçin Yardımı ile Yapışma

Çok geniş ve birçok parçadan oluşan yapılar için yapışma ile birlikte yapışma hattı boyunca spot-kaynağı yada perçinleme en iyi yöntemdir.



Şekil 2.19 Yapışmada Yapıştırıcı İle Birlikte Kaynak (a) ve Perçin (b) Kullanılması [4, s 15]

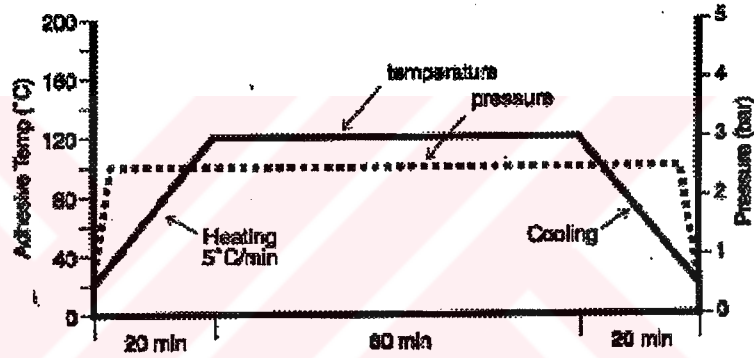
2.3.5. Sertleştirme

Yapıştırıcılar tipik olarak oda sıcaklığında sıvı halde yada sıvıya yakın olabilmeleri amacı ile, önce düşük molekül ağırlığına sahip olacak şekilde formüle edilirler. Yapışma işleminden sonra birleşmenin istenilen şekil ya da mukavemette olabilmesi için, yapıştırıcının sertleşmesi gerekir.

Sertleştirme işlemi, yapıştırıcının basınç ve sıcaklık altında kimyasal olarak çapraz bağ oluşturmaktır. Şüphesiz sertleştirme parametreleri, nihai parçada istenen optimum özelliklere göre belirlenir. Kompozit parça imalatında ve metal yapıştırırmada en önemli parametreler zaman, sıcaklık, basınç, ısıtma hızı, vakum ve soğutma hızıdır.

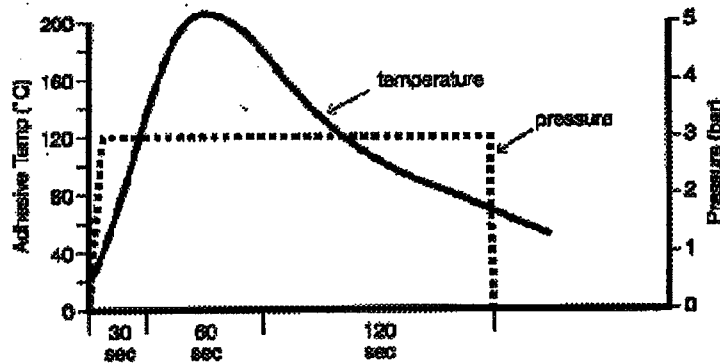
Yapıştırıcıyı sertleştirmek için gereken zaman ve sıcaklık, seçilen yapıştırıcı için verilen kuruma bilgilerine bakılarak bulunabilir. Şekil 2.20’ de tipik bir kuruma eğrisi verilmiştir.

Şekil 2.20’de görülen artış oranı (yani, gereken kuruma sıcaklığına, yapışma sıcaklığının çıkması için gerekli olan oran) genelde 1-5°C/dakika’dır. Eğer bu orana dikkat edilmez ise, yapışma hattı boyunca oluşan termal gerilmelerden dolayı yapışmada ayrılmalar ve yaşlanma olabilir. İstenilen kuruma sıcaklığına erişildikten sonra bu oran azaltılmalıdır. Sertleşme sona erdikten sonra, parçalar soğuyuncaya kadar parçalar üzerindeki basıncın devam etmesi yapışma açısından iyi sonuç verir.



Şekil 2.20 Kuruma / Basınç Eğrisi [4, s 16]

Çok yüksek miktarlarda imal edilen küçük yapışma birleşmelerinde ise, modifiye edilmiş kuruma eğrileri kullanılır. Şekil 2.21’de küçük kompozit parçalarının imalinde kullanılan, kısa zaman için yüksek sıcaklık uygulama esasına dayanan modifiye edilmiş kuruma eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.21 Modifiye Edilmiş Kuruma / Basınç Eğrisi [4, s 16]

Prepreglerin sertleşmesi ise, hidrostatik basıncın sabit tutularak sıcaklığın belirli bir hızda artırılma esasına dayanır. Yapıştırıcının vizkozitesi, sıcaklık artışı ile azalır. Bu azalışın nihai parça üzerinde şu tip olumlu etkileri vardır:

- a) Yapıştırıcının içerisindeki su ve havanın uzaklaştırılmasına yardım eder.
- b) Sertleşme esnasında yapıştırıcının önce sıvı hale gelmesi, imalatla kullanılan istenmeyen solventlerin uzaklaştırılmasına yardım eder.
- c) Kompozit parçanın optimum performans göstermesi için yapıştırıcının her bir fiberi kaplaması çok önemli ve kritik bir faktördür. Sertleşme esnasındaki düşük vizkozite bu işleme yardımcı olur.
- d) Nihai parçada istenen reçine oranı tipik olarak başlangıçtaki prepreg' den % 10-20 daha azdır. İşte bu fazla reçine, sertleşme esnasında reçinenin düşük vizkoziteye sahip olduğu anda kolaylıkla emilir.

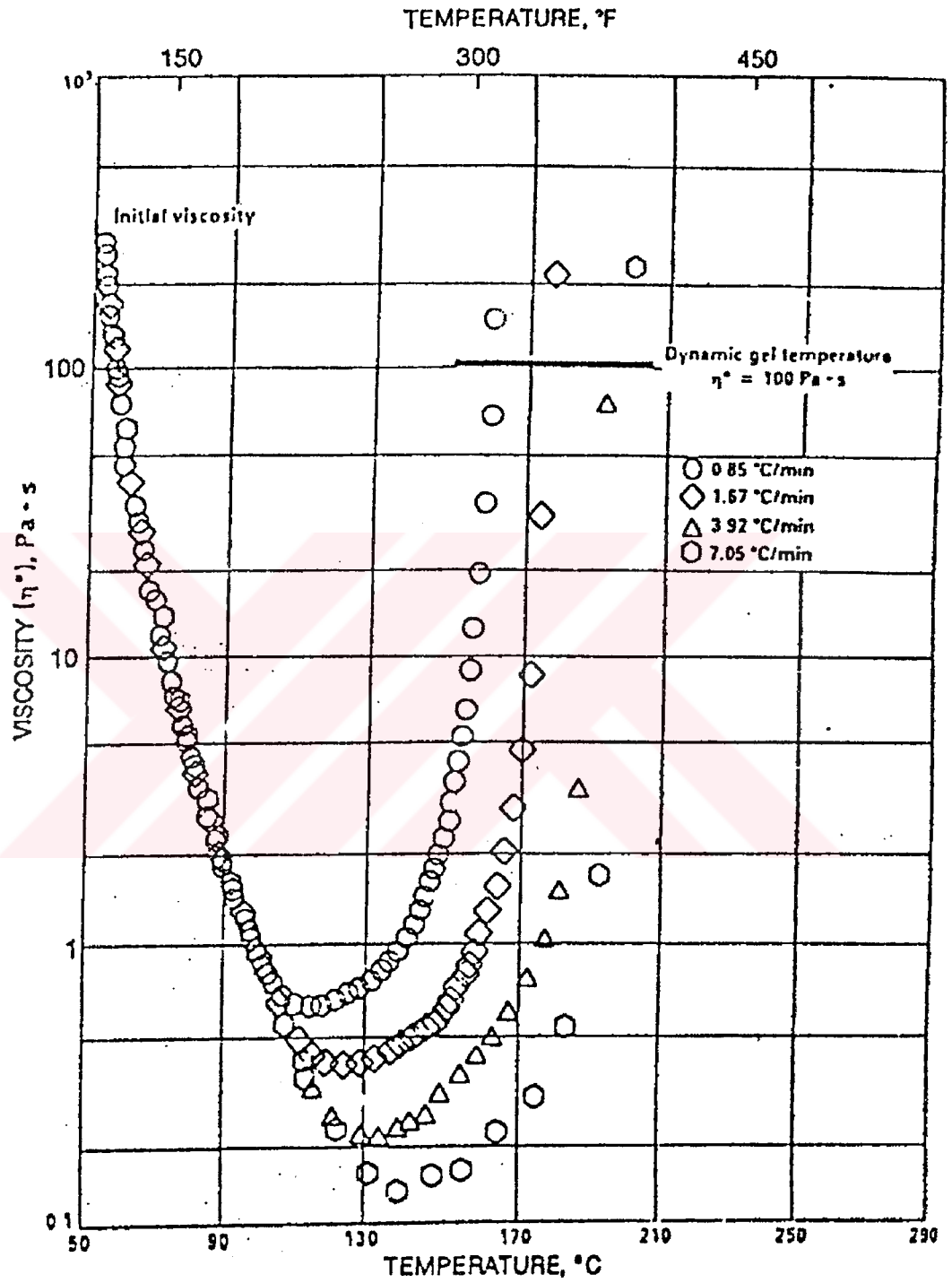
Isıtma süresinin sonuna doğru diğer bir deyimle sertleştirme sıcaklığına yaklaştıkça, reçine moleküllerinin molilitesi yavaş yavaş başlayan çapraz bağlanmadan dolayı azalır. Sonuçta yeterli sayıda çapraz bağlar oluşması ile jelleşme başlar ve artık parça sıvı halden katı hale gelmeye başlar. Reçinenin vizkozitesi artık artmaya başlamıştır. İşte bu faz değişikliğinin olduğu sıcaklığa, dinamik jelleşme sıcaklığı (Tgel) denir. Şekil 2.22 'de gösterildiği gibi, reçinede yukarıda anlatılan değişiklikler ısıtma hızına bağlıdır.

2.3.6. Yapışmanın Test Edilmesi ve İncelenmesi

Yapışma işlemi sona erdikten sonra, yapışmanın kalitesini ve performansını görmek için, tahribatlı (Destructive) yada tahribatsız (Non-destructive) testler uygulanır. Ayrıca seri imalatlar için, First Article Inspection denilen ilk ürün kontrolü yapılır ve seri imalata devam edilir.

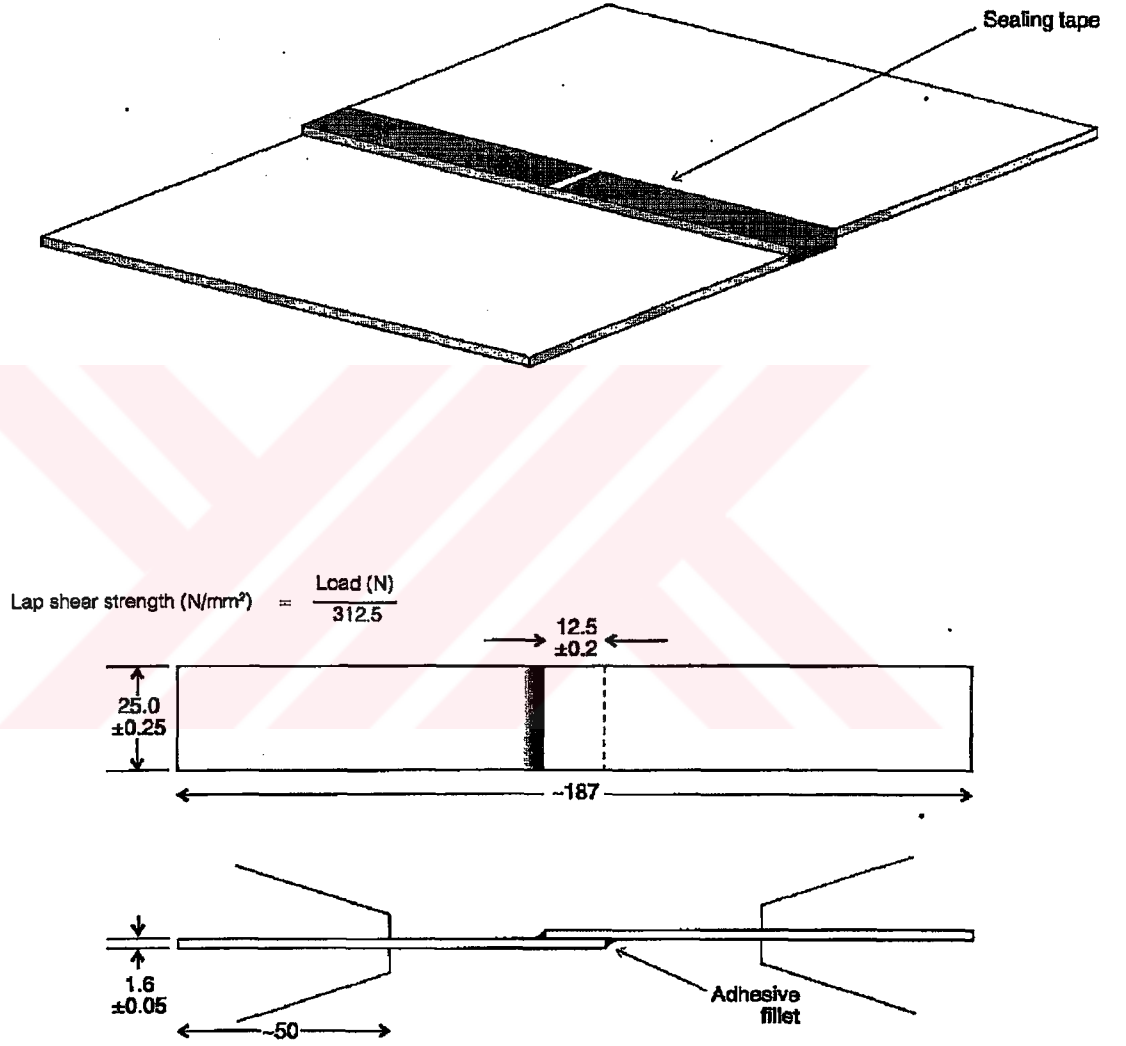
Tahribatsız testler, ultrasonik veya X-ray yöntemleri ile gerçekleştirilir. Bu yöntem ile yapışmada bozukluk ve ayrılmanın olup olmadığı kontrol edilir.

Tahribatlı testler de ise, yapışmanın istenilen mukavemet değerlerini karşılayıp karşılamadığı ve dayanıklı olup olmadığı kontrol edilir. Bu testler ise; çekme, basma ve ayrılma testleridir.



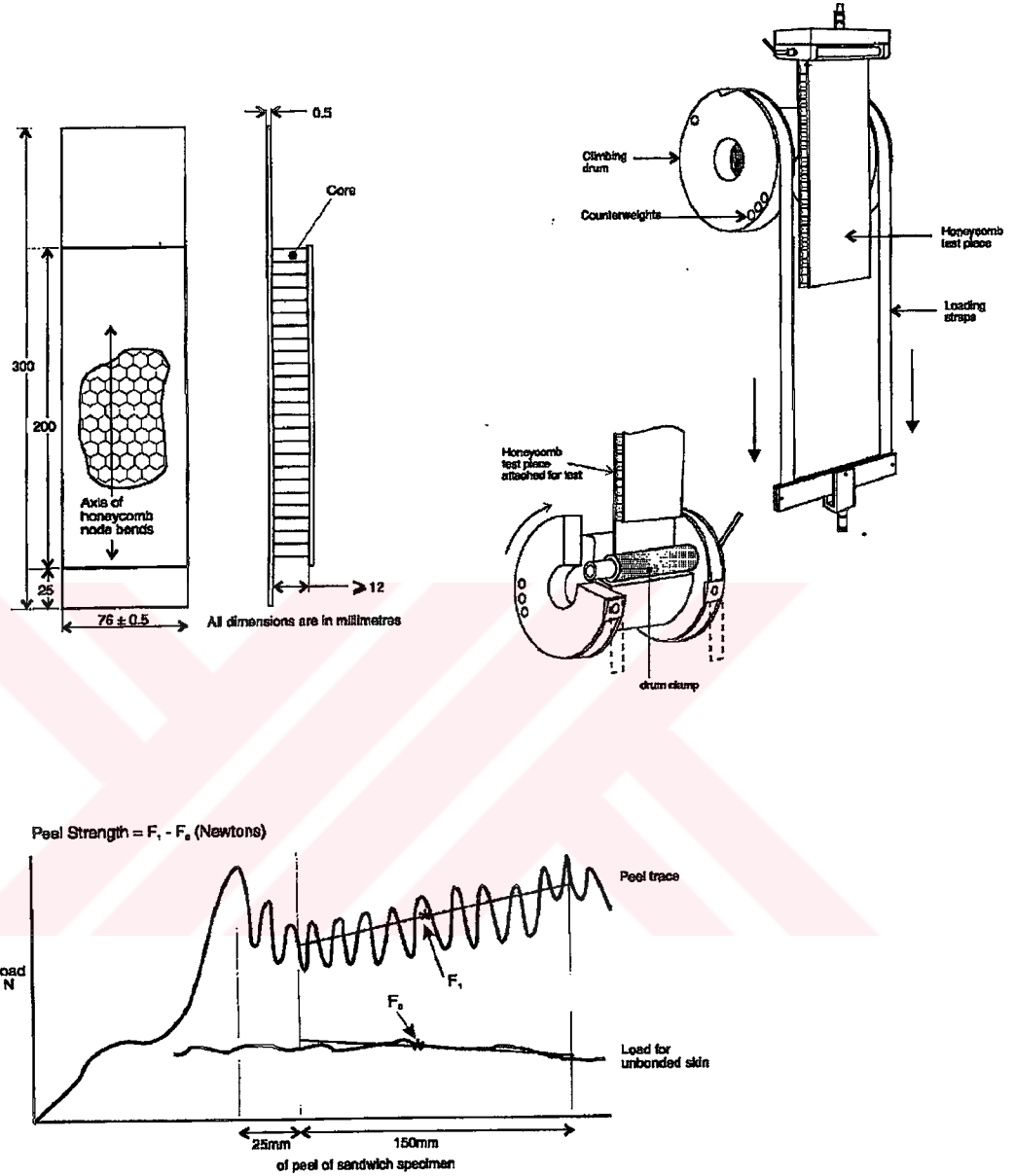
Şekil 2.22 Yapıştırıcının Sıcaklık / Vizkozite Eğrisi [6, s 11]

Şekil 2.23, yapışma birleşmesinin kayma gerilmesini bulma amacı ile yapılan testi gösteriyor. Test, yapışma birleşmesinin çekme yada basma gerilmesine maruz bırakılması ile yapılır.



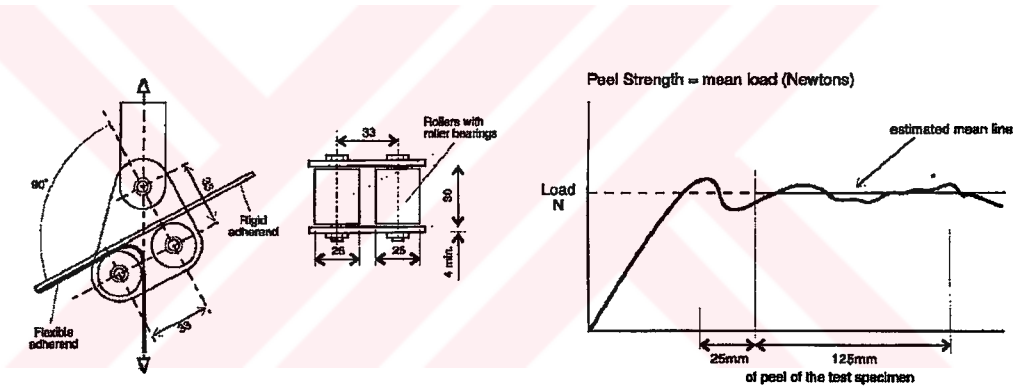
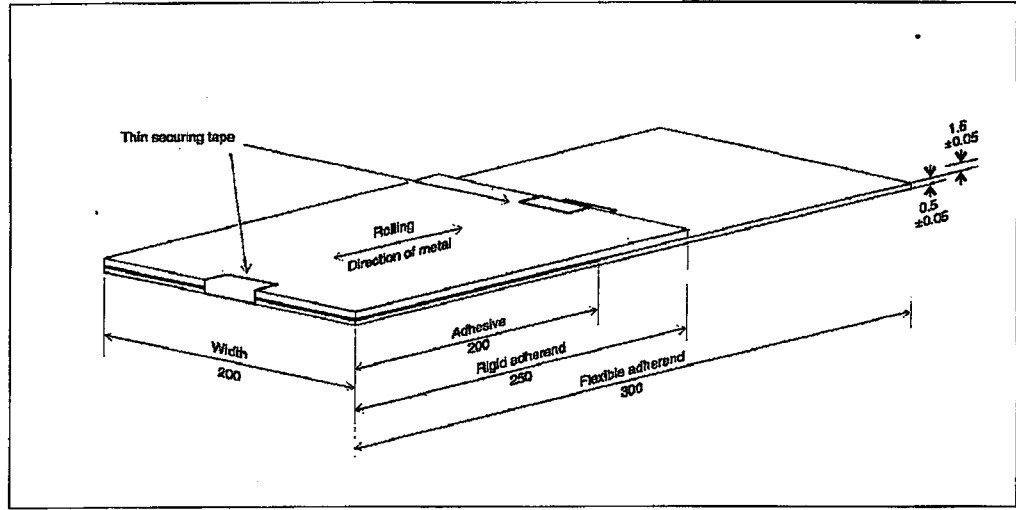
Şekil 2.23 Çekme / Basma Testi (Lap Shear Test) [4, s 21]

Şekil 2.24, Sandviç yapıların ayrılma gerilmesini bulma amacı ile yapılan testleri gösteriyor. Şekilden de görüldüğü gibi ayrılma mukavemeti, yapıştırılmış yüzeyleri ayırmak için gerekli olan kuvvetin, yapışmamış yüzeyleri soyamak için gerekli kuvvetinden çıkarılması ile bulunur.



Şekil 2.24 Sandviç Ayrılma Testi [4, s 22]

Şekil 2.25, metal / metal yapışma birleşmelerinde ayrılma mukavemetini bulmak için yapılan testi gösteriyor. Şekilden de görüldüğü gibi ayrılma mukavemeti, iki levhayı birbirinden ayırmak için uygulanan kuvvete eşittir.



Şekil 2.25 Metal / Metal Ayrılma Testi [4, s 23]

Yapışmada bazen istenilen sonuçlar elde edilmeyebilir. Bunun çeşitli sebepleri vardır. Tablo 2.5, yapışma birleşmesi için yapılan kontrol ve testlerden sonra istenilen dizayn özelliklerine (mukavemet ve dayanıklılık) erişilemediğinde, bunun muhtemel sebeplerini bulmak için kullanılan bir tablodur. Bu tablo, yapışma birleşmeleri için yapılan tahribatlı ve tahribatsız testler sonunda elde edilen verilere ve tecrübelerle göre hazırlanmış bir tablodur.

Tablo 2.5 Yapışmamanın Muhtemel Sebepleri ve Çözümleri

ARIZA	SEBEP	ÇÖZÜM
Yapıştırıcı yüzeye yapışmamış, çıplak yüzey elde ediliyor.	Yüzey ön işlemi iyi yapılmamış.	Yüzey ön işleminin doğru olup olmadığını kontrol et.
	Film yapıştırıcıların koruyucu tabakası sökülmüş.	Yüzey ön işleminden sonra parçaların lekelenmesini önle.
Kurumadan sonra yapıştırıcı hala yumuşak	Yapıştırıcı yanlış kurutulmuş.	Yapışmadan önce koruyucu tabakaları sök.
	Yapışma basıncı çok düşük.	Kuruma eğrisi boyunca uygulanan kuruma sıcaklığını kontrol et.
Yapışma hattı boyunca boşluklar ve hava kabarcıkları var.	Sabit basınç yok.	Basıncı artır.
	Sistem yanlış monte edilmiş.	Sabit basınç uygula.
Kenar yapışma hattı kavislenmiş yada düzgün oturmamış.	Yanlış jigging işlemi	Yapışmadan önce, ayrılma olup olmadığını ve parçaların doğru monte edilip edilmediğini kontrol et.
	Parçaların yapışma öncesi montajının doğru olup olmadığını kontrol et.	

BÖLÜM 3

YAPIŞMA İLE BİRLEŞME DİZAYNINA GENEL BAKIŞ

3.1. Giriş

Bu bölümün birinci kısmında, birleşmede yapıştırıcı kullanmanın avantajları, yapıştırıcı ile birleşmenin kısıtlamaları, yapışma birleşmelerinin form verilebilirliği ve yapıştırıcı kullanılarak imal edilmiş panellerin sızdırmazlığı hakkında bilgi verilecektir.

Bu bölümün ikinci kısmında ise, değişik gerilmelere maruz yapışma birleşmeleri kısaca tanıtıldıktan sonra, yapışma birleşmelerinin hangi esaslara göre dizayn edildikleri, normal ve yüksek sıcaklıklara maruz yapışma birleşmelerinde birleşme mukavemetinin nasıl değiştiği, yapışma uzunluğunu artırmanın yapışma birleşmeleri üzerindeki etkisi, yapışma ile birleşme dizaynında maximum kayma gerilmesinin önemi, yapışma birleşmelerinin yorulma mukavemeti, birleşen parçaların geometrisinin yapışma birleşmesinin mukavemetini nasıl etkilediği, yapışma birleşmelerinin nasıl iyileştirildikleri ve değişik yükler karşısında nasıl davrandıkları sırası ile incelenecektir.

3.2. Yapıştırıcı İle Birleşmenin Avantajları, Kısıtlamaları, Form Verilebilirliği ve Sızdırmazlığı

3.2.1. Yapıştırıcı Kullanmanın Avantajları

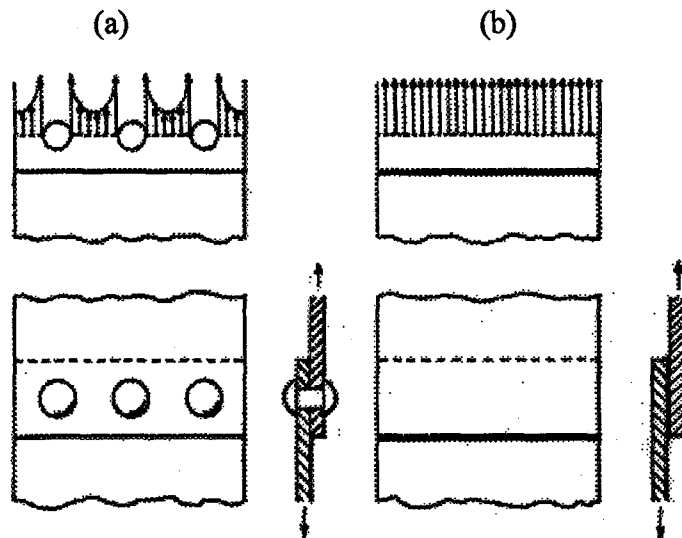
Yapıştırıcılar, uygun sertleştiriciler ile karıştırılarak ön işlemleri yapılmış yüzeylere uygulandıkları zaman, kayma gerilmesi olarak 10.000 Psi'ya kadar

yapışma mukavemetini karşılayabilir [2]. Yapıştırıcı ile yapışmanın gerçek mukavemeti, kullanılan malzemeye, yapışan parçaların geometrisine, çevre şartlarına ve yüzey ön işlemlerine bağlı olarak değişir.

Yapışma süreklidir [9]. Yapışma birleşmeleri yükleme esnasında, uniform gerilme dağılımı oluşturur. Birleşmede, kaynak yada bağlantı elemanları kullanılarak birleştirilmiş parçaların birleşme yüzeyinde oluşan bölgesel gerilme konsantrasyonlarından sakınılır.

Bağlantı elemanları kullanılarak yapılan birleşmelerde açılan delikler, çatlakların başlama merkezleridir. Gerilmeler deliklerin etrafında toplanmıştır. Gerilmenin en fazla olduğu delik etrafında çatlak oluşabilir. Ayrıca yorulma sonucu çatlakların ilerlemesi, bağlantı elemanları ile yapılan birleştirmelerde, yapıştırıcı ile birleşmeye göre daha hızlı ilerler. Yapıştırıcı ile yapışmada bağlantı delikleri olmadığı için, korozyona karşı yapıyı daha iyi korur. Korozyon etkisini azaltır. Yapıştırıcı ile yapışma, bağlantı elemanları kullanarak yapılan birleştirmeye göre, işlem sayısını azaltır.

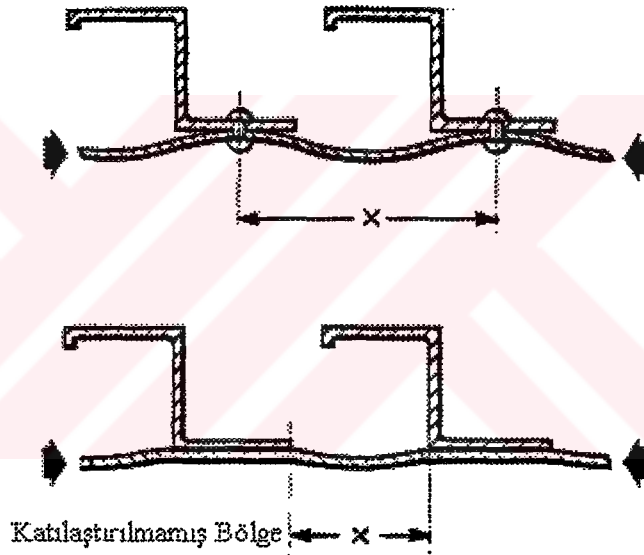
Şekil 3.1 a, bağlantı elemanları kullanılarak yapılan birleşmelerde, birleşme uzunluğu boyunca oluşan gerilme dağılımını göstermektedir. Spot kaynağı kullanılarak yapılmış birleşmelerde de şekil 3.1 a' da gösterilen dağılıma benzer bir dağılım oluşur. Şekil 3.1 b'de ise, yapıştırıcı ile birleştirilmiş birleşmelerde, yapışma hattı boyunca oluşan gerilme dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Yüke Maruz Yapılarda Gerilme Dağılımı [8, s 2]

Sürekli kaynatma ile yapılan birleşmelerde gerilme dağılımı uniform olmasına rağmen, ısıtmadan dolayı malzemenin mukavemetinde değişim ve termal gerilmeler meydana gelecektir. Yapıştırıcı ile yapışma yüksek bir sıcaklık gerektirmediğinden malzeme mukavemetinde değişiklik olmaz.

Yapıştırılmış parçalar yük altında daha uzun ömüre sahiptirler. Yapıştırıcı ile yapışma katı yapı oluşturur. Artırılmış katılık gerekmez ise, istenilen katılık devam ederken yapının ağırlığı azaltılabilir. Şekil 3.2; yapıştırıcı ile birleşmenin, bağlantı elemanları kullanılarak yapılan birleşmeye göre katılık etkisi açısından daha iyi olduğunu gösteriyor. Yapıştırılmış yapılar daha fazla katılığa sahiptirler ve yükleme burkulma oluşmadan % 30 ile 100' e kadar artırılabilir.



Şekil 3.2 Yapışma ve Perçinleme Sisteminin Karşılaştırılması [8, s 2]

Yapıştırıcı ile yapışma görüş açısından daha düzgün görünüş sağlar. Yapışmada, bağlantı elemanlarının geometrisinden kaynaklanan başı ve somunu ile kaynaktaki kaynak izleri gibi istenmeyen görüntüler yoktur.

Başka bir yol ile birleştirilemeyen yapılar için, yapıştırıcı kullanma dışında hemen hemen başka bir seçenek yoktur. Farklı iki malzemenin birleşmesine izin verir. Yapıştırıcılar farklı malzemelerden oluştukları için, farklı malzemelerin farklı özelliklerini içerirler. Buna en iyi örnek kompozit yapılardır [8].

Yapıştırıcı ile yapışma aynı zamanda sızdırmazlık sağlar. Yapıştırıcı ile yapışma yüzeyler arasında, elektriksel olarak izolasyon sağlayabilir. Yapıştırıcı ile

birleşme, iyi bir sönümlene özelliğine sahiptir. Bu sönemleme kapasitesi ses ve titreşim azaltılması açısından oldukça yararlıdır.

Sonuç olarak yapısal parçalarda yapıştırıcı ile kullanmanın avantajları, şu şekilde özetlenebilir:

- a) Azaltılmış üretim maliyeti
- b) Azaltılmış bakım maliyeti
- c) İyileştirilmiş yapısal eti (yük dağılımı ve daha hafif yapı)

3.2.2. Yapıştırıcı İle Birleşmenin Kısıtlamaları

Yapıştırıcılar bilindiği gibi polimerler, plastikler ve sentetik reçinelerdir. Bu tip malzemeler çeşitli sınırlamalara sahiptirler. Metaller kadar mukavemetli değildirler. Isı artırımıyla yapışma mukavemeti azalır ve yapıştırıcıların uzama özellikleri, elastikten plastiğe doğru hareket eder. Genellikle sıcaklık değişim değerleri, 70 ile 200°C arasındadır. Bu geçiş sıcaklığına sadece belirli yapıştırıcılar sahiptir. Yapışma birleşmelerinin çevreye direnci, içeriğindeki polimer malzemelere bağlıdır.

Çoğu yapıştırıcılarla maximum yapışma mukavemeti, bağlantı elemanları kullanılarak yada kaynak kullanılarak elde edilen mukavemet gibi anında elde edilmez. Maximum yapışma mukavemeti elde etmek için sertleşme süresini beklemek gerekir.

Yüzeyler yapıştırıcılar ile tamamen ıslatılamaz ise, yapışmanın kalitesi ve mukavemeti ters olarak yapışmayı etkileyebilir. Devamlı iyi sonuçlar elde etmek için, ilk defa yada alışılmamış işlemleri sürekli kontrol etmek ve tekrar tekrar yapmak gerekir. Kötü olarak yapılmış yapışmayı sonradan düzeltmek hemen hemen imkansızdır. Yapışma ile birleşmelerini söküp, tekrar tamir etmek oldukça zordur.

Yapıştırıcı kullanılarak yapılmış birleşmelerde kayma gerilmesi olarak maximum 10.000 Psi değerine ulaşılırken, bağlantı elemanları yada kaynak kullanılarak yapılan birleşmelerde oldukça yüksek değerlere ulaşılabilir.

Yapıştırıcı ile yapışmada birleşecek parçaların yüzey temizliği, ön işlemleri ve çevre şartlarının oldukça iyi olması gerekir.

3.2.3. Yapışma Birleşmelerinin Form Verilebilirliği

Yapışma birleşmelerine sertleşmeden sonra soğuk form verilebilir. *Redux* yapıştırıcı ile yapıştırılmış alüminyum levhaların mukavemetinde azalma olmaksızın sertleşme sonrası form verilebilmiştir [5]. Yapışmış tabakalar soğuk şekil verme (bükme, uzatma ve kademelendirme) işlemine tabii tutulduktan sonra mukavemeti ile ilgili birçok test yapılarak çeşitli sonuçlar elde edilmiştir:

a) Yapışma birleşmelerinin sertleşme sonrası uzatılması

Ayrılma gerilmesine maruz kalacak yapışma birleşme test örnekleri, sertleşmeden sonra % 5' e varan uzamalara maruz bırakıldı. Bu uzamış örnekler ile yapılan ayrılma testlerde, birleşme mukavemetinde azalma olmamıştır.

b) Yapışma birleşmelerinin sertleşme sonrası bükülmesi

Sertleşme sonrası bükülmüş yapışma birleşmeleri ile yapılan yerel burkulma testlerinde kıymete değer bir ezilmeye, yapışma birleşmeleri kopma olmadan dayanabilmiştir. Sertleşme sonrası bükülmüş yapışma birleşmelerinden alınan dar ayrılma test örnekleri ile yapılan testlerde ayrılma mukavemetinde kritik olmayan azalmalar olmuştur.

Bu testler, düz yapışmalardan sonra soğuk şekil verme ile eğrili yapışmaların elde edilebildiğini ve yapışma mukavemetinde iyi olduğunu göstermiştir.

3.2.4. Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Panellerin Sızdırmazlığı

Kanatlardaki integral yakıt tanklarında yapışma ile toplam katılığı artıran takviyelerin kullanımı, delik sayısının azalması ve artırılmış lokal katılıktan dolayı yakıt kaçağı problemlerini azaltmıştır.

Uçakların bakımında karşılaşılan en büyük problemlerden biri de, yakıt kaçağıdır. Çünkü uçaklarda integral tank adı verilen ve mevcut yakıt alanabilecek

yerlerin (kanat, gövde, kuyruk) doğrudan yakıt tankı olarak dizayn edilememesidir. Mevcut yapı çeşitli sızdırmazlık sağlayan *sealant* adı verilen yapıştırıcılar ile sızdırmazlığı sağlanarak yakıt alınabilir hale getirilir. Bu yüzden uçaklarda oluşabilecek yakıt kaçaqlarının yerlerinin tespiti ve tamiri oldukça zordur. Kanat dizaynında perçinleme yerine yapıştırıcı kullanımı, yakıt kaçağı problemlerini azaltır.

Yapıştırıcı ile birleştirilen paneller, düşük kuruma basıncı ile yapıştırılırsa yapıştırıcının gözenekli yapısından dolayı bazı yakıt kaçaqları olabilir. Bununla beraber yapışmada yüksek kuruma basıncı kullanılmasıda, ayrılma mukavemetinde azalmaya neden olur. Bu amaçla *Saab* uçağının integral yakıt tankının dizaynında perçin ve yapıştırıcı kullanılarak mükemmel yakıt sızdırmazlık sağlanmıştır.

3.3. Yapışma Birleşmelerinin Maruz Kaldığı Gerilmeler

Yapışma, geniş alanlar üzerinde yükün daha uniform dağıtılması amacıyla, yapıştırıcının avantajlarını kullanarak birleşme dizaynında önemli bir rol oynar. Yapışma ile birleşme dizaynında genel kural; yapışma alanının mümkün olan en büyük alan yapmak ve yapışma birleşmesinin taşıyacağı yüklerin yönünü kayma gerilmesi yönünde olacak şekilde birleşmeyi dizayn etmektir [2].

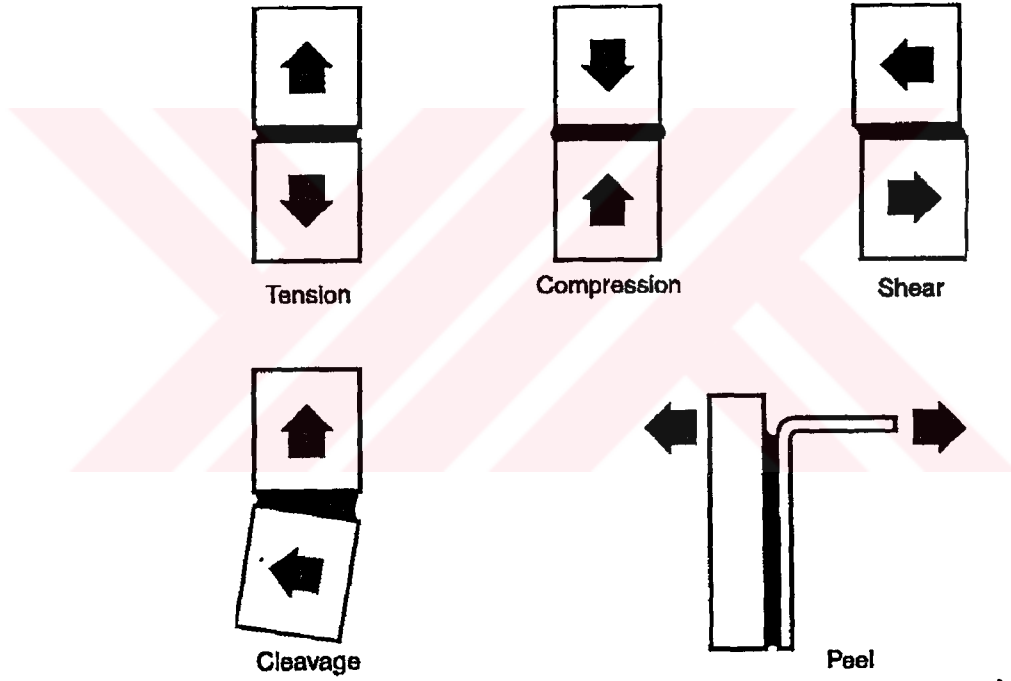
Birçok tabakadan oluşan yapılar için, birleşmenin konfigürasyonu ve performansı açısından yapışma birleşmesi dışında başka bir seçenek hemen hemen yoktur. Yapışma birçok tabakadan oluştuğundan herhangi bir tabakada oluşabilecek çatlak, yapışma sayesinde tek bir tabakada sınırlanır. Yapışma ile birleşmede toplam katılık artması, birleşmede en kritik yükler olarak nitelendirilen burkulma ve yerel burkulma mukavemetine karşı birleşme mukavemetini artırır.

Yapışma birleşmeleri en az iki bileşenden, yapıştırıcıdan ve birleşme yüzeyinden oluşur. Yapışma birleşmesinin kabul edilebilir bir performansı ve ömrü, birleşen parçaların mekanik özelliklerine, dayanıklılığına, tekrar üretilebilirliğine, uygun birleşme dizaynına ve birleşme yüzeylerin kimyasal ön işlemine bağlıdır.

Yapışma ile birleşme dizaynında bir başka önemli konuda, yapışmanın test edilmesidir. Yapışma birleşmesinin performansını ve ömürünü tespit etmek için bu testlere ihtiyaç vardır.

Yapışma birleşmeleri genel olarak kayma, basma, çekme, ayrılma ve yarıma yüklerine maruz kalırlar. Yapışma birleşmeleri çekme, kayma, ve basma yüklerine karşı oldukça mukavemetli olmalarına rağmen, ayrılma ve yarıma yüklerine karşı zayıftırlar.

Yarılma; kuvvetlerin birinin yapışma düzlemine dik, diğerinin paralel olduğu yükleme tipidir. Yarılma, yapışmada istenmeyen bir yükleme tipidir. Genelde yarılma yükünün olduğu dizaynlarda yapışma ile birleşme tercih edilmez.

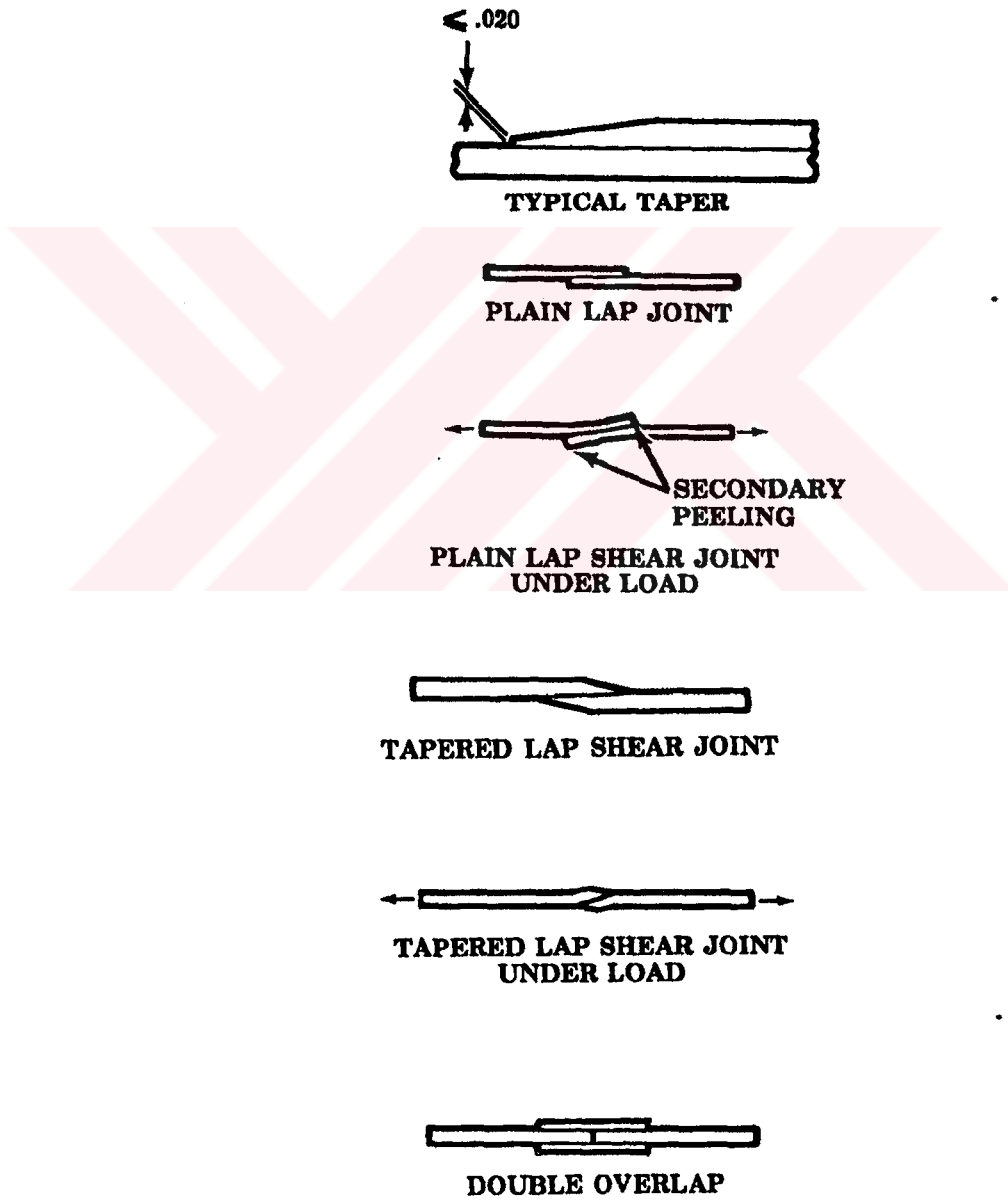


Şekil 3.3 Yükleme Şartları [8, s 4]

Ayrılma, yapışma yüzeyine kuvvetlerin yaklaşık olarak dik uygulandığı yükleme tipidir. Ayrılma, yapışmada istenmeyen bir yükleme tipidir. Bununla beraber ayrılma, yapışma kenarında çok ince bir hat ile sınırlanır. Ayrılma oluştuğu zaman arta kalan yapışma alanı, birleşme mukavemetine hiçbir katkıda bulunmaz. Birleşmedeki artırılmış genişlik, ayrılma yüküne direnci artırabilir. Bağlantı elemanı gibi mekanik bir stop yada takviye kullanımı ile yapışma birleşmesinin ayrılması

engellenebilir. Kısacası ayrılmanın başladığı noktalarda önlem alınması gerekir. Ayrılma gerilmesi, yapışma uzunluğunun artırılması ile dağıtılabilir.

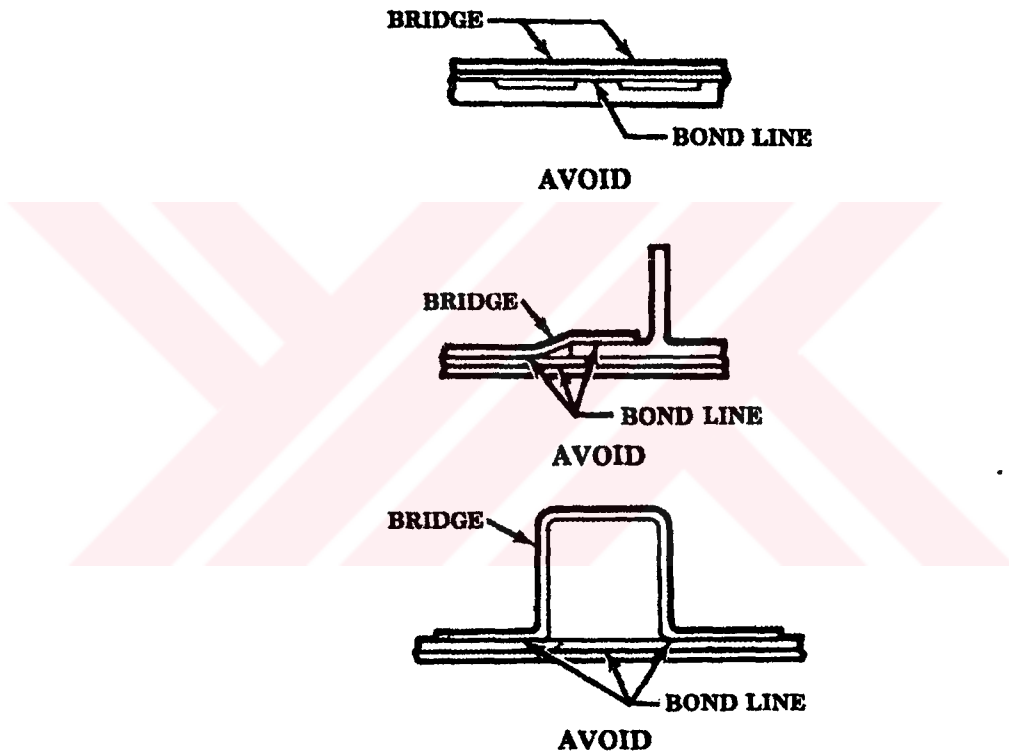
Doğrudan ayrılma yüklerine maruz kalmayan çekme, kayma ve basma gibi değişik yüklere maruz yapışma birleşmelerinde, yük altında ikincil ayrılma yükleri oluşur. İkincil ayrılma yükleri, yapışma birleşmesinin dizaynında istenmeyen bir başka yük tipidir. Yapışma birleşmesinin basamaklandırılması yada yapışma birleşmesinin yük yollarının balans edilmesi ile ikincil ayrılma yükleri azaltılabilir.



Şekil 3.4 Basamaklandırılmış Yapışma Birleşmeleri ve İkincil Ayrılma Yükleri [2, s 58]

Yapışma birleşmelerinde yapışma hattı boyunca yük dağılımının uniform olması istenir. Yapışma birleşmelerinde yapışma hattı boyunca köprü, boşluk ve setler yük dağılımını olumsuz yönde etkiler. (Bknz şekil 3.5)

Birleşme dizaynında benzer olmayan malzemeler, çoğu zaman yapıyı optimize etmek için biraraya gelerek yapışma birleşmelerini oluştururlar. Ama uzun süreli benzer olmayan malzemelerin birleşmesinden oluşan temaslar, yapışmanın termal yapısını etkiler. Bu yapışma birleşmeleri dizaynı açısından oldukça önemli bir kriterdir.



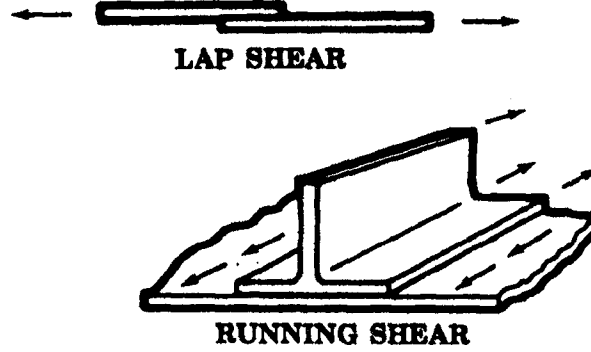
Şekil 3.5 Yapışma Birleşmelerindeki Köprüler [2, s 6]

Kısacası yapıştırıcılar, mukavemet açısından iki malzemeyi birleştiren ve birleşme yüzeyindeki kayma gerilmesi ile yükleri bir parçadan diğer parçaya transfer ederek taşıdığı yüklere göre çok farklı tipte yapışma birleşmelerini oluştururlar. Genel olarak bu yapışma tipleri şu şekilde özetlenebilir:

- a) Çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri
- b) Basma gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri
- c) Ayrılma gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri

3.3.1. Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri

Yapışma birleşmelerinin en yaygın tipi, yapışma düzleminde yükün transfer edildiği çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmesidir. (Bknz şekil 3.6)



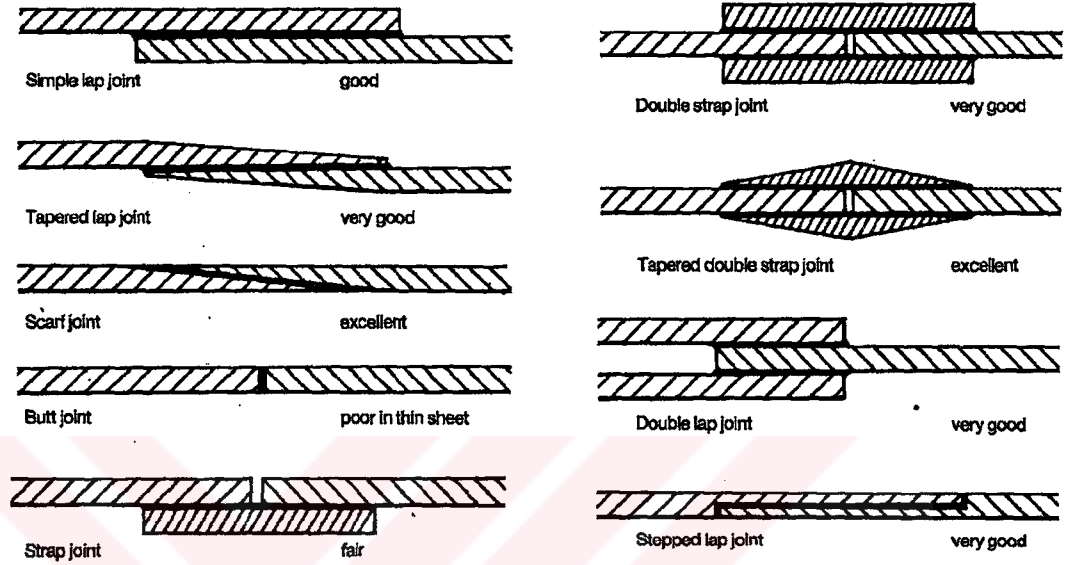
Şekil 3.6 Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri [2, s 7]

Çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmelerinin birim mukavemeti, kullanılan yapışma sisteminin temel karakteristiklerine ilave olarak birleşme yüzeylerinin uzaması ve yapışma uzunluğunun fonksiyonu olarak değişir.

Birleşmede, yapışma uzunluğunu artırma, belirli bir değere kadar azalan oranda birim mukavemeti artıracaktır. Bu değerin ötesinde, yapışma uzunluğunu artırma birleşme mukavemetini artırmaz. Yapışmalardaki daha kalın ve daha katı yapıştırıcılar, yapışma birleşmesinde oluşan kayma gerilme konsantrasyonlarını azaltıcı yöndedirler.

Çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmelerindeki gerilme dağılımını daha uniform hale getirmek için, yapışma birleşmesinin basamaklandırılması yada yapışma birleşmesinin modifikasyonu gerekir. Yapışma hattına zıt uzamayı dengelemek için yapışma birleşmelerinin basamaklandırılması yada modifikasyonu, çekme gerilmesi taşıyan yapışma birleşmelerinin mukavemetini artırma eğilimindeki ikincil ayrılma yüklerini azaltıcı yöndedir. Bununla beraber bazı modifikasyonlar imalat masraflarını artırır.

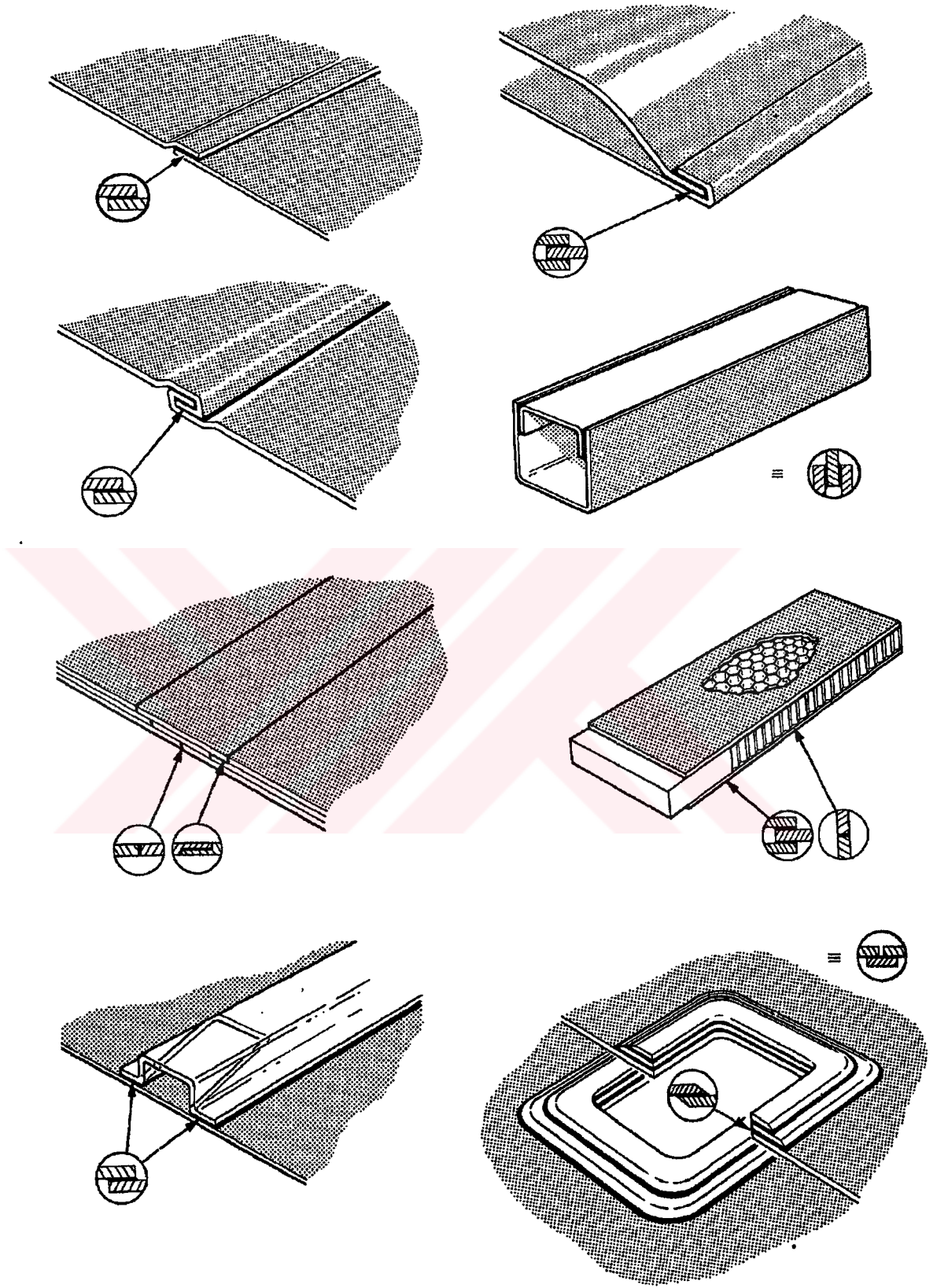
Çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri ve modifiye edilmiş çekme gerilmesine maruz yapışma birleşme örnekleri kullanılarak bu kıyaslama basit olarak şekil 3.7’de görüldüğü gibi yapılabilir.



Şekil 3.7 Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinin Karşılaştırılması [8, s 5]

Şekil 3.7’ de gösterilen yapışma konfigürasyonları, bazı karmaşık konfigürasyonlar için temel teşkil eder. Bu örnekler şekil 3.8’ de görülebilir.

Çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmelerini kısaca tanıdıktan sonra, yapışma birleşmelerinin hangi esaslara göre dizayn edildikleri, normal ve yüksek sıcaklıklarda çekme gerilmesine maruz yapışma birleşme mukavemetinin nasıl değiştiği, yapışma uzunluğunu artırmanın çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmelerine nasıl bir katkıda bulunduğu, çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmelerinin dizaynında yapışma uzunluğunun her iki ucunda oluşan maximum kayma gerilmesinin önemi, birleşen parçaların geometrisinin birleşme mukavemetini nasıl etkilediği, çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmelerinin değişik amaç ile nasıl kullanıldıkları, çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmelerinin nasıl iyileştirildikleri ve değişik yükler karşısında nasıl davrandıkları, aşağıdaki bölümlerde sırası ile incelenecektir.



Şekil 3.8 Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesi Örnekleri [8, s 6-7]

3.3.1.1. Normal ve Yüksek Sıcaklıklarda Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinin Mukavemeti

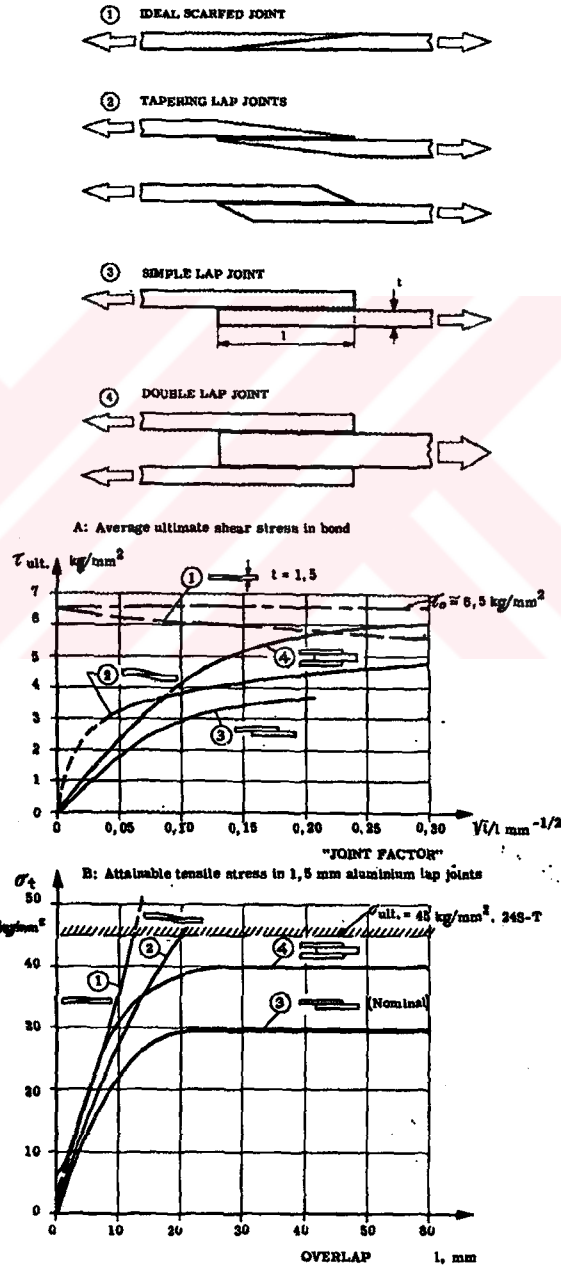
Yapışma birleşmelerinde dizayn bilgilerinin çoğu, basit çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri ile ilgilidir. Ama aslında, böyle yapışma birleşmeleri çekme yüklerinin direk olarak bir panelden diğer panele aktarılması için sadece uçak yapılarında kullanılırlar. Bununla beraber, herhangi bir yapıştırıcının özelliklerini anlamada üst üste binme ile elde edilen çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri, oldukça önemli bir araçtır. Belirli malzeme kombinasyonlarında üst üste binme ile elde edilen yapışma birleşmelerinden elde edilen karakteristik birleşme mukavemet bilgileri, değişen geometriyle (yani $J.F.(Joint factor) = \sqrt{t/l}$, geometriye bağlı birleşme faktörü) başka birleşme tiplerine dönüştürülebilir. Birleşme faktörü, kayma gerilmesi ile doğru orantılıdır. Yani birleşme faktörünü artırma, her zaman birleşme mukavemetini artırır.

3.3.1.1.1. Çekme Gerilmesine Maruz Değişik Yapışma Birleşmeleri İçin Birleşme Faktörü Grafikleri

Şekil 3.9 'da çekme gerilmesine maruz değişik yapışma birleşmelerinin deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçları gösteriliyor. Üst grafikteki eğriler (A), birleşme faktörünün fonksiyonu olarak değişik çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri için kayma mukavemetini gösteren oldukça karakteristik eğrilerdir. Görüldüğü gibi yapışma birleşmesinin basamaklandırılması yada modifikasyonu kayma gerilme dağılımının daha uniform olmasını sağlıyor. Alt grafikteki eğriler (B) ise, yapışma birleşmesindeki çekme mukavemetinin yapışma uzunluğu ile değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi yapışma uzunluğunu artırma, belirli bir değere kadar azalan oranda yapışma mukavemetini artırıyor.

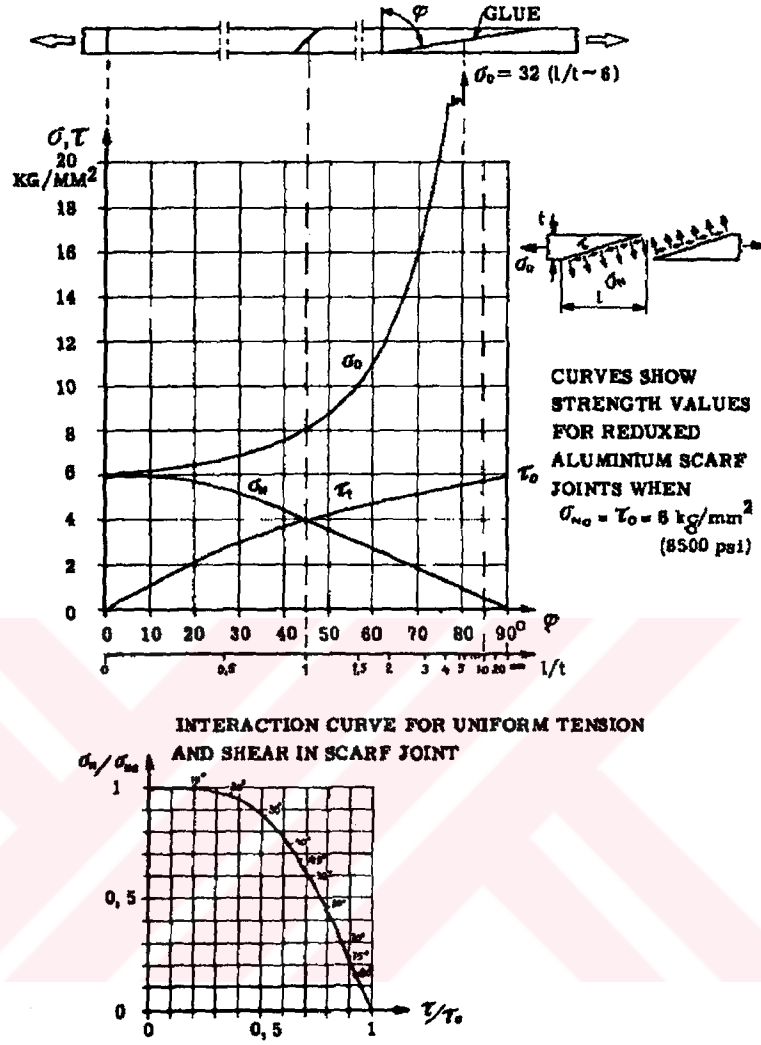
3.3.1.1.2. Yapışmada Çekme ve Kayma Mukavemetleri İçin Etkileşim Eğrisi

Şekil 3.10, yapışma birleşmelerinin değişik bir tipi olan ideal *scarf joint* için bazı ilginç eğrileri gösteriyor. Üstteki grafik, uniform çekme gerilmesine maruz *scarf joint* için birleşme açısı ile mukavemet arasındaki değişimi gösteriyor. Alttaki grafik ise, uniform çekme gerilmesine maruz değişik açılarla birleşen *scarf joint* için yapışma hattındaki etkileşim eğrisini gösteriyor.



Şekil 3.9 Çekme Gerilmesine Maruz Değişik Tipte Yapışma Birleşmeleri İçin Mukavemet Eğrileri[5, s 17]

IDEAL SCARFED JOINT, UNIFORM SHEAR AND TENSION

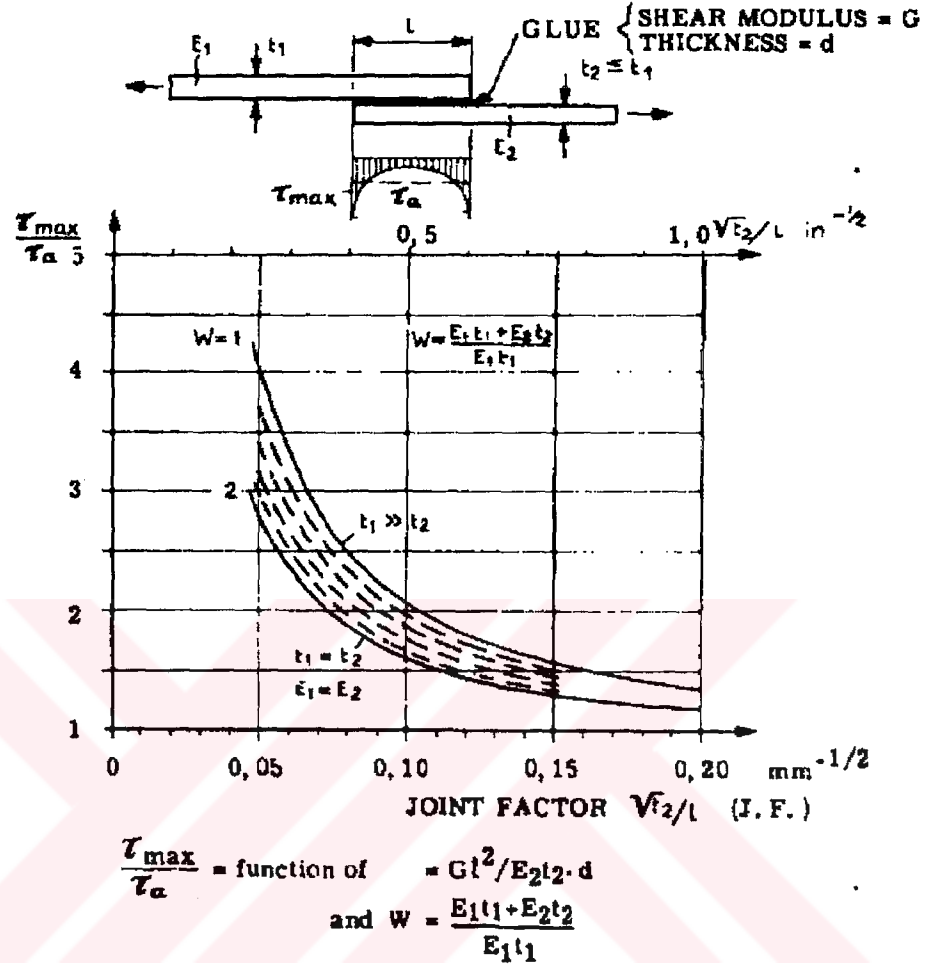


Şekil 3.10 Çekme Gerilmesine Maruz Scarf Joint [5, s 17]

3.3.1.1.3. Volkerson Teorisine Göre Basitleştirilmiş Teorik Olarak Kayma Gerilmesi Dağılımı

Şekil 3.11, eğilme momentinin olmadığı çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri için yapışmada kayma gerilme konsantrasyonlarını gösteren bazı eğrileri gösteriyor.

TENSILE LAP JOINT WITH NO BENDING
SHEAR STRESS CONCENTRATION ACCORDING
TO VOLKERSEN'S THEORY



CURVES PLOTTED FOR REDUX-BONDED
ALUMINIUM WITH $G = 70 \text{ kg/mm}^2$, $d = 0.25 \text{ mm}$
 $E_1 = E_2 = 7200 \text{ kg/mm}^2$

Şekil 3.11 Volkerson Teorisine Göre Hesaplanmış Kayma Gerilmesi / Birleşme Faktörü Eğrisi [5, s 17]

Kalınlıkları t_1 ve t_2 olan alüminyum levhalar arasındaki çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri için şekil 3.11' deki eğriler, birleşme kenar kayma gerilme konsantrasyonlarını yaklaşık olarak gösteriyor. Görüldüğü gibi kalınlıkları eşit olmayan alüminyum levhalar arasındaki birleşmeler, kalınlıkları eşit olan alüminyum levhalar arasındaki birleşmelerle karşılaştırıldığında, artırılmış kenar kayma gerilmesi konsantrasyonları veriyor. Bu yapışma birleşmesinin dizaynı açısından önemli bir kriterdir. Aslında oda sıcaklığında $1.25 < t_1/t_2 < 2.5$ için

çekmeye maruz birleşmeler, birleşme faktörünün normal değerinin üzerinde, eşit olmayan kalınlıklar her nasılsa eşit kalınlıkta olan yapışma birleşmelerinden (muhtemelen azaltılmış eğilme ve dolayısıyla daha düşük çekme gerilmesi üst noktaları) daha yüksek birleşme mukavemeti vermektedir. Bu basma gerilmesine maruz panellerin dizayn edilmesinde önemlidir.

3.3.1.1.4. Oda Sıcaklığında Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri İçin Dizayn Limitleri ve Nominal Mukavemet

Şekil 3.12, birleşme faktörünün fonksiyonu olarak farklı yapışma uzunluklarına sahip yapışma birleşmeleri için nominal mukavemet eğrilerini gösteriyor. Grafikte ayrıca *Saab* uçağının alt kuyruğunun dizaynında kullanılan değerler ($J.F.=0.09 \text{ mm}^{-1/2}$ ve $\tau_{min}=2.1 \text{ kg/mm}^2$) gösterilmiştir. Eğriler, nominal mukavemet değerinin 2/3'ü seçilerek çizilmiştir. Bunun anlamı, değişkenlik faktörü ($V.F.=t_1/t_2$, *variability factor*) dizaynda extra bir emniyet faktörü olarak birleşmelerde statik mukavemetinin oldukça geniş yayılmasına izin vermesidir. Genel olarak değişkenlik faktörü yaklaşık 1.5'dir.

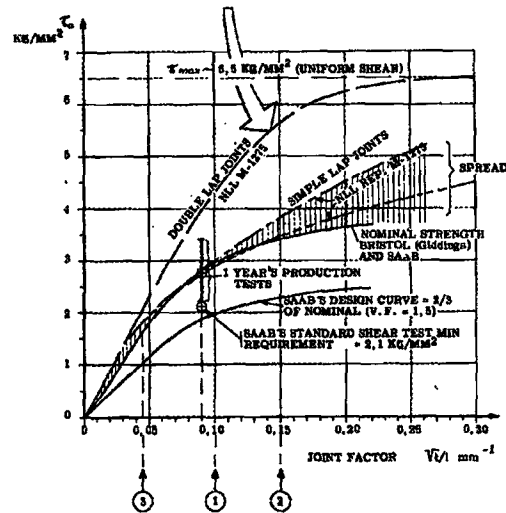
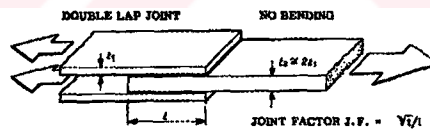
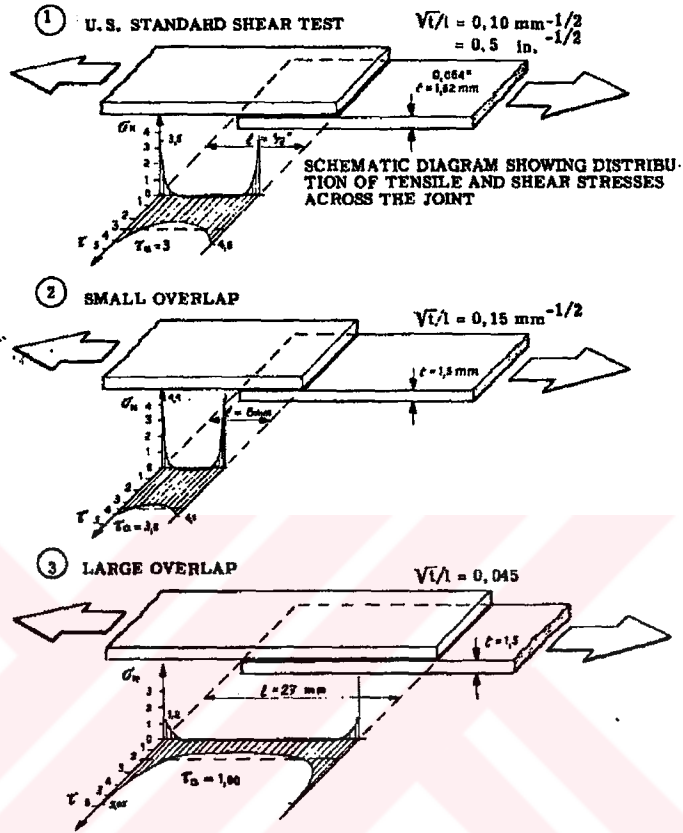
3.3.1.1.5. Yapışma Uzunluğunun Yüksek Sıcaklıklarda Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri Üzerindeki Etkisi

Oda sıcaklığında yapışma uzunluğunu artırmanın, belirli şartlar altında birleşme mukavemeti açısından yapışma birleşmelerine hiçbir katkıda bulunmayacakları çok iyi bilinir. Ayrıca yapışma uzunluğunu artırma, yapışma ile birleşme dizaynında emniyet katsayısı olarak da kullanılamaz.

Birleşmelerde, birleşen parçaların kalınlığını artırma ile daha iyi yapışma birleşmeleri elde edilebilir. Oda sıcaklığında yapışma uzunluğunu artırma, birleşme mukavemetini artırmamasına rağmen, yüksek sıcaklıklarda yapıştırıcı mukavemetinin azalmasından dolayı yapışma uzunluğunu artırma ile daha uniform gerilme dağılımı elde edilebilir.

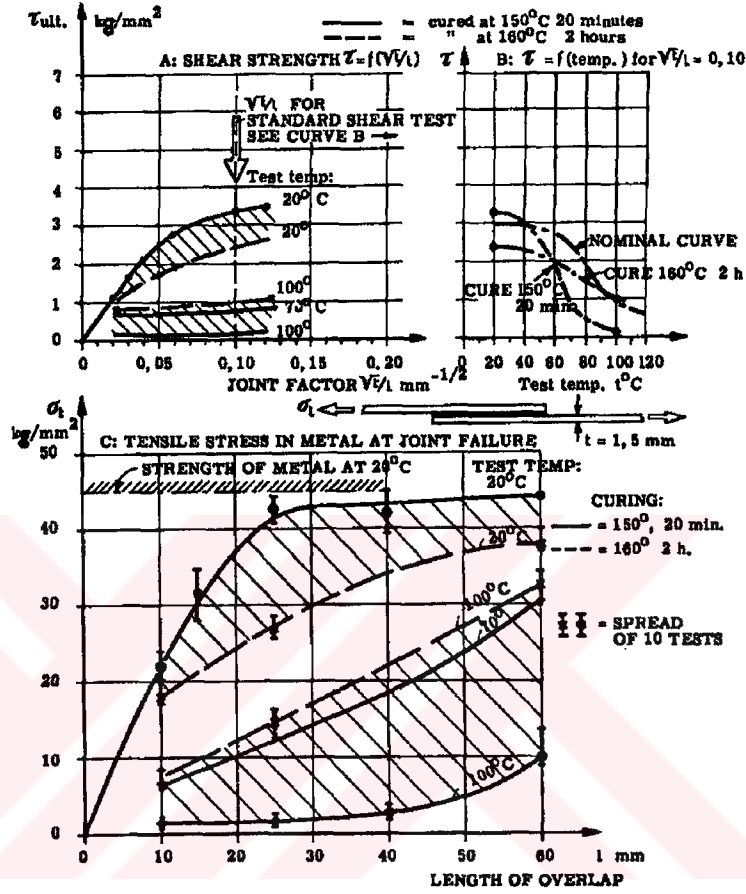
SIMPLE LAP JOINTS, LOADED IN TENSILE SHEAR

$$\tau_{90} = 6,5 \text{ kg/mm}^2$$



Şekil 3.12 Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri İçin Kayma Gerilmesi İle Birleşme Faktörü Arasındaki Değişim [5, s 18]

Şekil 3.13, iki farklı kuruma eğrisine göre sertleştirilmiş çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri (1-— 150°C de 20 dakika 2-__ 160°C de 120 dakika) için test sonuçlarını gösteriyor.



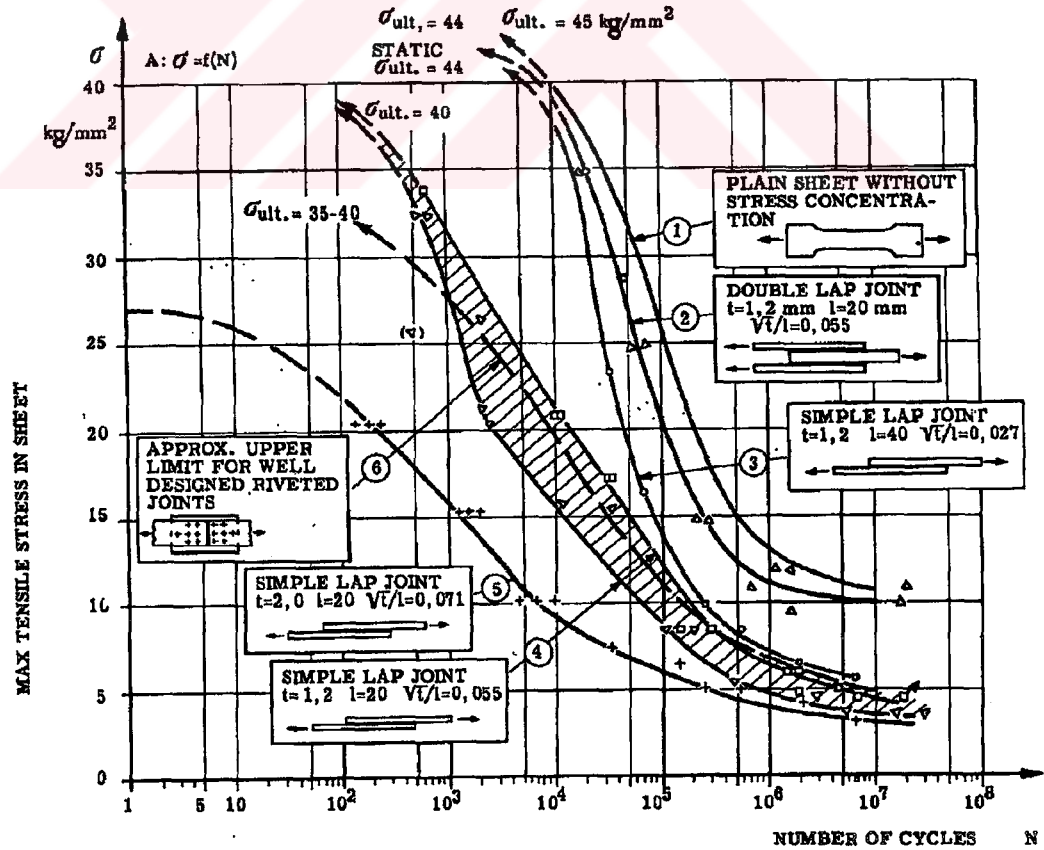
Şekil 3.13 Normal ve Yüksek Test Sıcaklıklarında Birleşme Mukavemetinin Değişimi [5, s 18]

Diyagram A, değişik test sıcaklıklarında karşılaştırılan, iki farklı sertleşme eğrisine göre sertleştirilmiş yapışma birleşmeleri için birleşme faktörü ve birleşme kayma gerilmesi arasındaki değişimi gösteriyor. Görüldüğü gibi düşük test sıcaklıklarında yapışma birleşmesinin mukavemeti daha yüksektir. Ama yüksek test sıcaklıklarında yüksek sıcaklıkta sertleştirilmiş olan yapışma birleşmeleri, düşük sıcaklıkta sertleştirilmiş yapışma birleşmelerine göre daha iyi kayma mukavemetleri vermektedir. Diyagram C ise, yapışma uzunluğunu artırmanın birleşme mukavemeti üzerindeki etkisini gösteriyor. Yapışma uzunluğunu artırma, artırılmış birleşme mukavemeti ile sonuçlanıyor. Oda sıcaklığı yada daha düşük

sıcaklıklardaki birleşme mukavemet değerine yaklaşılmadığı sürece yapışma uzunluğunu artırma, yüksek sıcaklıklara maruz yapışma birleşmeleri için, direk olarak emniyet katsayısı olarak kullanılabilir ve izin verilebilir.

3.3.1.1.6. Oda Sıcaklığındaki Yorulma Mukavemeti İle Birleşme Faktörü Arasındaki İlişki

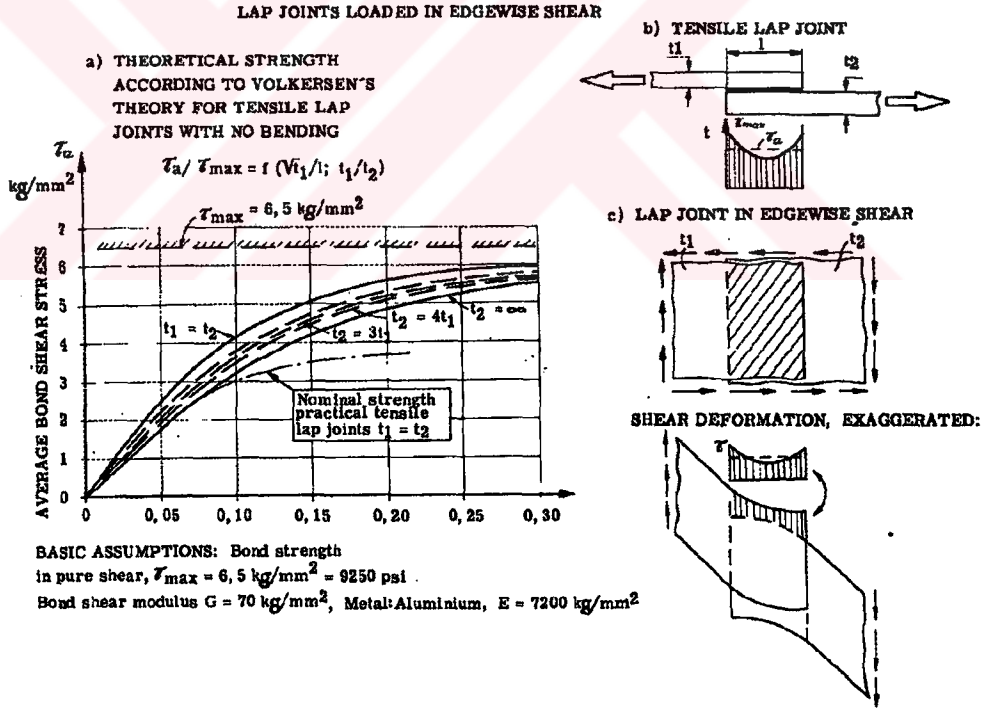
Şekil 3.14, değişik çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri için bazı yorulma mukavemet değerlerini gösteriyor. Görüldüğü gibi, artırılmış birleşme faktörü (3, 4 ve 5 nolu eğriler) ile yorulmada gerçek mukavemetinin azalmasını göstererek yapışma birleşmesi için yorulma eğrisi üzerinde birleşme faktörünün etkisini gösteriyor. Yine aynı şekilde yapışma birleşmeleri, perçinli birleşme ile karşılaştırıldığında, yapışma birleşmeleri için, birleşme faktörü $J.F.=0.05$ izin verilebilir değer olarak dizaynlarda kullanılabilir.



Şekil 3.14 Değişik Yapışma Birleşmeleri İçin Yorulma Mukavemeti [5, s 19]

3.3.1.2. Yanlamasına Kayma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinin Mukavemeti

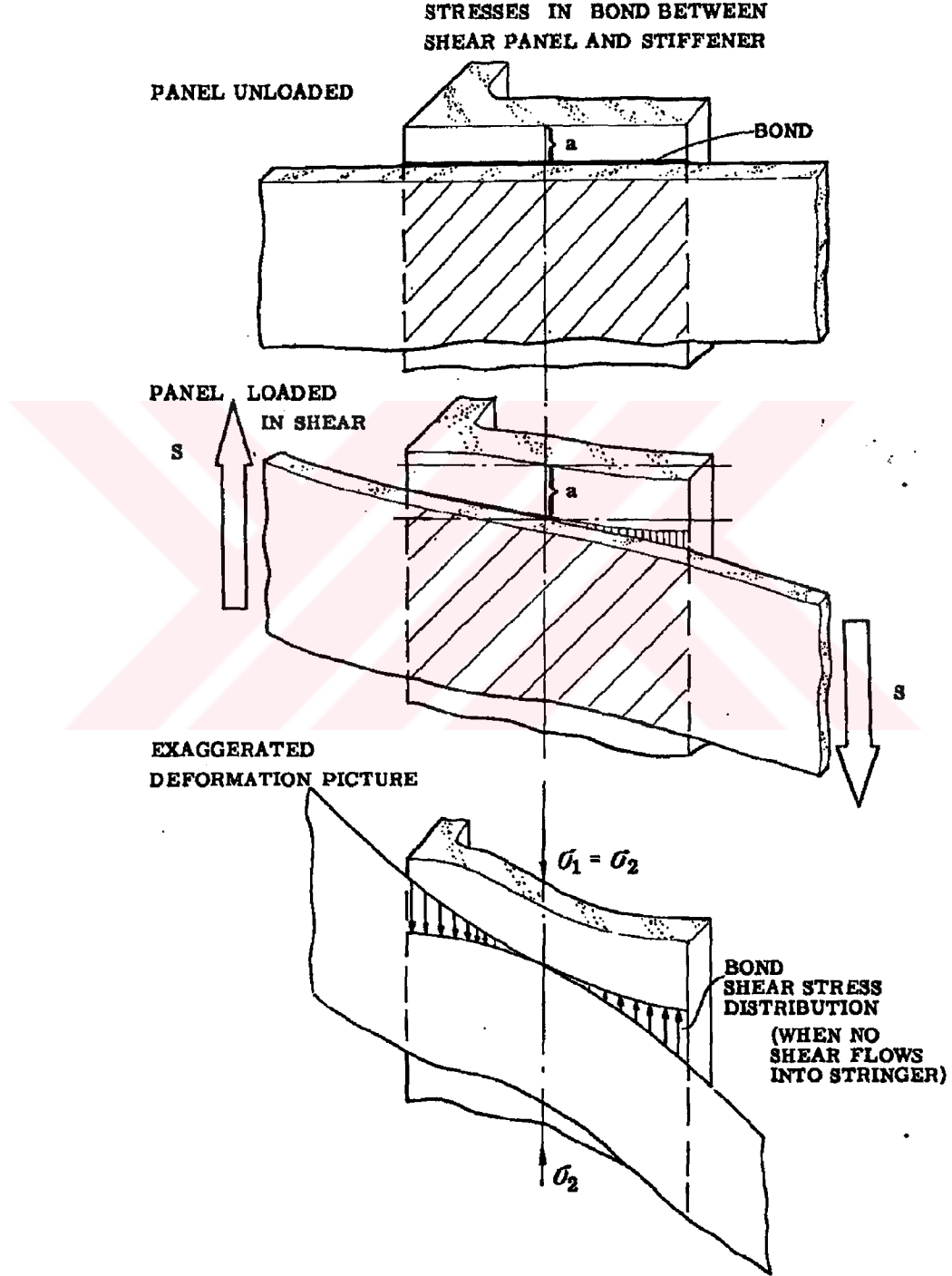
Şekil 3.15 'de eğilme momentinin olmadığı *Volkersen Teorisi*' ne göre hesaplanmış çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri ile yanlamasına kayma gerilmesine maruz yapışma birleşmelerinin (bitişik panellerde burkulma olmayan) karşılaştırılması yapılıyor. Yanlamasına kayma gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri için yapışma uzunluğunu boyunca kayma gerilmesi dağılımı, eğilme momentinin olmadığı çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmelerindeki kayma gerilmesi dağılımı ile benzerdir. Maximum kayma gerilmesi $\tau_{max}=6.5 \text{ kg/mm}^2$ olan yapıştırıcı ile *Volkersen Teorisi*'ne göre hesaplanmış diagram A'daki eğriler, değişen t_1/t_2 oranları ve kayma gerilmeleri için nominal mukavemet bilgilerini vermektedir. Değişkenlik faktörü V.F. =1.5 için, emniyetli dizaynlar elde edilebilir.



Şekil 3.15 Yanlamasına Kayma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinin Mukavemeti [5, s 20]

Normal olarak panelden stringere hiçbir yükün aktarılmadığı oldukça yüksek kayma gerilmesi yüklü panel ve göreceli olarak rijit stringer arasındaki

yapışma birleşmesinde çok şiddetli ikincil gerilmelerin nasıl oluştuğu şekil 3.16' da gösterilmiştir. Bu değerlendirmenin ve hesaplamının zor olduğu çoğu yapışma birleşmesinin sadece bir örneğidir.



Şekil 3.16 Yanlamasına Kayma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinde İkincil Yüklerin Oluşumu [5, s 21]

3.3.1.3. Çekme Gerilmesine Maruz Perçin İle Birleştirilmiş Yapışma Birleşmelerinde Kenar Takviyeleri

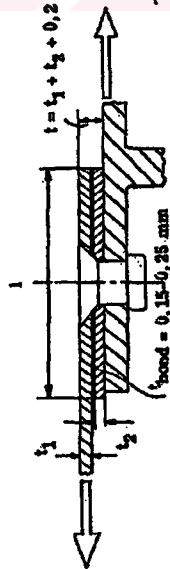
Yapıştırılmış tabakalara benzer kenar takviyeleri, perçin ile yapılan birleşmelerin mukavemetini artırmak için değişik yollar ile dizayn edilebilir.

Şekil 3.17, oda sıcaklığında perçinli kenar takviyeler için bazı dizayn bilgilerini gösteriyor. Şekil 3.15 A, birleşme geometrisini (saç kalınlığı: t_1 takviye kalınlığı: t_2), B yapışmada teorik yükün nasıl hesaplandığını, C’de ise takviyenin geometrisine bağlı olan k_{bond} faktörü ile çarpılan ve toplam perçin yükü olarak hesaplanan yapışma hattındaki yükün teorik ve konservatif olarak hesap edilmesi gösterilmektedir. Bu değer normal olarak birim değerden ($k_{bond} \leq 1.33$) daha büyüktür. D’de ise, değişen geometri ile gövde sacı yada takviye kalınlıklarından daha az olan t_{min} değeri ile hesaplanan τ_{bond} ile J.F. = $(t_{min})^{1/2} / l$ ile çizilen çok sayıdaki takviyeli yapışmalar için statik test sonuçlarını gösteriyor. Yapılan bu testlerin sonucu bulunan (1) nolu eğri ile çekmeye maruz yapışma birleşmeleri için bulunan nominal kayma gerilmesi birleşme faktörü eğrisi arasında bir karşılaştırma yapılırsa, benzer oldukları ortaya çıkar. Takviyeli yapışmada değişkenlik faktörü V.F. = 1.5 için, nominal çekme gerilmesine ($t_1 = t_2$) maruz yapışma birleşmelerindeki kayma gerilmesinden daha yüksek kayma gerilmesine izin veren bir dizayn eğrisi elde edilir. F’de ise, değişkenlik faktörü ile kayma gerilmesi arasındaki değişim gösteriliyor. t_2 / t_1 oranı arttıkça birleşmenin kayma gerilmesi düşmektedir.

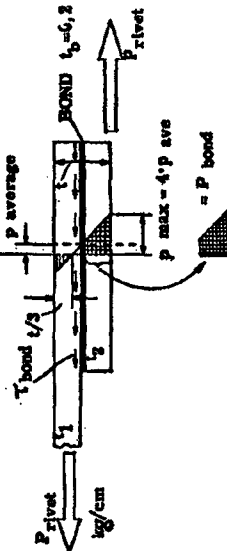
3.3.1.3.1. Perçin Mukavemeti

Havşalı perçinler için, izin verilebilir kayma gerilmesi, katı saç kalınlığı olan $t = t_1 + t_2$ için nominal bir değer olarak seçilebilir. Bununla beraber havşalı perçinler kullanılarak yapılan birleşmeler için yapışma tabakalarının esnekliğinden ve takviyelerin sebep olduğu artırılmış eksantriklikten dolayı, limit yükde kalıcı birleşme deformasyonları kritiktir.

A: JOINT GEOMETRY



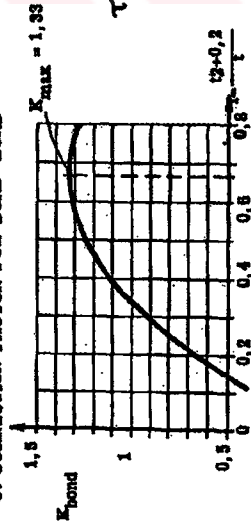
B: THEORETICAL LOAD IN BOND



$$P_{ave} = P_{rivet}; \quad T_{bond} = K_{bond} P_{rivet}/l;$$

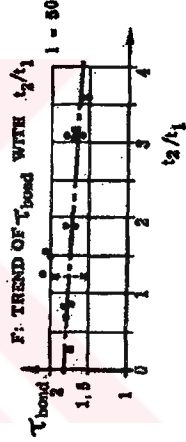
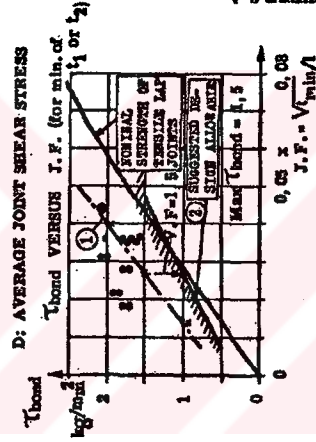
$$K_{bond} = P_{bond}/P_{rivet} = (4-3l)/4, \text{ where } l = \frac{t_2 + 0.2}{t}$$

C: CORRECTION FACTOR FOR BOND LOAD

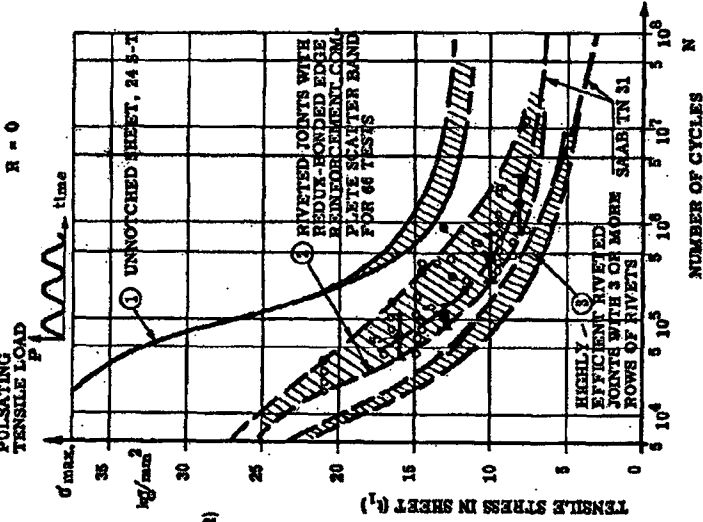


D-F: STATIC STRENGTH AT ROOM TEMP.

RESULTS OF 30 TESTS WITH FAILURE IN BOND (RIVETS REPLACED WITH BOLTS).



G: FATIGUE STRENGTH AT ROOM TEMP.



H: RANGE OF GEOMETRICAL DATA FOR REINFORCED JOINTS TESTED:

$t_1 = 0.5 - 1.5 \text{ mm}; \quad l = 20 - 80 \text{ mm}$
 $t_2 = 0.5 - 2.5 \text{ mm}; \quad t_2/t_1 = 0.3 - 3.6$
 Rivet diam. 4 - 6 mm.

Şekil 3.17 Çekme Gerilmesine Maruz Perçin ile Yapışma Birleşmeleri Kenar Takviyeleri [5, s 22]

3.3.1.3.2. Oda Sıcaklığında Yorulma Mukavemeti

Takviyeleri kullanarak yüksek yorulma mukavemeti veren küçük başlı (*shear head*) perçinlerin 3 yada daha fazla sırası kullanmanın yerine , büyük başlı (*tension head*) perçinlerin 1 sırasını kullanmak yeterli olur. Şekil 3.17 G, takviye kullanılarak yapılan birleşmede, yorulma mukavemeti açısından kıymete değer bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Tek perçin sıralı takviyeli birleşmenin yorulma limiti, en iyi çok sıralı takviyesiz birleşmelere göre % 50 daha yüksektir.

3.3.1.3.3. Yüksek Sıcaklıklardaki Mukavemet

Takviye kullanımı yapışma birleşmelerinde birçok avantaj sağlamasına rağmen, yüksek sıcaklıklarda mukavemette azalmaya yol açar. Bundan dolayı birleşmede, artırılmış yapışma uzunlukları kullanılmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda yorulma mukavemetini ölçmek için yapılan testlerde, 80°C'ye kadar yorulma mukavemetinin oda sıcaklığındaki mukavemete eşit olduğu, ancak 120°C'ye çıkıldığında yorulma mukavemetinde azalma olduğu ortaya çıkmıştır.

3.3.2. Basma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri

Yapışma birleşmelerinin diğer bir tipi ise, basma gerilmesine maruz yapışma birleşmeleridir. Yapışma birleşmelerinin diğer birleşmelere göre en önemli avantajı, basma gerilmesine karşı artırılmış toplam katılıktan dolayı en yüksek yerel burkulma mukavemeti veren birleşme olmasıdır.

3.3.2.1. Basma Gerilmesine Maruz Panellerin Burkulma Davranışı ve Yerel Burkulma Mukavemeti

Yapıştırıcı ile yapışmanın perçin ile birleşmeye göre en önemli avantajlarından biride, yapışmış katıların toplam katılık etkisinden dolayı yerel

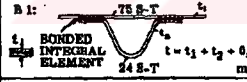
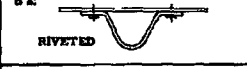
Tablo 3.1 ise, basma gerilmesine maruz çeşitli birleşmeler için test sonuçları ile *Lockhood Summation Yöntemi* kullanılarak hesaplanan değerler arasındaki karşılaştırmayı gösteriyor. A'da değişik kesit alanlara sahip Z tipi stringerler için yapışma birleşmesindeki mukavemetin, perçin ile birleşmedeki mukavemetten yaklaşık % 40 daha yüksek olduğu gösteriliyor.

B'de şapka tipi stringerler için aynı karşılaştırma yapılmaktadır. Yapışma birleşmesindeki mukavemet, artırılmış çift taraflı toplam katılıktan dolayı perçin ile birleşmedeki mukavemetten yaklaşık % 40 daha yüksektir.

C'de ise aynı ağırlıktaki tek parça L kesitli bir stringer ile iki levhanın form verilerek yapışması ile elde edilmiş L kesitli bir stringerin karşılaştırılması yapılıyor. Yapışma ile elde edilen L kesitli stringerin mukavemeti daha yüksektir.

Tablo 3.1 Yapışma İle Birleştirmenin Yerel Burkulma Mukavemeti Açısından Karşılaştırılması [5, s 23]

SOME TYPICAL BONDED COMPRESSION ELEMENTS TESTED.
COMPARISON WITH CALCULATED CRIPPLING STRENGTH.

TYPE OF SPECIMEN	AREA MM ²	CRIPPLING STRENGTH CORRECTED TEST VALUES			RATIO BETWEEN ACTUAL AND CALCULATED STRENGTH ¹⁾ P_{test}/P_{calc}	NOTE ¹⁾ "LOCKERD SUMMATION PRINCIPLE, WITH t
		P_{ult} kg	C_{ce} kg/mm ²	C_{ce} psi		
A: 	100 - 200	2300 - 3000	17 - 24,5	24000 - 35000	0,96 - 1,04	ULTIMATE STRENGTH OF COMPLETE BONDED PANELS UP TO 40 % HIGHER THAN RIVETED EQUIVALENT.
B 1: 	350	11800	34	48500	1,04	BONDED ELEMENT ~ 40 % STRONGER THAN RIVETED.
B 2: 	350	0,70 OF B 1				
C: 	70 - 310		14 - 27	20000 - 35000	1,10 ²⁾	²⁾ COMPARED WITH SOLID ANGLE OF THICKNESS t, ASSUMING SAME WEIGHT AS BONDED LAMINATE.

3.3.2.2. Basma Gerilmesine Maruz Panel Üzerindeki Yapışmış Stringerlerin Etkisi

Panel ile stringer arasındaki yapışmalarda toplam katılığın artması sadece yerel burkulma mukavemetini artırmaz, aynı zamanda burkulma mukavemetinide artırır. Bunun nedeni panel ile stringer birleşmesinde burkulma mukavemetini

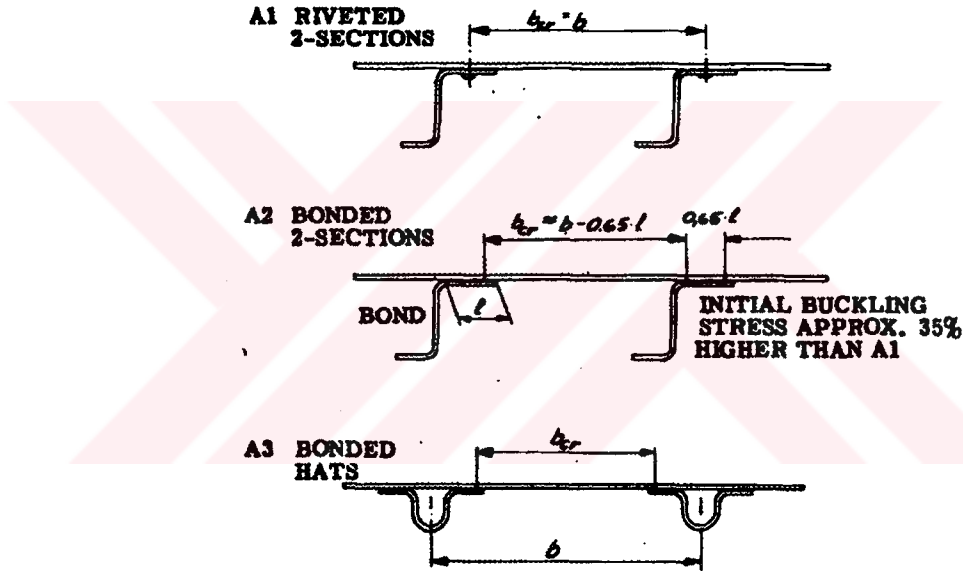
artıran şekil 3.19' daki b_{cr} mesafesinin azalmasıdır. Yapışma birleşiminde bu mesafe aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$b_{cr} = b - k.l$$

b : Burkulma gerilmesini $(t/b)^2$ 'nin oranı olarak) hesaplamada perçin ile birleştirilmiş basma gerilmesine maruz paneller için kullanılan iki perçin arasındaki mesafe

k : Yapışma katılık faktörü ($k < 1$)

l : Yapışma uzunluğu



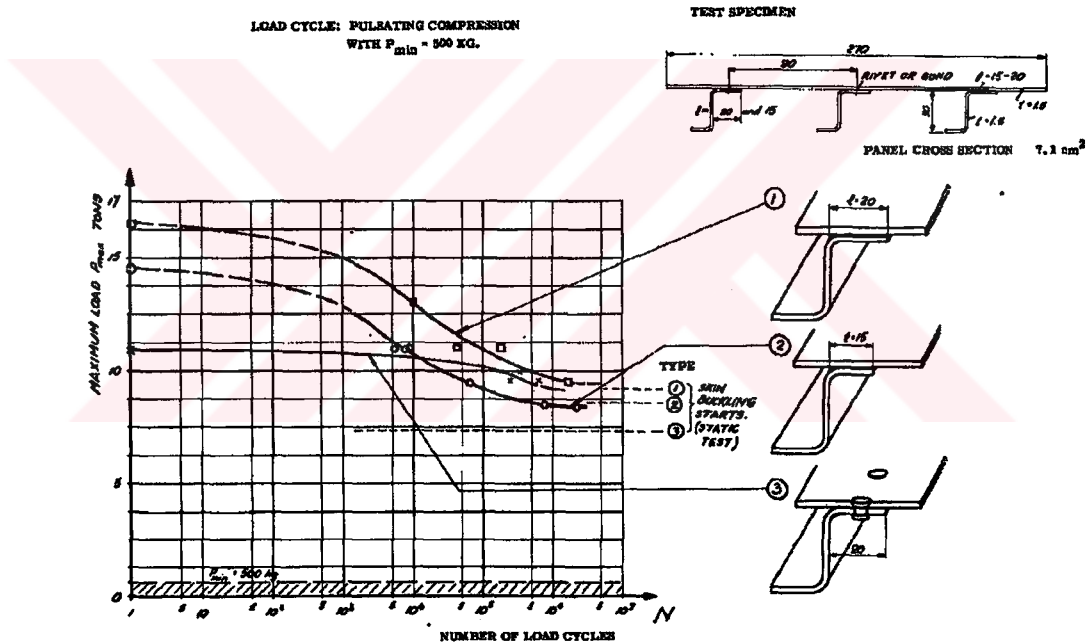
Şekil 3.19 Burkulma Mukavemeti Açısından Yapışma ile Perçinlemenin Karşılaştırılması [5, s 24]

Şekil 3.19 A1' de, perçin ile birleştirilmiş panel ile stringer birleşmesinde bu mesafe $b_{cr} = b$ 'dir. A2' de, yapışma ile birleştirilmiş panel ile stringer birleşmesinde bu mesafe $b_{cr} = b - 0,65.l$ dir. A3'de ise, şapka tipi stringerler için panel ile stringer birleşmesinde bu mesafe $b_{cr} = b - l$ 'dir.

Bu üç birleşme arasında karşılaştırma yapıldığında, b_{cr} mesafesi en düşük olan, çok yüksek yerel burkulma ile panel burkulma mukavemeti veren ve panel toplam katılığına artıran yapışma ile birleştirilmiş şapka tipi stringerler idealdir.

3.3.2.3. Basma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmelerinde Yorulma Mukavemeti

Şekil 3.20 'de aynı ölçülere sahip perçinli birleşmelerle karşılaştırılan iki değişik yapışma uzunluğuna (15mm ve 20mm) sahip Z tipi stringer ile panel yapışmasının yorulma mukavemeti test sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.20' deki 1 ve 2 nolu eğrilere bakılırsa, artırılmış yapışma uzunluğuna sahip yapışma birleşmeleri yüksek yorulma mukavemeti vermektedir. Perçin ile birleştirilen panellerle, yapışma ile birleştirilen paneller karşılaştırılırsa yorulma mukavemeti açısından yapışma ile birleşmede daha iyi sonuçlar elde edilebildiği şekil 3.20' de aşağıdaki şekilde açıkça görülebilir.



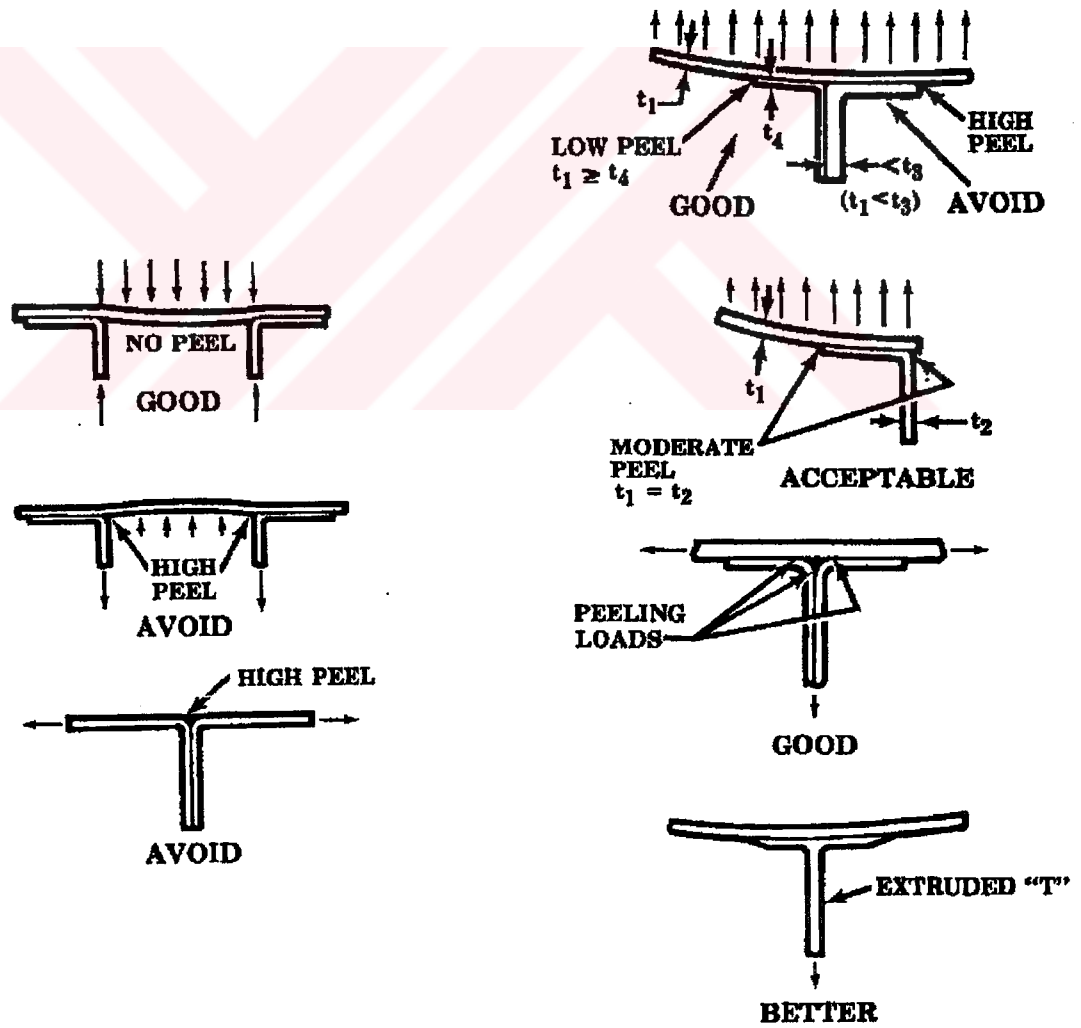
Şekil 3.20 Yorulma Mukavemeti Açısından Basma Gerilmesine Maruz Panellerde Yapışma Uzunluğunun Etkisi [5, s 24]

3.3.3. Ayrılma Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmeleri

Yapıştırıcılar, ayrılma gerilmelerine maruz şartlarda (yani çekme yüklerinin yapışma kenarları boyunca maximum olduğu durumlarda) genellikle güçsüzdürler.

Ayrılma gerilmeleri, yapışma birleşmelerinin kenarları üzerine etki eder ve yapışma hattı boyunca hareket eder. Ayrılma gerilmelerine maruz yapışma birleşmelerinde, yük yollarının balans edilmesi ve ayrılmanın olduğu yerlerde yapının kuvvetlendirilmesi ile yapışma birleşmesi iyileştirilebilir.

Yapışma birleşmelerinde kenar ayrılma etkileri, yapışma birleşmelerinin birçok değişik tipi ile temsil edilebilirler. Yani gövde saçlarına bağlı flanşlar, gerek birleşme kenarı boyunca verilen eğilme momentinden dolayı birincil ayrılma yükü olarak (hava yüklerine maruz paneller) ve gerekse birleşme kenarlarına bitişik metal saçların kayma yada basma olarak eğilmesinden dolayı ikincil ayrılma yükü olarak temsil edilirler.



Şekil 3.21 Ayrılma Yüklerine Maruz Yapışma Birleşmeleri [2, s'9]

3.3.3.1. Değişik Birleşmeler İçin Ayrılma Mukavemeti Bilgileri

Çok iyi bilinen ve çok hassas olan *ARL drum peel testleri* imal edilen yapışma birleşmelerinin kalite kontrolü için kullanılabilir. Ama gerçek yapısal elemanların ayrılma mukavemetini hesaplamak için direk olarak bu yöntemi kullanmak oldukça zordur. *U.S. standard bend peel testleri*, ayrılma mukavemet bilgilerini hesaplamak için gerçek dizaynlarda daha gerçekçidir.

Şekil 3.22, çeşitli pratik ayrılma yüklerine maruz durumlarının özetini ve oda sıcaklığında *Redux* yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum levhalar ile gerçekleştirilmiş bazı ayrılma test örneklerini gösteriyor.

PEEL CONDITION	EXAMPLES OF APPLICATIONS TO PRACTICAL SERVICE LOAD CASES FOR FINISHED PARTS.
A. STANDARD DRUM PEEL TEST, AERO RESEARCH	NO DIRECT APPLICATION TO JOINTS OF PRACTICAL DESIGNS, GIVES HOWEVER A MEASURE OF SOME IMPORTANT PROPERTIES SUCH AS: RESISTANCE TO SECONDARY EXTENSION OF VIOLENT PRIMARY FAILURES IN BONDED THIN SHEET STRUCTURES, (E.G. DUE TO EXPLOSIVE GUN FIRE, PRESSURE CABIN FAILURE, ETC.)
B. U.S. STANDARD BENDING PEEL TEST - AND - COMPLEMENTARY TESTS WITH VARYING SKIN GAUGES AND LOAD CASES, (SAAB - TESTS)	1) AIR LOADED PANELS $t=1-1.8$ mm 2) COMPRESSION PANELS ABOVE BUCKLING LOAD. 3) TENSION FIELD SHEAR WEBS 4) HONEYCOMB PANEL - EDGES
C. FLANGE EDGE PEEL, FIXED RADIUS, $\phi = 90^\circ$ (EXAMPLES OF TEST RESULTS)	1) STIFFENER BONDED TO SKIN 2) FLANGED SHEAR WEB WITH TENSION FIELD BUCKLES
D. PEELING OF BENT FLANGES WITH VARYING FLANGE ANGLE	1) CORRUGATED SANDWICH IN SHEAR 2) HAT SECTION WITH LOCAL LOAD OR INTERNAL PRESSURE

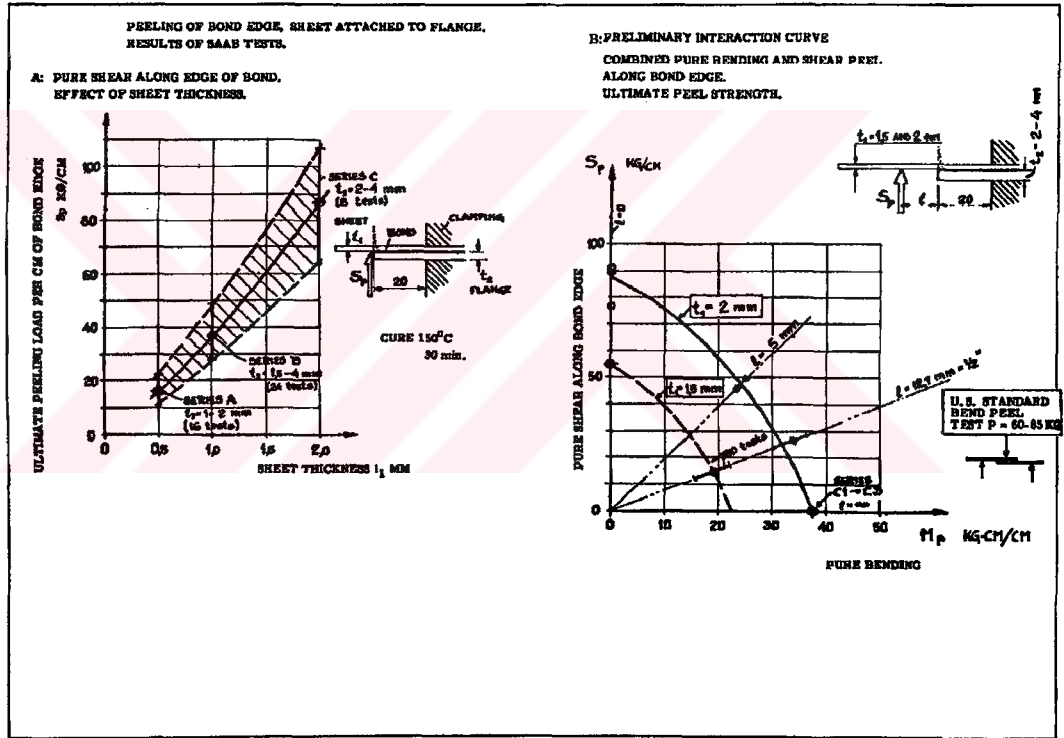
Şekil 3.22 Yapışma Birleşmelerinde Ayrılma Gerilmesini Bulmak İçin Yapılan Testler ve Uygulamaları [5, s 25]

Şekil 3.22 A'da *standard drum peel testi* ve uygulama alanları gösteriliyor. B'de yapışma hattı boyunca sadece eğilme momentine maruz gövde sacı ile flanş yapışmasının kenar boyunca ayrılma gerilmesinin *U.S. bend peel test* yardımı ile nasıl yapıldığı ve hangi durumlar için kullanıldıkları gösteriliyor.

C'de, dik açılı flanş yapışmaları için ayrılma gerilmesini bulma amacı ile yapılan testler ve örnekler gösteriliyor. D'de ise, değişen flanş açılı eğilmiş flanşların ayrılma mukavemetini bulmak için yapılan testler ve hangi durumlarda bu testlerin kullanıldığı gösteriliyor.

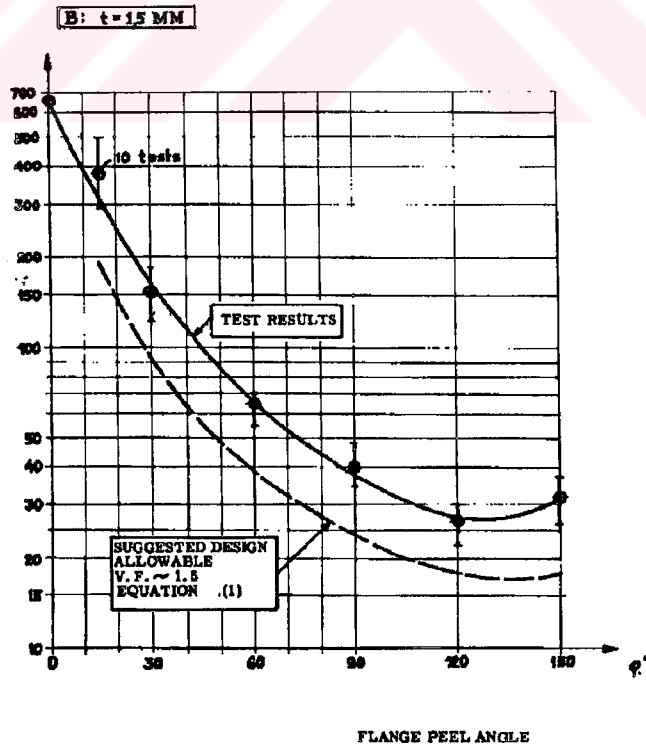
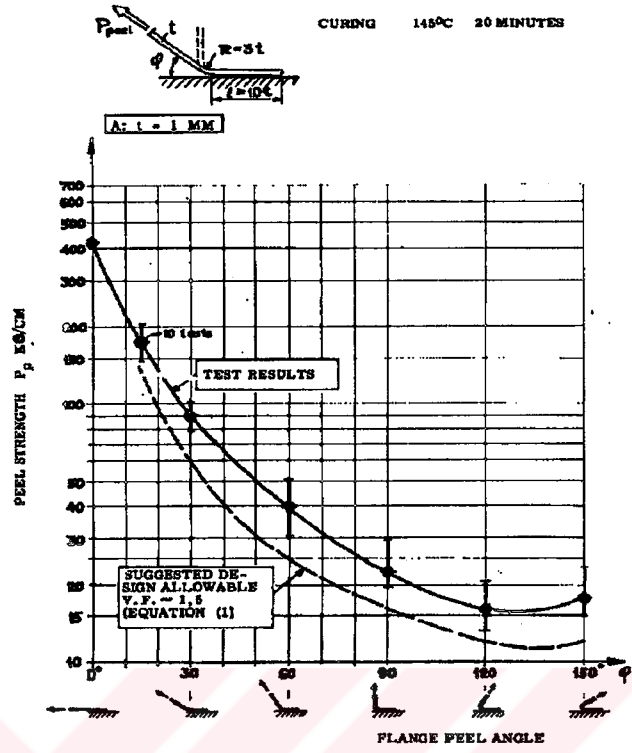
Şekil 3.23 A 'da, *U.S. standard bending peel test* yardımı ile hesaplanmış gövde sacı kalınlığı ile ayrılma yükü arasındaki değişim gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sac kalınlığı arttıkça, ayrılma mukavemeti artmaktadır.

B'de ise, değişik gövde sac kalınlıkları için aynı test yardımı ile eğilme momenti ile ayrılma yükü arasındaki değişim gösterilmiştir. Gövde sacı kalınlığının artması, her ikisinde artmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.23 Bending Peel Test Yardımı ile Hesaplanan Ayrılma Mukavemeti Eğrileri [5, s 25]

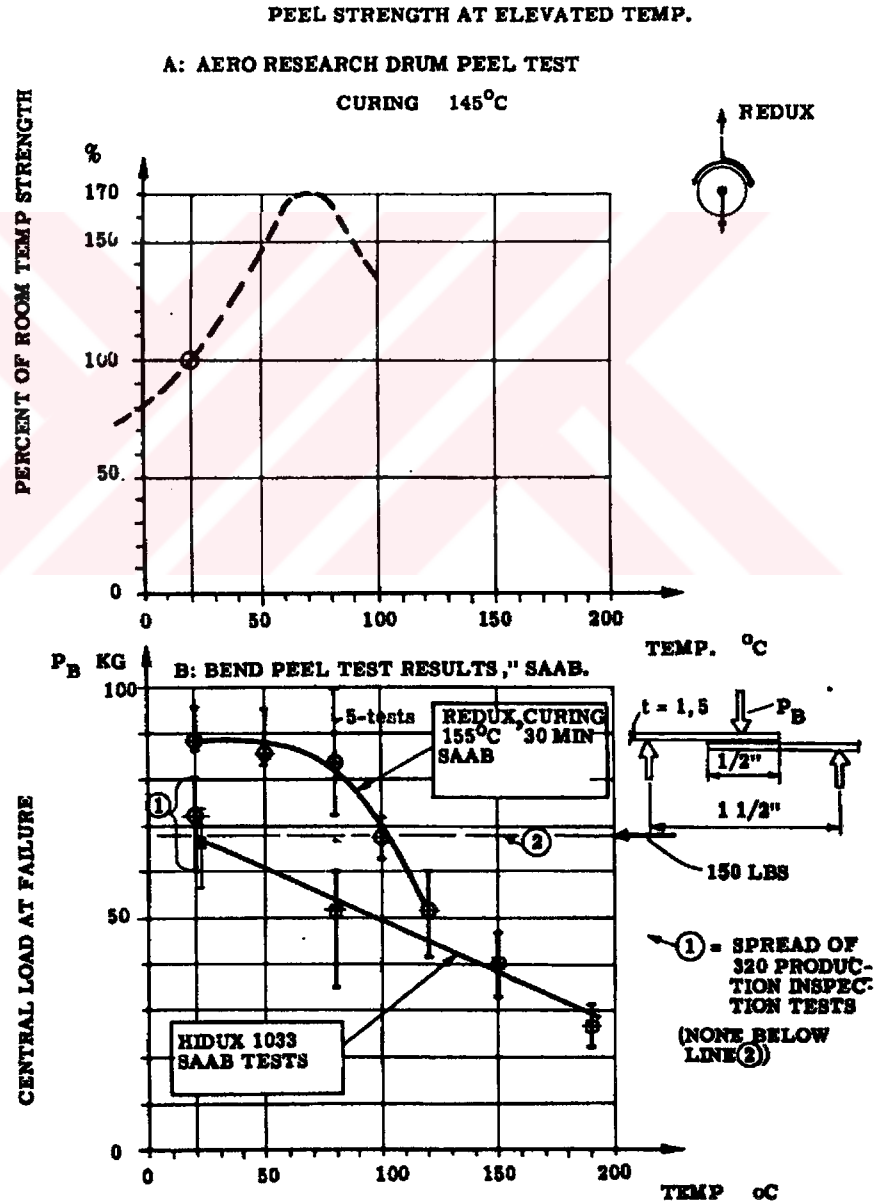
Şekil 3.24 A 'da 1mm, B 'de ise 1.5mm kalınlığa sahip değişik açılardaki flanşlar için ayrılma mukavemeti ile flanş açısı arasındaki değişim gösterilmiştir. Görüldüğü gibi flanş açısı arttıkça, ayrılma mukavemeti azalmaktadır.



Şekil 3.24 Değişen Flanş Açıları İle Ayrılma Mukavemeti Arasındaki Değişim [5, s 26]

3.3.3.2. Yüksek Sıcaklıkların ve Sertleşme Şartlarının Ayrılma Mukavemeti Üzerindeki Etkisi

Yüksek sıcaklıklarda sertleşme ile elde edilen yapışma birleşmesinin ayrılma mukavemetinin, düşük sıcaklıklarda sertleşme ile elde edilen yapışma birleşmesinin ayrılma mukavemetinden düşük olduğu iyi bilinir. Yüksek sıcaklıklarda *Redux* yapıştırıcı ile sertleşmiş birleşme için *drum peel test* mukavemet eğrileri, şekil 3.25 de verilmiştir.



Şekil 3.25 Yüksek Sıcaklıklarda Ayrılma Mukavemeti Eğrileri [5, s 26]

Aynı şekilde alt grafik, iki farklı yapıştırıcı (*Redux* ve *Hidux 1033*) ile yapışmanın 155°C de 30 dakika sertleşmesi ile elde edilen 1.5mm kalınlığındaki alüminyum levhalar için *Saab Bend Peel testleri* 'nin sonuçlarını gösteriyor. *Redux* yapıştırıcı ile yapışma için *bend peel test* sonuçları, 80°C' ye kadar mukavemette azalma olmadığını gösteriyor. Bununla beraber 120°C'de ayrılma mukavemetinin hala yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. *Hidux 1033* yapıştırıcı kullanılarak yapılan yapışmanın mukavemet değerleri, *Redux*'a göre düşük olmasına rağmen 190°C'de halen yüksek ayrılma mukavemetine sahiptir.



BÖLÜM 4

YAPIŞMA BİRLEŞMESİNİN GERİLME ANALİZİ

4.1. Giriş

Bu bölümde, çekme gerilmesine maruz basit bir model yardımı ile yapışma birleşmesi analitik ve nümerik olarak incelenecektir. Analitik incelemeden sonra elde edilen formüller yardımı ile çekme gerilmesine maruz model boyutlandırılarak çeşitli grafikler elde edilecektir. Elde edilen grafikler nümerik incelemede kullanılacak ANSYS programı yardımıyla elde edilen grafiklerle karşılaştırılarak değerlendirilecektir.

4.2. Yapışma İle Birleşme Dizaynı

Yapışma ile birleşme dizaynında temel prensip, birleşenler arasında yükün emniyetli bir şekilde transferini gerçekleştirerek emniyetli, ekonomik ve yüksek performansa sahip yapıştırıcı ile birleşmenin dizayn edilmesidir [10] . Emniyetli, ekonomik ve yüksek performanslı bir birleşmeyi yapıştırıcı ile dizayn edebilme; genel olarak yapışma birleşmesi için yapılan gerilme analizlerine ve yapıştırıcının taşıyabileceği maximum yükü tespit etmek için yapılan güvenilir testlere bağlıdır.

Emniyetli dizayn, yapıştırıcının taşıyabileceği maximum gerilmeler ile dizaynda hesaplanan gerilmelerin karşılaştırılması ile gerçekleştirilir. Hesaplanan gerilmelerin, izin verilebilir gerilmelerin altında olması istenir. Yüksek performanslı dizayn, yapışma birleşmesinin ömürünü tespit etmek için yapılan yorulma testleri ile yapışma birleşmesini ömürünün bulunması ile gerçekleştirilir. Ekonomik dizayn, yapışma birleşmesinin ağırlığını minimize etme ve yapışma birleşmesinin maliyetini

azaltma ile gerçekleştirilir. Yapışma ile birleşme dizaynında, bu üç kriterin sağlanması ve birbirleri ile uyumlu olması gerekir.

Yapıştırıcı ile birleşme dizaynında; yapıştırıcının yapışma uzunluğu boyunca davranışı, bağlantı elemanları ile yapılan birleşmelerde bağlantı elemanlarının birleşme uzunluğu boyunca davranışı ile benzer olmasıdır. Bağlantı elemanı ile birleşmede; birleşme uzunluğunun her iki ucundaki bağlantı elemanları, diğer yerlerdeki bağlantı elemanlarına göre daha fazla yük taşır. Doğal olarak gerilme konsantrasyonları bu bölgelerde oluşur. Aynı şekilde yapışma ile birleşmede de, yapışma uzunluğunun uç kısımlarında gerilme konsantrasyonları oluşur. Yapışma ile birleşme dizaynında, oluşan bu gerilme konsantrasyonlarının minimize edilmesi gerekir.

Yapışma birleşmeleri genel olarak çekme, kayma, basma, yarıma ve ayrılma yüklerine maruz kalırlar. Yapışma birleşmeleri çekme, kayma ve basma yüklerine karşı mukavemetli olmalarına rağmen, yarıma ve ayrılma kuvvetlerine karşı zayıflar [2]. Yapıştırıcı ile birleşme dizaynında, yapının hangi tip yüklemeye maruz kalacağı önceden tespit edilmelidir. Yükleme tipi tayin edildikten sonra gerilme analizini yapmak için, yapışma düzlemindeki gerilme dağılımını temsil eden uygun, basit bir model kurulması gerekir. Gerilme analizi; analitik, nümerik ve deneysel olmak üzere üç değişik yol ile yapılabilir.

4.3. Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesinin Analitik Olarak İncelenmesi

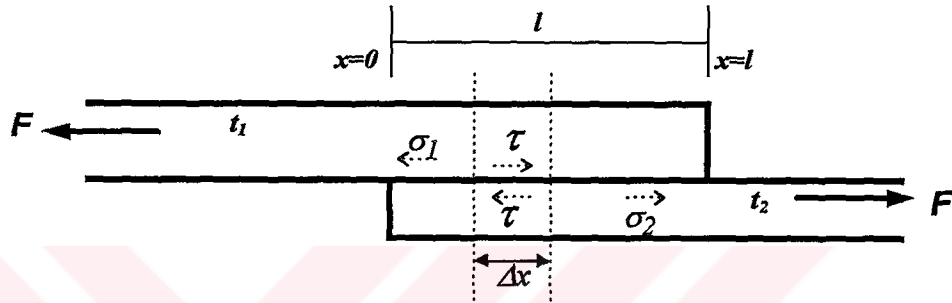
4.3.1. Yapışma Birleşme Modeli

Genel olarak yapışma ile birleşmenin mukavemeti; birleşen parçaların büyüklüğüne, kalınlığına, elastik modülüne, yapıştırıcının kayma modülüne, yapışma uzunluğuna, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine, yapışma işlemine ve yapışma birleşmesinin maruz kalacağı şartlara bağlıdır.

Yapışma ile birleşmeyi analiz etmeden önce, çeşitli kabuller yapılabilir. Bunlar;

- a) Levhalar arasında mükemmel bir yapışma vardır.
- b) Yapıştırıcının kalınlığı, yapışma uzunluğu boyunca sabittir.
- c) Yapışma birleşmesi, sadece çekme gerilmesine maruzdur.

Şekil 4.1, çekme gerilmesine maruz kalan; l yapışma uzunluğuna sahip, birim genişlikte, t_1 ve t_2 kalınlığında iki levhanın yapıştırıcı ile birleşmesini temsil eden modeli göstermektedir.



Şekil 4.1 Yapışma Birleşmesi Modeli

F : Birim genişlik başına uygulanan çekme kuvvetini

σ_1 : t_1 kalınlığındaki levhanın çekme gerilmesini

σ_2 : t_2 kalınlığındaki levhanın çekme gerilmesini

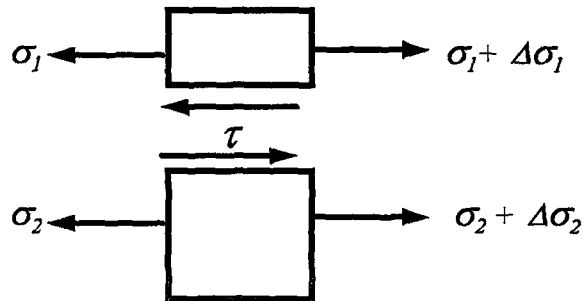
τ : İki levha arasındaki kayma gerilmesini

t_1 : Üst levhanın kalınlığını

t_2 : Alt levhanın kalınlığını

l : Yapışma uzunluğunu

Yapışma birleşme modelinde, Δx uzunluğundaki yapışma kesitine gelen yükler, şekil 4.2 'de gösterildiği gibi temsil edilebilir.



Şekil 4.2 Yapışma Kesitine Gelen Yükler

4.3.2. Yapışma Birleşme Modelinde Yapıştırıcının Analiz Edilmesi

Gerilme, uzama ile doğru orantılıdır [11]. Levhalar arasındaki yükün bir levhadan diğer levhaya aktarılması iki levha arasındaki kayma gerilmesi ile sağlanır. Levhalar arasındaki kayma gerilmesi, alt ve üst levhaların yerdeğiştirmesi ile ilgilidir. Levhalar arasındaki kayma gerilmesi için, aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\tau = k(u_1 - u_2) \quad (4.1)$$

Burada,

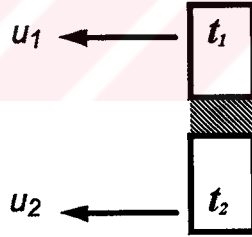
k : Katılık parametresi

u_1 : Üst levhanın yerdeğiştirmesini

u_2 : Alt levhanın yerdeğiştirmesini

temsil ediyor.

4.1 denklemi, yapışma uzunluğu boyunca kayma gerilmesinin oluşabilmesi için, levhalar arasında göreceli bir kaymanın oluşması gerektiğini belirtiyor.



Şekil 4.3 Δx Yapışma Kesitinin Yerdeğiştirmeleri

Şekil 4.4, Δx uzunluğunda h kalınlığında bir yapıştırıcı kesitin yüklenme durumunda davranışını göstermektedir.



Şekil 4.4 Yapıştırıcı Kesiti

Δx uzunluğunda, h kalınlığındaki yapıştırıcı kesiti için;

$$\tau = G\gamma \quad (4.2)$$

$$\gamma = \frac{(u_1 - u_2)}{h} \quad (4.3)$$

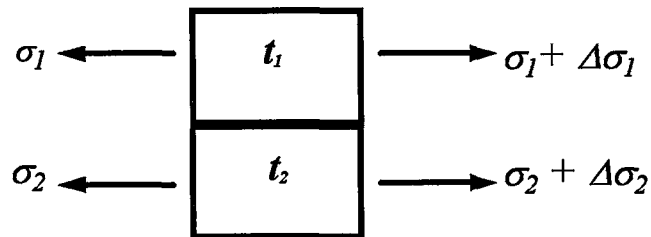
yazılabilir. 4.1 ve 4.2 denklemleri birbirine eşitlenir ve gerekli düzenlemeler yapılarak bu eşitlikte 4.3 denklemi yerine konursa, k katılık parametresi için aşağıdaki denklem bulunur.

$$k = \frac{G}{h} \quad (4.4)$$

4.1 denklemindeki k katılık parametresi; G kayma modülüne ve yapıştırıcı kalınlığına bağlıdır. Katılık parametresi k ; yapıştırıcının kalınlığı ile ters, yapıştırıcının kayma modülü ile doğru orantılıdır.

4.3.3. Δx Uzunluğundaki Yapışma Kesiti İçin Denge Denkleminin Bulunması

Şekil 4.5, denge durumunda olan Δx uzunluğundaki yapışma kesitini göstermektedir. Δx uzunluğundaki yapışma kesiti için denge denklemi yazılırsa, kayma gerilmesinden bağımsız, çekme gerilmeleri arasında denklemler bulunur.



Şekil 4.5 Denge Durumundaki Yapışma Kesiti

$$\sigma_1 t_1 + \sigma_2 t_2 = \sigma_1 t_1 + \sigma_2 t_2 + \Delta \sigma_1 t_1 + \Delta \sigma_2 t_2 \quad (4.5)$$

4.5 denge denkleminde gerekli düzenlemeler yapılır, her iki tarafı Δx 'e bölünür ve diferansiyel hale getirilirse, denge denklemi;

$$\frac{d\sigma_1}{dx} = -\frac{t_2}{t_1} \frac{d\sigma_2}{dx} \quad (4.6)$$

şeklini alır. Her iki tarafın integrali alınır,

$$\sigma_1 = -\frac{t_2}{t_1} \sigma_2 + C \quad (4.7)$$

olarak bulunur. 4.7 denklemindeki C bilinmeyeni, sınır şartlarından bulunabilir.

$$x=0 \text{ için } \sigma_1 = \frac{F}{t_1} \quad \sigma_2 = 0$$

Sınır şartları 4.7 denkleminde yerine konursa,

$$C = \frac{F}{t_1}$$

olarak bulunur. C bilinmeyeni yerine konursa,

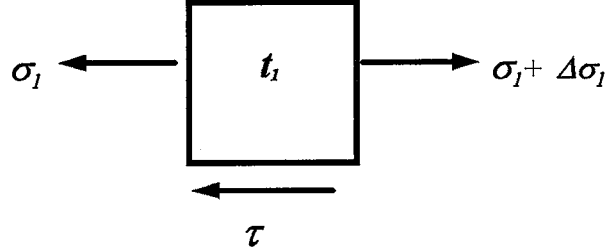
$$\sigma_1 = \frac{F}{t_1} - \frac{t_2}{t_1} \sigma_2 \quad (4.8)$$

$$\sigma_2 = \frac{F}{t_2} - \frac{t_1}{t_2} \sigma_1 \quad (4.9)$$

4.8 ve 4.9 denklemleri; Δx uzunluğundaki yapışma kesiti için kayma gerilmesinden bağımsız, çekme gerilmelerinin birbirleri ile ilişkisini gösteren denklemlerdir.

4.3.4. Üst Levha İçin Çekme ve Kayma Gerilmelerinin Bulunması

Şekil 4.6, Δx uzunluğundaki yapışma kesiti için üst levhanın maruz kaldığı yükleri göstermektedir.



Şekil 4.6 Üst Levhanın Yapışma Kesitine Gelen Yükler

Birim genişlik için, şekil 4.6'ya göre denge denklemi yazılırsa,

$$\tau \Delta x = \Delta \sigma_1 t_1 \quad (4.10)$$

bulunur. Her iki taraf Δx 'e bölünür ve diferansiyel hale getirilirse,

$$\tau = \frac{d\sigma_1}{dx} t_1 \quad (4.11)$$

elde edilir. 4.11 ve daha önce yazılan 4.1 denkleminde τ 'lar eşitlenirse,

$$k(u_1 - u_2) = \frac{d\sigma_1}{dx} t_1 \quad (4.12)$$

bulunur. Her iki tarafın dx 'e göre türevini alarak,

$$\frac{k}{t_1} \left(\frac{du_1}{dx} - \frac{du_2}{dx} \right) = \frac{d^2 \sigma_1}{dx^2} \quad (4.13)$$

bulunur. Burada,

$$\frac{du_1}{dx} = \varepsilon_1 \quad (4.14)$$

$$\frac{du_2}{dx} = \varepsilon_2 \quad (4.15)$$

ε_1 ve ε_2 , sırasıyla üst ve alt levhaların birim uzamalarını göstermektedir. Yerine konursa,

$$\frac{k}{t_1}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \frac{d^2 \sigma_1}{dx^2} \quad (4.16)$$

bulunur. ε_1 ve ε_2 için aşağıdaki gibi gerilme-birim uzama denklemleri yazılabilir.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (4.18)$$

4.17 ve 4.18 denklemleri, 4.16 denkleminde yerine konursa,

$$\frac{k}{t_1} \left(\frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_2}{E_2} \right) = \frac{d^2 \sigma_1}{dx^2} \quad (4.19)$$

bulunur. 4.19 denkleminde, σ_1 ve σ_2 olmak üzere iki bilinmeyen vardır. Daha önce bulunan 4.9 denklemi, 4.19 denkleminde yerine konursa,

$$\frac{k}{t_1} \left[\frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \left(\frac{F}{t_2} - \frac{t_1}{t_2} \sigma_1 \right) \right] = \frac{d^2 \sigma_1}{dx^2} \quad (4.20)$$

elde edilir. Bulunan bu ikinci dereceden bir bilinmeyenli diferansiyel denklem düzenlenerek aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{d^2\sigma_1}{dx^2} - \beta^2\sigma_1 = -A_1 \quad (4.21)$$

Burada,

$$\beta = \sqrt{k\left(\frac{1}{E_1t_1} + \frac{1}{E_2t_2}\right)}$$

$$k = \frac{G}{h}$$

$$A_1 = F \frac{k}{E_2t_2t_1}$$

4.21 denklemi, yapışma uzunluğu boyunca üst levhanın çekme gerilmesini göstermektedir. Bu denklem, ikinci dereceden bir bilinmeyenli diferansiyel denklemdir. Bu diferansiyel denklemin genel çözümü; özel ve tamamlayıcı çözüm olmak üzere iki aşamada yapılabilir.

a) Özel Çözüm

Özel çözüm için eşitliğin sağ tarafına göre, aşağıdaki gibi birinci dereceden bir denklem önerilebilir.

$$R(x) = S_1x + S_2 \quad (4.22)$$

4.22 denkleminin türevleri alınırsa,

$$R'(x) = S_1 \quad (4.23)$$

$$R''(x) = 0 \quad (4.24)$$

bulunur. 4.23 ve 4.24 denklemleri, 4.21 denkleminde yerine konursa, S_1 ve S_2 bilinmeyenleri,

$$S_1=0 \quad (4.25)$$

$$S_2= A_1/\beta^2 \quad (4.26)$$

şeklinde bulunur. 4.25 ve 4.26 denklemleri, 4.22 denkleminde yerine konursa özel çözüm,

$$R(x)= A_1/\beta^2 \quad (4.27)$$

olarak elde edilir.

b) Tamamlayıcı Çözüm

Tamamlayıcı çözüm için, ikinci dereceden bir bilinmeyenli 4.21 diferansiyel denkleminin sol tarafına uygun olarak, aşağıdaki gibi hiperbolik bir denklem önerilebilir.

$$U_1 = A_2 \sinh(\beta x) + A_3 \cosh(\beta x) \quad (4.28)$$

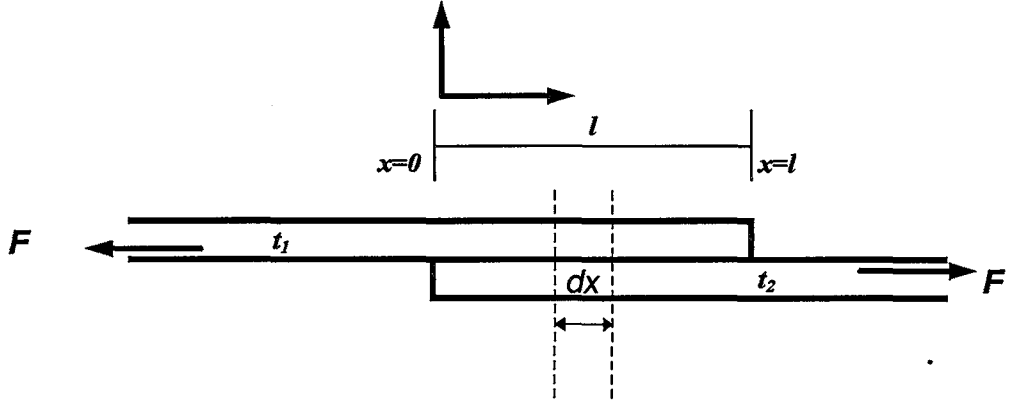
Özel ve tamamlayıcı çözümler elde edildikten sonra, 4.21 denkleminin genel çözümü; özel ve tamamlayıcı çözümlerin toplamıdır. Şimdi genel çözüm yazılırsa,

$$\sigma_1 = \frac{A_1}{\beta^2} + A_2 \sinh(\beta x) + A_3 \cosh(\beta x) \quad (4.29)$$

elde edilir. 4.29 denklemindeki A_1 , A_2 ve A_3 bilinmeyenleri sınır şartlarından bulunur.

$$(1) \quad x = 0 \quad \sigma_1 = F/t_1$$

$$(2) \quad x = l \quad \sigma_1 = 0$$



Şekil 4.7 Üst Levha için Sınır Şartları

(1) nolu sınır şartından,

$$A_3 = \frac{F}{t_1} - \frac{A_1}{\beta^2} \quad (4.30)$$

(2) nolu sınır şartından,

$$A_2 = - \frac{\left(A_3 \cosh(\beta l) + \frac{A_1}{\beta^2} \right)}{\sinh(\beta l)} \quad (4.31)$$

bulunur. A_1 , A_2 ve A_3 bilinmeyenleri yeniden düzenlenirse,

$$A_1 = \left(\frac{F}{t_1} \right) \frac{k}{E_2 t_2} \quad (4.32)$$

$$A_2 = - \left(\frac{F}{t_1} \right) \left(\frac{1}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \right) \left[\frac{E_2 t_2 \cosh(\beta l) + E_1 t_1}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (4.33)$$

$$A_3 = \left(\frac{F}{t_1} \right) \left(\frac{E_2 t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \right) \quad (4.34)$$

elde edilir. 4.32, 4.33 ve 4.34 denklemleri; 4.29 denkleminde yerine konursa,

$$\sigma_1 = \left(\frac{F}{t_1}\right) \left(\frac{1}{E_1 t_1 + E_2 t_2}\right) \left[E_2 t_2 \cosh(\beta x) + E_1 t_1 - (E_2 t_2 \cosh(\beta l) + E_1 t_1) \frac{\sinh(\beta x)}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (4.35)$$

bulunur. 4.35 denkleminde; F , birim genişlik başına üst levhaya uygulanan çekme kuvvetini göstermektedir. Bu değer üst levha kalınlığı t_1 'e bölünürse, yapışma uzunluğu dışında üst levhanın maruz kaldığı çekme gerilmesi elde edilir.

$$\sigma_{\infty 1} = \frac{F}{t_1} \quad (4.36)$$

4.36 denklemi, 4.35 denkleminde yerine konur ve boyutsuzlandırılırsa, üst levha için yapışma uzunluğu boyunca çekme gerilmesi dağılımını gösteren 4.37 denklemi elde edilir.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{\infty 1}} = \left(\frac{1}{E_1 t_1 + E_2 t_2}\right) \left[E_2 t_2 \cosh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right) + E_1 t_1 - (E_2 t_2 \cosh(\beta l) + E_1 t_1) \frac{\sinh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right)}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (4.37)$$

Burada,

$$\beta = \sqrt{k \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)}$$

$$k = \frac{G}{h}$$

Üst levha için, yapışma uzunluğu boyunca çekme gerilmesi dağılımını gösteren 4.37 denklemi bulunduktan sonra, 4.11 denkleminin yardımı ile yapışma uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımı bulunabilir.

$$\tau = \frac{d\sigma_1}{dx} t_1$$

Yukarıdaki denklemde, 4.29 denklemi yerine konursa,

$$\tau = \frac{d}{dx} \left(\frac{A_1}{\beta^2} + A_2 \sinh(\beta x) + A_3 \cosh(\beta x) \right) t_2 \quad (4.38)$$

elde edilir. 4.38 denkleminin türevi alınırsa,

$$\tau = t_1 \beta (A_2 \cosh(\beta x) + A_3 \sinh(\beta x)) \quad (4.39)$$

bulunur. 4.33 ve 4.34 denklemleri, 4.39 denkleminde yerine konursa,

$$\tau = \left(\frac{F}{t_1} \right) \left(\frac{\beta t_1}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \right) \left[E_2 t_2 \sinh(\beta x) - (E_2 t_2 \cosh(\beta l) + E_1 t_1) \frac{\cosh(\beta x)}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (4.40)$$

elde edilir. 4.40 denkleminde, gerekli düzenlemeler yapılarak boyutsuzlandırılırsa, üst levha için yapışma uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımını gösteren 4.41 denklemi bulunur.

$$\frac{\tau}{\sigma_{\infty 1}} = \left(\frac{\beta t_1}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \right) \left[E_2 t_2 \sinh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right) - (E_2 t_2 \cosh(\beta l) + E_1 t_1) \frac{\cosh\left(\beta l \left(\frac{x}{l}\right)\right)}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (4.41)$$

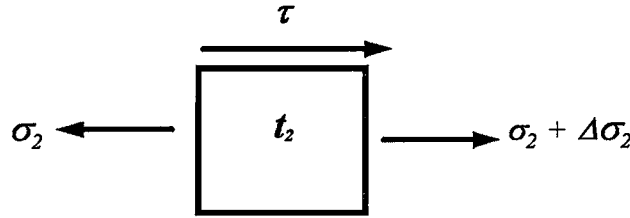
Burada,

$$\beta = \sqrt{k \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)}$$

$$k = \frac{G}{h}$$

4.3.5. Alt Levha İçin Çekme ve Kayma Gerilmelerinin Bulunması

Şekil 4.8, Δx uzunluğundaki yapışma kesiti için alt levhanın maruz kaldığı yükleri göstermektedir.



Şekil 4.8 Alt Levhanın Yapışma Kesitine Gelen Yükler

Birim genişlik için, şekil 4.8'e göre denge denklemi yazılırsa,

$$-\tau\Delta x = \Delta\sigma_2 t_2 \quad (4.42)$$

bulunur. Her iki taraf Δx 'e bölünür ve diferansiyel hale getirilirse,

$$\tau = -\frac{d\sigma_2}{dx} t_2 \quad (4.43)$$

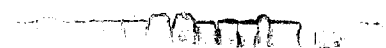
elde edilir. Denge denklemi 4.43 ve 4.1 denkleminde τ 'lar eşitlenirse,

$$k(u_1 - u_2) = -\frac{d\sigma_2}{dx} t_2 \quad (4.44)$$

bulunur. Her iki tarafın dx 'e göre türevini alarak,

$$\frac{k}{t_2} \left(\frac{du_2}{dx} - \frac{du_1}{dx} \right) = \frac{d^2\sigma_2}{dx^2} \quad (4.45)$$

bulunur. 4.45 denkleminde, 4.14 ve 4.15 denklemleri yerine konursa,



$$\frac{k}{t_2}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) = \frac{d^2 \sigma_2}{dx^2} \quad (4.46)$$

bulunur. 4.17 ve 4.18 denklemleri; 4.46 denkleminde yerine konursa,

$$\frac{k}{t_2} \left(\frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\sigma_1}{E_1} \right) = \frac{d^2 \sigma_2}{dx^2} \quad (4.47)$$

bulunur. 4.47 denkleminde; σ_1 ve σ_2 olmak üzere iki bilinmeyen vardır. Daha önce bulunan 4.8 denklemi, 4.47 denkleminde yerine konursa,

$$\frac{k}{t_2} \left[\frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{1}{E_1} \left(\frac{F}{t_1} - \frac{t_2}{t_1} \sigma_2 \right) \right] = \frac{d^2 \sigma_2}{dx^2} \quad (4.48)$$

elde edilir. Bulunan bu ikinci dereceden bir bilinmeyenli diferansiyel denklem düzenlenerek aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{d^2 \sigma_2}{dx^2} - \beta^2 \sigma_2 = -B_1 \quad (4.49)$$

Burada,

$$\beta = \sqrt{k \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)}$$

$$k = \frac{G}{h}$$

$$B_1 = \left(\frac{F}{t_2} \right) \frac{k}{E_1 t_1}$$

4.49 denklemi yapışma uzunluğu boyunca alt levhanın çekme gerilmesini göstermektedir. Bu denklem, ikinci dereceden bir bilinmeyenli diferansiyel denklemdir. Bu diferansiyel denklemin genel çözümü; özel ve tamamlayıcı çözüm olmak üzere iki aşamada yapılabilir.

a) Özel Çözüm

Özel çözüm için aşağıdaki gibi birinci dereceden bir denklem önerilebilir.

$$f(x) = M_1 x + M_2 \quad (4.50)$$

4.50 denkleminin türevleri alınırsa,

$$f'(x) = M_1 \quad (4.51)$$

$$f''(x) = 0 \quad (4.52)$$

bulunur. 4.51 ve 4.52 denklemleri; 4.50 denkleminde yerine konursa,

$$M_1 = 0 \quad (4.53)$$

$$M_2 = B_1 / \beta^2 \quad (4.54)$$

şeklinde bulunur. 4.53 ve 4.54 denklemleri; 4.50 denkleminde yerine konursa özel çözüm,

$$f(x) = B_1 / \beta^2 \quad (4.55)$$

olarak elde edilir.

b) Tamamlayıcı Çözüm

Tamamlayıcı çözüm için, ikinci dereceden bir bilinmeyenli 4.49 diferansiyel denkleminin sol tarafına göre aşağıdaki gibi hiperbolik bir denklem önerilebilir.

$$U_2 = B_2 \sinh(\beta x) + B_3 \cosh(\beta x) \quad (4.56)$$

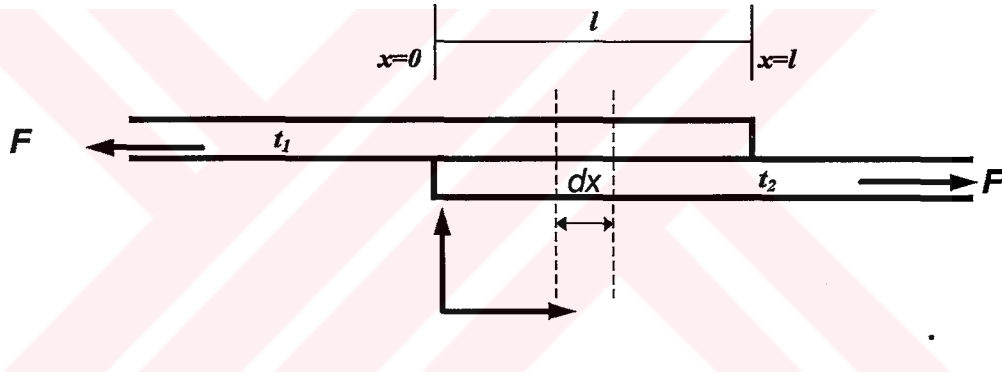
4.49 denkleminin genel çözümü; özel ve tamamlayıcı çözümlerin toplamıdır. Şimdi genel çözüm yazılırsa,

$$\sigma_2 = \frac{B_1}{\beta^2} + B_2 \sinh(\beta x) + B_3 \cosh(\beta x) \quad (4.57)$$

elde edilir. 4.57 denkleminde; B_1 , B_2 ve B_3 bilinmeyenleri sınır şartlarından bulunur.

$$(1) \quad x = 0 \quad \sigma_2 = 0$$

$$(2) \quad x = l \quad \sigma_2 = F/t_2$$



Şekil 4.9 Alt Levha İçin Sınır Şartları

(1) nolu sınır şartından,

$$B_3 = -\frac{B_1}{\beta^2} \quad (4.58)$$

(2) nolu sınır şartından,

$$B_2 = \frac{\left(\frac{F}{t_2} - \frac{B_1}{\beta^2} (1 - \cosh(\beta l)) \right)}{\sinh(\beta l)} \quad (4.59)$$

bulunur. B_1 , B_2 ve B_3 bilinmeyenleri yeniden düzenlenirse,

$$B_1 = \left(\frac{F}{t_2}\right) \frac{k}{E_1 t_1} \quad (4.60)$$

$$B_2 = \left(\frac{F}{t_2}\right) \left(\frac{1}{E_1 t_1 + E_2 t_2}\right) \left[\frac{E_1 t_1 + E_2 t_2 \cosh(\beta l)}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (4.61)$$

$$B_3 = -\left(\frac{F}{t_2}\right) \left(\frac{E_2 t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2}\right) \quad (4.62)$$

elde edilir. 4.60, 4.61 ve 4.62 denklemleri; 4.57 denkleminde yerine konursa,

$$\sigma_2 = \left(\frac{F}{t_2}\right) \left(\frac{1}{E_1 t_1 + E_2 t_2}\right) \left[(E_1 t_1 + E_2 t_2 \cosh(\beta l)) \frac{\sinh(\beta x)}{\sinh(\beta l)} - E_2 t_2 \cosh(\beta x) + E_2 t_2 \right] \quad (4.63)$$

bulunur. 4.63 denkleminde; F , birim genişlik başına alt levhaya uygulanan çekme kuvvetini göstermektedir. Bu değer alt levha kalınlığı t_2 'ye bölünürse, yapışma uzunluğu dışında alt levhanın maruz kaldığı çekme gerilmesi bulunur.

$$\sigma_{\infty 2} = \frac{F}{t_2} \quad (4.64)$$

4.64 denklemi; 4.63 denkleminde yerine konur ve boyutsuzlandırılırsa, alt levha için yapışma uzunluğu boyunca çekme gerilmesi dağılımını gösteren 4.65 denklemi elde edilir.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_{\infty 2}} = \left(\frac{1}{E_1 t_1 + E_2 t_2}\right) \left[(E_1 t_1 + E_2 t_2 \cosh(\beta l)) \frac{\sinh(\beta l(\frac{x}{l}))}{\sinh(\beta l)} + E_2 t_2 \left(1 - \cosh(\beta l(\frac{x}{l}))\right) \right] \quad (4.65)$$

Burada,

$$\beta = \sqrt{k\left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2}\right)}$$

$$k = \frac{G}{h}$$

Alt levha için, yapışma uzunluğu boyunca çekme gerilmesi dağılımını gösteren 4.65 denklemi bulunduğundan sonra, 4.43 denklemi yardımı ile yapışma uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımı bulunabilir.

$$\tau = -\frac{d\sigma_2}{dx} t_2$$

Yukarıdaki denklemde, 4.57 denklemi yerine konursa,

$$\tau = -\frac{d}{dx} \left(\frac{B_1}{\beta^2} + B_2 \sinh(\beta x) + B_3 \cosh(\beta x) \right) t_2 \quad (4.66)$$

elde edilir. 4.66 denkleminin türevi alınırsa,

$$\tau = -t_2 \beta (B_2 \cosh(\beta x) + B_3 \sinh(\beta x)) \quad (4.67)$$

bulunur. 4.61 ve 4.62 denklemleri; 4.67 denkleminde yerine konursa,

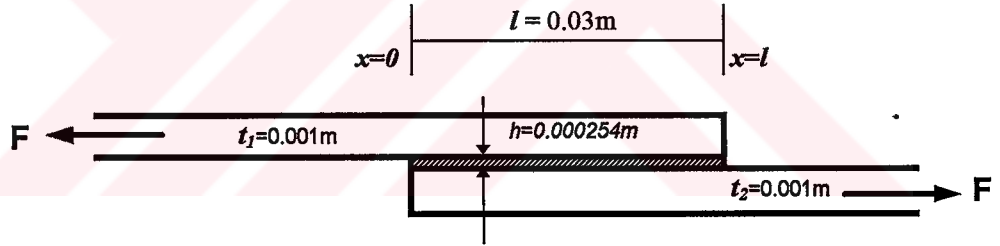
$$\tau = -\left(\frac{F}{t_2}\right) \left(\frac{\beta t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2}\right) \left[(E_1 t_1 + E_2 t_2 \cosh(\beta l)) \frac{\cosh(\beta x)}{\sinh(\beta l)} - E_2 t_2 \sinh(\beta x) \right] \quad (4.68)$$

elde edilir. 4.68 denkleminde, gerekli düzenlemeler yapılarak boyutsuzlandırılırsa, alt levha için yapışma uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımını gösteren 4.69 denklemi bulunur.

$$\frac{\tau}{\sigma_{\infty 2}} = \left(\frac{\beta t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \right) \left[E_2 t_2 \sinh \left(\beta l \left(\frac{x}{l} \right) \right) - (E_1 t_1 + E_2 t_2 \cosh(\beta l)) \frac{\cosh \left(\beta l \left(\frac{x}{l} \right) \right)}{\sinh(\beta l)} \right] \quad (4.69)$$

4.3.6. Analitik İncelemede Kullanılan Modelin Boyutlandırılması ve Gerilme Dağılımlarının Grafik Olarak Bulunması

4.37, 4.41, 4.65 ve 4.69 denklemleri; çekme gerilmesine maruz kalan, l yapışma uzunluğuna sahip yapışma birleşmesini temsil eden model için, kayma ve çekme gerilmelerinin yapışma uzunluğu boyunca dağılımını gösteren denklemlerdir. Elde edilen bu denklemler yardımı ile; analitik incelemede kullanılan model şekil 4.10'da gösterildiği gibi boyutlandırılarak yapışma uzunluğu boyunca çekme ve kayma gerilmelerinin; yapışma uzunluğu, yapıştırıcı kalınlığı, elastik modül ve levha kalınlığı ile değişimlerini gösteren çeşitli grafikler bulunabilir.



Şekil 4.10 Yapışma Birleşme Modelinin Boyutlandırılması

Boyutlandırma Parametreleri;

$t_1 = 0.001 \text{ m}$ (üst levhanın kalınlığı)

$t_2 = 0.001 \text{ m}$ (alt levhanın kalınlığı)

$l = 0.03 \text{ m}$ (yapışma uzunluğu)

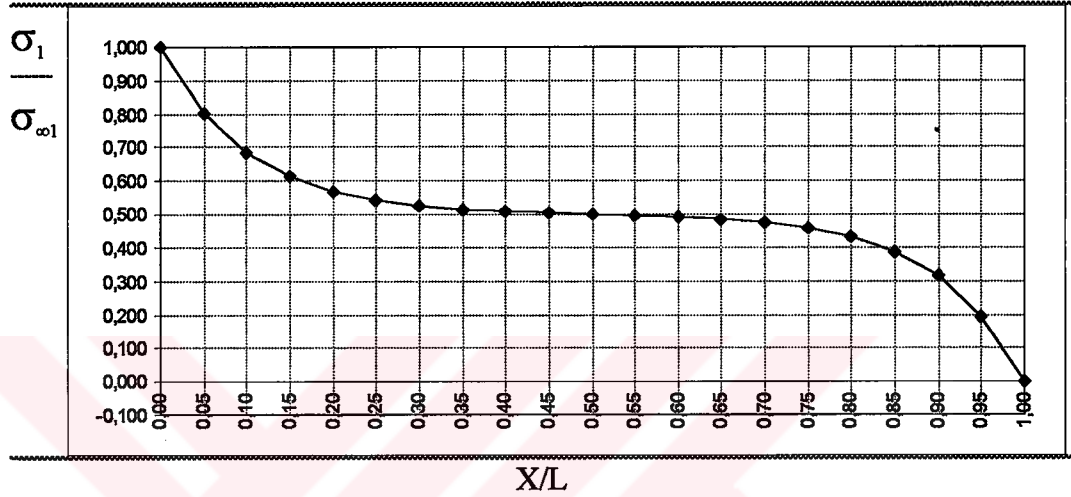
$h = 0.000254 \text{ m}$ (yapıştırıcı kalınlığı)

$E_1 = 72 \text{ GPa}$ (üst levhanın elastik modülü)

$E_2 = 72 \text{ GPa}$ (alt levhanın elastik modülü)

$G = 1 \text{ GPa}$ (yapıştırıcının kayma modülü)

Şekil 4.11; üst levha için maximum çekme gerilmesinin oranı olarak çekme gerilmesinin yapışma uzunluğu ile boyutsuz değişimini göstermektedir. $X/L=0$ için çekme gerilmesi $\sigma_1=\sigma_{\infty 1}$; X/L 'nin artması ile çekme gerilmesi azalan oranda azalarak; yapışma hattının ortalarına doğru sabitleşmektedir. Yapışma hattının sonlarına doğru artan oranda düşerek $X/L=1$ 'de çekme gerilmesi $\sigma_1=0$ olmaktadır.

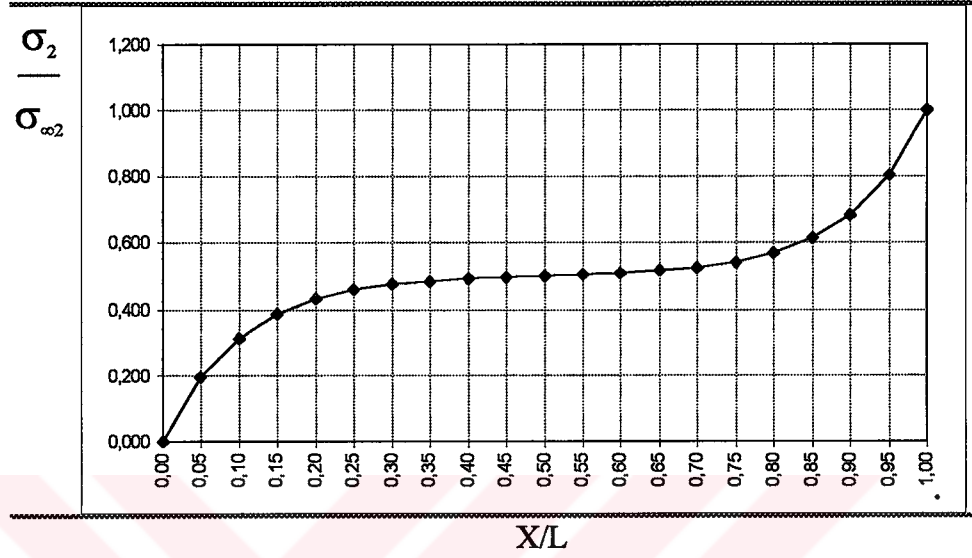


Şekil 4.11 Yapışma Hattı Boyunca Üst Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı

Şekil 4.12; alt levha için maximum çekme gerilmesinin oranı olarak çekme gerilmesinin yapışma uzunluğu ile boyutsuz değişimini göstermektedir. $X/L=0$ için çekme gerilmesi $\sigma_2=0$; X/L 'nin artması ile çekme gerilmesi azalan oranda artmakta, yapışma hattının ortalarına doğru sabitleşmektedir. Yapışma hattının sonlarına doğru artan oranda artarak; $X/L=1$ 'de çekme gerilmesi $\sigma_2=\sigma_{\infty 2}$ olmaktadır.

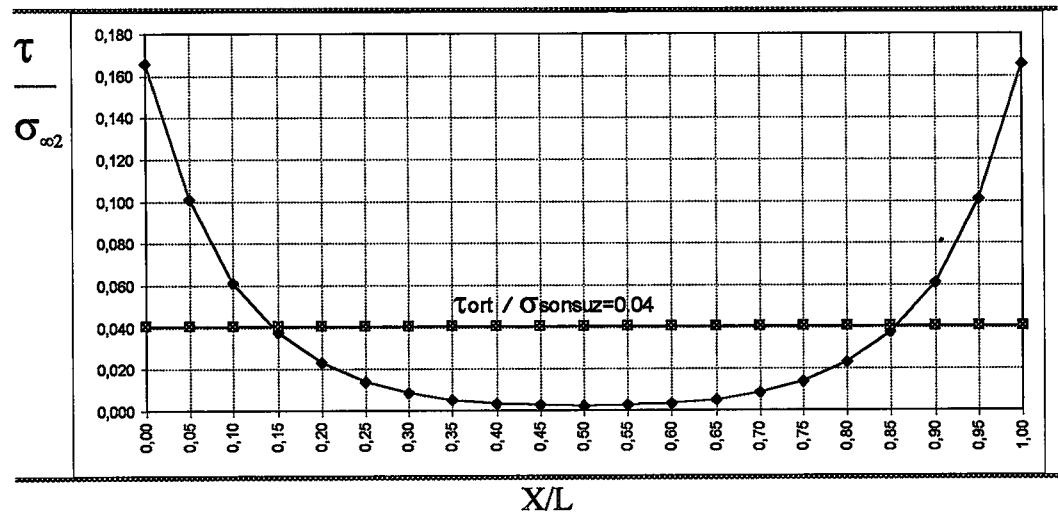
Şekil 4.13; maximum çekme gerilmesinin oranı olarak kayma gerilmesinin yapışma uzunluğu ile boyutsuz değişimini göstermektedir. $X/L=0$ 'da kayma gerilmesi $\tau=\tau_{\max}$; X/L 'nin artması ile kayma gerilmesi azalan oranda azalarak yapışma hattının ortalarına doğru minimum değerine ulaşmaktadır. Yapışma hattının sonlarına doğru artan oranda artarak, $X/L=1$ 'de tekrar kayma gerilmesi

$\tau=\tau_{\max}$ olmaktadır. Şekil 4.13’de ayrıca, maximum çekme gerilmesinin oranı olarak ortalama kayma gerilmesinin yapışma uzunluğu ile boyutsuz değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Yapışma Hattı Boyunca Alt Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı

Yapışma uzunluğunun başında ve sonunda ($X=0$ ve $X=L$) kayma gerilmesi maximumdur. Gerilme konsantrasyonları bu bölgelerde oluşur. Oluşan bu gerilme konsantrasyonlarının minimize edilmesi gerekir. Yapışma ile birleşme dizaynında bu önemli bir kriterdir.



Şekil 4.13 Yapışma Hattı Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı

Şekil 4.11, 12 ve 13'deki gösterilen boyutsuz eğriler; çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmeleri için, yapışma uzunluğu boyunca çekme ve kayma gerilmelerinin dağılımını gösteren oldukça karakteristik eğrilerdir.

Analitik çözümden de anlaşıldığı gibi, yapışma ile birleşmenin mukavemeti genel olarak;

- a) Yapışma uzunluğuna
- b) Birleşen levhaların elastik modülüne
- c) Birleşen levhaların kalınlığına
- d) Yapıştırıcının kalınlığına

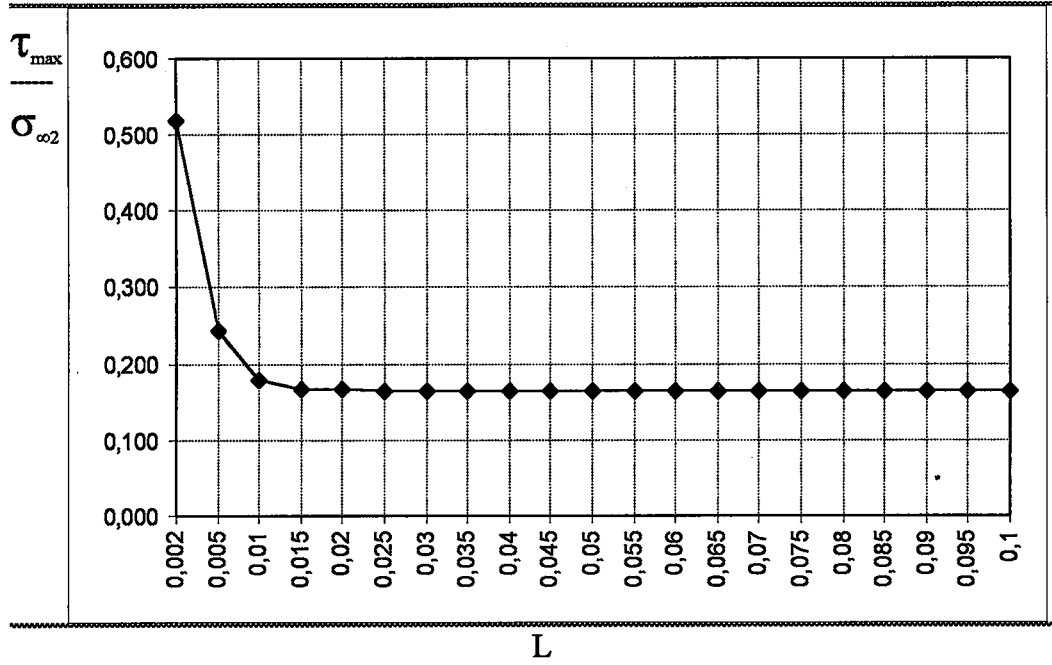
bağlıdır. Yapışma mukavemeti üzerinde; yapışma uzunluğunun, birleşen levhaların elastik modülünün, birleşen levhaların kalınlığının ve yapıştırıcının kalınlığının etkisi, elde edilen denklemler yardımı ile aşağıdaki bölümlerde sırasıyla incelenecektir.

4.3.6.1. Yapışma Uzunluğunun Etkisi

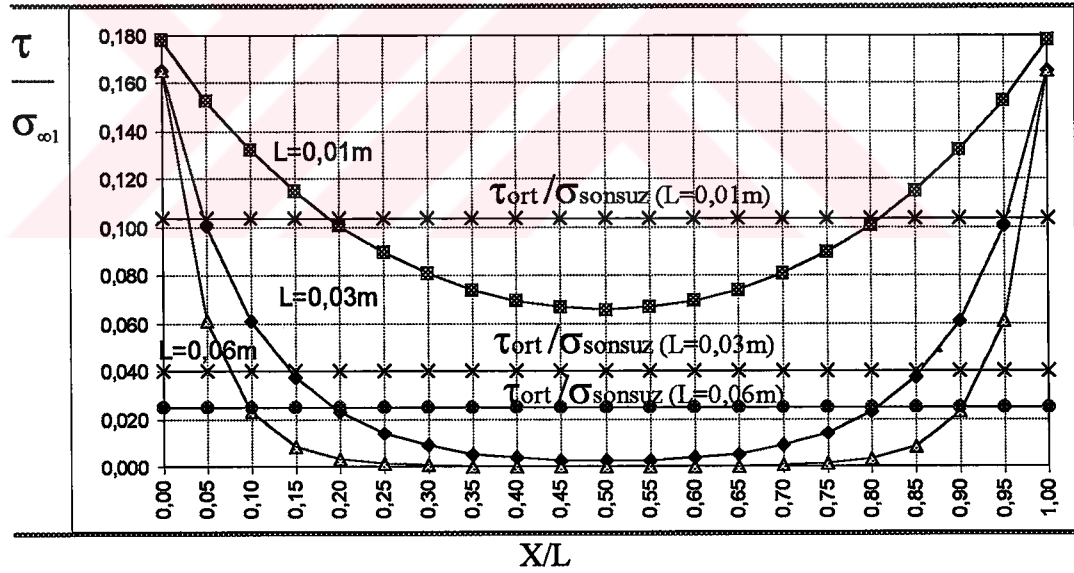
Şekil 4.14; yapışma birleşmesindeki maximum çekme gerilmesinin oranı olarak maximum kayma gerilmesinin yapışma uzunluğu ile değişimini göstermektedir. Yapışma uzunluğu artması ile maximum kayma gerilmesi azalan oranda düşerek belirli bir değerden sonra sabitleşmektedir.

Yapışma ile birleşme dizaynında; yapışma uzunluğunu artırma, yapışma uzunluğunu her iki ucunda ($X=0$ ve $X=L$) oluşan kayma gerilme konsantrasyonlarını; yani maximum kayma gerilmeleri; belirli bir değerin ötesinde azaltmaz.

Şekil 4.15; değişik yapışma uzunluklarına göre dizayn edilmiş yapışma birleşmeleri için, yapışma uzunluğu boyunca maximum çekme gerilmesinin oranı olarak kayma gerilmesinin yapışma uzunluğu ile boyutsuz değişimini göstermektedir. Yapışma uzunluğunun artırılması ile ortalama kayma gerilmesi önemli oranda azalmasına rağmen, yapışma hattının her iki ucundaki ($X=0$ ve $X=L$) kayma gerilmesi konsantrasyonlarında önemli oranda azalma olmamıştır. Bu yapışma ile birleşme dizaynında önemli bir kriterdir.

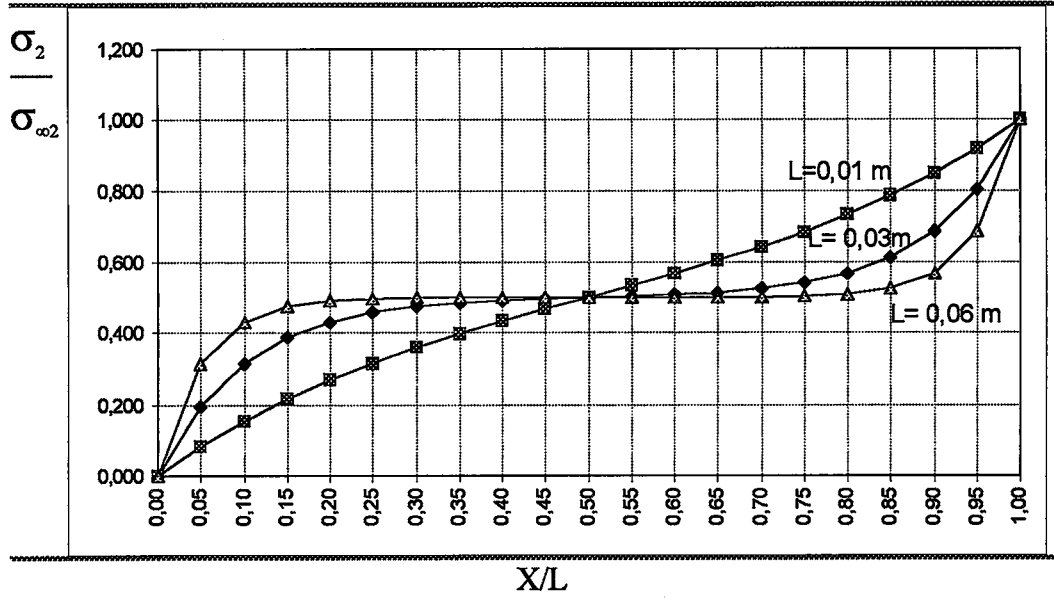


Şekil 4.14 Boyutsuz Maximum Kayma Gerilmesi ile Yapışma Uzunluğunun Değişimi



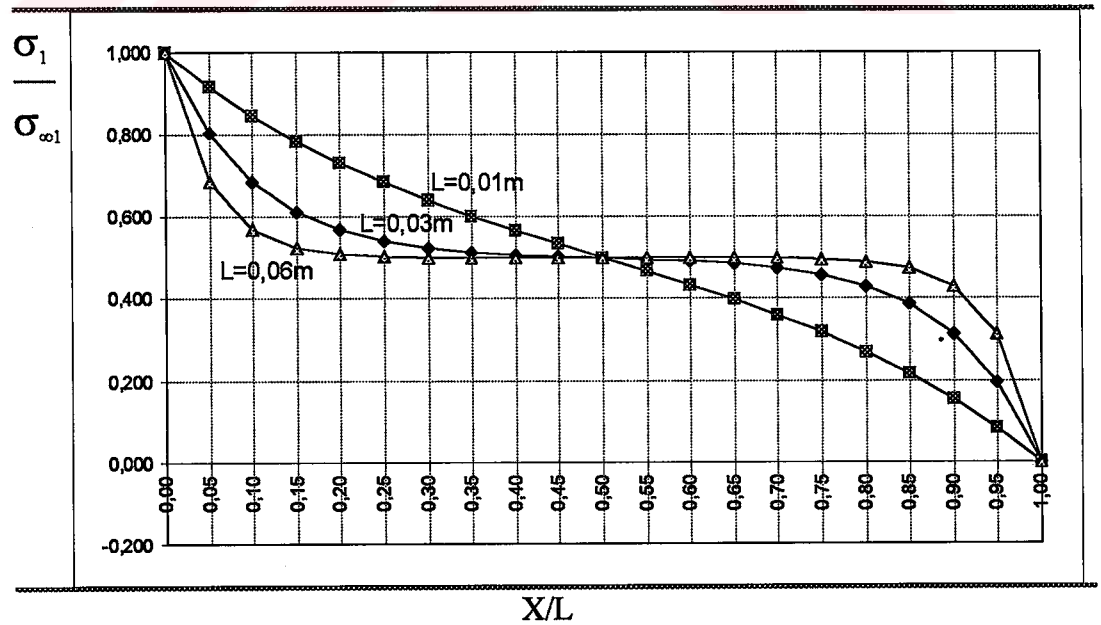
Şekil 4.15 Değişik Yapışma Uzunlukları İçin Yapışma Hattı Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı

Şekil 4.16; değişik yapışma uzunluklarına sahip yapışma birleşmeleri için, yapışma hattı boyunca maximum çekme gerilmesinin oranı olarak alt levhanın çekme gerilmesinin yapışma uzunluğu ile boyutsuz değişimini göstermektedir. Yapışma uzunluğunu artırma ile daha uniform çekme gerilmesi dağılımı elde edilir.



Şekil 4.16 Değişik Yapışma Uzunlukları İçin Yapışma Hattı Boyunca Alt Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı

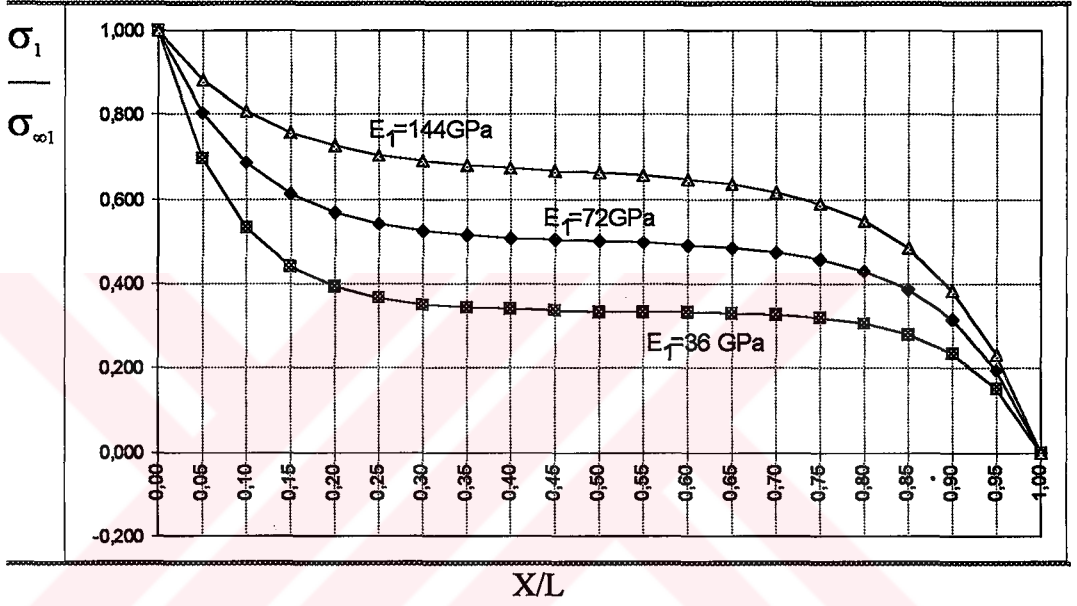
Şekil 4.17; değişik yapışma uzunluklarına sahip yapışma birleşmeleri için, yapışma hattı boyunca maximum çekme gerilmesinin oranı olarak üst levhanın çekme gerilmesinin yapışma uzunluğu ile boyutsuz değişimini göstermektedir. Yapışma uzunluğunu artırma ile daha uniform çekme gerilmesi dağılımı elde edilir.



Şekil 4.17 Değişik Yapışma Uzunlukları İçin Yapışma Hattı Boyunca Üst Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı

4.3.6.2. Birleşen Levhaların Elastik Modülünün Etkisi

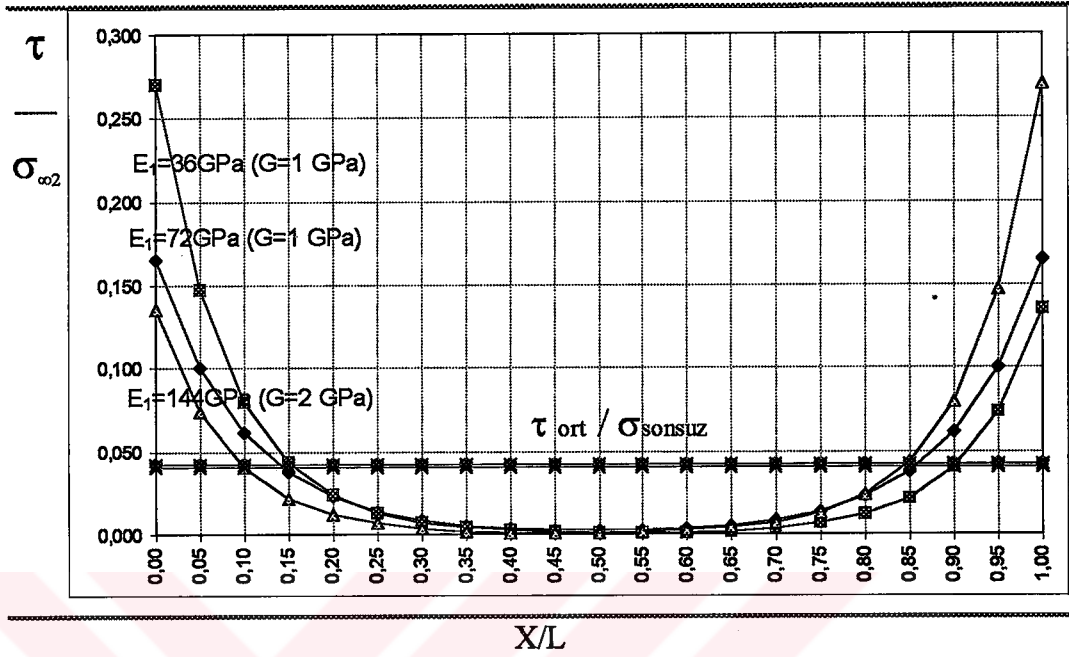
Şekil 4.18; değişik elastik modüllere göre dizayn edilmiş yapışma birleşmeleri için, yapışma hattı boyunca üst levhanın boyutsuz çekme gerilmesi dağılımını göstermektedir. Şekil 4.8’de sadece üst levhanın elastik modülü değiştirilmiştir. Üst levhanın elastik modülü artması ile üst levhanın yapışma hattındaki çekme gerilmesi artmaktadır.



Şekil 4.18 Değişik Elastik Modüller İçin Yapışma Hattı Boyunca Üst Levhanın Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı

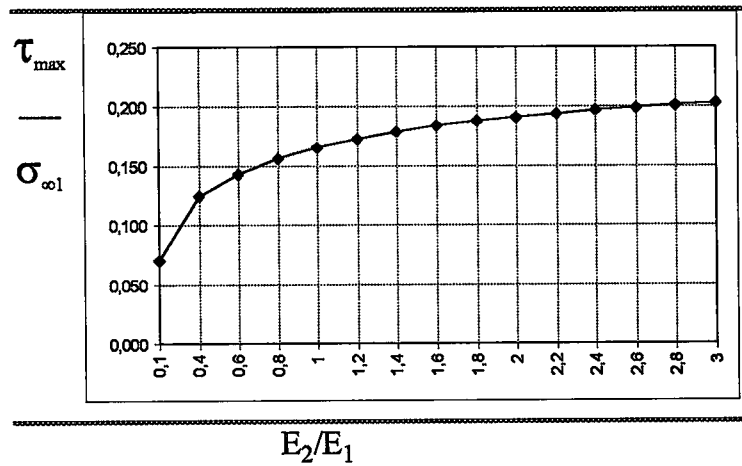
Şekil 4.19; değişik elastik modüllere göre dizayn edilmiş yapışma birleşmeleri için, yapışma hattı boyunca maximum çekme gerilmesinin oranı olarak kayma gerilmesinin değişimini göstermektedir. Şekil 4.19’da; üst levhanın elastik modülü ile yapıştırıcının kayma modülü değiştirilmiştir. $E_1=144$ GPa, $E_2=72$ GPa ve $G=2$ GPa’ya göre dizayn edilmiş yapışma birleşmesi; $E_1=72$ GPa, $E_2=72$ GPa ve $G=1$ GPa’ya göre dizayn edilmiş yapışma birleşmesi ile karşılaştırılırsa; $X=0$ ’daki maximum kayma gerilmesi daha düşük olmasına rağmen, $X=L$ ’deki maximum kayma gerilmesi daha yüksektir. $E_1=36$ GPa, $E_2=72$ GPa ve $G=1$ GPa’ya göre dizayn edilmiş yapışma birleşmesi; $E_1=72$ GPa, $E_2=72$ GPa ve $G=1$ GPa’ya göre dizayn edilmiş yapışma birleşmesi ile karşılaştırılırsa; $X=0$ ’daki maximum kayma

gerilmesi daha yüksek olmasına rağmen, $X=L$ 'deki maximum kayma gerilmesi daha düşüktür.



Şekil 4.19 Değişik Elastik Modüller İçin Yapışma Hattı Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı

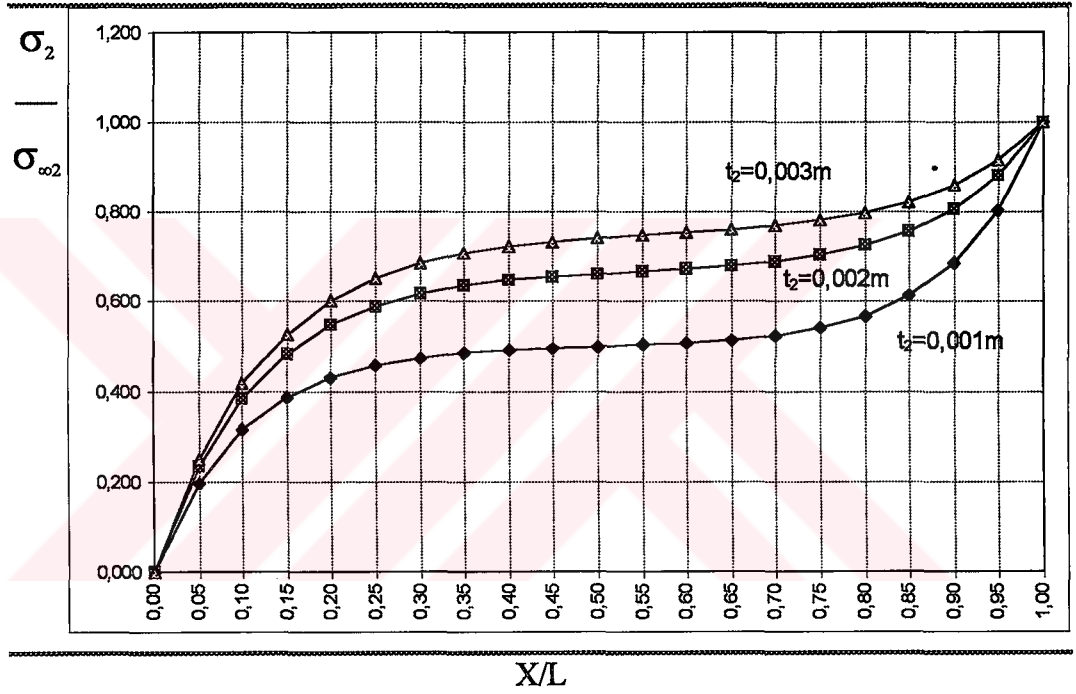
Şekil 4.20; maximum çekme gerilmesinin oranı olarak maximum kayma gerilmesinin, levhaların elastik modüller oranı ile değişimini göstermektedir. Elastik modüller oranının artması ile maximum kayma gerilmesi belirli bir değere kadar azalan oranda artmaktadır.



Şekil 4.20 Elastik Modüller Oranı İle Boyutsuz Maximum Kayma Gerilmesinin Değişimi

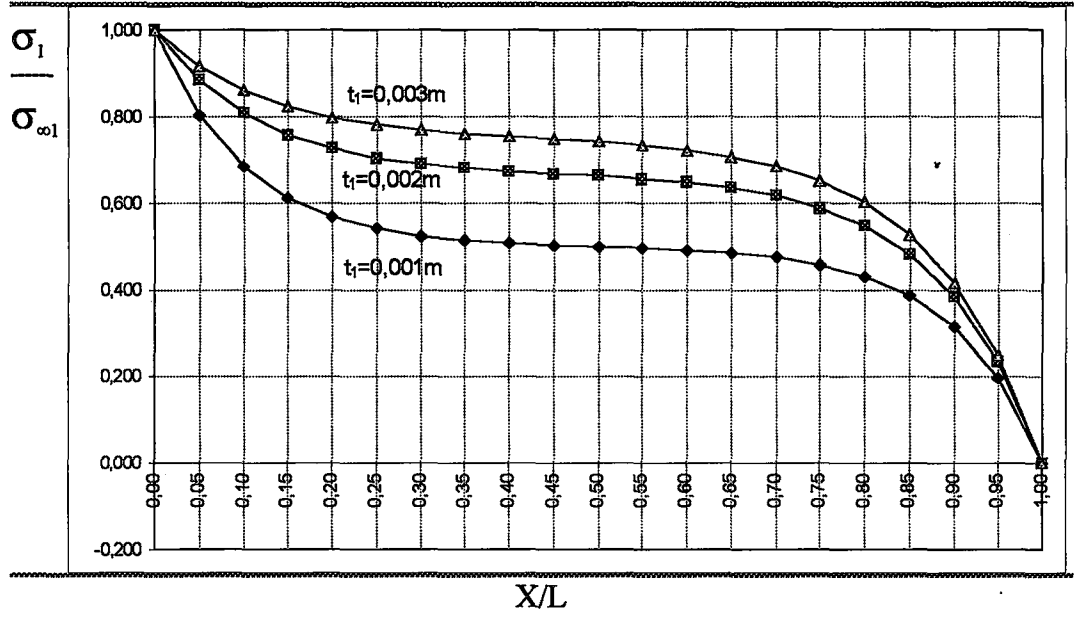
4.3.6.3. Levha Kalınlığının Etkisi

Şekil 4.21; değişik levha kalınlıklarına göre dizayn edilmiş yapışma birleşmeleri için, yapışma hattı boyunca alt levhanın boyutsuz çekme gerilmesi dağılımını göstermektedir. Alt levhanın kalınlığının artması ile yapışma hattındaki alt levha için çekme gerilmesi artmaktadır.



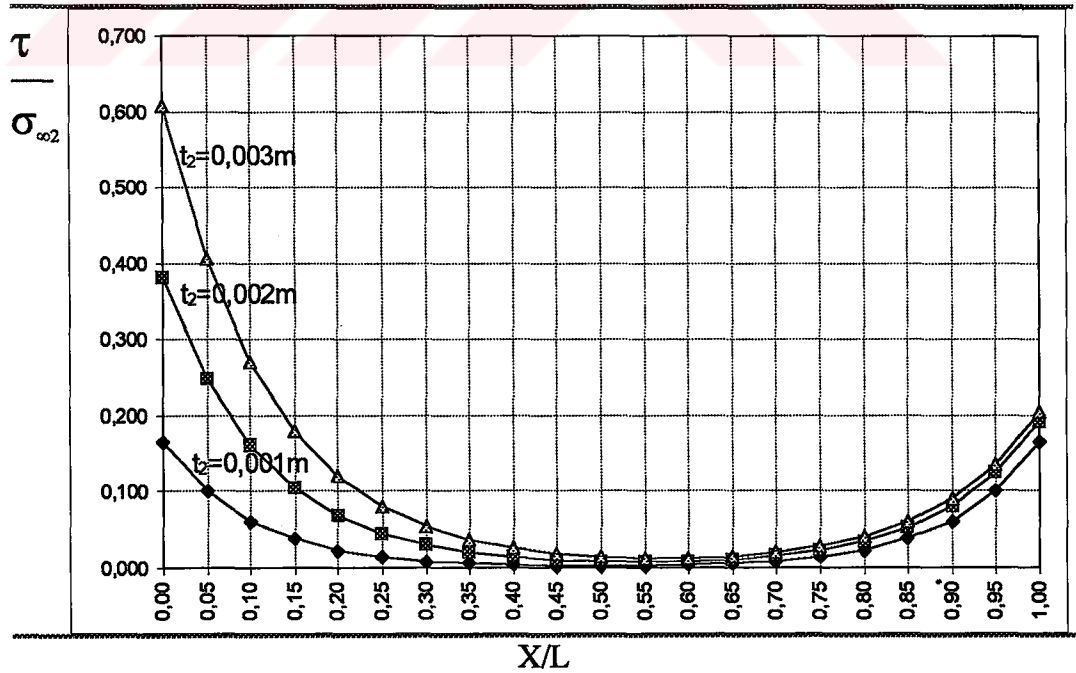
Şekil 4.21 Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı

Şekil 4.22; değişik levha kalınlıklarına göre dizayn edilmiş yapışma birleşmeleri için, yapışma hattı boyunca üst levhanın boyutsuz çekme gerilmesi dağılımını göstermektedir. Üst levhanın kalınlığının artması ile yapışma hattındaki üst levha için çekme gerilmesi artmaktadır.



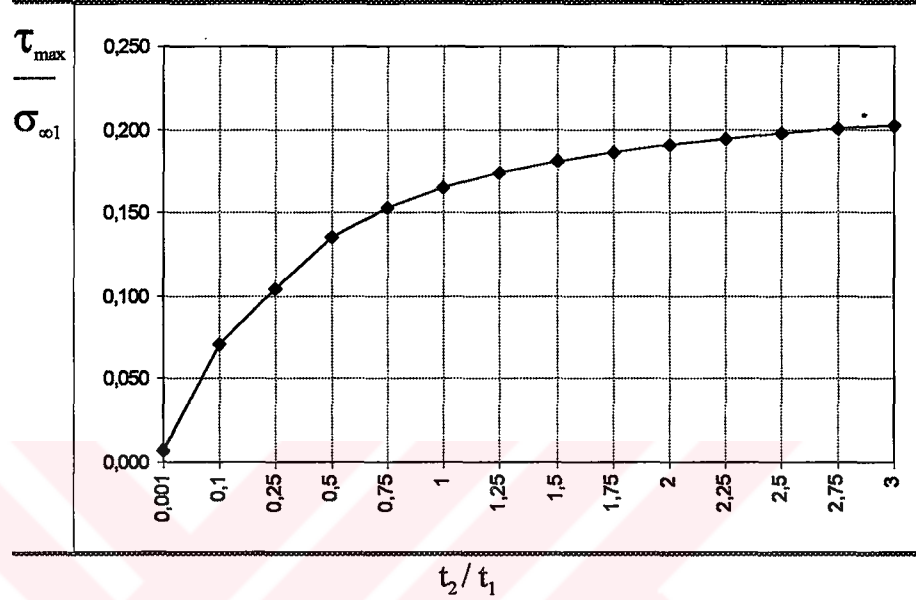
Şekil 4.22 Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Çekme Gerilmesi Dağılımı

Şekil 4.23'de, değişik levha kalınlıkları için, yapışma hattı boyunca kayma gerilmesi dağılımı gösterilmiştir. Alt levhanın kalınlığının artması ile $X=0$ 'daki maximum kayma gerilmesi artar.



Şekil 4.23 Değişik Levha Kalınlıkları İçin Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı

Şekil 4.24; maximum çekme gerilmesinin oranı olarak maximum kayma gerilmesinin levhaların kalınlıklarının oranı ile değişimini göstermektedir. Levhaların kalınlıklar oranının artması ile maximum kayma gerilmesi azalan oranda artmaktadır.



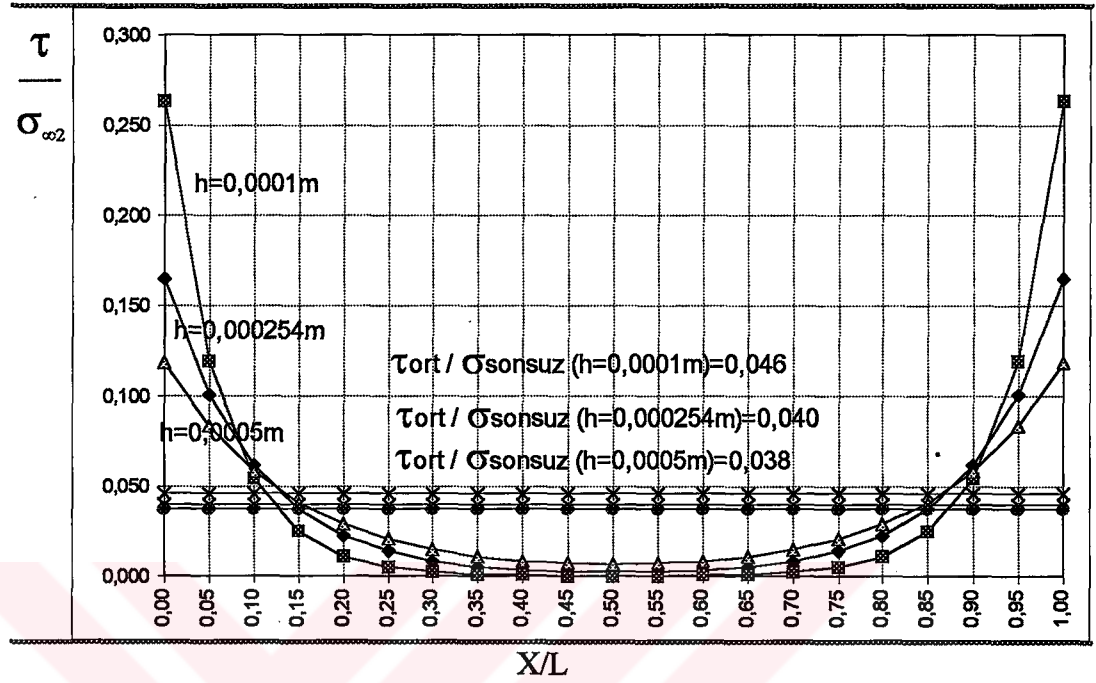
Şekil 4.24 Kalınlıklar Oranı İle Boyutsuz Maximum Kayma Gerilmesinin Değişimi

4.3.6.4. Yapıştırıcı Kalınlığının Etkisi

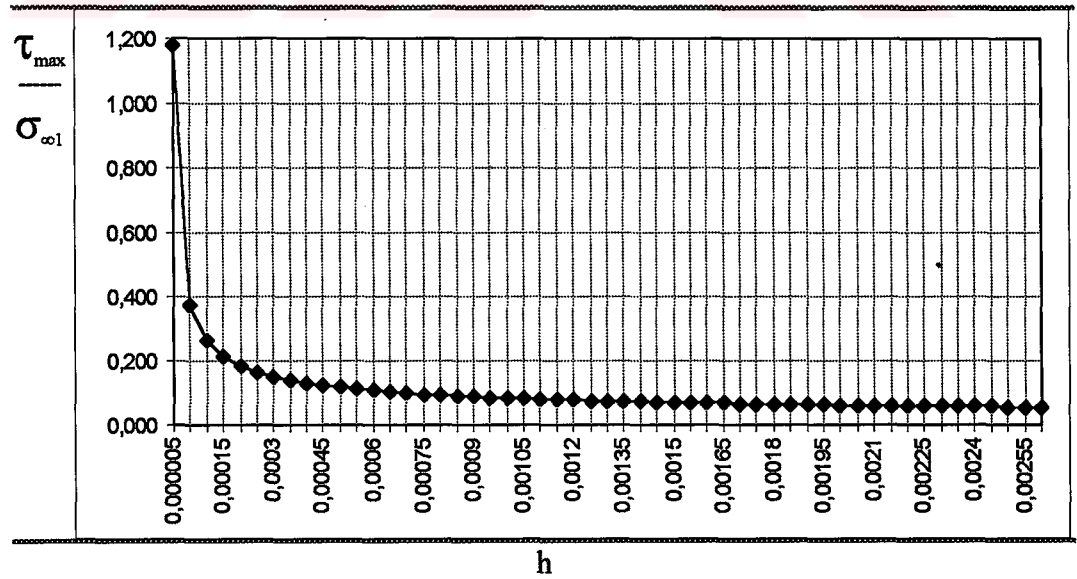
Şekil 4.25; değişik yapıştırıcı kalınlıklarına göre dizayn edilmiş yapışma birleşmeleri için, yapışma hattı boyunca boyutsuz kayma gerilmesi dağılımını göstermektedir. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile maximum kayma gerilmesi önemli oranda azalmasına rağmen ortalama kayma gerilmesinde önemli bir oranda azalma yoktur. Bu kritere göre; yapışma birleşmesinin uç noktalarında ($X=0$ ve $X=L$) daha kalın yapıştırıcı kalınlıklarını kullanma ile kayma gerilmesi konsantrasyonları azalır. Bu yapışma ile birleşme dizaynında bir başka önemli kriterdir.

Şekil 4.26; maximum çekme gerilmesinin oranı olarak maximum kayma gerilmesi ile yapıştırıcı kalınlığı arasındaki değişim göstermektedir. Yapıştırıcı

kalınlığının artması ile maximum kayma gerilmesi aniden bir azalım göstermekte ve sonra azalan oranda sabitleşmektedir.



Şekil 4.25 Değişik Yapıştırıcı Kalınlıkları İçin Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı



Şekil 4.26 Boyutsuz Maximum Kayma Gerilmesi İle Yapıştırıcı Kalınlığının Değişimi

4.4. Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesinin Nümerik Olarak İncelenmesi

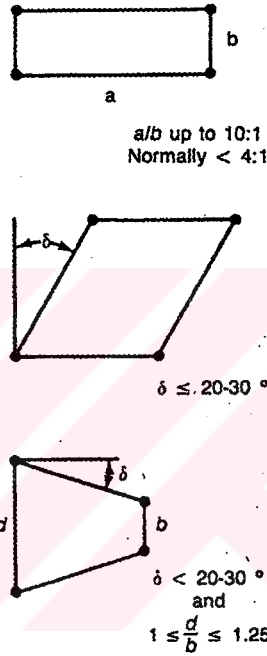
4.4.1. Nümerik Yöntemler

Sonlu elemanlar yöntemi gibi nümerik inceleme teknikleri; emniyetli, ekonomik ve performanslı bir yapışma birleşmesinin dizayn edilmesinde önemli bir araçtır. Ama birleşme bölgesi çok karmaşık ve çok farklı malzemelerden oluşan birleşmelerin nümerik inceleme teknikleri kullanılarak yapılan analizinde, matematiksel olarak gerçek çözümlerin bulunma zorlukları ortaya çıkar [12]. Bu matematiksel problemlerin bazıları, yapıştırıcı ve bileşenler arasındaki etkileşimde oluşan tekil noktaların (teorik olarak sonsuz gerilmeler) varlığı ve sınır şartlarının belirlenme zorluğudur.

Nümerik yöntemler; kompleks yüklere, geometrilere, malzeme özelliklerine ve sınır şartlarına sahip yapışma birleşmeleri için kolayca adapte edilebilir. Bununla beraber nümerik çözümler, gerçek çözümler için sadece bir yaklaşımdır. Gerçek çözümler ile bu yaklaşık çözümler arasındaki doğruluğun derecesi çözülecek problemin karmaşıklığına bağlıdır. Bu yüzden analizi yapan kişinin nümerik teknikleri kullanmanın kısıtlamalarını, analiz edilecek yapının maruz kaldığı gerilme tipini ve birleşmedeki tekil noktaların yerini çok iyi bilmesi gerekir.

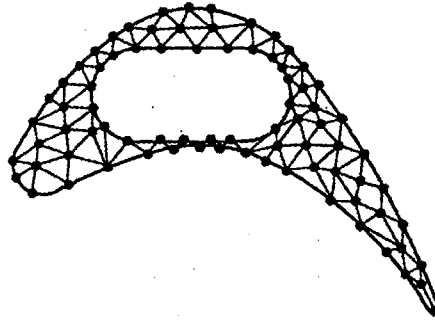
Nümerik teknikler içinde en yaygın ve en etkili olanı, sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi, adi diferansiyel denklemlere parçalama yaklaşımını kullanır. Sonlu elemanlar yönteminde analiz edilecek bölge, çeşitli geometrik şekillere sahip küçük parçalara bölünür. Bu parçalara analiz elemanı denilir. Bu analiz elemanları; üçgen, dikdörtgen, paralel kenar yada yamuk şeklinde olabilir. Analiz elemanlarının seçimi, analiz edilecek bölgenin yapısına bağlıdır. Şekil 4.27 'de, çeşitli analiz elemanları gösterilmiştir. Bu küçük analiz elemanları yapı üzerinde biraraya gelerek ağ biçiminde oluşurlar. Bu oluşan ağın kesişme noktalarına, düğüm adı verilir. Şekil üzerinde oluşan bu düğümler, analiz elemanlarının birbirileri ile ilişkisini sağlar.

İncelenecek bölge üzerindeki düzgün sürekli parçalama fonksiyonları bilinmeyen miktarları (nitelikleri) tahmin etmek için kullanılır. İnterpolasyon fonksiyonları olarak seçilen bu fonksiyonlar, genellikle integral ve diferansiyel işlemleri kolay olan polinom olarak seçilir. Metodun mantığı; analiz edilecek yapının toplam cevabı, yapının parçalanmış elemanlarının cevaplarının toplamına eşittir. İntegral formülasyon kullanılarak bilinmeyen düğüm noktalarında, lineer denklemler sistemi oluşturularak analiz gerçekleştirilir.



Şekil 4.27 Çeşitli Analiz Elemanları [12, s 485]

Şekil 4.28 'de, üçgen analiz elemanları kullanılarak elde edilmiş herhangi bir cisim için, sonlu elemanları yöntemindeki ağ yapısı gösterilmiştir.

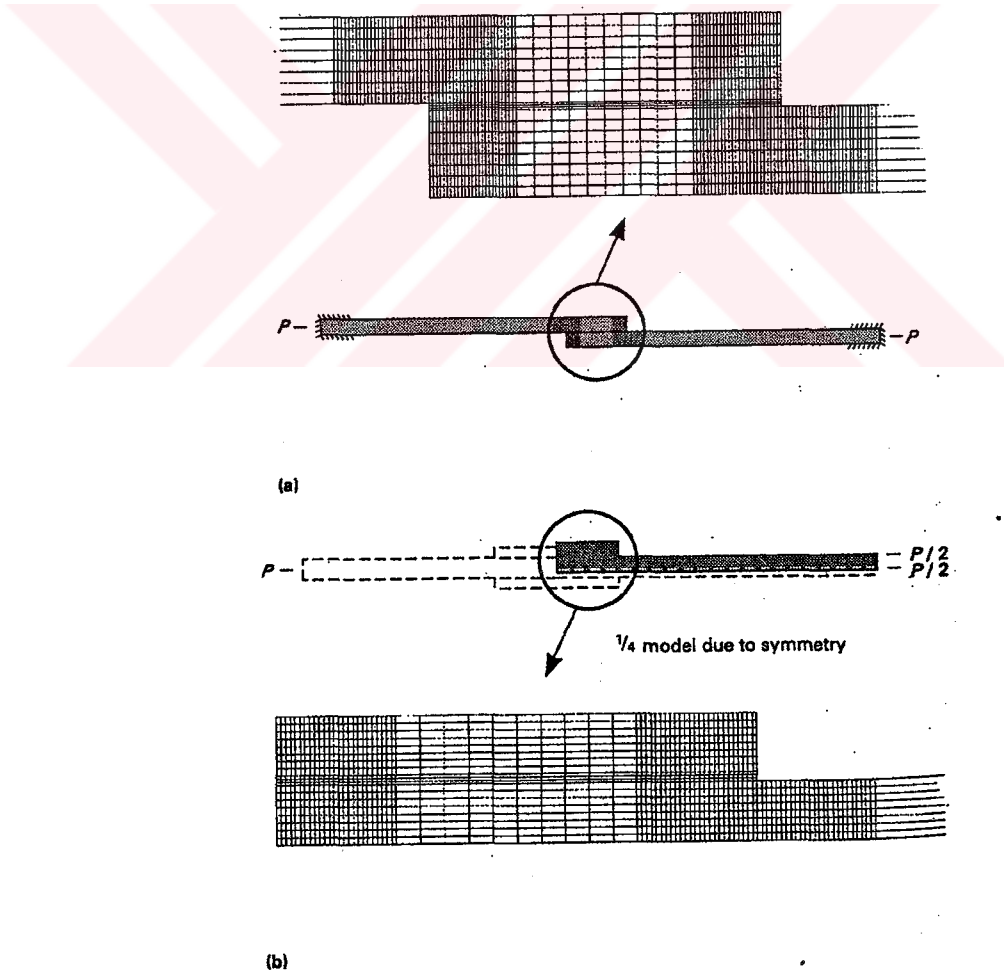


Şekil 4.28 Herhangi Bir Cismin Ağ Yapısı [12, s 479]

Çok karmaşık geometriye sahip birleşmelerin gerilme analizi için, sonlu elemanlar yöntemi çok iyi sonuçlar verir. Sonlu elemanlar yönteminin bir başka özelliği ise farklı malzemelerden oluşan birleşmelerde, yani yapışma ile birleşmede nümerik analiz için en uygun metod olmasıdır.

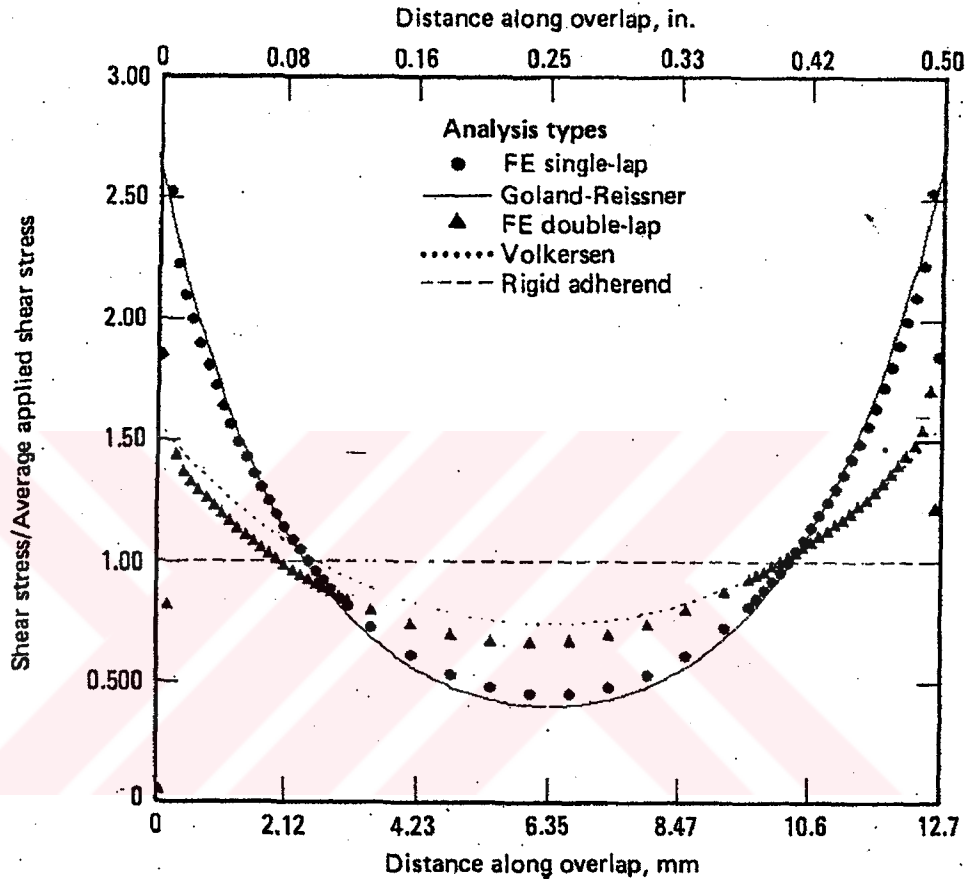
Bu konuda NASTRAN, ADINA ve ANSYS gibi çok sayıda nümerik analiz programları geliştirilmiştir. Bu programlar ile değişik çevre şartlarına maruz, lineer ve lineer olmayan geometride kabuk gibi üç boyutlu, isotropik ve anizotropik malzeme özelliklerine sahip yapıların katı modeli oluşturularak çok değişik yükleme tiplerinde, yapının dinamik ve statik gerilme analizleri yapılabilir. Ayrıca bu programlar otomatik olarak ağ oluşturma özelliğine sahiptir.

Şekil 4.29, iki ve üç bileşenli yapışma birleşmeleri için NASTRAN 'da oluşturulan ağ yapısını göstermektedir.



Şekil 4.29 Yapışma Birleşmeleri İçin NASTRAN Ağ Yapısı [12, s 480]

Şekil 4.30, dikdörtgen analiz elemanları kullanılarak analiz edilmiş iki ve üç bileşenli yapışma birleşmeleri için, NASTRAN analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.30 'daki grafik, yapıştırıcının bulunduğu ağ yapısının orta sırasındaki düğümlerden alınan sonuçlara göre çizilmiştir.



Şekil 4.30 NASTRAN 'da Analiz Edilmiş İki ve Üç Bileşenli Yapışma Birleşmeleri İçin Boyutsuz Kayma Gerilmesi İle Yapışma Uzunluğunun Değişimi [12, s 479]

Doğruluk derecesi yüksek ve gerçeğe en yakın sonuçlar verebilecek bir modelin bilgisayar ortamında oluşturulabilmesi için, analiz edilecek yapıya ait belirli parametrelerin seçimi ve tanımlanması oldukça önemlidir. Bu parametreler:

- Sınır şartlarının seçimi
- Malzeme özellikleri
- Geometrik kavramlar
- Analiz elemanının seçimi

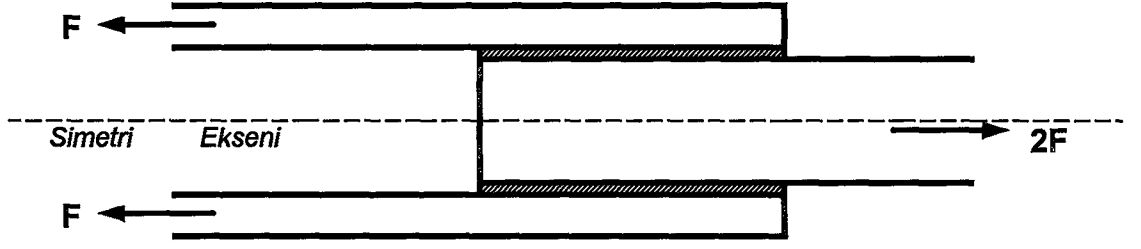
Sınır şartlarının seçimi, yapının temsili modelinin formülasyonunda temel problemlerden biridir. Birleşme analizi için düşünülen malzeme özellikleri, birleşmeyi etkileyen çevre şartlarını içermelidir. Özellikle yapışma ile birleşmede, çevre sıcaklığı yapıştırıcının katılığını ve yapışma birleşmesinin mukavemetini etkiler. Geometrik kavramlar, birleşen ve yapıştırıcı geometrisinin doğru modellenmesi için oldukça önemlidir. Yapışma ile birleşmenin gerilme analizinde; yapışma uzunluğu, birleşen levhaların kalınlığı ve yapıştırıcı kalınlığı birinci dereceden önemli kavramlardır. Analiz elemanlarının şekli ve seçimi, birleşme analizinde bir başka önemli noktadır. Örneğin yüksek uzama gradyentlerinin olduğu bölgeler, daha detaylı ağ yapısına sahip olmalıdır.

Genellikle bilgisayarlar otomatik ağ oluşturma özelliğine sahiptir. Farklı analiz elemanı kullanımı; mühendislik değerlendirmesine, bakış açısına, analiz inceleme sonuçlarına ve geometriye bağlıdır.

4.4.2. ANSYS Programı Yardımı İle Yapışma Birleşme Modelinin Nümerik Olarak Analiz Edilmesi

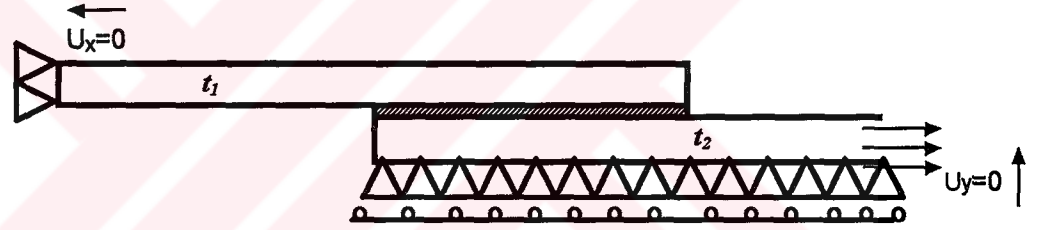
Analitik incelemede kullanılan yapışma birleşme modeli, ANSYS programında nümerik analiz amacıyla aynen kullanıldığında eğilme momentinin etkisi ile karşılaşmıştır. Bu yüzden eğilme momentinin yapışma birleşme modeli üzerindeki etkisini azaltmak için, şekil 4.31’de gösterilen üç bileşenli yapışma birleşme modeli nümerik incelemede kullanılmıştır.

Şekil 4.31’de görülen model; simetri ekseninden ikiye bölündüğünde, birbirinin aynı, analitik incelemede kullanılan modele benzer, iki bileşenli, iki yapışma birleşme modelini temsil etmektedir. Simetri ekseninin üst yarısındaki yapışma birleşme modeli, analitik incelemede kullanılan modelin benzeridir. Simetri ekseninin üst yarısındaki bu model ile; şekil 4.32’de gösterildiği gibi düğüm sayısı kadar kayar ve sabit mesnet konularak analitik incelemede kullanılan modele benzer bir model ANSYS programında oluşturularak gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilir.



Şekil 4.31 Nümerik İncelemede Kullanılan Yapışma Birleşmesi Modeli

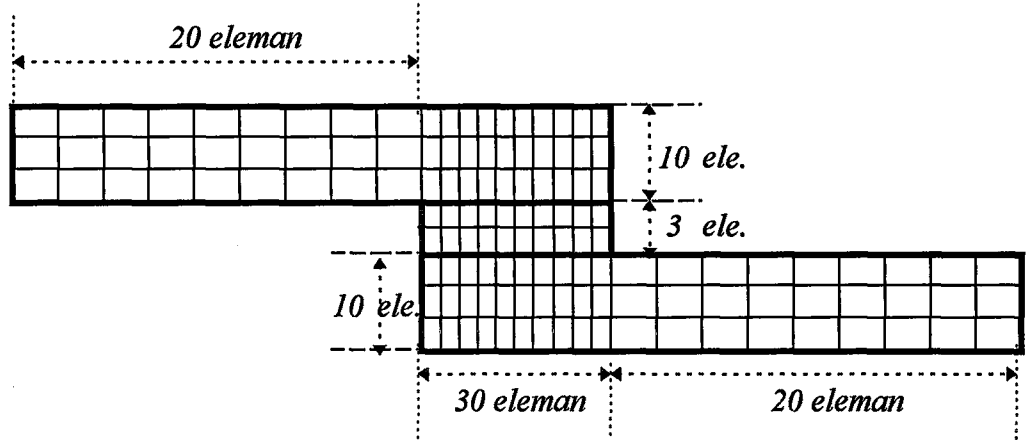
Çekme gerilmesine maruz, birim genişlikte, l yapışma uzunluğunda, t_1 ve t_2 kalınlığında iki levhanın birbirine yapıştırıcı ile birleşmesini temsil eden ve nümerik analizde kullanılacak yapışma birleşme modeli şekil 4.32’de görülebilir.



Şekil 4.32 ANSYS Programında Oluşturulan Yapışma Birleşme Modeli

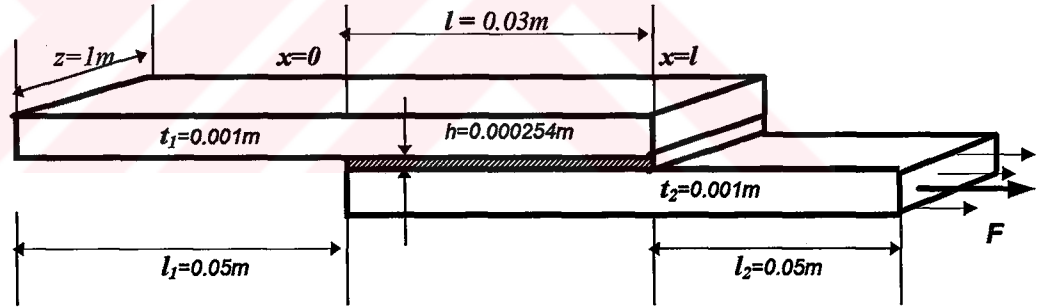
ANSYS programı yardımı ile nümerik inceleme için analiz eleman tipi olarak, düzlem birim uzamalı, 4 düğümlü, dikdörtgen eleman; malzeme tipi olarak, özellikleri lineer değişen malzeme seçilerek yapışma birleşmesinin iki boyutlu katı modeli ANSYS programında oluşturulmuştur. Analitik incelemede olduğu gibi nümerik incelemede de eğilme momentinin yarattığı ayrılma kuvvetlerinin etkisi ihmal edilerek yapışma birleşme modeli bir boyutlu olarak analiz edilmiştir.

ANSYS programında analiz edilecek modelin sembolik ağ yapısı, şekil 4.33’de gösterilmiştir. Alt ve üst levhanın yapışma dışında kalan bölümü, düşeyde 10 yatayda 20 elemana; yapışma içinde kalan bölümü ise, düşeyde 10 ve yatayda 30 elemana parçalanmıştır. Yapıştırıcının olduğu bölge ise; düşeyde 3 yatayda 30 elemana parçalanmıştır.



Şekil 4.33 ANSYS Programında Analiz İçin Oluşturulan Yapışma Birleşme Sembolik Ağ Yapısı

ANSYS programında analiz edilecek model şekil 4.34 'de gösterildiği gibi boyutlandırılmıştır.



Şekil 4.34 ANSYS Programında Gerilme Analizi İçin Modelin Boyutlandırılması

Boyutlandırma Parametreleri;

$t_1 = 0.001 \text{ m}$ (üst levhanın kalınlığı)

$t_2 = 0.001 \text{ m}$ (alt levhanın kalınlığı)

$l = 0.03 \text{ m}$ (yapışma uzunluğu)

$h = 0.000254 \text{ m}$ (yapıştırıcı kalınlığı)

$E_1 = 72 \text{ GPa}$ (üst levhanın elastik modülü)

$E_2 = 72 \text{ GPa}$ (alt levhanın elastik modülü)

$E_3 = 1 \text{ GPa}$ (yapıştırıcının elastik modülü)

$l_1 = 0.05 \text{ m}$ (üst levhanın yapışma dışındaki uzunluğu)

$l_2 = 0.05 \text{ m}$ (alt levhanın yapışma dışındaki uzunluğu)

$F = 1 \text{ KN}$ (uygulanan çekme kuvveti)

$z = 1 \text{ m}$ (genişlik)

$\nu_1 = 0.3$ (üst levhanın poisson oranı)

$\nu_2 = 0.3$ (alt levhanın poisson oranı)

$\nu_3 = 0.4$ (yapıştırıcının poisson oranı)

Şekil 4.34'deki modelin çekme kuvvetinin uygulandığı kesit alan, 4.70 denkleminin yardımı ile,

$$A = z \times t_2 \quad (4.70)$$

$$A = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

olarak bulunur. Buna göre yapışma birleşme modelinin maruz kaldığı gerilme,

$$\sigma_\infty = 1 \text{ MPa}$$

olarak hesaplanır.

ANSYS programında yapışma birleşme modeli şekil 4.34 'de gösterildiği gibi boyutlandırıldıktan sonra, gerilme analizi yapılarak yapışma uzunluğu boyunca çekme, kayma ve birim uzama dağılımları bulunmuştur. Ayrıca yapıştırıcının bulunduğu bölgenin orta sırasında yer alan analiz elemanlarının düğümlerine ait kayma gerilme değerleri okunarak yapışma uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımını gösteren grafik çizilmiştir. Şekil 4.35, yapışma uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımını göstermektedir. Şekil 4.35'de görüldüğü gibi, maximum kayma gerilmesi $X=0$ ve $X=L$ 'dedir. Nümerik analiz için bu noktalar,

tekil noktalardır. Yani teorik olarak sonsuz gerilmelerdir. Bu uç bölgelerin daha detaylı bir ağ yapısı ile incelenmesi gerekir.

Nümerik incelemede kullanılan modelin boyutlandırılması sonucunda elde edilen şekil 4.35 ve analitik inceleme sonucu bulunan şekil 4.13 kayma modülleri farklı olmakla birlikte benzer bir dağılım göstermektedir. Bu iki şekil arasında birebir değerlendirme yapabilmek için; analitik incelemede kullanılan yapıştırıcının kayma modülünün, nümerik incelemede kullanılan yapıştırıcının kayma modülüne eşitlenmesi gerekir. Bilindiği gibi nümerik incelemede yapıştırıcı için, elastik modül kullanıldığından, kayma modülü ve elastik modül arasındaki geçişi sağlayacak aşağıda yazılan 4.71 denkleminde [7] ihtiyaç vardır.

$$E = 2 \times G (1 + \nu) \quad (4.71)$$

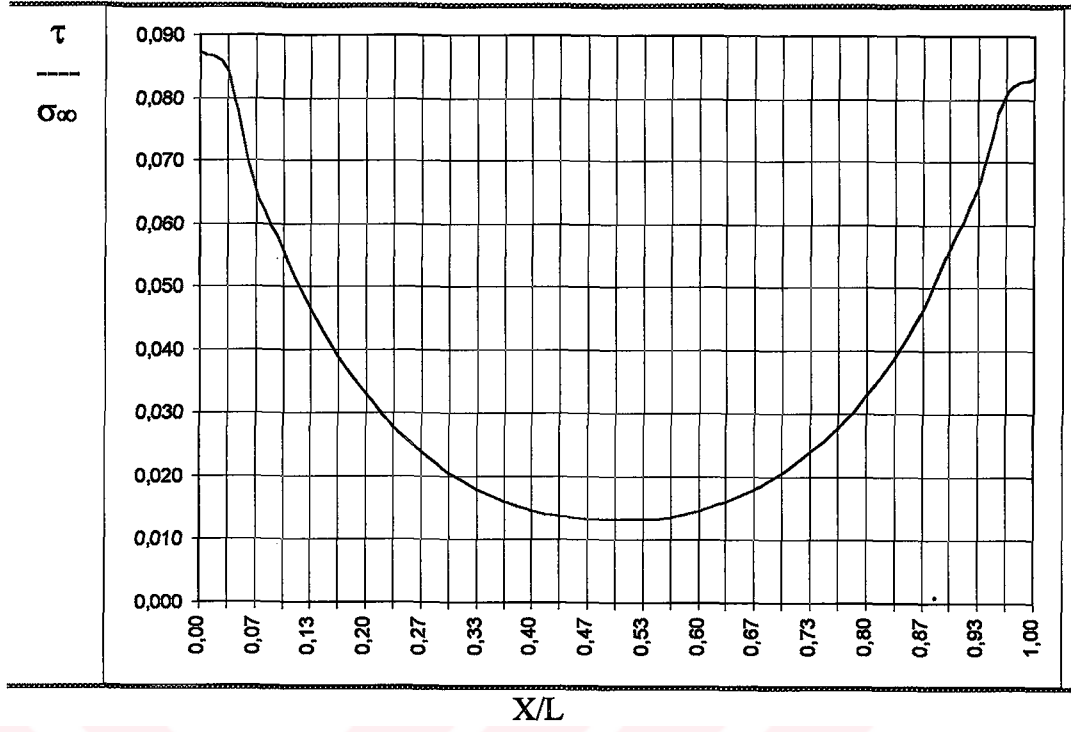
4.71 denkleminde yapıştırıcı için nümerik incelemede kullanılan $E = 1 \text{ GPa}$ ve $\nu = 0.4$ değerleri yerine konursa, yapıştırıcının kayma modülü;

$$G = 0.3571 \text{ GPa}$$

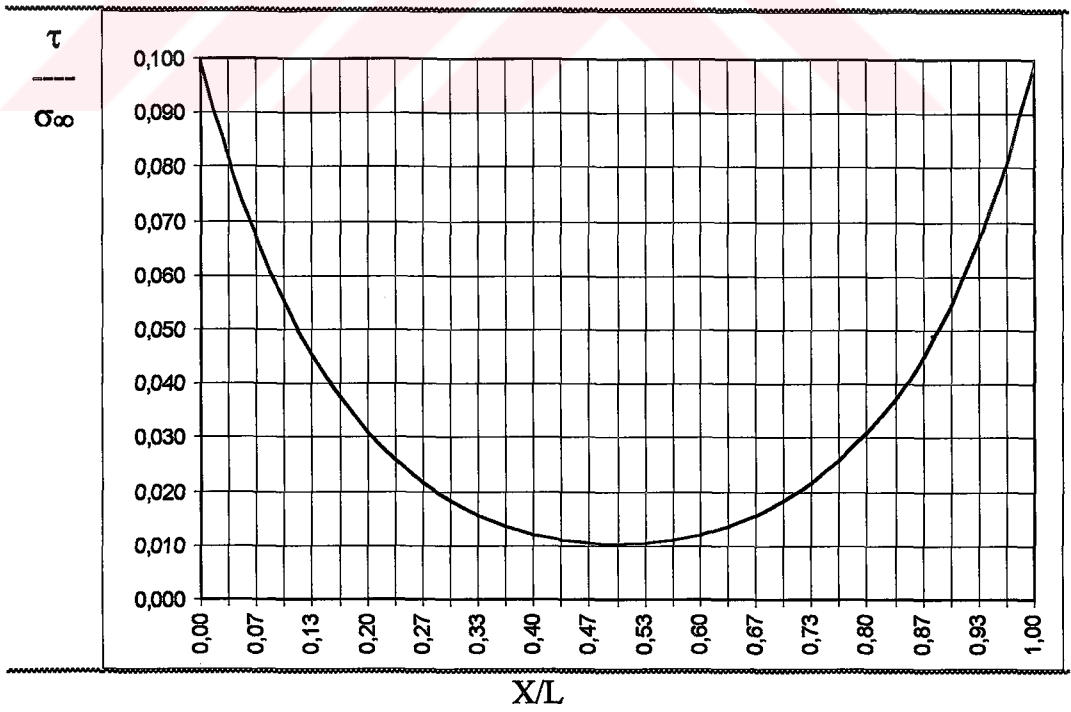
olarak hesaplanır.

Hesaplanan bu değere göre, analitik inceleme sonucu bulunan 4.69 denklemi yardımı ile yapışma uzunluğu boyunca boyutsuz kayma gerilmesi dağılımını gösteren şekil 4.36'da gösterilen eğri elde edilmiştir.

Gerek analitik ve gerekse de nümerik inceleme sonucunda elde edilen kayma gerilme dağılımları, yapıştırıcı için aynı değerdeki kayma modülleri kullanıldığında, benzer ve değer olarak birbirine oldukça yakın iki eğriyi göstermektedir. Yani birbirlerini doğrulamaktadır. Her iki şekilde de $X=0$ 'da kayma gerilmesi maximumdur. Yapışma uzunluğunun artması ile kayma gerilmesi azalarak $X=L/2$ 'de minimum değerine ulaşmaktadır. Yapışma uzunluğunun sonlarına doğru artarak $X=L$ de tekrar maximum değerine ulaşmaktadır.



Şekil 4.35 Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı (Nümerik İnceleme)



Şekil 4.36 Yapışma Uzunluğu Boyunca Boyutsuz Kayma Gerilmesi Dağılımı (Analitik İnceleme)

Şekil 4.37, yapışma uzunluğu boyunca X yönündeki gerilme dağılımını göstermektedir. Üst levha için $X=0$ da, X yönündeki gerilme pozitif ve mutlak değer olarak maximum, X 'in artması ile X yönündeki gerilme azalarak yapışma uzunluğunun ortalarına doğru sabitleşmektedir. Yapışma uzunluğunun sonlarına doğru azalarak $X=L$ de, negatif ve mutlak değer olarak minimum değerdedir. Alt levha için ise $X=0$ da, X yönündeki gerilme negatif ve mutlak değer olarak minimum değerdedir. X 'nin artması ile X yönündeki gerilme artarak yapışma uzunluğunun ortalarına doğru sabitleşmektedir. Yapışma uzunluğunun sonlarına doğru artarak $X=L$ de, pozitif ve mutlak değer olarak maximum değerdedir.

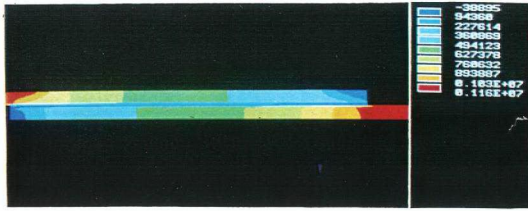
Şekil 4.38, yapışma uzunluğu boyunca X yönündeki asal gerilme dağılımını göstermektedir. Bu dağılım gerilme değerleri farklı olmakla birlikte şekil 4.37'ye benzer bir dağılımdır.

Şekil 4.39, yapışma uzunluğu boyunca Y yönündeki gerilme dağılımını göstermektedir. $X=0$ da, Y yönündeki gerilme negatif ve mutlak değer olarak maximum değerdedir. X 'in artması ile Y yönündeki gerilme azalarak yapışma uzunluğunun ortalarına doğru sabitleşmektedir. Yapışma uzunluğunun sonlarına doğru artarak $X=L$ de pozitif olarak en büyük değerine ulaşmaktadır. Bunun nedeni, yapışma birleşmesi üzerinde oluşan eğilme momentidir.

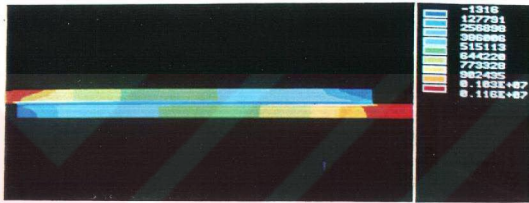
Şekil 4.40, yapışma uzunluğu boyunca Y yönündeki asal gerilme dağılımını göstermektedir. Bu dağılım gerilme değerleri farklı olmakla birlikte şekil 4.37'ye benzer bir dağılımdır.

Şekil 4.41; yapışma uzunluğu boyunca kayma birim uzama dağılımını göstermektedir. $X=0$ ve $X=L$ 'de yapıştırıcının bulunduğu bölgelerde kayma birim uzama değerleri, negatif ve mutlak değer olarak maximumdur. Alt ve üst levhalarda ise kayma birim uzama değerleri pozitif, sabit ve aynı değerdedir. Mutlak değer olarak en büyük kayma birim uzamaları, yapıştırıcının olduğu bölgelerde oluşmaktadır. Bunun nedeni yapıştırıcının elastik, levhaların diğerine göre daha rijit olmasıdır.

Şekil 4.42, yapışma uzunluğu boyunca X yönündeki birim uzama dağılımını göstermektedir. Üst levha için $X=0$ da, X yönündeki birim uzama değerleri, pozitif ve mutlak değer olarak maximum bir değerdedir. X 'in artması ile birim uzama değerleri azalarak $X=L$ de, negatif ve mutlak değer olarak minimumdur. Alt levha



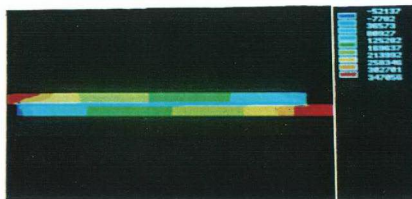
Şekil 4.37 Yapışma Uzunluğu Boyunca X Yönündeki Gerilme Dağılımı



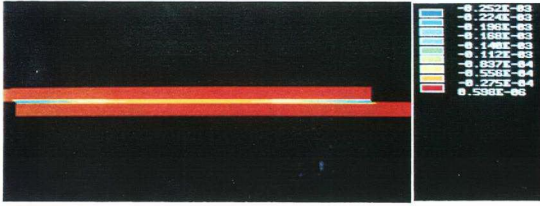
Şekil 4.38 Yapışma Uzunluğu Boyunca X Yönündeki Asal Gerilme Dağılımı



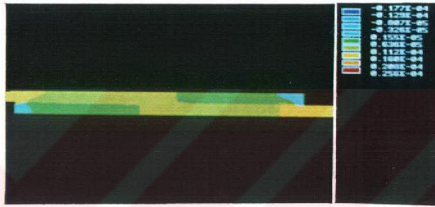
Şekil 4.39 Yapışma Uzunluğu Boyunca Y Yönündeki Gerilme Dağılımı



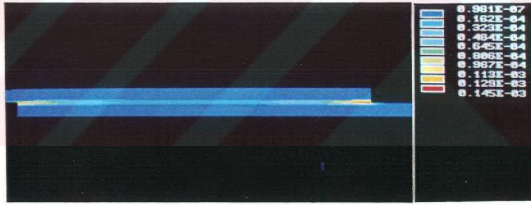
Şekil 4.40 Yapışma Uzunluğu Boyunca Y Yönündeki Asal Gerilme Dağılımı



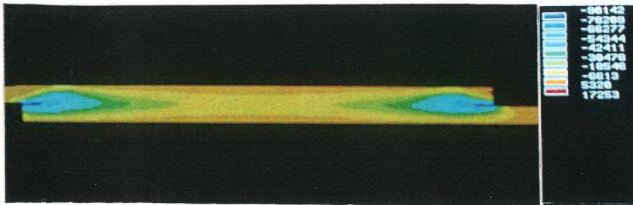
Şekil 4.41 Yapışma Uzunluğu Boyunca Kayma Birim Uzama Dağılımı



Şekil 4.42 Yapışma Uzunluğu Boyunca X Yönündeki Birim Uzama Dağılımı



Şekil 4.43 Yapışma Uzunluğu Boyunca X Yönündeki Birim Asal Uzama Dağılımı



Şekil 4.44 Yapışma Uzunluğu Boyunca Kayma Gerilmesi Dağılımı

için ise $X=0$ da birim uzama değerleri, negatif ve mutlak olarak minimum bir değerdedir. X 'in artması ile birim uzama değerleri artarak $X=L$ de, pozitif ve mutlak değer olarak maximumdur.

Şekil 4.43, yapışma uzunluğu boyunca X yönündeki birim asal uzama dağılımını göstermektedir. $X=0$ ve $X=L$ de; yapıştırıcının bulunduğu bölgelerde birim asal uzamalar, pozitif ve mutlak değer olarak maximumdur. Alt ve üst levhalarda ise birim asal uzama değerleri aynı, pozitif olarak minimum ve sabittir. Bunun nedeni yapıştırıcının elastik, levhaların diğerine göre daha rijit olmasıdır.

Şekil 4.44, yapışma uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımını göstermektedir. $X=0$ da özellikle yapıştırıcının bulunduğu bölgelerde kayma gerilmesi negatif ve mutlak değer olarak maximum, X 'in artması ile kayma gerilmesi azalan oranda düşmekte; yapışma uzunluğunun ortalarına doğru mutlak olarak minimum değerine ulaşmaktadır. Yapışma uzunluğunun sonlarına doğru artan oranda artarak, $X=L$ de tekrar kayma gerilmesi negatif ve mutlak değer olarak maximumdur. Mutlak değer olarak maximum kayma gerilmesinin yapıştırıcının bulunduğu bölgede olmasının nedeni, yapıştırıcının elastik, levhaların diğerine göre daha rijit olmasıdır.

4.5. Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesi İçin Analitik ve Nümerik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde; çekme gerilmesine maruz, birim genişlikte, l yapışma uzunluğunda, t_1 ve t_2 kalınlığında iki levhanın birbirine yapıştırıcı ile birleşmesini temsil eden model yardımı ile yapışma birleşmesi analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik incelemede ANSYS programı kullanılmıştır. İncelemelerde eğilme momentinin oluşturduğu ayrılma kuvvetlerinin etkisi ihmal edilerek yapışma birleşme modeli bir boyutlu olarak analiz edilmiştir. Bu çerçevede;

a) Çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmesini temsil eden model kurularak boyutlandırılmış,

b) Kayma ve çekme gerilmelerinin yapışma uzunluğu boyunca dağılımları elde edilmiş,

c) Bu dağılımlar bilgisayar yardımı ile grafik olarak çizilmiş,

d) Analitik incelemede elde edilen denklemler yardımı ile; yapışma uzunluğunun, birleşen levhaların elastik modülünün, birleşen levhaların kalınlığının ve yapıştırıcı kalınlığının birleşme mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiş,

e) Nümerik incelemede çekme ve kayma gerilme dağılımlarının yanında, X ve Y yönünde asal gerilme ve birim uzama dağılımları, X ve Y yönünde birim uzama dağılımları ve kayma birim uzama dağılımları ANSYS programı yardımıyla bulunmuştur.

Sonuç olarak analitik ve nümerik analiz sonuçları birbirlerini doğrulamaktadır. Yani;

a) Yapışma uzunluğu boyunca maximum kayma gerilmesi yapışma uzunluğunun başında ($X = 0$) ve sonunda ($X = L$) oluşur. Yapışma ile birleşme dizaynı açısından en kritik yerler kayma gerilme konsantrasyonlarının olduğu bu uç noktalaradır.

b) Üst levha için X yönündeki çekme gerilmesi $X=0$ da maximum ve $X=L$ de minimumdur. Alt levha için X yönündeki çekme gerilmesi $X=0$ da minimum ve $X=L$ de maximumdur.

c) Yapışma uzunluğu boyunca maximum kayma birim uzamaları özellikle yapıştırıcının bulunduğu bölgelerde ve her iki uç noktada ($X = 0$ ve $X = L$) oluşmaktadır. Bunun nedeni, yapıştırıcının elastik levhaların diğerine göre daha rijit olmasıdır.

d) Yapışma birleşmelerinde, yapışma uzunluğunu artırma ile maximum kayma gerilme değerleri azaltılamaz.

e) Yapışma birleşmelerinde yapışma uzunluğunun her iki uç bölgesinde, ($X = 0$ ve $X = L$) yapıştırıcı kalınlığının artırılması ile maximum kayma gerilme değerleri düşürülür.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezinde; havacılık ve uzay sanayiinde çok geniş kullanım alanına sahip yapıştırıcılar, yapışma ve yapışma birleşmeleri genel olarak değerlendirilerek, çekme gerilmesine maruz, l yapışma uzunluğunda, birim genişlikte, t_1 ve t_2 kalınlığında iki levhanın birbirine yapıştırıcı ile birleşmesini temsil eden basit bir model yardımı ile yapışma birleşmesi analitik ve nümerik olarak incelenmiştir.

Yapılan araştırmalar ve elde edilen bilgiler sonucunda;

a) Emniyetli, ekonomik ve yüksek performanslı bir birleşmeyi yapıştırıcı ile dizayn edebilmek; genel olarak yapışma birleşmesi için yapılan gerilme analizlerine ve yapıştırıcının taşıyabileceği maximum yükü tespit etmek için yapılan güvenilir testlere bağlıdır.

b) Yapışma birleşmelerinin çevreye direnci, içeriğindeki polimer malzemelere bağlıdır.

c) Yapıştırıcı ile birleşme, farklı iki malzemenin birleşmesine izin verir. Yapıştırıcılar farklı malzemelerden oluştukları için, farklı malzemelerin farklı özelliklerini içerirler.

d) Yapışma ile birleşmenin mukavemeti; birleşen levhaların kalınlığına ve birleşen levhaların elastik modüllerine, yapıştırıcının kayma modülüne, yapışma uzunluğuna, yapışma yüzeylerinin ön işlemine, yapışma işlemine ve yapışma birleşmesinin maruz kalacağı şartlara bağlıdır.

e) Yapışma birleşmeleri çekme, kayma, ve basma yüklerine karşı oldukça mukavemetli olmalarına rağmen, ayrılma ve yarılmaya yüklerine karşı zayıftırlar.

f) Yapışma birleşmelerinin diğer birleşmelere göre en önemli avantajı, basma gerilmesine karşı artırılmış toplam katılıktan dolayı en yüksek yerel burkulma mukavemeti veren birleşme olmasıdır.

g) Yapışma birleşmeleri, yük altında daha uzun ömüre sahiptirler.

h) Yapışma süreklidir. Yapışma birleşmeleri yüklemeye esnasında, uniform gerilme dağılımı oluşturur.

i) Yapışma uzunluğu boyunca yapışma birleşmelerinin basamaklandırılması yada modifikasyonu, çekme gerilmene maruz yapışma birleşmelerinin mukavemetini artırma eğilimindeki ayrılma yüklerini azaltıcı yöndedir.

j) Yapışma ile birleşme dizaynında, yapıştırıcının yapışma uzunluğu boyunca davranışı, bağlantı elemanları ile yapılan birleşmelerde bağlantı elemanlarının birleşme uzunluğu boyunca davranışı ile benzer olmasıdır.

k) Yorulma çatlaklarının ilerlemesi, bağlantı elemanları ile yapılan birleştirmelerde, yapıştırıcı ile birleşmeye göre daha hızlı ilerler.

l) Yapıştırıcı ile yapışmada bağlantı delikleri olmadığı için, korozyona karşı yapıyı daha iyi korur.

m) Yapıştırıcı ile birleşme görüş açısından daha düzgün görünüş sağlar. Yapışmada, bağlantı elemanlarının geometrisinden kaynaklanan başı ve somunu ile kaynaktaki kaynak izleri gibi istenmeyen görüntüler yoktur.

n) Kaynak ile birleşmeye göre yapıştırıcı ile birleşme yüksek bir sıcaklık gerektirmediğinden malzeme mukavemetinde değişiklik olmaz.

o) Yapıştırıcı kullanılarak yapılmış birleşmelerde kayma gerilmesi olarak maximum 10.000 Psi değerine ulaşılırken, bağlantı elemanları yada kaynak kullanılarak yapılan birleşmelerde oldukça yüksek değerlere ulaşılabilir.

p) Yapışma birleşmelerine sertleşmeden sonra soğuk form verilebilir.

r) Yapıştırıcı ile yapışma aynı zamanda sızdırmazlık sağlar.

s) Yapıştırıcı ile birleşme, yüzeyler arasında elektriksel olarak izolasyon sağlar.

t) Yapıştırıcı ile birleşme, iyi bir sönümleme özelliğine sahiptir. Bu sönümleme kapasitesi ses ve titreşim azaltılması açısından oldukça önemlidir.

u) Başka bir yol ile birleştirilemeyen yapılar için, yapıştırıcı kullanma dışında hemen hemen başka bir seçenek yoktur. Buna en iyi örnek kompozit yapılarıdır.

Yapılan analitik ve nümerik analiz sonucunda ise;

a) Yapışma uzunluğu boyunca maximum kayma gerilmesi yapışma uzunluğunun başında ($X=0$) ve sonunda ($X=L$) oluşur. Yapışma ile birleşme

dizaynı açısından en kritik yerler kayma gerilme konsantrasyonlarının olduğu bu uç noktalardır. Gerilme konsantrasyonları bu bölgelerde oluşur. Oluşan bu gerilme konsantrasyonlarının minimize edilmesi gerekir. Yapışma ile birleşme dizaynında bu önemli bir kriterdir.

b) Üst levha için X yönündeki çekme gerilmesi $X=0$ da maximum ve $X=L$ de minimumdur. Alt levha için X yönündeki çekme gerilmesi $X=0$ da minimum ve $X=L$ de maximumdur.

c) Yapışma uzunluğu boyunca maximum kayma birim uzamaları özellikle yapıştırıcının bulunduğu bölgelerde ve her iki uç noktada ($X=0$ ve $X=L$) oluşmaktadır. Bunun nedeni, yapıştırıcının elastik levhaların diğerine göre daha rijit olmasıdır.

d) Yapışma ile birleşme dizaynında yapışma uzunluğunu artırma, yapışma hattının her iki ucunda ($X=0$ ve $X=L$) oluşan kayma gerilme konsantrasyonlarını; yani maximum kayma gerilmeleri; belirli bir değerin ötesinde azaltmaz. Bu yapışma ile birleşme dizaynında önemli bir kriterdir.

e) Yapışma birleşmelerinde yapışma uzunluğunun her iki uç bölgesinde, ($X=0$ ve $X=L$) yapıştırıcı kalınlığının artırılması ile maximum kayma gerilme değerleri düşürülür.

KAYNAKLAR

- [1] CLARK, E.C., Adhesives and Sealants: Aerospace Application For Adhesives, ASM International Committee, Engineered Materials Handbook, Vol. 3, pp 558-566, 1990.
- [2] MORRISEY, M.A. and JOHNSON, W.R., Douglas Aircraft Company Design Handbook: Adhesives and Cements, California, 1985.
- [3] AIRBUS INDUSTRIE, Process and Material Specification: Bonding of Aluminum Alloys, France, 1995.
- [4] CIBA-GEIGY, Ciba Composites: Redux Bonding Technology, Duxford-Chambridge, Pub. No. RGU 201A, 1993.
- [5] LJUNGSTROM, O. and RAYNER, C.A.A., Bonded Aircraft Structures: Design Aspects of Bonded Structures 1 and High Temperature Adhesives, Duxford-Chambridge, 1957.
- [6] AKTAŞ, R. ve OTOBATMAZ, I., Kompozit Malzemeler ve Havacılık Sanayiindeki Uygulamaları, Seminer Notları, Ankara, 1995.
- [7] CHAWLA, K.K., Composite Materials, Science and Engineering, Socorro-New Mexico, 1987.
- [8] CIBA-GEIGY, Ciba Composites: User' s Guide to Adhesives, Duxford-Chambridge, Pub. No. A17f, 1989.
- [9] DE BRUYNE, N.A., Redux in Aircraft, Ciba Company Inc, New York, N.Y, 1953.
- [10] KRIEGER, R.B., Adhesives and Sealants: Adhesives Bonding Design and Analysis, ASM International Committee, Engineered Materials Handbook, Vol. 3, pp 459-476, 1990.
- [11] KOTİL, T., Ceramic Composites: Experimental and Analytical Study of SiC / Si₃N₄ Composites, The University of Michigan, Michigan, 1991.
- [12] PENADO, F.E. and DROPEK, K., Adhesives and Sealants: Numerical Design and Analysis, ASM International Committee, Engineered Materials Handbook, Vol. 3, pp 477-500, 1990.

EK A: BİRİM DÖNÜŞÜMÜ

İngiliz Birim Sistemi

SI Birim Sistemi

1 inch

0.0254 m

1 ft

0.3048 m

1 lb

0.4536 Kg

1 litre

 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

1 Psi

6895 N/ m² (Pa)

1 Psi

 $6895 \times 10^{-6} \text{ N/ m}^2 \text{ (MPa)}$

1 Psi

 $6895 \times 10^{-9} \text{ N/ m}^2 \text{ (GPa)}$

ÖZGEÇMİŞ

Levent Kodakoğlu, 1970 yılında Nevşehir’ de doğdu. 1987 yılında Nevşehir Lisesi’ nden pekiyi derece ile mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümü’ nde lisans öğrenimine başladı.

1991 yılında “Kapalı Deney Odalı, Sesaltı Hava Tünelinin İmali ve Dairesel Kesitli Cismin İz Bölgesinin İncelenmesi” konulu bitirme ödevi ile lisans öğrenimini iyi derece ile tamamladı ve uçak mühendisi oldu.

Mezuniyetinden hemen sonra İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı Uçak Mühendisliği Programı’ nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

Halen yüksek lisans öğrenimine devam etmekte olup 1993 yılından bu yana Türk Hava Yolları A. O. İstanbul Bakım Merkezi’ nde Yapısal Sistemler Mühendisi olarak görev yapmaktadır.